Для цитирования: Лещенко Ю.Г. Перспективы развития и безопасности квантовых технологий // Grand Altai Research & Education — Выпуск 1 (24)'2025 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2025.01) — EDN: https://elibrary.ru/ECLPWZ

УДК: 004.056, 004.424
JEL: O33, D81, K20
SPIN-код: 3428-5851
AuthorID: 988171
ORCID: 0000-0003-2642-8139

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Юлия Георгиевна Лещенко[1,2]
1 Российская Академия Естественных Наук, Москва, Россия
2 Первое экономическое издательство, международный научно-практический журнал «Экономическая безопасность», Москва, Россия
Email: qwerty-ula@mail.ru

Аннотация. В работе представлен аналитический обзор перспектив развития и безопасности квантовых технологий. Обоснована актуальность исследования в связи с потенциальным трансформационным воздействием квантовых технологий на различные сектора экономики. Выявлено: развитие квантовых технологий, обеспечивая значительный прогресс в вычислительной мощности и криптографии, одновременно порождает новые угрозы информационной безопасности. Проведена оценка траектории развития и потенциала квантовых технологий в контексте существующих тенденций. В заключении сформулированы рекомендации по стратегиям развития, внедрения и управления рисками, связанными с квантовыми технологиями.

Ключевые слова: развитие; безопасность; квантовые технологии; квантовые вычисления; квантовая криптография; квантовые алгоритмы; декогеренция

For citation: Leshchenko Yu.G. Prospects for development and security of quantum technologies // Grand Altai Research & Education — Issue 1 (24)'2025 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2025.01) — EDN: https://elibrary.ru/ECLPWZ

PROSPECTS FOR DEVELOPMENT AND SECURITY OF QUANTUM TECHNOLOGIES

Yu.G. Leshchenko[1,2]
1 Russian Academy of Natural Sciences, Moscow, Russia
2 First Economic Publishing House, International Scientific and Practical Journal «Economic Security», Moscow, Russia
Email: qwerty-ula@mail.ru

Abstract. The paper presents an analytical review of the prospects for the development and security of quantum technologies. The relevance of the study substantiated in connection with the potential transformational impact of quantum technologies on various sectors of the economy. It revealed that the development of quantum technologies, while providing significant progress in computing power and cryptography, simultaneously gives rise to new threats to information security. An assessment of the development trajectory and potential of quantum technologies in the context of existing trends carried out. In conclusion, recommendations formulated on strategies for the development, implementation and management of risks associated with quantum technologies.

Keywords: development; security; quantum technologies; quantum computing; quantum cryptography; quantum algorithms; decoherence

Введение

Актуальность исследования перспектив развития и безопасности квантовых технологий обусловлена их потенциальным влиянием на многие сферы экономической деятельности, в том числе на информационные технологии, коммуникации, финансы, безопасность и развитие. Квантовые технологии, основанные на принципах квантовой механики, способны преобразовывать существующие методы обработки информации, обеспечивая беспрецедентный уровень вычислительной мощности [1]. С одной стороны, квантовые компьютеры имеют б*о*льшую скорость в решении сложнейших задач, чем обычные компьютеры, предоставляя возможности для научных исследований, оптимизации процессов и разработки новых материалов. С другой, — с развитием квантовых технологий становится важным обеспечить защиту данных, хранящихся на обычных компьютерах.

В тоже время квантовые системы подвергаются различным видам атак, угрожающим как конфиденциальности, так и целостности информации. Квантовые состояния чрезвычайно чувствительны к внешним воздействиям, это делает их уязвимыми к ошибкам и потере информации, требуя разработки новых методов коррекции ошибок и повышения стабильности квантовых устройств. Процессы разработки являются важным этапом на пути к практическому применению квантовых вычислений.

Учитывая глобальные тенденции цифровизации и увеличения объемов обрабатываемой информации, вопросы безопасности становятся особенно значимыми. Например, квантовая криптография предлагает инновационные методы защиты данных, значительно повышая уровень безопасности коммуникаций.

Цель исследования: определить ключевые перспективы развития квантовых технологий и выявить основы безопасности, связанные с их применением.

Гипотеза исследования предполагает, что дальнейшее развитие квантовых технологий не только приведет к существенному прорыву в вычислительной мощности и безопасности передачи данных, но и создаст новые вызовы в области информационной безопасности.

