

**Карнулин Иван Алексеевич студент
5 курс, Российский государственный университет нефти и газа
(НИУ) имени И.М. Губкина
Россия, г. Москва**

СРАВНЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ КВАНТОВЫХ ПРОЦЕССОРОВ: IBM, GOOGLE, D-WAVE И ДРУГИХ, СУЩЕСТВУЮЩИХ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Аннотация: В статье проведён сравнительный анализ квантовых процессоров ведущих мировых производителей: IBM, Google, D-Wave, IonQ, Rigetti, Microsoft и Quantinuum. Рассмотрены четыре основных архитектурных подхода: сверхпроводящие кубиты, ионные ловушки, квантовый отжиг и топологические кубиты. С применением метрики Quantum Volume, вероятностной модели накопления ошибок $P_s = (1-\epsilon)^N$ и модели декогеренции T_1 выполнен количественный анализ производительности. Предложена взвешенная нормированная оценка для интегрального ранжирования платформ, показывающая лидерство ионных ловушек по качеству кубитов при преимуществе сверхпроводящих платформ по числу кубитов и масштабируемости.

Ключевые слова: квантовые вычисления, квантовый процессор, кубит, верность квантового гейта, квантовая коррекция ошибок, Quantum Volume, квантовый отжиг.

Annotation: The article presents a comparative analysis of quantum processors from leading manufacturers: IBM, Google, D-Wave, IonQ, Rigetti, Microsoft, and Quantinuum. Four architectural approaches are examined: superconducting qubits, ion traps, quantum annealing, and topological qubits. Quantitative performance analysis is carried out using the Quantum Volume

metric, the probabilistic error accumulation model $P_s = (1-\varepsilon)^N$, and the T1 decoherence model. A weighted normalized scoring method is proposed for integral platform ranking, demonstrating ion trap leadership in qubit quality and superconducting platform advantages in qubit count and scalability.

Key words: quantum computing, quantum processor, qubit, quantum gate fidelity, quantum error correction, Quantum Volume, quantum annealing.

1. Введение

Квантовые вычисления являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений современных технологий. В отличие от классических ЭВМ, квантовые процессоры используют суперпозицию и запутанность кубитов, что позволяет теоретически решать ряд задач экспоненциально быстрее [1]. После демонстрации «квантового превосходства» Google в 2019 году ведущие корпорации — IBM, Google, D-Wave, IonQ, Rigetti и Microsoft — активно конкурируют в создании новых платформ, принципиально различающихся по архитектуре и применению [2, 5].

Настоящая работа посвящена систематическому сравнительному анализу квантовых процессоров по состоянию на 2025 год с применением метрики Quantum Volume, вероятностных моделей накопления ошибок и методов статистического ранжирования. Актуальность обусловлена переходом отрасли от этапа NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) к разработкам в области квантовой коррекции ошибок [5, 3].

2. Основные архитектуры квантовых процессоров

2.1. Сверхпроводящие кубиты. Кубит реализуется как контур с джозефсоновским переходом, охлаждаемый до 10–20 мК. Нелинейность потенциала позволяет выделить два рабочих уровня $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Применяют IBM, Google, Rigetti. Преимущества: быстрые гейты (10–100 нс),

совместимость с полупроводниковой технологией. Недостаток: требуется сверхглубокое охлаждение, высокая дефазировка [5].

2.2. Ионные ловушки. Ионы атомов (Yb^+ , Be^+) удерживаются в ловушках Пауля, квантовые состояния управляются лазерными импульсами. Применяют IonQ, Quantinuum. Верность гейтов — до 99,99%, время когерентности — миллисекунды и более, полная связность в ловушке. Недостаток: медленные гейты (~ 100 – $1\,000$ мкс), сложность масштабирования [9].

2.3. Квантовый отжиг. Архитектура D-Wave специализирована для задач оптимизации QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization). Система находит минимум квадратичной формы $\min x^T Q x$, используя квантовое туннелирование. Не реализует универсальные квантовые алгоритмы [8].

2.4. Топологические кубиты. Microsoft (Majorana 1, 2025) — 8 кубитов на основе майорановских нулевых мод (MZM) в гетероструктурах InAs/Al. Теоретически обеспечивают встроенную защиту от локальных ошибок и обещают радикальное сокращение числа физических кубитов на один логический [10].

