

Методологические аспекты информационных и математических технологий

УДК 530.145.83

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.001

Квантовые вычисления на перспективных платформах

Бетеров Илья Игоревич^{1,2}, Чэнь Цзюньси^{1,2} Ложкина Екатерина Андреевна²

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Россия, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Россия, Новосибирск,

beterov@isp.nsc.ru

Аннотация. В работе представлен краткий обзор современного состояния дел в области квантовых вычислений. В последние годы в этой сфере исследований наблюдается стремительный прогресс, в первую очередь в развитии экспериментальных методов управления состояниями многочастичных квантовых систем. В то же время, вопрос о практическом применении квантовых вычислений остается открытым. Наиболее перспективные направления, где такие приложения могут появиться уже в ближайшие годы – это решение задач квантовой химии, материаловедение, различные оптимизационные задачи. Большой интерес научной общественности вызывают современные экспериментальные работы по реализации различных квантовых алгоритмов с использованием квантовых процессоров промежуточного масштаба с десятками и сотнями кубитов – двухуровневых квантовых систем, которые являются основными логическими элементами квантового компьютера. Это хорошо видно по результатам библиометрического анализа, проведенного с помощью Google Scholar и ChatGPT.

Экспериментальная реализация квантовых вычислений в настоящее время характеризуется соревнованием нескольких физических платформ, среди которой лидирует сверхпроводящая платформа, что было отмечено Нобелевской премией по физике в 2025 году. В то же время, альтернативные платформы – фотоны, ионы, нейтральные атомы – обладают рядом потенциальных преимуществ. Наиболее значимое направление развития экспериментальных квантовых вычислений в последние годы – это квантовая коррекция ошибок, которая должна увеличить глубину квантовых алгоритмов и позволить реализовать наиболее сложные универсальные квантовые алгоритмы. Основные принципы квантовой коррекции ошибок и реализации поверхностного кода, наилучшим образом соответствующего архитектуре современных квантовых процессоров, приведены в статье.

На базе существующих сверхпроводящих квантовых процессоров реализован облачный доступ, позволяющий исследователям проводить как численное моделирование, так и эксперименты по реализации квантовых вычислений. Для этого широко используется ставшая де-факто стандартом библиотека IBM Qiskit. В качестве примера в работе приведена демонстрация элементов поверхностного кода квантовой коррекции ошибок, реализованная с помощью больших языковых моделей.

Ключевые слова: квантовые вычисления, квантовые компьютеры, квантовая коррекция ошибок

Цитирование: Бетеров И.И. Квантовые вычисления на перспективных платформах / И.И. Бетеров, Ц. Чэнь, Е.А. Ложкина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1 (41). – С. 5-22 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.001.

Введение. В честь столетия появления понятия квантовой механики [1] 2025 год был объявлен ЮНЕСКО Международным годом квантовой науки и технологий [2]. Квантовая механика опирается на представления о дискретности элементарных процессов поглощения энергии, неопределенности – отсутствия у квантовых частиц физической траектории, случайности измерения физических величин. Сегодня экспериментальная квантовая физика переживает расцвет, поскольку появились возможности управления квантовыми состояниями многочастичных квантовых систем, что было отмечено тремя Нобелевскими премиями по физике в 2012, 2022 и 2025 годах [3]. Потенциальные практические приложения таких исследований сегодня обычно называют квантовыми технологиями. К квантовым технологиям, как правило, относят квантовые вычисления, квантовые коммуникации и квантовую сенсорику. При этом квантовые вычисления и квантовые коммуникации объединяются понятием квантовой информатики. В целом, к квантовой информатике можно

отнести те методы обработки информации, которые не имеют аналогов, реализуемых на обычных компьютерах.

Экспериментальный прогресс в области квантовых технологий в последние годы – это создание оптоволоконных и спутниковых систем квантовой связи, значительное увеличение масштаба квантовых регистров на основе различных физических платформ, а также значительное увеличение точности логических вентилях, выполняемых с отдельными кубитами – двухуровневыми квантовыми системами, на которых основаны квантовые компьютеры. Несмотря на то, что практических приложений квантовых компьютеров еще не имеется, темп научно-технического прогресса в этой области поражает воображение. Обзоры современного состояния дел успевают полностью устареть приблизительно за один год. Цель статьи – кратко рассмотреть перспективы квантовых вычислений на современном этапе.

1. Состояние дел в области квантовых вычислений: экспертные оценки. Работы в области квантовых вычислений привлекают большое внимание научной общественности и наиболее значимых экспертных сообществ, в том числе Нобелевского комитета. В последние годы развитие квантовых вычислений во многом сместилось из академических организаций в индустриальный сектор. Исследовательские центры в области квантовых вычислений появились в крупнейших ИТ-компаниях, включая Google, IBM, Microsoft. Не случайно один из лауреатов Нобелевской премии по физике 2025 года Мишель Деворе является сотрудником Google [4], а другой лауреат, Джон Мартинис, длительное время руководил исследовательским центром Google в области квантовых вычислений [5]. Именно компания Google в 2019 году впервые продемонстрировала квантовое превосходство – возможность с помощью квантового компьютера решить математическую задачу, которая не может быть эффективно решена даже с использованием суперкомпьютеров [6]. Для этого использовался квантовый процессор Sycamore, содержащий 54 кубита. Это число не выглядит таким уж большим, но классическое моделирование квантовых вычислений требует экспоненциального роста объема памяти с увеличением числа кубитов. При этом параллельное решение этой задачи с использованием большого числа процессоров, которое обычно, делается на современных суперкомпьютерах, оказывается малоэффективным. Это позволяет надеяться на появление практически значимых квантовых алгоритмов.

В то же время, имеется ряд обстоятельств, сдерживающих развитие квантовых вычислений. Во-первых, квантовые алгоритмы демонстрируют экспоненциальное преимущество для очень узкого набора задач, например, таких, как факторизация больших чисел [7]. Хотя для многих других NP-трудных задач также разработаны квантовые алгоритмы, они не обеспечивают столь существенного превосходства. То же самое относится и к различным оптимизационным задачам. Например, коммерческий квантовый процессор D-Wave изначально был разработан для решения задач квантового отжига. Но корректное сравнение его производительности с обычными процессорами оказалось достаточно сложным, и его превосходство продолжает быть предметом дискуссий [8]. Во-вторых, для квантовых компьютеров необходима постоянная коррекция ошибок, поскольку квантовые состояния быстро разрушаются. Это требует увеличения числа кубитов, что достаточно сложно технически, и может быть эффективно реализовано лишь на нескольких физических платформах – таких, как сверхпроводники и ультрахолодные нейтральные атомы.

Одним из наиболее известных экспертов в области квантовых вычислений является физик-теоретик из Калифорнийского технологического университета Джон Прескилл. Ему принадлежит понятие Noisy Intermediate Scale Quantum technology (NISQ) – квантовые технологии промежуточного масштаба с высоким уровнем шумов [9]. Основная идея заключалась в том, что возможности индивидуального управления квантово-запутанными

состояниями многочастичных квантовых систем появилась впервые в истории современной физики.

Развитие этой работы – недавняя публикация, посвященная квантовым преимуществам [10]. Необходимо уметь отличать преимущества для решения практических задач, связанных с принципиальными отличиями квантовой механики от классической, от псевдо-преимуществ, связанных с недостаточно оптимальным выбором классического подхода к решению конкретной задачи. Это достаточно просто в отношении таких задач, как факторизация больших чисел, на отсутствие эффективных классических алгоритмов решения которой базируются стандарты информационной безопасности. В то же время, квантовый алгоритм факторизации реализуется за полиномиальное время по отношению к размеру массива входных данных [7]. Можно утверждать, что потенциальные преимущества существуют и для других задач, включая приближенные оптимизационные алгоритмы, поиск собственных значений унитарного оператора, дискретное логарифмирование [11,12]. Оценка квантовых преимуществ – нетривиальная проблема, особенно в условиях, когда постоянно разрабатываются все новые алгоритмы для решения различных математических задач, включая моделирование сложных квантовых систем. В некоторых случаях квантовое преимущество может иметь эмпирический характер, например, когда эффективный квантовый алгоритм уже существует, а эффективный классический еще предстоит разработать. Это относится в первую очередь к задачам моделирования квантовых систем, что важно для приложений в материаловедении, физике конденсированного состояния и квантовой химии. В целом, квантовая химия является областью знания, которая должна выиграть наиболее существенно от появления квантовых компьютеров.

