

Крайнов Павел Алексеевич

студент

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Аннотация: В статье проведён системный анализ современного состояния и перспектив развития квантовых вычислений. Рассмотрены ведущие технологические платформы — сверхпроводящие, ионные, топологические кубиты. Представлены данные о динамике мирового и российского рынка, отраслевых приложениях и прогнозах аналитических агентств до 2030 года. Определены основные барьеры и перспективы практического применения квантовых систем.

Ключевые слова: квантовые вычисления; кубит; квантовое превосходство; коррекция ошибок; топологические кубиты; NISQ-эпоха; постквантовая криптография; рынок квантовых технологий.

Kraynov Pavel Alekseevich

student

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF QUANTUM COMPUTING

Abstract: The article provides a systematic analysis of the current state and development prospects of quantum computing. Leading technological platforms — superconducting, ion-trap, and topological qubits — are reviewed. Data on the dynamics of the global and Russian markets, industry applications and forecasts of analytical agencies up to 2030 are presented. Key barriers and prospects for practical applications of quantum systems are identified.

Keywords: quantum computing; qubit; quantum supremacy; error correction; topological qubits; NISQ era; post-quantum cryptography; quantum technology market.

1. Введение

Квантовые вычисления — одно из наиболее динамично развивающихся направлений современной науки и техники, находящееся на пересечении квантовой

физики, математики и инженерии. Принципиальное отличие квантовых компьютеров от классических состоит в использовании кубитов — квантовых битов, способных одновременно находиться в суперпозиции состояний «0» и «1», что обеспечивает принципиально иную вычислительную парадигму [9].

Интерес к квантовым вычислениям обусловлен теоретически доказанными преимуществами перед классическими алгоритмами: разложением числа на множители (алгоритм Шора [10]), поиском в неупорядоченных базах данных (алгоритм Гровера), моделированием квантовых систем и комбинаторной оптимизацией. Вместе с тем перевод этих преимуществ в практически значимые результаты сопряжён с существенными инженерными трудностями — прежде всего с проблемой декогеренции и накопления ошибок [1].

Цель настоящей статьи — систематизировать актуальные данные о состоянии и перспективах развития квантовых вычислений, включая анализ ведущих технологических платформ, отраслевых приложений и рыночных прогнозов, а также оценку российских разработок в данной области.

2. Технологические платформы и современные достижения

В настоящее время существует несколько конкурирующих физических реализаций кубитов, каждая из которых обладает своими преимуществами и ограничениями. Ключевыми платформами являются сверхпроводящие цепи, захваченные ионы, нейтральные атомы, фотонные системы и топологические кубиты.

Сверхпроводящие кубиты. Знаковым событием 2024 года стало представление Google квантового чипа Willow со 105 кубитами. Согласно результатам, опубликованным в журнале Nature [5], процессор выполнил эталонный тест менее чем за пять минут — задачу, на решение которой лучшим классическим суперкомпьютерам потребовалось бы порядка 10 септиллионов лет. Принципиально важным стало достижение режима работы «ниже порогового значения» коррекции ошибок: впервые при масштабировании числа кубитов частота ошибок снижалась, а не возрастала [5].

Топологические кубиты. В феврале 2025 года Microsoft представила чип Majorana 1 — первый в мире квантовый процессор на топологических кубитах [6]. Архитектура Topological Core основана на майорановских нулевых модах и новом материале — топокондукторе из арсенида индия и алюминия. Текущий прототип содержит 8 кубитов, однако заявленная масштабируемость до одного миллиона кубитов на одном чипе открывает качественно новые перспективы. Топологические кубиты защищены от внешних воздействий на аппаратном уровне, что потенциально позволяет существенно снизить затраты на коррекцию ошибок [6].

В таблице 1 представлено сравнение ведущих технологических платформ по состоянию на середину 2025 года.

Таблица 1. Сравнительные характеристики ведущих платформ квантовых вычислений (2024–2025 гг.)

Платформа	Вид кубитов	Кубитов (2024–2025)	Темп. работы	Ключевое достижение
Google Willow	Сверхпроводящие	105	~15 мК	Коррекция ошибок ниже порога
IBM Heron r2	Сверхпроводящие	133	~15 мК	Модульная архитектура
Microsoft Majorana 1	Топологические	8 (прототип)	~20 мК	Первый топологический QPU
Росатом / ФИАН	Ионы иттербия	70	Комнатная	50-куб. прототип в 2024 г.
Quantinuum H-Series	Захваченные ионы	56	Комнатная	Рекорд Quantum Volume

Составлено автором по данным [5, 6, 11].