Результаты исследования могут быть применены для модернизации существующих отраслей с использованием квантовых технологий, разработки более надежных систем защиты данных и создания новых инструментов для научных исследований.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели исследования автором применялись междисциплинарный и системный подходы, позволившие обобщить и систематизировать имеющиеся теоретические и практические аспекты развития

и безопасности квантовых технологий. Для анализа текущего состояния и перспектив развития квантовых технологий использованы рецензируемые статьи из научных и специализированных журналов. Аналитический обзор существующих публикаций позволил выявить ключевые тенденции в развитии квантовых технологий и оценить их потенциальное влияние на различные сферы.

Обсуждение

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к квантовым технологиям как со стороны научного сообщества, так и со стороны промышленности/бизнес-структур. Это обусловлено их потенциальной способностью решать задачи, недоступные для классических технологий.

Впервые идея защиты информации с помощью квантовых объектов была предложена С. Визнером (Stephen Wiesner) в 1970г. [2]. Спустя десятилетие Ч. Беннет (Bennett Charles H.) и Ж. Брассар (Brassard Gilles) на основе работы С. Визнера предложили передавать секретный ключ с использованием квантовых объектов. В 1984г. учёные выдвинули идею создания полностью защищенного канала связи, основанного на использовании квантовых свойств. Впоследствии они разработали протокол (BB84), в котором легальные пользователи передают друг другу сообщения в виде поляризованных фотонов по квантовому каналу [3].

Д. Дойч (D. Deutsch) внес значительный вклад в развитие квантовых вычислений, в частности предложив идею универсального квантового компьютера. Ещё в 1985г. он опубликовал статью «Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer», теоретически обосновав возможность создания машины, способной выполнять любые вычисления с использованием принципов квантовой механики [4].

Исследования, проведенные П.В. Шор (P.W. Shor) в 1990-х гг., продемонстрировали, что квантовые алгоритмы могут значительно ускорить решение определенных задач, таких как факторизация больших чисел и поиск в неструктурированных базах данных [5; 6]. В последние годы компании Google и IBM активно разрабатывают квантовые процессоры. Это создаёт возможности для практического применения квантовых вычислений в различных отраслях (финансы, медицина, искусственный интеллект и др.).

Квантовая криптография в свою очередь обеспечивает защиту информации, основанную на принципах квантовой механики. «Квантовая распределенная ключевая система (QKD[1]) представляет собой будущее безопасной связи, предлагая уровень защиты, недостижимый для устаревающих классических методов шифрования» [7].

Идея квантового моделирования была предложена лауреатом Нобелевской премии Р. Фейнманом (R. Feynman) в 1982г. Он предположил, что квантовые

[1] квантовое распределение ключей (QKD)

модели можно сделать наиболее приближенными к реальности, если использовать управляемую квантовую систему [8].

М.Д. Лукин ((Гарвардский университет, сотрудничает с российскими научными группами) сыграл ключевую роль в прогрессе квантовых технологий, особенно в области использования нейтральных атомов и других платформ. В начале 2000-х гг. совместно с коллегами предложил новаторскую концепцию кодирования информации с помощью квантовых состояний нейтральных атомов [9]. Впоследствии М.Д. Лукин разработал архитектуру квантовых вычислений, известную как массив нейтральных атомов.

А.В. Устинов (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС») активно занимается разработкой и исследованием сверхпроводящих квантовых процессоров [10]. В область научных интересов учёного входит в том числе: квантовая когерентность, квантовые биты (кубиты), реализация квантового компьютера.

В 2015г. совместно с МФТИ (Московский физико-технический институт) учёные из МИСиС под руководством А.В. Устинова изготовили первые сверхпроводниковые кубиты [11]. В 2023г. в результате коллективной работы МИСиС, РКЦ (Российский квантовый центр) и МФТИ была изготовлена и продемонстрирована сверхпроводниковая интегральная квантовая микросхема из 8 кубитов-трансмонов с рекордной точностью двухкубитных операций — свыше 97% [11].

Лаборатория под руководством В.В. Макарова (МИСиС, Центр компетенций НТИ «Квантовые коммуникации») занимается передовыми исследованиями в области безопасности квантовых коммуникаций [12]. Под руководством В.В. Макарова специалисты не только выявляют существующие уязвимости, но и разрабатывают новые методы противодействия кибератакам, а также способы сертификации квантовых систем [13].