По оценкам исследователей из компании BlueQubit, преимущественно выпускников Стенфордского университета, возможные практические приложения квантовых компьютеров на современном этапе ожидаются в первую очередь в следующих областях [13]:

- Разработка новых лекарств. С помощью квантовых компьютеров предполагается моделировать химические связи и пути химических реакций, что позволит ускорить разработку новых лекарств, для которых сейчас требуется перебирать химические компоненты и возможные реакции в лабораториях.
- Разработка новых материалов. За счет точного моделирования квантовых состояний электронов в твердотельных системах, невозможного на классическом компьютере, ожидается разработка новых сверхпроводящих материалов, легких и прочных сплавов, солнечных панелей.
- Моделирование финансовых рынков. Анализ состояния рынка является чрезвычайно сложным, поскольку рынок описывается огромным числом параметров и обладает чрезвычайно высоким уровнем неопределенности. Анализ рынка с помощью квантовых компьютеров может стать важным инвестиционным инструментом.
- Технологии искусственного интеллекта. Задачи глубокого обучения являются экспоненциально сложными и требуют огромных вычислительных ресурсов. Квантовые компьютеры могут быть интересными для обработки естественного языка, распознавания изображений. Большой интерес представляют гибридные квантово-классические модели.
- Логистика. Квантовые компьютеры могут быть использованы для комбинаторной оптимизации, что открывает возможности для решения множества сложных логистических задач.

Разумеется, к этому перечню перспективных направлений следует относиться с известной осторожностью. Хотя он хорошо показывает основные точки приложения сил, ни

одно из этих приложений пока не является гарантированным, в отличие от, например, хорошо известной задачи факторизации больших чисел.

2. Библиометрические оценки. Для краткого библиометрического анализа публикаций в период 2020-2025 была использована база данных Google Scholar с сортировкой по цитированию с помощью библиотеки `sortgs` для языка Python. Наиболее цитируемые работы последних лет – экспериментальная демонстрация квантового превосходства с использованием фотонного процессора, обзор по квантовой вычислительной химии, экспериментальная демонстрация квантового алгоритма, имеющего потенциал практического применения на сверхпроводящем компьютере IBM, более убедительная по сравнению с первым результатом Google демонстрация квантового превосходства на сверхпроводящем процессоре, реализация бозонного сэмпинга в фотонной системе, обзор квантовых алгоритмов в области квантовой химии и квантового материаловедения, новый квантовый алгоритм решения термодинамических задач, описание библиотеки Qiskit для квантовых вычислений, обзор квантовых вычислений с нейтральными атомами, материаловедческий анализ перспективных платформ для квантовых вычислений.

Альтернативный анализ наиболее цитируемых работ был проведен с помощью ChatGPT 5.2 с последующей верификацией результатов в содержательном плане. Этот перечень имеет большое число пересечений с результатами, полученными непосредственно с помощью Google Scholar. В то же время, в нем дается краткая характеристика значимости каждой работы и ее влияния на состояние дел в области знания, приведенная в Таблице 1.

Таблица 1. Наиболее цитируемые работы в области квантовых вычислений с 2020 года, согласно ChatGPT 5.2

Год	Статья	Журнал	Почему цитируется
2020	McArdle et al., “Quantum computational chemistry” [14]	Reviews of Modern Physics	Обзор алгоритмов квантовых вычислений для задач квантовой химии, включая вариационные методы и квантовые симуляторы. Обзор широко цитируется в работах, посвященных вариационным методам.
2020	Kjaergaard et al., “Superconducting Qubits: Current State of Play” [15]	Annual Review of Condensed Matter Physics	Стандартизированный обзор физических характеристик сверхпроводящих кубитов (время когерентности, квантовые вентили, чтение состояний, архитектура процессора)
2020	Zhong et al., “Quantum computational advantage using photons” [16]	Science	Ключевой эксперимент по демонстрации квантового превосходства на примере бозонного сэмпинга, широко цитируется в работах, посвященных квантовому превосходству
2021	Cerezo et al., “Variational quantum algorithms” [17]	Nature Reviews Physics	Классический обзор вариационных квантовых алгоритмов (оптимизация, приложения)
2021	Wu et al., “Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor” [18]	Physical Review Letters	Убедительная демонстрация квантового превосходства с использованием сверхпроводящего квантового процессора, широко цитируется в работах, посвященных квантовому превосходству

2021	Endo et al., “Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation” [19]	Journal of the Physical Society of Japan	Широко используется в работах, посвященных уменьшению влияния ошибок и в гибридных квантово-классических конфигурациях, а также в экспериментах с устройствами с высоким уровнем шумов
2022	Bharti et al., “Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms” [20]	Reviews of Modern Physics	Обширный и широко цитируемый обзор квантовых алгоритмов, применимых в устройствах с высоким уровнем шумов, соображения по практическому использованию
2022	Tilly et al., “The variational quantum eigensolver: a review of methods and best practices” [21]	Physics Reports	Обзор наиболее эффективных методов вариационного поиска собственных значений, широко цитируется в публикациях по химии и материаловедению, а также используется при оценке характеристик и скорости алгоритмов
2022	Madsen et al., “Quantum computational advantage with a programmable photonic processor” [22]	Nature	Демонстрация квантового превосходства с использованием программируемого фотонного процессора, широко цитируется в публикациях по фотонике и используется в работах, посвященных сэмплингу и верификации результатов
2023	Google Quantum AI et al., “Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit” [23]	Nature	Флагманская работа по экспериментальной реализации поверхностного кода, широко цитируется в дорожных картах по квантовым алгоритмам и работах по реализации квантовой коррекции ошибок

Хорошо видно, что наиболее цитируемые работы в области квантовых вычислений посвящены экспериментальной реализации различных квантовых алгоритмов на небольшом числе физических платформ – сверхпроводящей и реже фотонной. Большой интерес научной общественности вызывают обзоры по квантовым алгоритмам и вопросы квантового превосходства. Это указывает на основные направления приложения усилий. Вместе с тем, следует отметить, что анализ цитируемости всегда имеет несколько запаздывающий характер, и наиболее значимые современные публикации следует оценивать скорее экспертным образом.

3. Основные принципы квантовых вычислений. Основой квантового компьютера является квантовый регистр, состоящий из квантовых битов (кубитов) – любых двухуровневых квантовых систем [24]. Любые хорошо различимые состояния кубита выбираются в качестве логического нуля и единицы. В качестве таких состояний могут рассматриваться разные энергетические уровни в атомах или ионах, или различные состояния квантованного электрического тока в сверхпроводниках, за исследования которого была присуждена Нобелевская премия 2025 года [3]. В квантовой физике широко используется предложенная Полем Дираком система обозначений для квантовых состояний в виде асимметричных скобок, например, $|0\rangle$ и $|1\rangle$, которые соответствуют логическим нулю и единице. Принципиальная разница с классическими битами информации состоит в том, что, в отличие от классического бита, квантовый бит может находиться в суперпозиции состояний $a|0\rangle + b|1\rangle$, где a и b – комплексные числа. В этом случае вероятность найти кубит в состоянии

$|0\rangle$ будет равна $|a|^2$, а вероятность обнаружить его в состоянии $|1\rangle$ будет $|b|^2$. При этом точно предсказать результат единичного измерения невозможно.

Эти же логические состояния могут быть обозначены векторами $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ или $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. В этом случае произвольное суперпозиционное состояние кубита будет выглядеть как $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$. С учетом того, что волновая функция определена с точностью до глобальной фазы, а сумма квадратов модулей коэффициентов a и b равна единице (условие нормировки), произвольное суперпозиционное состояние может быть записано как $\cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\varphi}\sin(\theta/2)|1\rangle$ и графически изображено в виде единичного вектора на сфере, которая называется сферой Блоха (рис. 1). Однокубитовые вентили обычно соответствуют вращению вектора вокруг заданной оси, поэтому их часто называют вращениями кубита.