На рисунке 2 представлена эволюция числа кубитов у ведущих мировых разработчиков квантовых процессоров.

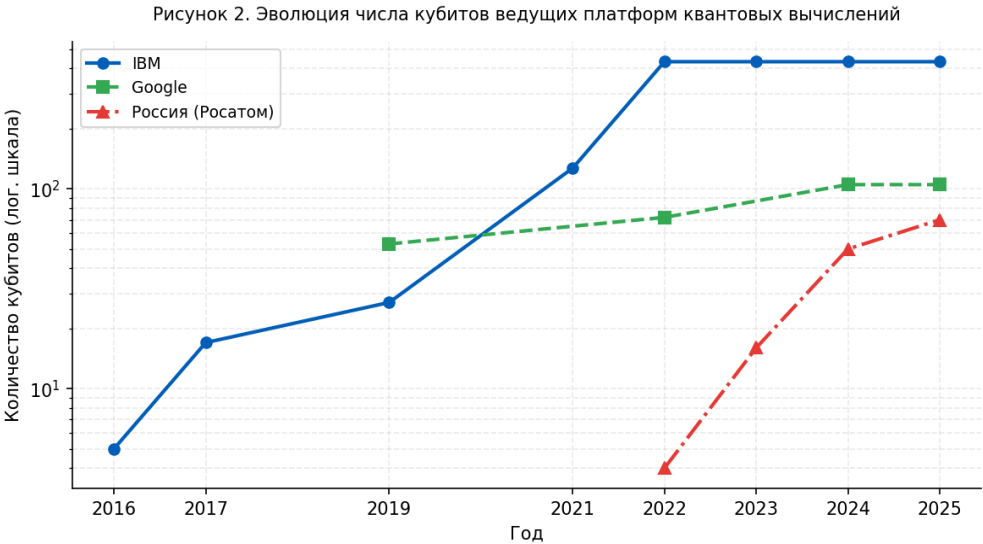


Рисунок 2 — Эволюция числа кубитов ведущих платформ квантовых вычислений (составлено автором по данным открытых источников)

3. Рыночная динамика и прогнозы

Глобальный рынок квантовых вычислений демонстрирует устойчивый рост. По данным Fortune Business Insights, объём рынка увеличился с 490 млн долл. в 2022 году до 930 млн долл. в 2024 году, а к 2030 году прогнозируется его рост до 6,5 млрд долл. при среднегодовом темпе роста около 32% [8]. Согласно отчёту McKinsey Quantum Technology

Monitor 2024, к 2035 году совокупный экономический потенциал квантовых технологий в четырёх ключевых отраслях может составить от 0,9 до 2,0 трлн долл. [7].

Динамика мирового рынка квантовых вычислений за 2022–2030 годы представлена на рисунке 1.

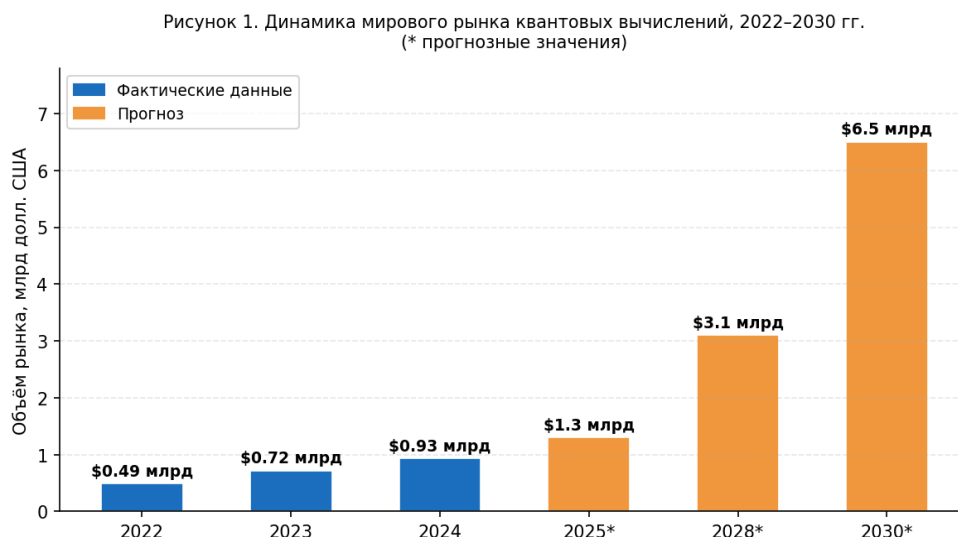


Рисунок 1 — Динамика мирового рынка квантовых вычислений, 2022–2030 гг.