Важным вкладом Н.А. Гиппиус (Центр фотоники и квантовых материалов «Сколковский институт науки и технологий») в развитие квантовых технологий является [14]:

— разработка метода нахождения собственных мод фотонно-кристаллических слоёв (на их основе получены дисперсионные кривые слоев различной геометрии и состава, в том числе содержащих оптически активные электронные резонансы);

— создание метода расчёта резонансной фотолюминесценции фотонных структур, содержащих тонкий слой материала с сильной резонансной оптической нелинейностью;

— построение теории для описания линейных оптических характеристик фотонно-кристаллических слоев, содержащих наноструктурированные полупроводники и металлы.

Таким образом, аналитический обзор академической литературы демонстрирует трансформационный потенциал квантовых технологий для различных отраслей промышленности и экономической деятельности.

Преодолевая существующие препятствия, эта область стремительно развивается (в перспективе прогнозируется появление множества реальных приложений). Дальнейшие исследования и разработки, а также междисциплинарное сотрудничество, будут способствовать интенсивной реализации этого потенциала.

Результаты исследования

Хотя многие квантовые технологии еще находятся на стадии исследований уже сейчас можно увидеть контуры будущего, определяемые ключевыми тенденциями и перспективами. Чтобы оценить траекторию этого развития рассмотрим основные из них.

Квантовые вычисления (огромный потенциал и вызовы)

Для преодоления вызовов необходимо создание стабильных и масштабируемых квантовых компьютеров. Перспективы развития квантовых вычислений сконцентрированы в следующих областях [15-17]:

— медицина и фармацевтика (разработка новых лекарств и материалов, моделирование сложных молекулярных взаимодействий, персонализированная медицина на основе анализа геномных данных);

— материаловедение (открытие новых материалов с улучшенными характеристиками, например, сверхпроводников, более эффективных аккумуляторов и легких, но прочных композитов;

— финансы (оптимизация инвестиционных портфелей, разработка более точных моделей рисков, обнаружение мошеннических операций);

— искусственный интеллект (ускорение обучения нейронных сетей, разработка сложных и эффективных алгоритмов машинного обучения);

— криптография (разработка надежных методов шифрования, устойчивых к взлому с помощью классических компьютеров).

Тенденциями в развитии квантовых вычислений являются:

— формирование различных платформ: исследуются физические платформы для создания кубитов (сверхпроводники, ионы в ловушках, фотоны и топологические кубиты); каждая платформа имеет свои преимущества и недостатки;

— разработка программного обеспечения: создаются новые языки программирования и инструменты для разработки квантовых алгоритмов;

— облачные квантовые вычисления: квантовые компьютеры становятся доступными через облачные платформы, это позволяет исследователям и разработчикам экспериментировать с этой технологией.

Квантовая связь (безопасная передача информации)

Развитие квантовых сетей и квантового интернета является перспективным направлением, требующим решения проблем масштабируемости и интеграции с существующей инфраструктурой.

Перспективы квантовой связи обусловлены [18; 19]:

— абсолютной безопасностью — преимуществом квантовой связи является ее принципиальная защищенность от прослушивания; любая попытка измерить или скопировать квантовый сигнал неизбежно изменяет его, это позволяет сторонам, участвующим в коммуникации, выявить факт перехвата и остановить передачу данных;

— защитой от будущих угроз — с развитием квантовых компьютеров существующие криптографические алгоритмы становятся уязвимыми; квантовая связь, напротив, устойчива к атакам квантовых компьютеров, это делает ее перспективным решением для защиты конфиденциальной информации в долгосрочной перспективе;

— глобальной сетью безопасной связи — в будущем квантовая связь может стать основой для создания глобальной сети, обеспечивающей безопасную передачу данных между правительствами, финансовыми институтами, военными и другими организациями, требующими максимальной защиты информации;

— новыми возможностями для науки и технологий — развитие квантовой связи стимулирует исследования в других областях квантовой физики и технологий, таких как квантовые вычисления, квантовые сенсоры и квантовая метрология.