Поскольку каждый кубит может находиться в двух состояниях одновременно, квантовый регистр, состоящий из n кубитов, может находиться в суперпозиции 2^n ортонормированных базисных состояний. Потенциально, это позволяет квантовому компьютеру с n кубитами проводить вычисления над 2^n числами одновременно. Но извлечь такое количество информации из вектора состояния невозможно. Поэтому такое преимущество, называемое квантовым параллелизмом, реализуется только косвенным образом в некоторых квантовых алгоритмах.

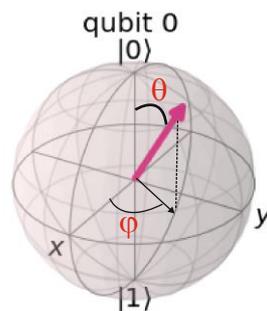


Рис. 1. Изображение состояния кубита на сфере Блоха

Квантовые алгоритмы выполняются путем преобразования состояний отдельных кубитов. Эти преобразования, по аналогии с логическими вентилями в классической информатике, называются квантовыми вентилями. При этом для квантовых алгоритмов введено понятие универсального набора квантовых вентилях, к которым могут быть сведены сколь угодно сложные алгоритмы.

Такие универсальные наборы обязательно включают простые логические вентили, которые выполняются над отдельными кубитами (однокубитовые вентили) и, что намного сложнее, над парами кубитов (двухкубитовые вентили). Поскольку двухкубитовые вентили требуют управления взаимодействием реальных физических систем, их намного сложнее реализовать с высокой точностью. Именно поэтому точность двухкубитовых вентилях рассматривается, как одна из важнейших характеристик любого квантового процессора, наряду с числом содержащихся в нем кубитов. Еще одной важной характеристикой является топология квантового процессора – могут ли выполняться двухкубитовые вентили между произвольными кубитами (как в ионных системах), или только между ближайшими соседями (многие реализации сверхпроводящих и атомных процессоров).

Действие вентиля X описывается матрицей Паули σ_x , умноженной на вектор состояния кубита. Таким образом, вентиль X описывает преобразование $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$, $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$, что эквивалентно классическому вентилю «Не». Но, в отличие от классического вентиля, квантовый вентиль может преобразовать произвольную квантовую суперпозицию состояний

кубита. Преобразование произвольной квантовой суперпозиции выглядит следующим образом: $a|0\rangle + b|1\rangle \rightarrow a|1\rangle + b|0\rangle$.

Вентиль Адамара не имеет классического аналога. Этот вентиль создает квантовые суперпозиции в соответствии с правилами $|0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ и $|1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$. Его действие может быть описано матрицей Адамара, которую нужно умножить на вектор состояния:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Для реализации произвольного квантового алгоритма необходимо, помимо однокубитовых вентилях, уметь выполнять и двухкубитовые вентили, например, CNOT, изображенный на рис. 1. Этот вентиль аналогичен операции «Исключающее ИЛИ». При выполнении этого вентиля состояние контролируемого кубита $|t\rangle$ инвертируется в том случае, если контролирующий кубит $|c\rangle$ находился в состоянии $|1\rangle$. Состояние системы из двух кубитов преобразуется по правилам $|00\rangle \rightarrow |00\rangle$, $|01\rangle \rightarrow |01\rangle$, $|10\rangle \rightarrow |11\rangle$, $|11\rangle \rightarrow |10\rangle$. Матрица такого преобразования имеет вид:

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

и описывает преобразование четырехмерных векторов состояний системы из двух кубитов.

С помощью вентиля CNOT можно создать квантово-запутанные состояния системы из двух кубитов. Такие состояния невозможно представить в виде произведения состояний отдельных кубитов. Впервые они были рассмотрены в известной статье Эйнштейна, Подольского и Розена в 1935 году [25]. За экспериментальные исследования квантово-запутанных состояний в 2022 году была присуждена Нобелевская премия по физике [3].

Мы рассмотрели отдельные логические вентили – элементарные блоки любого квантового алгоритма. Сами квантовые алгоритмы могут быть достаточно сложными. Выделяют несколько классов квантовых алгоритмов. Например, придуманный Питером Шором алгоритм факторизации больших чисел [7] основан на квантовом преобразовании Фурье – аналоге дискретного преобразования Фурье, широко использующегося в современной вычислительной математике. Другой распространенный класс алгоритмов – это алгоритмы поиска, позволяющие выделить одно квантовое состояние из множества.

4. Элементарная база квантовых вычислений. В 1995 году Давид Ди Винченцо сформулировал критерии [26], которым должна удовлетворять физическая система для создания квантового компьютера:

Масштабируемость: квантовый регистр должен состоять из большого (порядка 10^3 - 10^6) числа кубитов – двухуровневых квантовых систем.

Инициализация: перед началом квантовых вычислений нужно «стереть» начальное состояние квантового регистра и приготовить кубиты в заданное начальное состояние.

Устойчивость к декогерентизации: Состояния кубитов не должны разрушаться в течение длительного времени по сравнению с временем выполнения отдельных логических вентилях, что позволит выполнять квантовую коррекцию ошибок. При успешной коррекции ошибок ограничения на глубину алгоритмов, связанные с временем жизни квантового состояния регистра, снимаются.

Универсальный набор логических вентилях: необходимо выполнять однокубитовые и двухкубитовые квантовые вентили.

Измерение: необходимо измерить конечное состояние регистра с достаточно высокой точностью.

На рис. 2 схематически изображены некоторые перспективные физические платформы для квантовых вычислений. Основные принципы сверхпроводящего квантового процессора показаны на рис. 2 (а). Идея сверхпроводящего кубита была впервые предложена в 1999 году [27]. Сверхпроводящие кубиты основываются на эффекте Джозефсона, который заключается в способности электронов (а точнее, куперовских пар электронов) проникать через разрыв в сверхпроводящей электрической цепи. Сверхпроводящее кольцо с двумя джозефсоновскими контактами представляет собой сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство. Противоположные направления тока в сверхпроводящем кольце могут рассматриваться, как различные состояния сверхпроводящего кубита. Сверхпроводящие процессоры Google Sycamore и Willow представляют собой чипы, в которых каждый кубит (изображенный крестом на рисунке) соединяется с четырьмя ближайшими соседями с помощью специальных соединительных модулей (изображены прямоугольниками). Квантовый процессор IBM Condor состоит из 1121 кубитов [11]. Этот чип помещается в криостат, в котором охлаждается с помощью жидкого гелия.

Ионная платформа изображена на рис. 2(б) [28]. Эксперимент происходит в условиях сверхвысокого вакуума. Ионы захватываются в области между электродами, а затем с помощью лазерного излучения их движение «замораживается» за счет механического действия света. Образуется линейная цепочка ионов, которая может колебаться, как показано на рисунке в виде последовательности кадров – цепочка либо двигается целиком, либо, например, растягивается и сжимается. Через возбуждение таких колебаний можно выполнять двухкубитовые вентили для любой пары ионов в цепочке, даже если эти ионы находятся далеко друг от друга. Преимущество ионной платформы – отсутствие ограничений на взаимодействие далеких друг от друга кубитов и высокая точность двухкубитовых вентилей, а также относительная технологическая простота такой системы. Недостаток – увеличение числа кубитов в такой цепочке до более чем несколько десятков оказывается чрезвычайно трудным.