3. Квантовые процессоры IBM

IBM последовательно наращивала кубиты: Eagle — 127 (2021) [2], Osprey — 433 (2022), Condor — 1 121 (2023). Рабочим флагманом стала серия **Heron**: r1 — 133 кубита (2023), r2 — 156 (2024), r3 (2025). Архитектура heavy-hex lattice с отдельными резонаторами считывания полностью устранила перекрёстные помехи, обеспечив 3–5-кратное превосходство над Eagle [2]. Дорожная карта IBM 2033 предусматривает переход к отказоустойчивым вычислениям через квантовую коррекцию ошибок (QEC) на поверхностных кодах.

4. Квантовые процессоры Google

В декабре 2024 года Google представила **Willow** — 105 кубитов (квадратная решётка, связность 3,47). Ключевое достижение: первая демонстрация QEC ниже порогового значения поверхностного кода — при увеличении кода с 3×3 до 7×7 логическая ошибка снижалась в 2,14 раза на шаг [3]. $T_1 = 68 \pm 13$ мкс, верность двухкубитного гейта — 99,85%, частота ошибок — 0,14% за цикл. В тесте RCS задача выполнена за 5 минут против 10^{25} лет для суперкомпьютера [3].

5. Квантовые системы D-Wave

Advantage (2020): 5 000+ кубитов, топология Pegasus, 15-связность. **Advantage2** (май 2025): 4 400+ кубитов, топология Zephyr, 20-связность; удвоенное время когерентности, +40% энергетического масштаба, -75% шума, потребление 12,5 кВт. Производительность на задачах 3D-решёток возросла в 25 000 раз [8]. Система используется для оптимизации маршрутов, финансовых портфелей, задач расписания; перспективна для нефтегазовой отрасли (VRP, планирование добычи).

6. Другие производители

IonQ Forte Enterprise (2024): 35 кубитов, мировой рекорд верности двухкубитного гейта — 99,99% ($\epsilon = 10^{-4}$) [12]. Дорожная карта: 80 000 логических кубитов к 2030 году через оптические сети ловушек.

Rigetti Cepheus-1-36Q (2025): 36 кубитов, модульная архитектура чиплет (4 чипа), медианная верность — 99,5%, снижение ошибок вдвое относительно Ankaa-3. Доступен через Microsoft Azure Quantum и Rigetti QCS [4].

Quantinuum H2 (2024): 56 полностью связанных кубитов, верность ~99,9%, Quantum Volume $> 10^6$. Опубликованы результаты реализации отказоустойчивых логических кубитов на коде цвета [9, 7].

7. Математический аппарат сравнительного анализа

7.1. Метрика *Quantum Volume*.

Метрика QV, предложенная IBM [1, 4], определяет наибольший равноглубокий алгоритм (схему $m \times m$), который процессор выполняет с вероятностью «тяжёлого» выхода $P_{\text{heavy}} \geq 2/3$:

$$QV = 2^n, \text{ где } P_{\text{heavy}}(n) = \Pr[p(x) > \text{median}(p)] \geq 2/3.$$

QV одновременно учитывает число кубитов, связность и уровень ошибок. Quantinuum H2: $QV > 10^6$ ($\approx 2^{20}$). Типичные NISQ-платформы: $QV = 2^5 - 2^8$. Разница отражает принципиальное преимущество ионных ловушек по качеству кубитов.

7.2. Вероятностная модель накопления ошибок.

Пусть ϵ — вероятность ошибки двухкубитного гейта, N — число таких гейтов в схеме. При независимости ошибок вероятность успешного выполнения (верность схемы):

$$P_s = (1 - \epsilon)^N.$$

Из условия $P_s \geq 0,5$ следует максимально применимая глубина схемы:

$$N_{\text{max}} = \ln(2) / \epsilon.$$

Расчёт N_{max} для ведущих процессоров представлен в Таблице 1.

Таблица 1. Максимальная глубина схемы N_{max} при пороге $P_s = 0,5$

Процессор	epsilon	F_2q, %	N_max	Класс алгоритмов
IonQ Forte Enterprise	0,0001	99,99	6 931	Шор, Гровер (глубокие схемы)
Quantinuum H2	0,001	99,90	693	VQE, QAOA
Google Willow	0,0015	99,85	462	VQE, QEC-схемы
IBM Heron r2	0,005	99,50	139	NISQ-алгоритмы
Rigetti Cephheus-1-36Q	0,005	99,50	139	NISQ-алгоритмы

7.3. Модель декогеренции T_1 .