Тенденциями в развитии квантовой связи выступают:

— увеличение дальности передачи: в настоящее время квантовая связь ограничена расстояниями в несколько сотен километров из-за потерь сигнала в оптическом волокне; для преодоления этого ограничения разрабатываются квантовые ретрансляторы, позволяющие усиливать и восстанавливать квантовые сигналы без нарушения их состояния;

— миниатюризация и интеграция: разрабатываются компактные и интегрированные квантовые устройства, которые можно будет легко внедрять в существующие телекоммуникационные сети; это позволит сделать квантовую связь доступной и экономически эффективной;

— развитие квантовых протоколов: активно разрабатываются новые квантовые протоколы для передачи ключей и информации; эти протоколы должны быть устойчивы к различным типам атак и адаптированы к различным условиям передачи;

— коммерциализация квантовой связи: все больше компаний/организаций проявляют интерес к коммерциализации квантовой связи; ведется разработка коммерческих продуктов, предназначенных для защиты конфиденциальной информации (квантовые генераторы случайных чисел и квантовые системы распределения ключей);

— спутниковая квантовая связь позволяет преодолеть ограничения по дальности передачи, обеспечивая глобальную связь; уже были проведены успешные эксперименты по передаче квантовых ключей между спутником и наземными станциями [20].

Квантовая криптография (квантовые технологии обеспечивают новый уровень безопасности передачи данных, это особенно актуально в свете растущих угроз кибербезопасности)

Перспективы развития квантовой криптографии способны радикально изменить подходы к шифрованию и обеспечить беспрецедентный уровень защиты информации [21]. Изначально квантовая криптография применялась для защиты правительственных и военных коммуникаций. Однако с развитием технологий и снижением стоимости она находит все больше применений в других областях, таких как: финансовый сектор (защита банковских транзакций, финансово-банковских тайн и конфиденциальной информации о клиентах); здравоохранение (обеспечение конфиденциальности медицинских данных пациентов); телекоммуникации (защита каналов связи и предотвращение прослушивания); интернет вещей (IoT) (защита данных, генерируемых и передаваемых устройствами IoT).

Основные тенденции в развитии квантовой криптографии:

— разработка новых протоколов: скорость и безопасность квантового распределения ключей (QKD) постоянно улучшаются благодаря разработке новых протоколов;

— стандартизация: международная стандартизация квантовой криптографии обеспечит совместимость устройств и систем, упрощая внедрение технологий в различных отраслях;

— гибридные решения: сочетание квантовой криптографии и классического шифрования в гибридных решениях позволяет создать более устойчивые и адаптивные системы защиты информации, чем использование каждой технологии по отдельности.

Квантовая сенсорика (сверхчувствительные измерения)

Квантовые сенсоры, превосходящие все существующие аналоги по чувствительности и точности, становятся генератором инноваций в медицине, геологии, навигации и многих других сферах. В этой связи будущее квантовой сенсорики выглядит перспективным:

— навигация и оборона: квантовые акселерометры и гироскопы, не требующие GPS, обеспечивают сверхточную навигацию в условиях, где спутниковая связь недоступна, например, под водой или в космосе; это создаёт возможности для автономных транспортных средств, подводных лодок и космических аппаратов; в оборонной сфере квантовые сенсоры могут использоваться для обнаружения скрытых объектов, создания более надежных систем связи;

— фундаментальная наука: квантовые сенсоры позволяют проводить эксперименты, которые ранее были невозможны; они могут использоваться для проверки теории относительности, поиска темной материи и изучения квантовой гравитации.

Тенденции развития квантовой сенсорики:

— миниатюризация и интеграция (разработка компактных и портативных квантовых сенсоров, их интеграция в существующие устройства);

— разработка новых материалов и технологий (исследования в области новых материалов (например, алмазы с азот-вакансионными центрами (NV-центры) и технологии (микро- и нанофабрикация), играют важную роль в улучшении характеристик квантовых сенсоров);

— развитие алгоритмов обработки данных: квантовые сенсоры генерируют огромные объемы данных, требующие сложных алгоритмов обработки для извлечения достоверной информации;

— коммерциализация и масштабирование: переход от лабораторных прототипов к коммерчески доступным продуктам является важным этапом в развитии квантовой сенсорики.