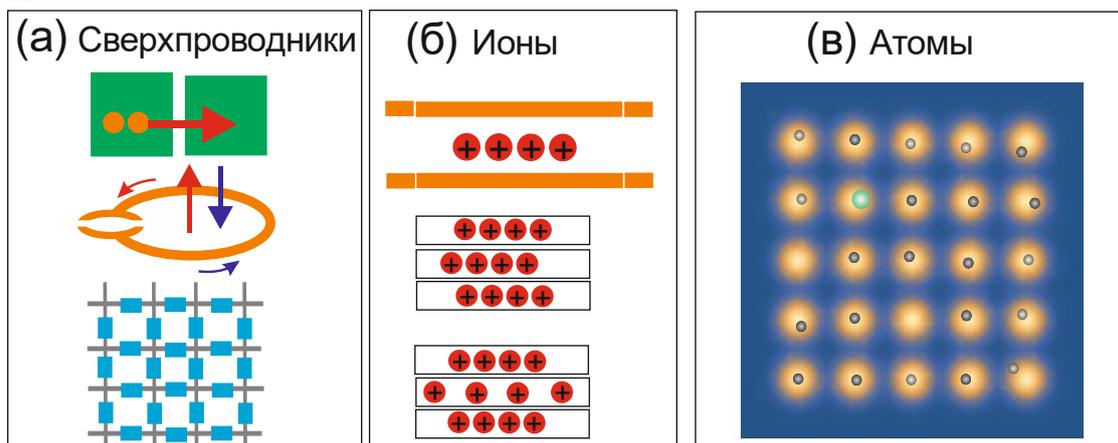


Рис. 2. (а) Сверхпроводящая платформа для квантовых вычислений, сверху вниз – переход Джозефсона, сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство (СКВИД), архитектура сверхпроводящего квантового процессора; (б) Ионная платформа для квантовых вычислений, сверху вниз – положительно заряженные ионы в ловушке, колебания цепочки ионов как целого, дышащая колебательная мода – растяжение и сжатие цепочки; (в) Атомная платформа для квантовых вычислений, изображены ультрахолодные атомы в массиве оптических пинцетов, показаны дефекты в массиве и переход атома в другое квантовое состояние в результате лазерного возбуждения

Атомная платформа изображена на рис. 2(в) [29]. Эксперимент также проводится в вакуумной камере или высоковакуумной стеклянной ячейке, в которой в небольшой концентрации присутствует газ каких-либо атомов (чаще всего щелочных или щелочноземельных металлов). Под действием лазерного излучения атомы «замораживаются», а затем захватываются в оптические пинцеты (Нобелевские премии 1997 и 2023 годов). После этого с помощью лазерного излучения выполняются квантовые вентили. Атомная платформа имеет практически неограниченные возможности масштабирования – уже сейчас продемонстрированы 6100 атомных кубитов [30]. В то же время, точные квантовые вентили между далекими атомами сделать довольно трудно. В отличие от ионов и сверхпроводящих кубитов, из-за потерь атомов в таких массивах быстро возникают дефекты, которые требуется заполнять. Как ионная, так и атомная платформа позволяют работать при комнатной температуре.

Список действующих в настоящее время квантовых процессоров включает несколько десятков сверхпроводящих систем (IBM, Google, Intel, Rigetti, Oxford Quantum Circuits, Chinese Academy of Sciences и др.), ионные (IonQ, Quantinuum), атомные системы (Atom Computing, QuEra), а также более экзотические – азотные вакансии в алмазах, фотонные системы, квантовые точки, ядерный магнитный резонанс [31].

С помощью ChatGPT 5.2 был проведен анализ наиболее значимых технологических достижений для различных физических платформ. Было предложено выбрать 1-2 публикации, имеющих первостепенное значение для развития каждой платформы, исключая статьи, уже отмеченные среди ранее приведенных высокоцитируемых публикаций. Результаты подбора приведены в Таблице 2. Следует отметить, что ограничение в 1-2 публикации для каждой платформы является довольно сложным для обработки. Потребовалось отдельно исключить из результатов поиска подборки публикаций по ключевым словам, со ссылками на Google Scholar. Некоторые ссылки потребовали обновления и уточнения. Следует отметить, что традиционные поисковые платформы оказываются более эффективными для анализа самых новых и последних результатов, из-за неизбежных задержек, требуемых для обучения обновляемых больших языковых моделей.

Таблица 2. Наиболее значимые технологических достижения применительно к физическим платформам для квантовых вычислений в период с 2020 года

Год	Физическая платформа	Статья для иллюстрации	Технологическое значение результата	
2023	Сверхпроводники: демонстрация квантовой коррекции ошибок	Kim et al., Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance [32]	Демонстрация повторяемых циклов квантовой коррекции ошибок необходима, как предварительный этап перед полной коррекцией ошибок	Nature
2023	Сверхпроводники: защищенные от шумов квантовые вентили	Puri et al., “Bias-preserving gates with stabilized cat qubits” [33]	Стабилизация вентилей путем аппаратного управления уровнем шума – важно для эффективной квантовой коррекции ошибок	Science Advances

2023	Ультрахолодные ионы: ионный транспорт	Pino et al., "Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture" [34]	Ионный транспорт как технология для модульного масштабирования ионной платформы	Nature
2023	Нейтральные атомы: измерения в процессе выполнения алгоритмов	Graham et al., "Midcircuit Measurements on a Single-Species Neutral Alkali Atom Quantum Processor" [35]	Прогресс в реализации элементов квантовой коррекции ошибок с нейтральными атомами	Phys. Rev. X
2023	Нейтральные атомы: точные двухкубитовые вентили в больших массивах	Evered et al., "High-fidelity parallel entangling gates on a neutral-atom quantum computer" [36]	Улучшение точности вентилей в больших массивах, необходимое для реализации квантовой коррекции ошибок	Nature
2023	Спиновые кубиты в кремнии: многокубитовые вентили, интеграция	Weinstein et al., "Universal logic with encoded spin qubits in silicon" [37]	Демонстрация программируемых многокубитовых вентилей в спиновых кубитах на кремнии	Nature
2025	Фотоника: однофотонное детектирование на чипах	Raj et al., "Waveguide integrated superconducting nanowire single-photon detectors for integrated photonics" [38]	Интеграция сверхпроводящих нанопроволочных детекторов одиночных фотонов на чипе	Journal of Physics D: Applied Physics

Приведенные в Таблице 2 технологические публикации представляют интерес для оценки перспектив развития квантовых вычислений на следующем этапе. Видно, что в Таблице 2 присутствует широкий перечень технических платформ, которые станут в ближайшем будущем основой для реализации квантовых алгоритмов с большим числом кубитов.

5. Квантовая коррекция ошибок. С увеличением количества физических кубитов развитие технологий квантовых вычислений перешло на следующий этап – квантовой коррекции ошибок [39]. Важность этого направления на современном этапе хорошо видна из Таблиц 1 и 2. В связи с этим целесообразно отдельно рассмотреть основные принципы квантовой коррекции ошибок.

Исходная идея квантовой коррекции ошибок довольно проста – квантовая информация кодируется в состояниях нескольких физических кубитов, образующих так называемый логический кубит, например, $a|\bar{0}\rangle + b|\bar{1}\rangle = a|00 \dots 0\rangle + b|11 \dots 1\rangle$. Для кода коррекции ошибок введено обозначение $[[n, k, d]]$, где n – число физических кубитов, кодирующих k логических кубитов, а d – расстояние кода, или минимальное количество ошибок, произошедших с физическими кубитами, которые приводят к превращению одного логического состояния в другое, что эквивалентно расстоянию Хэмминга для двух битовых строк. Обозначения параметров квантового кода коррекции ошибок эквивалентны классическим для линейного кода, где n – размер кодового слова, k – число бит информационного слова, d – расстояние кода. Основная трудность в применении классических методов коррекции ошибок к квантовым системам заключается в следующем. Во-первых, состояние квантового бита

невозможно скопировать. Во-вторых, помимо классических ошибок вида «переворот бита», то есть $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ и $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$ существуют так называемые фазовые ошибки, например, $|1\rangle \rightarrow -|1\rangle$.

Самый простой код коррекции ошибок – это трехкубитовый код повторения $[[3, 1, 3]]$, где $|\bar{0}\rangle = |000\rangle$ и $|\bar{1}\rangle = |111\rangle$, позволяющий исправлять ошибки вида «переворот бита», то есть $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ и $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$. Классическая коррекция ошибок происходит в три этапа: детектирование ошибки, обработка ошибки, исправление ошибки. Квантовая коррекция ошибок выполняется по аналогии. Простейшая схема исправления квантовых ошибок вида «переворот бита» приведена на рис. 3(а). Шаг 1 изображает приготовление начального логического состояния $a|\bar{0}\rangle + b|\bar{1}\rangle$. Для этого используются два вентиля CNOT. Ошибка в одном бите возникает на шаге 2. Для её исправления потребуются вспомогательные кубиты, инициализированные в состояние $|0\rangle$ (шаг 3). Чтобы обнаружить, в каком именно кубите возникла ошибка, применяются коды стабилизаторов (шаги 4 и 5). Результат измерения состояний вспомогательных кубитов позволит определить синдром ошибки – состояние какого из физических кубитов будет отличаться от состояния двух остальных. После этого состояние этого кубита можно будет изменить, выполнив корректирующую процедуру на шаге 6, например, операцию «HE».