Распад населённости возбуждённого состояния кубита: $P_1(t) = \exp(-t / T_1)$. Верхняя граница верности гейта длительностью t_g :

$$F_{\text{max}} \sim 1 - t_g / T_1.$$

Для Google Willow ($T_1 = 68$ мкс, $t_g = 50$ нс): $F_{\max} \approx 99,93\%$. Эксперимент: 99,85% — согласуется с учётом T_2 -дефазировки. Ионные ловушки ($T_1 \gg 1$ с): $F_{\max} > 0,9999999$, что объясняет рекордную верность IonQ.

7.4. Взвешенная нормированная оценка.

Для интегрального ранжирования универсальных процессоров введём нормированный показатель:

$$S_i = \sum_j w_j * (x_{ij} - \min_j) / (\max_j - \min_j),$$

где w_j — веса: $w_F = 0,40$ (верность), $w_{T1} = 0,25$, $w_N = 0,25$, $w_{sc} = 0,10$ (масштабируемость). Результаты — в Таблице 3.

8. Сравнительный анализ и обсуждение результатов

Таблица 2. Сравнительные характеристики квантовых процессоров (2024–2025)

Произ-водитель	Процессор	Год	Тип кубитов	Кубиты	T1, мкс	F_2q, %	QV
IBM	Heron r2	2024	Сверхпровод.	156	~300	99,50	---
Google	Willow	2024	Сверхпровод.	105	68	99,85	---
D-Wave	Advantage2	2025	Кв. отжиг	4 400+	~1	N/A	N/A
IonQ	Forte Ent.	2024	Ион. ловушка	35	>10 000	99,99	---
Rigetti	Cepheus-1	2025	Сверхпровод.	36	~100	99,50	---
Microsoft	Majorana 1	2025	Топологич.	8	TBD	TBD	N/A
Quantinuum	H2	2024	Ион. ловушка	56	>10 000	~99,90	>10^6

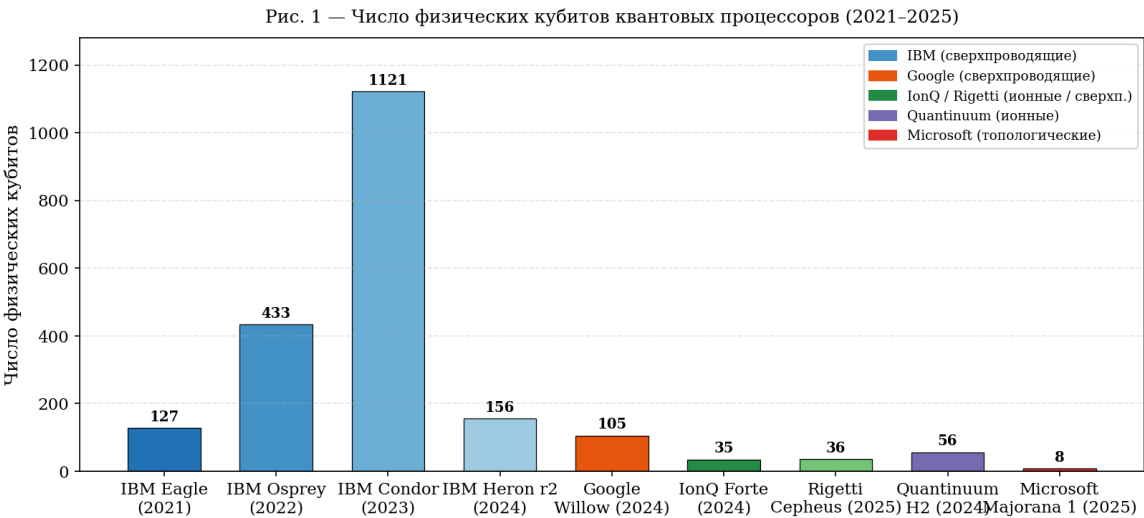


Рисунок 1. Число физических кубитов квантовых процессоров (2021–2025)