Квантовые материалы (новые свойства и возможности)

Квантовые материалы — это класс веществ, в которых квантово-механические эффекты демонстрируют необычные явления (сверхпроводимость, топологические фазы, гигантское магнетосопротивление, квантовые спиновые жидкости) [22]. Развитие квантовых материалов находится на пересечении фундаментальной науки и прикладных исследований, и их перспективы охватывают широкий спектр областей:

— квантовые вычисления: квантовые материалы способны стать основой для создания кубитов — базовых элементов квантовых компьютеров; топологические кубиты, основанные на топологических изоляторах могут быть более устойчивыми к декогеренции, что является ключевой проблемой в квантовых вычислениях;

— спинтроника: квантовые материалы, обладающие уникальными магнитными свойствами, могут быть использованы для создания спинтронных устройств — электроники, использующей спин электрона, а не только его заряд; это позволит создавать энергоэффективные и компактные устройства хранения и обработки информации;

— сенсоры и детекторы: высокая чувствительность квантовых материалов к внешним воздействиям, таким как свет, магнитное поле и температура, делает их идеальными для создания сверхчувствительных сенсоров и детекторов;

— энергоэффективные устройства: квантовые материалы могут быть использованы для создания термоэлектрических генераторов, преобразующих тепло в электричество, и фотоэлектрических элементов с высокой эффективностью; это позволит эффективно использовать энергию и снизить зависимость от ископаемого топлива.

Современное состояние исследований квантовых материалов характеризуется несколькими важными тенденциями:

— поиск новых материалов: ученые находятся в активном поиске новых материалов, обладающих уникальными квантовыми свойствами. Это включает в себя как синтез новых соединений, так и модификацию существующих

материалов с помощью различных методов, таких как легирование и наноструктурирование;

— интеграция с нанотехнологиями: нанотехнологии предоставляют уникальные возможности для манипулирования квантовыми материалами на атомном уровне; это позволяет создавать новые структуры и устройства с заданными свойствами;

— развитие методов синтеза: синтез квантовых материалов с высокой чистотой и контролируемой структурой является ключевым фактором для их успешного применения; разрабатываются новые методы синтеза, такие как молекулярно-лучевая эпитаксия, химическое осаждение из паровой фазы и гидротермальный синтез.

Рассмотрев перспективы развития и тенденции квантовых технологий, очевидным является необходимость междисциплинарного подхода и инвестиций. Развитие квантовых технологий требует сотрудничества между физиками, инженерами, математиками и специалистами в области компьютерных наук. Кроме того, необходимы значительные инвестиции в исследования и разработки, а также в подготовку квалифицированных кадров.

Важным аспектом является и развитие инфраструктуры для поддержки квантовых технологий. Создание соответствующей инфраструктуры станет главным фактором для успешного внедрения квантовых решений.

Выводы и рекомендации

Проведённое исследование перспектив и безопасности квантовых технологий позволило получить ряд фундаментальных выводов, определяющих понимание будущего, в котором эти технологии будут играть все более важную роль:

1. Квантовые вычисления обладают колоссальным потенциалом, способным кардинально изменить многие сферы (например, фармацевтика, материаловедение, логистика, финансы). Несмотря на это, реализация потенциала требует преодоления серьезных препятствий, в частности повышение стабильности и количества кубитов, создание эффективных квантовых алгоритмов.

2. Квантовое распределение ключей (QKD), основанное на принципах квантовой криптографии, теоретически обеспечивает абсолютно безопасную передачу информации. Любая попытка перехвата данных в QKD неизбежно оставляет след, делая систему невосприимчивой к взлому. Тем не менее практическая реализация QKD сталкивается с проблемами, такими как ограниченная дальность связи и высокая стоимость необходимого оборудования.

3. Развитие квантовых технологий несет в себе риски относительно существующей криптографии. Квантовые компьютеры — достаточно мощные, чтобы взломать современные криптографические алгоритмы. Это требует

перехода к постквантовой криптографии, устойчивой к атакам квантовых компьютеров.

Учитывая сделанные выводы, перейдём к рекомендациям, которые позволят максимально использовать преимущества квантовых технологий, минимизируя при этом связанные с ними риски. Данные рекомендации направлены на три ключевые области: развитие, внедрение и защиту.

Рекомендации в области развития квантовых технологий:

— увеличение инвестиций в фундаментальные исследования: необходимо поддерживать научные группы, занимающиеся поиском новых материалов и архитектур для кубитов, а также разработкой эффективных методов контроля и коррекции ошибок; фундаментальные прорывы в этих областях критически важны для преодоления текущих ограничений квантовых вычислений;

— стимулирование разработки квантовых алгоритмов: следует поощрять сотрудничество между учеными-теоретиками и специалистами из различных отраслей для создания квантовых алгоритмов, способных решать реальные задачи;

— поддержка развития квантовой инфраструктуры: необходимо инвестировать в создание и развитие квантовых центров обработки данных, а также в разработку стандартов и протоколов для квантовых сетей; это позволит обеспечить доступ к квантовым ресурсам для широкого круга пользователей и ускорить внедрение квантовых технологий.