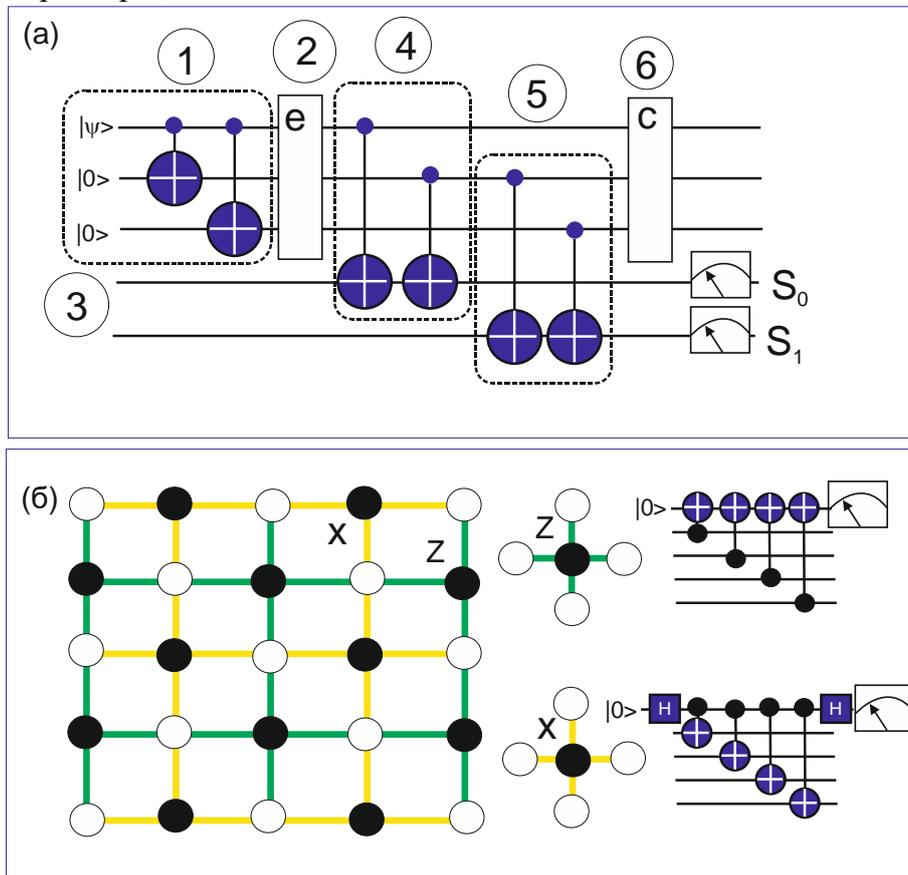


Рис. 3. (а) Простейший код квантовой коррекции ошибок (1) – приготовление начального состояния, (2) – возникновение ошибки, (3) – инициализация вспомогательных кубитов, (4,5) – коды стабилизаторов для генерации синдрома ошибки, (6) – исправление ошибки; (б) Поверхностный код коррекции ошибок. Пустые кружки – кубиты данных, закрашенные кружки – вспомогательные кубиты. Для генерации синдрома ошибки состояние кубита данных запутывается с состояниями четырех ближайших вспомогательных кубитов.

Квантовые схемы иллюстрируют коды стабилизаторов

Возможности такого кода повторения ограничены. Поэтому в современных экспериментах применяются поверхностные коды коррекции ошибок, которые хорошо соответствуют топологии современных квантовых процессоров [40]. Схема поверхностного кода приведена на рис. 3(б). Пустые кружки – кубиты данных, закрашенные кружки – вспомогательные кубиты. Код стабилизаторов генерируется путем квантового запутывания состояния вспомогательного кубита с четырьмя соседними кубитами данных. Для определения синдрома ошибки вида «переворот бита» используется код стабилизатора, обозначенный зеленым цветом, а для ошибки вида «переворот фазы» – код стабилизатора, обозначенный желтым цветом. Схематически оба кода изображены на рис. 3(б) в виде квантовых схем. Если ошибки в кубите данных не происходит, то результат измерения синдрома не изменяется между последовательными измерениями. В недавней работе [41] для 72-кубитного сверхпроводящего процессора было продемонстрировано, что коррекция ошибок с помощью поверхностных кодов позволяет преодолеть порог ошибок. Таким образом, разрушение квантовых состояний оказывается медленнее, чем исправление ошибок, что открывает возможности для увеличения глубины квантовых алгоритмов и в целом снимает ограничения третьего критерия диВинченцо.

7. Генерация квантовых кодов с использованием ChatGPT. ChatGPT является мощным инструментом программирования, который может применяться и для квантовых алгоритмов [43]. Для тестирования его возможностей применительно к квантовым вычислениям чат-боту было предложено написать пример простейшей программы для реализации поверхностного кода квантовой коррекции ошибок с использованием разработанной компанией IBM библиотеки Qiskit [44], и визуализировать квантовую схему и результаты коррекции кода.

Для упрощения интерпретации результатов было предложено построить код коррекции ошибок с расстоянием 3 и ограничиться коррекцией ошибок вида «переворот бита». Схема расположения кубитов, построенная сгенерированным кодом, приведена на рис. 4(а). Здесь индексом d (data) обозначены кубиты данных, а индексом a (ancilla) – вспомогательные кубиты.

Линии, соединяющие кубиты, указывают на выполнение двухкубитовых вентилях CNOT, в которых кубит данных является контролирующим, а вспомогательный кубит – контролируемым, что соответствует коду Z стабилизатора на рис. 4(б). В сгенерированной квантовой схеме была внесена ошибка вида «переворот бита» применительно к кубиту $d4$.

Синдром ошибки был получен путем измерения состояний вспомогательных кубитов. Переворот бита $d4$ приводит к инверсии состояний всех вспомогательных кубитов, в результате чего результат измерения синдрома является строкой «1111». Результат моделирования измерения синдрома с использованием симулятора Aer приведен на рис. 4(б) и соответствует ожидаемому. Результат измерения состояний кубитов данных $d0-d9$ приведен на рис. 4(в). Переворот кубита $d4$ виден как измерение строки «000010000», где состояние кубита $d4$ оказалось логической единицей. После измерения синдрома ошибок состояние кубитов данных может быть скорректировано путем инверсии состояния соответствующего бита в зависимости от значения измеренного синдрома. Результат коррекции приведен на рис. 4(г) – все кубиты вернулись в исходное состояние логического нуля. Следует отметить, что квантовая схема восстанавливает исходное состояние регистра независимо от того, для какого кубита данных была внесена ошибка. Таким образом, средствами ChatGPT был успешно сгенерирован демонстрационный код, иллюстрирующий основные принципы квантовой коррекции ошибок.