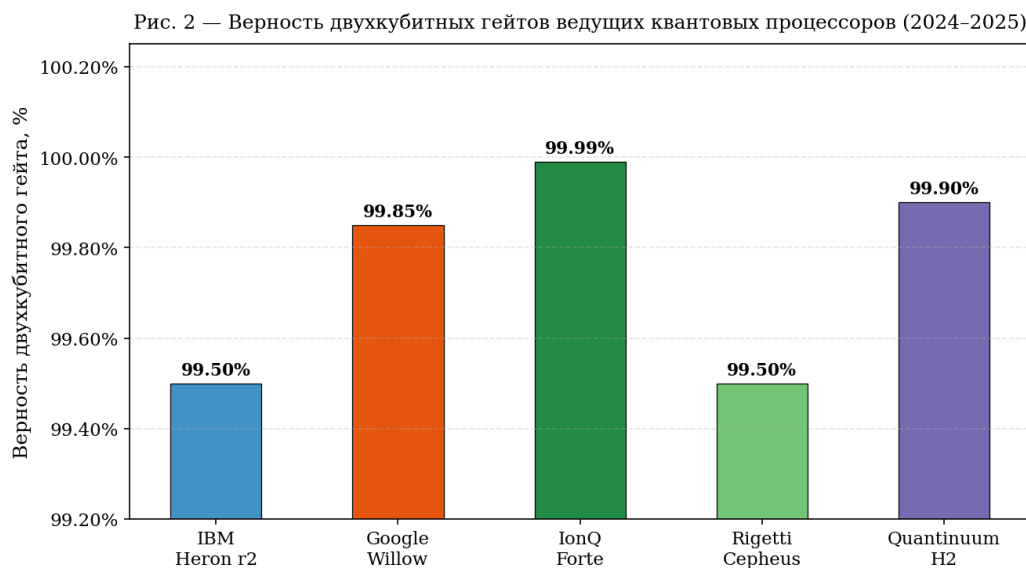


Рисунок 2. Верность двухкубитных гейтов ведущих процессоров (2024–2025)

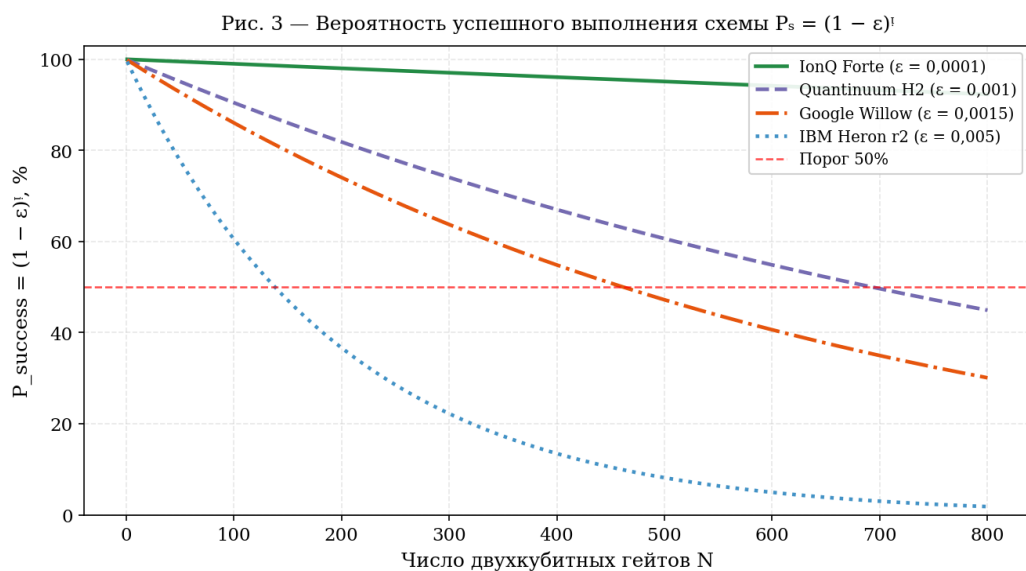


Рисунок 3. Вероятность успешного выполнения схемы $P_s = (1 - \text{epsilon})^N$

Таблица 3. Взвешенная нормированная оценка S_i ($w_F=0,40$; $w_{T1}=0,25$; $w_N=0,25$; $w_{sc}=0,10$)

Процессор	F _{2q}	T1	N _{max}	Масш.	S _i (итог)
IonQ Forte Enterprise	1,000	1,000	1,000	0,50	0,950
Quantinuum H2	0,816	1,000	0,082	0,50	0,649
Google Willow	0,714	0,000	0,048	0,70	0,366
IBM Heron r2	0,000	0,023	0,000	0,80	0,086
Rigetti Cepheus-1-36Q	0,000	0,003	0,000	0,40	0,041

По интегральной метрике лидируют ионные платформы: IonQ ($S_i = 0,950$) > Quantinuum (0,649) за счёт рекордных верности и T_1 . Сверхпроводящие IBM и Google имеют преимущество по числу кубитов и экосистеме; Google Willow уникально демонстрирует QEC ниже порога. D-Wave Advantage2 доминирует на задачах оптимизации QUBO, недостижимых для универсальных платформ по скорости.