Рекомендации в области внедрения квантовых технологий:

— разработка дорожных карт по внедрению QKD в критически важные инфраструктуры: необходимо определить области, где QKD может обеспечить максимальную защиту информации, и разработать планы по постепенному внедрению этой технологии;

— создание пилотных проектов по тестированию квантовых вычислений в различных отраслях: следует поддерживать проекты, в которых квантовые компьютеры используются для решения конкретных задач;

— развитие образовательных программ по подготовке специалистов в области квантовых технологий: необходимо создавать учебные программы, позволяющие подготовить квалифицированных специалистов, способных разрабатывать, внедрять и обслуживать квантовые системы.

Рекомендации в области защиты от рисков, связанных с квантовыми технологиями:

— активное развитие постквантовой криптографии: следует поддерживать исследования и разработки в области постквантовой криптографии, а также разработку стандартов и протоколов для использования этих алгоритмов;

— разработка стратегий мониторинга и реагирования на квантовые угрозы: необходимо разработать системы мониторинга, позволяющие обнаруживать попытки использования квантовых компьютеров для взлома криптографических систем;

— повышение осведомленности о рисках, связанных с квантовыми технологиями: общественность и бизнес-предприятия должны быть проинформированы о потенциальных рисках, связанных с квантовыми технологиями, и о мерах по их оптимизации.

Список литературы

[1] Лещенко, Ю. Г. Квантовая верификация финансовой системы в целях безопасности // Экономическая безопасность. 2024. Т.7, №3. С. 535-558. DOI 10.18334/ecsec.7.3.120696. EDN ILDIDT. Текст: непосредственный.

[2] Wiesner, S.J. «Conjugate Coding» SIGACT News 15:1, pp. 78-88, 1983. Текст: непосредственный.

[3] Bennett, Charles H.; Brassard, Gilles; Crépeau, Claude; Jozsa, Richard; Peres, Asher; Wootters, William K. (29 March 1993). «Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein–Podolsky–Rosen Channels». Phys. Rev. Lett. 70 (13): 1895-1899. Bibcode: 1993PhRvL.70.1895B. DOI:10.1103/PhysRevLett.70.1895. PMID 10053414. S2CID 6599630. Текст: непосредственный.

[4] Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. Proceedings of the Royal Soci-Ety of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 400(1818), 97-117. DOI.org/10.1098/rspa.1985.0070. Текст: непосредственный.

[5] Shor P. W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring // Foundations of Computer Science: Conference Publications. 1994. P.124-134. ISBN 0-8186-6580-7. DOI: 10.1109/SFCS.1994.365700. Текст: непосредственный.

[6] Shor P.W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer // Foundations of Computer Science: Conference Publications. 1997. P. 1484-1509. Текст: непосредственный.

[7] Bennett C.H., Brassard G. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, Bangalore, India (IEEE, New York, 1984), pp. 175-179. Текст: непосредственный.

[8] Feynman R.P. Simulating Physics with Computers. Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107. International Journal of Theoretical Physics, VoL 21, Nos. 6/7, 1982. Текст: непосредственный.

[9] Конг, И., Чой, С., Лукин, М.Д. Квантовые свёрточные нейронные сети. Nat. Phys. 15, 1273-1278 (2019). DOI.org/10.1038/s41567-019-0648-8. Текст: непосредственный.

[10] Устинов А.В. Квантовые материалы на основе сверхпроводниковых кубитов. НИР: грант №19-12-11011. Российский научный фонд. 2019. Текст: непосредственный.

[11] Российский квантовый центр. Сверхпроводниковые кубиты и квантовые схемы. — URL: https://www.rqc.ru/team/сверхпроводниковые-кубиты-и-квантовые-схемы (дата обращения 25.03.2025). Текст: электронный

[12] Высшая школа прикладной физики и космических технологий. Институт электроники и телекоммуникаций СПбПУ. Доклад всемирно известного специалиста в области квантовых коммуникаций Вадима Макарова. — URL: https://hsapst.spbstu.ru/news/report_vadim_makarov/ (дата обращения 25.03.2025). Текст: электронный

[13] Российский квантовый центр. Уязвимости квантовых систем. — URL: https://www.rqc.ru/team/уязвимости-квантовых-систем (дата обращения 25.03.2025). Текст: электронный

[14] Гиппиус Н.А. Резонансное приближение для составных систем фотоники. НИР: грант №22-12-00351. Российский научный фонд. 2022. Текст: непосредственный.