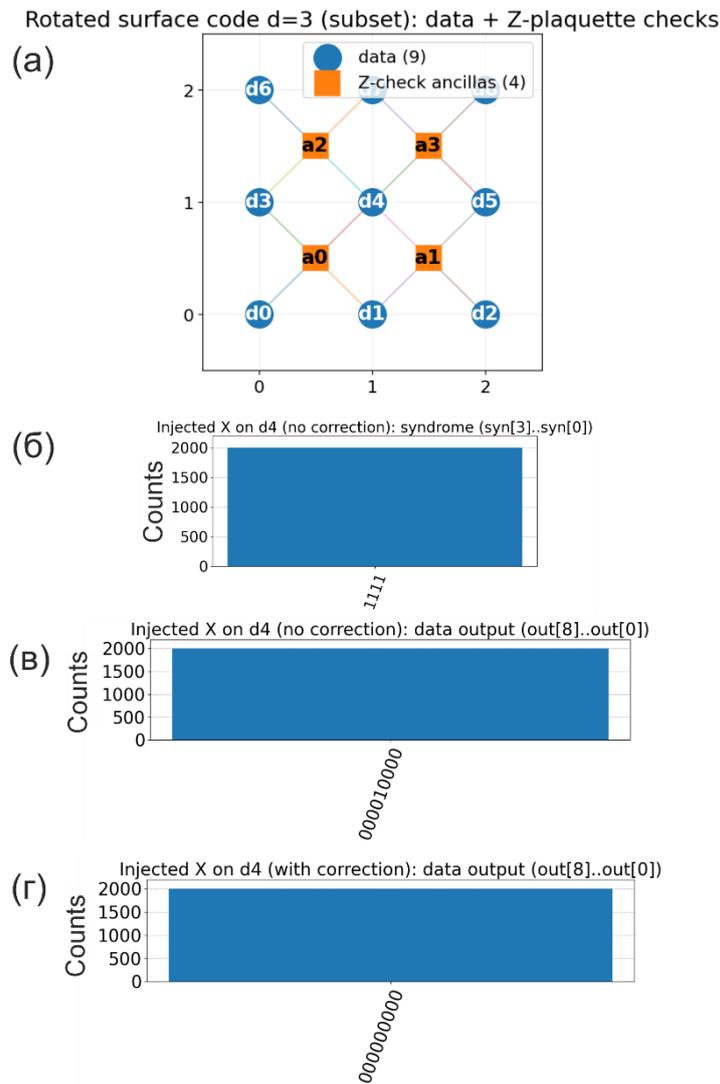


Рис. 4. (а) схема поверхностного кода для коррекции ошибок вида «переворот бита». (б) Измеренный синдром ошибок в случае, когда ошибка внесена для бита d4. (в) Результат измерения кубитов данных без коррекции ошибок. (г) Результат измерения кубитов данных с коррекцией ошибок по измеренному синдрому

8. Облачные системы для квантовых вычислений. Хотя облачный доступ к квантовым процессорам выглядел очевидным решением, компания IBM первой предоставила доступ к своим квантовым компьютерам неограниченному кругу пользователей. Тем самым она в некотором смысле повторила свой успех 1980-х годов, когда за счет открытой архитектуры был создан стандарт персонального компьютера IBM PC. Экосистема IBM объединяет реальные квантовые процессоры, доступ к которым предоставляется в порядке очереди, симуляторы квантовых процессоров с близкими техническими характеристиками, визуальный редактор квантовых схем и Qiskit - библиотеку для программирования квантовых процессоров для языка Python [43]. Особенность этой библиотеки заключается в том, что мгновенный доступ к квантовому симулятору для моделирования квантовых схем и к реальному квантовому процессору реализованы максимально похожим образом. Это дает пользователю возможность отработать свою квантовую схему на квантовом симуляторе, а уже потом поставить ее в очередь для запуска на квантовом процессоре. В результате, в 2024 году в мире более 600 тысяч пользователей запускали программы на квантовых процессорах IBM. В настоящее время компания IBM блокирует доступ к своим квантовым процессорам для пользователей из России и Китая, но библиотека Qiskit остается общедоступной. Компания

Google разработала для пользователей симулятор Cirq для языка Python, который удобно запускать в онлайн режиме в среде Google Colab [44], но без доступа к реальным квантовым процессорам его популярность оказалась существенно ниже. Компания Microsoft разработала язык квантового программирования Q Sharp [45], который тоже не отличается большой популярностью и используется, по-видимому, главным образом специалистами самой компании для программирования различных квантовых процессоров, включая сверхпроводящую и ионную платформы. В настоящее время можно получить облачный доступ к квантовым процессорам Quafu Пекинской академии квантовых вычислений, где используются совместимые с Qiskit библиотеки [46]. В России существует облачная платформа Vauman Ostillion для гибридного квантово-классического вычислительного комплекса на базе сверхпроводящего сопроцессора [47].

Заключение. В статье дан краткий обзор современного состояния дел в области квантовых вычислений. Этот обзор включает оценку наиболее важных результатов последних лет и перспективных приложений квантовых компьютеров, полученную в том числе с помощью больших языковых моделей, основные принципы квантовых вычислений, сравнение платформ для их физической реализации, основные идеи квантовой коррекции ошибок, благодаря которым в ближайшие годы должно быть достигнуто значительное увеличение глубины квантовых алгоритмов. Именно экспериментальная реализация квантовой коррекции ошибок в настоящее время является магистральным направлением развития квантовых процессоров. В то же время, принципиальное значение имеет поиск первых практических приложений квантовых компьютеров, которые стали потенциально возможны после демонстрации квантового превосходства.

В качестве примера с помощью больших языковых моделей сгенерирован простейший алгоритм реализации поверхностного кода квантовой коррекции ошибок для среды квантового программирования IBM Qiskit. Верификация алгоритма проведена с помощью общедоступного квантового симулятора IBM Aer.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта РНФ 23-42-00031.

Список источников

1. Борн М. О квантовой механике / М. Борн, П. Иордан // Успехи физических наук, 1977. – Т. 122, вып. 4. – С. 586-611.
2. Quantum 2025, available at: <https://quantum2025.org/> (accessed: 10/29/2025).
3. Nobel Prize, available at: www.nobelprize.org (accessed: 10/29/2025)
4. Nobel Prize, Interview with Michel Devoret, available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/devoret/interview/> (accessed: 10/29/2025)
5. Nobel Prize, Interview with John Martinis, available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/martinis/interview/> (accessed: 10/29/2025)
6. Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 2019, vol. 574, pp. 505–510, DOI: 10.1038/s41586-019-1666-5.
7. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)*. IEEE, 1994, pp. 124-134.
8. King A.D., Nocera A., Rams M.M., et al. Beyond-classical computation in quantum simulation. *Science*, 2025, vol. 388, pp. 199-204, DOI: 10.1126/science.ado6285
9. Preskill J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2018, vol. 2, p. 79, DOI: 10.22331/q-2018-08-06-79.
10. Huang H.Y., Choi S., McClean J.R., et al. The vast world of quantum advantage. *arXiv*, DOI:10.48550/arXiv.2508.05720
11. AbuGhanem M. IBM Quantum computers: evolution, performance, and future directions. *The Journal of supercomputing*, 2025, vol. 81, p. 687, DOI: 10.1007/s11227-025-07047-7
12. Bravyi S., Dial O., Gambetta J.M., Gil D., Nazario Z. The future of quantum computing with superconducting qubits. *Journal of Applied Physics*, 2022, vol. 132, p. 160902, DOI: 10.1063/5.0082975.