Заключение

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие цифровые итоги. (1) Рекорд числа кубитов среди универсальных вентильных процессоров — IBM Condor (1 121 кубит); рабочий флагман — Heron r2 (156 кубитов). (2) Рекорд верности двухкубитного гейта — IonQ Forte: 99,99%, $N_{\max} = 6\,931$ гейт при $P_s \geq 0,5$. (3) Google Willow ($T_1 = 68$ мкс, $F = 99,85\%$) впервые продемонстрировал QEC ниже порога поверхностного кода. (4) D-Wave Advantage2 (4 400+ кубитов, Zephyr) обеспечивает ускорение до $25\,000\times$ на задачах оптимизации при неизменных 12,5 кВт. (5) Взвешенный рейтинг: IonQ (0,950) > Quantinuum (0,649) > Google (0,366) > IBM (0,086) > Rigetti (0,041). Выбор платформы определяется классом задачи: D-Wave — для QUBO, IonQ/Quantinuum — для глубоких алгоритмов, IBM/Google — для NISQ и QEC-прототипирования.

Использованные источники:

1. Jurcevic P., Javadi-Abhari A., Bishop L.S. [et al.]. Demonstration of quantum volume 64 on a superconducting quantum computing system // Quantum Science and Technology.— 2021.— Vol. 6, no. 2.— Art. 025020.— DOI: 10.1088/2058-9565/abe519.
2. Kim Y., Eddins A., Anand S. [et al.]. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance // Nature.— 2023.— Vol. 618.— P. 500–505.— DOI: 10.1038/s41586-023-06096-3.

3. Acharya R., Aleiner I.L., Andersen T.I. [et al.] (Google Quantum AI). Quantum error correction below the surface code threshold // *Nature*.— 2024.— Vol. 638.— P. 920–926.— DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y.
4. Pelofske E., Bartschi A., Eidenbenz S. Quantum Volume in Practice: What Users Can Expect from NISQ Devices // *IEEE Transactions on Quantum Engineering*.— 2022.— Vol. 3.— Art. 3102119.— DOI: 10.1109/TQE.2022.3184764.
5. Bharti K., Cervera-Lierta A., Kyaw T.H. [et al.]. Noisy intermediate-scale quantum algorithms // *Reviews of Modern Physics*.— 2022.— Vol. 94, no. 1.— Art. 015004.— DOI: 10.1103/RevModPhys.94.015004.
6. Preskill J. Quantum computing 40 years later [Electronic resource].— 2021.— URL: <https://arxiv.org/abs/2106.10522> (дата обращения: 20.10.2024).
7. Bravyi S., Cross A.W., Gambetta J.M. [et al.]. High-threshold and low-overhead fault-tolerant quantum memory // *Nature*.— 2024.— Vol. 627.— P. 778–782.— DOI: 10.1038/s41586-024-07107-7.
8. King A.D., Suzuki S., Raymond J. [et al.]. Quantum critical dynamics in a 5000-qubit programmable spin glass // *Nature*.— 2023.— Vol. 617.— P. 61–66.— DOI: 10.1038/s41586-023-05867-2.
9. Bluvstein D., Evered S.J., Geim A.A. [et al.]. Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays // *Nature*.— 2024.— Vol. 626.— P. 58–65.— DOI: 10.1038/s41586-023-06927-3.
10. Aghaee M., Razmkhah A., Bauer B. [et al.] (Microsoft Azure Quantum). InAs-Al hybrid devices passing the topological gap protocol // *Physical Review B*.— 2023.— Vol. 107.— Art. 245423.— DOI: 10.1103/PhysRevB.107.245423.
11. Cerezo M., Arrasmith A., Babbush R. [et al.]. Variational quantum algorithms // *Nature Reviews Physics*.— 2021.— Vol. 3.— P. 625–644.— DOI: 10.1038/s42254-021-00348-9.

12. Egan L., Debroy D.M., Noel C. [et al.]. Fault-tolerant control of an error-corrected qubit // Nature.— 2021.— Vol. 598.— P. 281–286.— DOI: 10.1038/s41586-021-03928-y.
13. IBM Quantum Computing: Hardware and Roadmap [Electronic resource].— IBM, 2024.— URL: <https://www.ibm.com/quantum/hardware> (дата обращения: 25.10.2024).