[15] Лев, М.Ю. Цены, инфляция и безопасность общества / М.Ю. Лев, С.В. Казанцев. Москва: ООО «Первое экономическое издательство», 2024. 230 с. ISBN 978-5-91292-512-2. DOI: 10.18334/9785912925122. EDN DSBINV. Текст: непосредственный.
[16] Лещенко, Ю.Г. Совет по финансовой стабильности: перспективы развития механизма глобального регулирования // Вопросы инновационной экономики. 2018. Т.8, №2. С.197-222. DOI: 10.18334/vinec.8.2.39151. EDN XTUDGX. Текст: непосредственный.
[17] Лев, М.Ю. Регулирование искусственного интеллекта международными организациями как фактор обеспечения технологической безопасности в национальных юрисдикциях / М.Ю. Лев, Ю.Г. Лещенко, М.Б. Медведева // Экономическая безопасность. 2024. Т.7, №8. С.1999-2026. DOI 10.18334/ecsec.7.8.121608. EDN LREDXA. Текст: непосредственный.
[18] Егоров, А. В. Квантовые вычисления и связь : учебно-методическое пособие. Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований. Казань : Издательство Академии наук РТ, 2020. 46 с. ISBN 978-5-9690-0679-9. EDN MIGQXZ. Текст: непосредственный.
[19] Евсиков, К. С. Правовой режим линий квантовой связи в свободном пространстве // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА). 2024. №10(122). С.117-125. DOI: 10.17803/2311-5998.2024.122.10.117-125. EDN NLROUG. Текст: непосредственный.
[20] Гриц, В. И. Спутниковые системы на основе квантовых линий связи / В.И. Гриц, Д.О. Малышев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т.1, №14. С.375-377. EDN YSNUEH. Текст: непосредственный.
[21] Зуев, С.В. Квантовые вычисления и квантовая криптография. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. 118с. ISBN 978-5-361-01373-9. EDN BILJYU. Текст: непосредственный.
[22] Квантовый подход к выбору материала для бронезащиты по квантовым числам / И.К. Устинов, А.К. Горбунов, А.Л. Лысенко [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №3. С.197-200. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-197-198. EDN LXECQH. Текст: непосредственный.

References

[1] Leshchenko, YU. G. Kvantovaya verifikaciya finansovoj sistemy v celyah bezopasnosti // Ekonomicheskaya bezopasnost'. 2024. T.7, №3. S. 535-558. DOI 10.18334/ecsec.7.3.120696. EDN ILDIDT. Tekst: neposredstvennyj.
[2] Wiesner, S.J. «Conjugate Coding» SIGACT News 15:1, pp. 78-88, 1983. Tekst: neposredstvennyj.
[3] Bennett, Charles H.; Brassard, Gilles; Crépeau, Claude; Jozsa, Richard; Peres, Asher; Wootters, William K. (29 March 1993). «Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein–Podolsky–Rosen Channels». Phys. Rev. Lett. 70 (13): 1895-1899. Bibcode: 1993PhRvL.70.1895B. DOI:10.1103/PhysRevLett.70.1895. PMID 10053414. S2CID 6599630. Tekst: neposredstvennyj.
[4] Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. Proceedings of the Royal Soci-Ety of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 400(1818), 97-117. DOI.org/10.1098/rspa.1985.0070. Tekst: neposredstvennyj.
[5] Shor P. W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring // Foundations of Computer Science: Conference Publications. 1994. P.124-134. ISBN 0-8186-6580-7. DOI: 10.1109/SFCS.1994.365700. Tekst: neposredstvennyj.
[6] Shor P.W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer // Foundations of Computer Science: Conference Publications. 1997. P. 1484-1509. Tekst: neposredstvennyj.