13. BlueQubit. Google's Quantum Computing Chip Willow, available at: <https://www.bluequbit.io/googles-quantum-computing-chip-willow> (accessed: 10/29/2025)
14. McArdle S., Endo S., Aspuru-Guzik A., Benjamin S.C., Yuan X. Quantum computational chemistry. *Reviews of modern physics*, 2020, vol. 92, p. 015003, DOI: 10.1103/RevModPhys.92.015003
15. Kjaergaard M., Schwartz M.E., Braumüller J., et al. Superconducting qubits: current state of play. *Annual review of condensed matter physics*, 2020, vol. 11, p. 369, DOI: 10.1146/annurev-conmatphys-031119-050605
16. Zhong H.-S., Wang H., Deng Y.-H. et al. Quantum computational advantage using photons. *Science*, 2020, vol. 370, pp. 1460, DOI: 10.1126/science.abe8770.
17. Cerezo M., Arrasmith A., Babbush R. et al. Variational quantum algorithms. *Nature reviews physics*, 2021, vol. 3, p. 625, DOI: 10.1038/s42254-021-00348-9
18. Wu Y., Bao W.-S., Cao S. et al. Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor. *Physical review letters*, 2021, vol. 127, p. 180501, DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.180501.
19. Endo S., Cai Z., Benjamin S.C., Yuan X. Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation. *Journal of the physical society of Japan*, 2021, vol. 90, p. 032001, DOI: 10.7566/JPSJ.90.032001.
20. Bharti K., Cervera-Lierta A., Kyaw T.H. et al. Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms. *Reviews of modern physics*, 2022, vol. 94, p. 015004, DOI: 10.1103/RevModPhys.94.015004.
21. Tilly J., Chen H., Cao S. et al. The Variational quantum eigensolver: a review of methods and best practices. *Physics reports*, 2022, vol. 986, p. 1, DOI: 10.1016/j.physrep.2022.08.003
22. Madsen L.S., Laudenbach F., Askarani M.F. et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. *Nature*, 2022, vol. 606, p. 75, DOI: 10.1038/s41586-022-04725-x.
23. Kim Y., Eddins A., Anand S. et al. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance. *Nature*, 2023, vol. 618, p. 500, DOI: 10.1038/s41586-023-06096-3.
24. Нильсен М. Квантовые вычисления и квантовая информация / М. Нильсен, И. Чанг. – М.: Мир, 2006. – 822 с.
25. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Physical Review*, 1935, vol. 47, pp. 777–780, DOI: 10.1103/PhysRev.47.777.
26. DiVincenzo D.P. Quantum Computation. *Science*, 1995, vol. 270, no. 5234, p. 255, DOI: 10.1126/science.270.5234.255.
27. Nakamura Y., Pashkin Yu.A., Tsai J.-S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. *Nature*, 1999, vol. 398, pp. 786-788, DOI: 10.1038/19718.
28. Cirac J.I., Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions. *Physical review letters*, 1995, vol. 74, no. 20, pp. 4091-4094, DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.4091.
29. Briegel H.-J., Calarco T., Jaksch D., et al. Quantum computing with neutral atoms. *Journal of Modern Optics*, 2000, vol. 47, no. 14-15, pp. 415-451.
30. Manetsch H.J., Nomura G., Bataille E. et al. A tweezer array with 6,100 highly coherent atomic qubits. *Nature*, 2025, vol. 647, p. 60, DOI: 10.1038/s41586-025-09641-4.
31. List of quantum processors, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_quantum_processors (accessed: 10/29/2025)
32. Kim Y., Eddins A., Anand S. et al. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance. *Nature*, 2023, vol. 618, p. 500, DOI: 10.1038/s41586-023-06096-3.
33. Puri S., St-Jean L., Gross J.A. et al. Bias-preserving gates with stabilized cat qubits. *Science Advances*, 2020, vol. 6, no. 34, DOI: 10.1126/sciadv.aay5901.
34. Pino J.M., Dreiling J.M., Figgatt C. et al. Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture. *Nature*, 2021, vol. 592, p. 209, DOI: 10.1038/s41586-021-03318-4.
35. Graham T.M., Phuttitarn L., Chinnarasu R. et al. Midcircuit measurements on a single-species neutral alkali atom quantum processor. *Physical Review X*, 2023, vol. 13, p. 041051, DOI: 10.1103/PhysRevX.13.041051.
36. Evered S.J., Bluvstein D., Kalinowski M. et al. High-fidelity parallel entangling gates on a neutral-atom quantum computer. *Nature*, 2023, vol. 622, p. 268, DOI: 10.1038/s41586-023-06481-y.
37. Weinstein A.J., Reed M.D., Jones A.M. et al. Universal logic with encoded spin qubits in silicon. *Nature*, 2023, vol. 615, p. 817, DOI: 10.1038/s41586-023-05777-3.
38. Raj V., Azem A., Patterson M. Waveguide integrated superconducting nanowire single-photon detectors for integrated photonics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2025, vol. 58, p. 243001, DOI: 10.1088/1361-6463/add946.
39. Devitt S.J., Munro W.J., Nemoto K. Quantum error correction for beginners. *Reports on Progress in Physics*, 2013, vol. 76, no. 7, p. 076001. DOI: 10.1088/0034-4885/76/7/076001.
40. Fowler A.G., Mariantoni M., Martinis J.M., Cleland A.N. Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation. *Physical Review A*, 2012, vol. 86, p. 032324. DOI: 10.1103/PhysRevA.86.032324.

41. Acharya R. et al. Quantum error correction below the surface code threshold. *Nature*, 2025, vol. 638, pp. 920–926, DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y.
42. Dupuis N. et al. Qiskit Code Assistant: Training LLMs for generating Quantum Computing Code. arXiv, 2024, available at: <https://arxiv.org/abs/2405.19495v1> (accessed: 10/29/2025).
43. Qiskit. GitHub repository, available at: <https://github.com/Qiskit/qiskit> (accessed: 10/29/2025).
44. Cirq. Available at: <https://quantumai.google/cirq> (accessed: 10/29/2025).
45. Microsoft. Introduction to Q#, available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/quantum/qsharp-overview> (accessed: 10/29/2025).
46. Quafu Quantum Computing Platform. Available at: <https://quafu-sqc.baqis.ac.cn/framework/home> (accessed: 10.29.2025).
47. Octillion Project. Available at: <https://octillion.bmstu.ru/> (accessed: 10/29/2025).

Бетеров Илья Игоревич. К.ф.-м.н., с.н.с. Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, доцент Новосибирского государственного университета, автор теоретических и экспериментальных исследований по применению ультрахолодных нейтральных атомов для квантовых вычислений. AuthorID: 120600, SPIN: 3644-0610, ORCID: 0000-0002-6596-6741. beterov@isp.nsc.ru, 630090, Россия, Новосибирск.

Чэнь Цзюньси. Аспирант НГУ, инженер Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, AuthorID: 1330964; SPIN: 5023-4741, ORCID: 0009-0001-2107-2543. 875709591@qq.com. 630090, Россия, Новосибирск.

Ложкина Екатерина Андреевна. Студентка Новосибирского государственного университета, ORCID: 0009-0006-6209-8025, lozhechka2008@yandex.ru, 630090, Россия, Новосибирск.

UDC 530.145.83

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.001

Quantum computing on perspective platforms

Ilya I. Beterov^{1,2}, Chen Junxi^{1,2}, Ekaterina A. Lozhkina²

¹Rzhanov institute of semiconductor physics SB RAS, Russia, Novosibirsk

²Novosibirsk state university, Russia, Novosibirsk, beterov@isp.nsc.ru

Abstract. This work presents a brief overview of the current state of quantum computing. In recent years, this field of research has seen rapid progress, primarily in the development of experimental methods for controlling the states of multiparticle quantum systems. At the same time, the question of the practical applications of quantum computing remains open. The most promising areas, where such applications may emerge in the coming years, include solving problems in quantum chemistry, materials science, and various optimization problems. Current experimental work on the implementation of various quantum algorithms using intermediate-scale quantum processors with tens and hundreds of qubits—two-level quantum systems that are the fundamental logical elements of a quantum computer—has generated considerable interest in the scientific community. This is clearly demonstrated by the results of a bibliometric analysis conducted using Google Scholar and ChatGPT.

The experimental implementation of quantum computing is currently characterized by competition among several physical platforms, with the superconducting platform leading the way, a feat recognized by the 2025 Nobel Prize in Physics. At the same time, alternative platforms—photons, ions, and neutral atoms—offer a number of potential advantages. The most significant development in experimental quantum computing in future years is quantum error correction, which should increase the depth of quantum algorithms and enable the implementation of the most complex universal quantum algorithms. The basic principles of quantum error correction and the implementation of a surface code that best suits the architecture of modern quantum processors are presented in the article.

Based on existing superconducting quantum processors, cloud access has been implemented, allowing researchers to conduct both numerical simulations and experiments on the implementation of quantum computing. The IBM Qiskit library, which has become the de facto standard, is widely used for this purpose. As an example, the paper presents a demonstration of elements of a surface code for quantum error correction, implemented using large language models.