(составлено автором по данным [7, 8])

Российский рынок квантовых технологий также показывает положительную динамику. По данным аналитического агентства Kert (КПИМГ Россия), объём рынка в 2024 году составил около 31 млрд руб. и, по прогнозам, вырастет до 50 млрд руб. к 2030 году [12]. Государственная корпорация «Росатом» в рамках дорожной карты «Квантовые вычисления» к концу 2024 года обеспечила создание четырёх действующих квантовых процессоров на различных физических платформах [11]. Самый мощный российский квантовый вычислитель насчитывает на сегодняшний день 70 кубитов [11].

4. Перспективные области применения

Аналитики McKinsey [7] выделяют четыре ключевые отрасли, которые в краткосрочной перспективе получают наибольшую выгоду от квантовых вычислений: фармацевтика, химическая промышленность, финансы и автомобилестроение. Вместе с тем практически значимые применения охватывают более широкий спектр задач.

Криптография и информационная безопасность. Алгоритм Шора [10] теоретически позволяет квантовому компьютеру эффективно факторизовать большие числа и решать задачу дискретного логарифмирования, что подрывает основы широко применяемых криптографических протоколов RSA и ECDSA. По различным оценкам, квантовая угроза для существующей криптографической инфраструктуры может стать

реальной уже через 10–15 лет [2], что стимулирует активное развитие и стандартизацию алгоритмов постквантовой криптографии (NIST, 2024).

Молекулярное моделирование и фармацевтика. Квантовые компьютеры принципиально лучше классических справляются с моделированием квантовой динамики молекулярных систем. Это открывает перспективы для ускорения разработки новых лекарственных препаратов, дизайна катализаторов и создания материалов с заданными свойствами [3].

Финансы и оптимизация. Квантовые алгоритмы способны ускорить решение задач портфельной оптимизации, оценки рисков методом Монте-Карло и ценообразования производных финансовых инструментов. Ведущие финансовые институты — Goldman Sachs, JPMorgan, BBVA — уже реализуют пилотные проекты с использованием квантовых облачных платформ.

Отраслевое распределение инвестиций в квантовые вычисления представлено на рисунке 3.

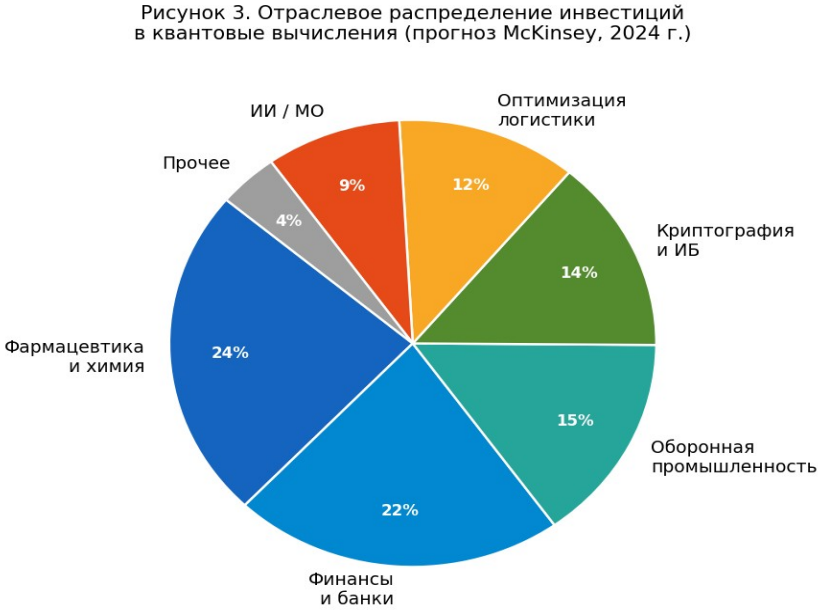


Рисунок 3 — Отраслевое распределение инвестиций в квантовые вычисления
(прогноз McKinsey [7], 2024 г.; составлено автором)

В таблице 2 систематизированы отраслевые направления применения квантовых вычислений с оценкой экономического потенциала.

Таблица 2. Отраслевые перспективы квантовых вычислений к 2035 году (по данным McKinsey [7])

Отрасль	Потенциал к 2035 г. (млрд долл.)	Горизонт коммерциализации	Основные задачи
Фармацевтика и науки о жизни	200–340	2027–2032	Молекулярное моделирование, поиск лекарств
Химическая промышленность	100–200	2026–2030	Катализ, новые материалы
Финансы и банки	80–130	2025–2028	Оптимизация портфелей, оценка рисков
Автомобилестроение и логистика	60–100	2027–2033	Маршрутизация, планирование поставок

Составлено автором по данным McKinsey Quantum Technology Monitor 2024 [7].