[7] Bennett C.H., Brassard G. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, Bangalore, India (IEEE, New York, 1984), pp. 175-179. Tekst: neposredstvennyj.
[8] Feynman R.P. Simulating Physics with Computers. Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107. International Journal of Theoretical Physics, VoL 21, Nos. 6/7, 1982. Tekst: neposredstvennyj.
[9] Kong, I., CHoj, S., Lukin, M.D. Kvantovye svyortochnye nejronnye seti. Nat. Phys. 15, 1273-1278 (2019). DOI.org/10.1038/s41567-019-0648-8. Tekst: neposredstvennyj.
[10] Ustinov A.V. Kvantovye materialy na osnove sverhprovodnikovyh kubitov. NIR: grant №19-12-11011. Rossijskij nauchnyj fond. 2019. Tekst: neposredstvennyj.
[11] Rossijskij kvantovyj centr. Sverhprovodnikovye kubity i kvantovye skhemy. — URL: https://www.rqc.ru/team/sverhprovodnikovye-kubity-i-kvantovye-skhemy (data obrashcheniya 25.03.2025). Tekst: elektronnyj
[12] Vysshaya shkola prikladnoj fiziki i kosmicheskih tekhnologij. Institut elektroniki i telekommunikacij SPbPU. Doklad vsemirno izvestnogo specialista v oblasti kvantovyh kommunikacij Vadima Makarova. — URL: https://hsapst.spbstu.ru/news/report_vadim_makarov/ (data obrashcheniya 25.03.2025). Tekst: elektronnyj
[13] Rossijskij kvantovyj centr. Uyazvimosti kvantovyh sistem. — URL: https://www.rqc.ru/team/uyazvimosti-kvantovyh-sistem (data obrashcheniya 25.03.2025). Tekst: elektronnyj
[14] Gippius N.A. Rezonansnoe priblizhenie dlya sostavnyh sistem fotoniki. NIR: grant №22-12-00351. Rossijskij nauchnyj fond. 2022. Tekst: neposredstvennyj.
[15] Lev, M.YU. Ceny, inflyaciya i bezopasnost' obshchestva / M.YU. Lev, S.V. Kazancev. Moskva: OOO «Pervoe ekonomicheskoe izdatel'stvo», 2024. 230 s. ISBN 978-5-91292-512-2. DOI: 10.18334/9785912925122. EDN DSBINV. Tekst: neposredstvennyj.
[16] Leshchenko, YU.G. Sovet po finansovoj stabil'nosti: perspektivy razvitiya mekhanizma global'nogo regulirovaniya // Voprosy innovacionnoj ekonomiki. 2018. T.8, №2. S.197-222. DOI: 10.18334/vinec.8.2.39151. EDN XTUDGX. Tekst: neposredstvennyj.
[17] Lev, M.YU. Regulirovanie iskusstvennogo intellekta mezhdunarodnymi organizaciyami kak faktor obespecheniya tekhnologicheskoj bezopasnosti v nacional'nyh yurisdikciyah / M.YU. Lev, YU.G. Leshchenko, M.B. Medvedeva // Ekonomicheskaya bezopasnost'. 2024. T.7, №8. S.1999-2026. DOI 10.18334/ecsec.7.8.121608. EDN LREDXA. Tekst: neposredstvennyj.
[18] Egorov, A. V. Kvantovye vychisleniya i svyaz' : uchebno-metodicheskoe posobie. Akademiya nauk Respubliki Tatarstan, Institut prikladnyh issledovanij. Kazan' : Izdatel'stvo Akademii nauk RT, 2020. 46 s. ISBN 978-5-9690-0679-9. EDN MIGQXZ. Tekst: neposredstvennyj.
[19] Evsikov, K. S. Pravovoj rezhim linij kvantovoj svyazi v svobodnom prostranstve // Vestnik Universiteta imeni O.E. Kutafina (MGYUA). 2024. №10(122). S.117-125. DOI: 10.17803/2311-5998.2024.122.10.117-125. EDN NLROUG. Tekst: neposredstvennyj.
[20] Gric, V. I. Sputnikovye sistemy na osnove kvantovyh linij svyazi / V.I. Gric, D.O. Malyshev // Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki. 2018. T.1, №14. S.375-377. EDN YSNUEH. Tekst: neposredstvennyj.
[21] Zuev, S.V. Kvantovye vychisleniya i kvantovaya kriptografiya. Belgorod: BGTU im. V.G. SHuhova, 2024. 118s. ISBN 978-5-361-01373-9. EDN BILJYU. Tekst: neposredstvennyj.
[22] Kvantovyj podhod k vyboru materiala dlya bronezashchity po kvantovym chislam / I.K. Ustinov, A.K. Gorbunov, A.L. Lysenko [i dr.] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2024. №3. S.197-200. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-197-198. EDN LXECQH. Tekst: neposredstvennyj.