Keywords: quantum computing, quantum computers, quantum error correction

Acknowledgements: This work is supported by Russian Science Foundation Grant No. 23-42-00031

References

1. Born M., Jordan P. On kvantovoy mekhanike [On quantum mechanics]. Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in physical sciences], 1977, vol. 122, no. 4, pp. 586-611.
2. Quantum 2025, available at: <https://quantum2025.org/> (accessed: 10/29/2025).
3. Nobel Prize, available at: www.nobelprize.org (accessed: 10/29/2025)
4. Nobel Prize, Interview with Michel Devoret, available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/devoret/interview/> (accessed: 10/29/2025)
5. Nobel Prize, Interview with John Martinis, available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/martinis/interview/> (accessed: 10/29/2025)
6. Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature, 2019, vol. 574, pp. 505–510, DOI: 10.1038/s41586-019-1666-5.
7. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS). IEEE, 1994, pp. 124-134.
8. King A.D., Nocera A., Rams M.M., et al. Beyond-classical computation in quantum simulation. Science, 2025, vol. 388, pp. 199-204, DOI: 10.1126/science.ado6285
9. Preskill J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. Quantum, 2018, vol. 2, p. 79, DOI: 10.22331/q-2018-08-06-79.
10. Huang H.Y., Choi S., McClean J.R., et al. The vast world of quantum advantage. arXiv, DOI: 10.48550/arXiv.2508.05720
11. AbuGhanem M. IBM Quantum computers: evolution, performance, and future directions. The Journal of supercomputing, 2025, vol. 81, p. 687, DOI: 10.1007/s11227-025-07047-7
12. Bravyi S., Dial O., Gambetta J.M., Gil D., Nazario Z. The future of quantum computing with superconducting qubits. Journal of Applied Physics, 2022, vol. 132, p. 160902, DOI: 10.1063/5.0082975.
13. BlueQubit. Google's Quantum Computing Chip Willow, available at: <https://www.bluequbit.io/googles-quantum-computing-chip-willow> (accessed: 10/29/2025)
14. McArdle S., Endo S., Aspuru-Guzik A., Benjamin S.C., Yuan X. Quantum computational chemistry. Reviews of modern physics, 2020, vol. 92, p. 015003, DOI: 10.1103/RevModPhys.92.015003
15. Kjaergaard M., Schwartz M.E., Braumüller J., et al. Superconducting qubits: current state of play. Annual review of condensed matter physics, 2020, vol. 11, p. 369, DOI: 10.1146/annurev-conmatphys-031119-050605
16. Zhong H.-S., Wang H., Deng Y.-H. et al. Quantum computational advantage using photons. Science, 2020, vol. 370, pp. 1460, DOI: 10.1126/science.abe8770.
17. Cerezo M., Arrasmith A., Babbush R. et al. Variational quantum algorithms. Nature reviews physics, 2021, vol. 3, p. 625, DOI: 10.1038/s42254-021-00348-9
18. Wu Y., Bao W.-S., Cao S. et al. Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor. Physical review letters, 2021, vol. 127, p. 180501, DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.180501.
19. Endo S., Cai Z., Benjamin S.C., Yuan X. Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation. Journal of the physical society of Japan, 2021, vol. 90, p. 032001, DOI: 10.7566/JPSJ.90.032001.
20. Bharti K., Cervera-Lierta A., Kyaw T.H. et al. Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms. Reviews of modern physics, 2022, vol. 94, p. 015004, DOI: 10.1103/RevModPhys.94.015004.
21. Tilly J., Chen H., Cao S. et al. The Variational quantum eigensolver: a review of methods and best practices. Physics reports, 2022, vol. 986, p. 1, DOI: 10.1016/j.physrep.2022.08.003
22. Madsen L.S., Laudenbach F., Askarani M.F. et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. Nature, 2022, vol. 606, p. 75, DOI: 10.1038/s41586-022-04725-x.
23. Kim Y., Eddins A., Anand S. et al. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance. Nature, 2023, vol. 618, p. 500, DOI: 10.1038/s41586-023-06096-3.
24. Nielsen M., Chuang I. Kvantovyye vychisleniya i kvantovaya informatsiya [Quantum Computation and Quantum Information]. Moscow, Mir [World] Publ., 2006, 822 p.
25. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? Physical Review, 1935, vol. 47, pp. 777–780, DOI: 10.1103/PhysRev.47.777.
26. DiVincenzo D.P. Quantum Computation. Science, 1995, vol. 270, no. 5234, p. 255, DOI: 10.1126/science.270.5234.255.
27. Nakamura Y., Pashkin Yu.A., Tsai J.-S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. Nature, 1999, vol. 398, pp. 786-788, DOI: 10.1038/19718.
28. Cirac J.I., Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions. Physical review letters, 1995, vol. 74, no. 20, pp. 4091-4094, DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.4091.

29. Briegel H.-J., Calarco T., Jaksch D., et al. Quantum computing with neutral atoms. *Journal of Modern Optics*, 2000, vol. 47, no. 14-15, pp. 415-451.
30. Manetsch H.J., Nomura G., Bataille E. et al. A tweezer array with 6,100 highly coherent atomic qubits. *Nature*, 2025, vol. 647, p. 60, DOI: 10.1038/s41586-025-09641-4.
31. List of quantum processors, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_quantum_processors (accessed: 10/29/2025)
32. Kim Y., Eddins A., Anand S. et al. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance. *Nature*, 2023, vol. 618, p. 500, DOI: 10.1038/s41586-023-06096-3.
33. Puri S., St-Jean L., Gross J.A. et al. Bias-preserving gates with stabilized cat qubits. *Science Advances*, 2020, vol. 6, no. 34, DOI: 10.1126/sciadv.aay5901.
34. Pino J.M., Dreiling J.M., Figgatt C. et al. Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture. *Nature*, 2021, vol. 592, p. 209, DOI: 10.1038/s41586-021-03318-4.
35. Graham T.M., Phuttitarn L., Chinnarasu R. et al. Midcircuit measurements on a single-species neutral alkali atom quantum processor. *Physical Review X*, 2023, vol. 13, p. 041051, DOI: 10.1103/PhysRevX.13.041051.
36. Evered S.J., Bluvstein D., Kalinowski M. et al. High-fidelity parallel entangling gates on a neutral-atom quantum computer. *Nature*, 2023, vol. 622, p. 268, DOI: 10.1038/s41586-023-06481-y.
37. Weinstein A.J., Reed M.D., Jones A.M. et al. Universal logic with encoded spin qubits in silicon. *Nature*, 2023, vol. 615, p. 817, DOI: 10.1038/s41586-023-05777-3.
38. Raj V., Azem A., Patterson M. Waveguide integrated superconducting nanowire single-photon detectors for integrated photonics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2025, vol. 58, p. 243001, DOI: 10.1088/1361-6463/add946.
39. Devitt S.J., Munro W.J., Nemoto K. Quantum error correction for beginners. *Reports on Progress in Physics*, 2013, vol. 76, no. 7, p. 076001. DOI: 10.1088/0034-4885/76/7/076001.
40. Fowler A.G., Mariantoni M., Martinis J.M., Cleland A.N. Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation. *Physical Review A*, 2012, vol. 86, p. 032324. DOI: 10.1103/PhysRevA.86.032324.
41. Acharya R. et al. Quantum error correction below the surface code threshold. *Nature*, 2025, vol. 638, pp. 920–926, DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y.
42. Dupuis N. et al. Qiskit Code Assistant: Training LLMs for generating Quantum Computing Code. *arXiv*, 2024, available at: <https://arxiv.org/abs/2405.19495v1> (accessed: 10/29/2025).
43. Qiskit. GitHub repository, available at: <https://github.com/Qiskit/qiskit> (accessed: 10/29/2025).
44. Cirq. Available at: <https://quantumai.google/cirq> (accessed: 10/29/2025).
45. Microsoft. Introduction to Q#, available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/quantum/qsharp-overview> (accessed: 10/29/2025).
46. Quafu Quantum Computing Platform. Available at: <https://quafu-sqc.baqis.ac.cn/framework/home> (accessed: 10.29.2025).
47. Octillion Project. Available at: <https://octillion.bmstu.ru/> (accessed: 10/29/2025).

Beterov Ilya Igorevich. *Ph.D. senior science researcher at Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, lecturer at Novosibirsk State University, research interests are focused on application of ultracold neutral atoms for quantum computing. AuthorID: 120600, SPIN: 3644-0610, ORCID: 0000-0002-6596-6741. betеров@isp.nsc.ru. 630090, Russia, Novosibirsk.*

Chen Junxi. *Ph.D. student at Novosibirsk State University, engineer at Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, AuthorID: 1330964; SPIN: 5023-4741, ORCID: 0009-0001-2107-2543. 875709591@qq.com. 630090, Russia, Novosibirsk.*

Lozhkina Ekaterina Andreevna. *Student at Novosibirsk State University lozhchka2008@yandex.ru, Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia.*

Статья поступила в редакцию 30.10.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2026; принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 10/30/2025; approved after reviewing 02/10/2026; accepted for publication 02/10/2026.