5. Ключевые барьеры и вызовы

Декогеренция и коррекция ошибок. Кубиты чрезвычайно чувствительны к тепловым флуктуациям, электромагнитным помехам и вибрации. Время когерентности у лучших современных чипов не превышает сотен пикосекунд. Для реализации практически значимых алгоритмов необходимы тысячи физических кубитов на один логический с развёрнутой системой коррекции ошибок [1, 4]. По оценкам специалистов Google Quantum AI, создание полноценного универсального квантового компьютера займёт ещё около 10 лет.

Масштабирование. По аналогии с законом Мура в классических вычислениях существует эмпирический «закон Невена», описывающий удвоенно-экспоненциальный рост мощности квантовых процессоров. Однако даже при таком темпе достижение числа кубитов, необходимого для практически значимых криптографических атак, прогнозируется лишь к 2035–2040 годам [10].

Кадровый дефицит и инфраструктура. Острой проблемой остаётся нехватка квалифицированных специалистов в области квантовых вычислений. Кроме того, сверхпроводящие процессоры требуют охлаждения до температур ~15 мК, что существенно ограничивает масштабирование инфраструктуры.

6. Заключение

Квантовые вычисления вступили в зрелую фазу NISQ-эпохи (Noisy Intermediate-Scale Quantum), для которой характерны устройства с десятками и сотнями кубитов при ещё недостаточном уровне коррекции ошибок для универсальных вычислений. Тем не менее ключевые достижения 2024–2025 годов — чип Google Willow с коррекцией ошибок ниже порогового значения [5] и топологический процессор Microsoft Majorana 1 [6] — свидетельствуют о существенном приближении к практически значимым квантовым вычислениям.

Мировой рынок квантовых технологий демонстрирует устойчивый рост с прогнозом достижения 6,5 млрд долл. к 2030 году [8]. Наибольшие экономические выгоды ожидаются в фармацевтике, химической промышленности, финансах и обеспечении информационной безопасности. Россия обладает конкурентными позициями: к 2024 году созданы четыре действующих квантовых процессора на различных физических платформах [11].

Ключевыми направлениями дальнейших исследований являются: разработка масштабируемых архитектур с аппаратной коррекцией ошибок, создание прикладных квантово-классических гибридных алгоритмов, а также подготовка квалифицированных кадров для квантовой индустрии.

Использованные источники:

1. Aharonov D., Ben-Or M. Fault-tolerant quantum computation with constant error rate // *SIAM Journal on Computing*. – 1997. – Vol. 38, No. 4. – P. 1207–1282.
2. Arute F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // *Nature*. – 2019. – Vol. 574. – P. 505–510.
3. Babbush R. et al. Encoding electronic spectra in quantum circuits with linear T complexity // *Physical Review X*. – 2018. – Vol. 8, No. 4. – 041015.
4. Beverland M. et al. Assessing requirements to scale to practical quantum advantage. – 2022. – arXiv:2211.07629.
5. Google Quantum AI. Quantum error correction below the surface code threshold // *Nature*. – 2024. – Vol. 636. – P. 1–7. DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y.
6. Microsoft. Microsoft Majorana 1: the world's first Quantum Processing Unit powered by a Topological Core [Электронный ресурс] // *Azure Quantum Blog*. – 2025. – URL: <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/microsoft-majorana-1/> (дата обращения: 14.05.2026).
7. McKinsey & Company. Quantum Technology Monitor 2024. – McKinsey Global Institute. – 2024. – 58 p.
8. Fortune Business Insights. Quantum Computing Market Size, Share & Industry Analysis [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/quantum-computing-market-106236> (дата обращения: 14.05.2026).
9. Preskill J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond // *Quantum*. – 2018. – Vol. 2. – P. 79.
10. Shor P.W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer // *SIAM Journal on Computing*. – 1997. – Vol. 26, No. 5. – P. 1484–1509.
11. Юнусов Р., Солнцева Е. Квантовые вычисления в России: итоги дорожной карты 2020–2024 // *Атомная энергия*. – 2025. – Т. 138, № 1. – С. 3–12.

12. Керт (КПМГ Россия). Рынок квантовых технологий в России: аналитический обзор 2024. – М.: Керт, 2024. – 44 с.