

Квантовые технологии: физические платформы, методы оценки, результаты и ограничения развития

Литературный обзор

Квантовые технологии: физические платформы, методы оценки, результаты и ограничения развития

2024

Аннотация

Квантовые технологии формируют междисциплинарную область, в которой эффекты квантовой физики превращаются в инструменты вычислений, моделирования, связи, сенсорики и метрологии. Цель обзора состоит в аналитическом сопоставлении основных направлений, физических платформ, методов проверки результатов и ограничений, определяющих переход от фундаментальных демонстраций к масштабируемым системам. Рассмотрены NISQ-вычисления, атомы Ридберга, гибридные и оптомеханические архитектуры, вычислительное моделирование материалов, квантовое оценивание параметров и энергоэффективная сверхпроводниковая логика. Показано, что квантовое преимущество не является единой характеристикой: его практическая значимость зависит от конкретной задачи, точности управления, устойчивости к шуму, измерительной процедуры, энергетических затрат и сложности интеграции. NISQ-устройства уже рассматриваются как потенциально ценные инструменты исследования многочастичной физики, однако шум ограничивает размер надёжно выполняемых схем. Атомные и гибридные платформы предоставляют взаимодополняющие ресурсы для вычислений, памяти, передачи и измерений, а оптомеханика расширяет область управляемых квантовых состояний. Основной нерешённой проблемой остаётся согласование физических преимуществ отдельных платформ с отказоустойчивостью, масштабируемостью, измеримой энергоэффективностью и системной инженерией.

Ключевые слова: квантовые технологии, квантовые вычисления, NISQ, квантовое моделирование, атомы Ридберга, гибридные системы, квантовое оценивание, оптомеханика, сверхпроводниковая логика.

Значение и границы области квантовых технологий

Квантовые технологии возникли на пересечении фундаментальной физики, информационных наук и инженерии. Их исходным ресурсом служат управляемые квантовые состояния, взаимодействия и измерения, которые используются не только для проверки фундаментальных теорий, но и для создания вычислительных, измерительных и коммуникационных устройств. В этом смысле квантовое поведение выступает одновременно объектом

исследования и технологическим ресурсом. Такое совмещение особенно характерно для оптомеханики, где изучение квантового движения связано с обработкой сигналов, зондированием и разработкой новых квантовых устройств [1].

Исторически современный этап часто описывается как «вторая квантовая революция»: если первая революция привела к установлению принципов квантовой механики и их использованию в физике вещества, то вторая связана с целенаправленным управлением отдельными квантовыми объектами и корреляциями между ними [2]. Однако технологический переход не сводится к переносу фундаментального результата в устройство. Для практической системы требуются специализированные источники и детекторы, методы управления, интерфейсы, средства коррекции ошибок, программные комплексы и инфраструктура эксплуатации. Поэтому область формируется как прикладная междисциплинарная система, а не как совокупность изолированных физических экспериментов [3][2].

Охват настоящего обзора включает четыре функционально связанные области: квантовые вычисления, квантовое моделирование, квантовую связь, а также квантовые сенсоры и метрологию. В анализ также включены физические платформы и инженерные решения, которые определяют реализуемость этих направлений: сверхпроводниковые схемы, атомные системы, гибридные архитектуры, оптомеханические устройства и программные средства моделирования материалов. Такая граница позволяет сопоставить не только заявленные функции технологий, но и условия, при которых физический эффект становится вычислительно, измерительно или энергетически значимым.

Ключевые понятия и постановка исследовательской проблемы

Квантовое моделирование направлено на воспроизведение поведения сложных квантовых систем, тогда как квантовые вычисления используют управляемую квантовую динамику для обработки информации. Сенсорные и метрологические приложения ориентированы на повышение чувствительности измерений, а квантовая связь — на передачу информации с использованием одиночных или запутанных фотонов и связанных с ними процедур проверки безопасности. Эти направления различаются функционально, но опираются на общую задачу: подготовить, преобразовать и измерить квантовое состояние с контролируемой погрешностью [3].

Квантовая технология в широком смысле охватывает не только уже сформировавшиеся приложения, но и линии развития, находящиеся на разных стадиях зрелости. К ним относятся квантовые информационные технологии, электромеханические системы, когерентная электроника, квантовая оптика и когерентные технологии материи [2]. Поэтому одинаковые слова «квантовое преимущество» могут обозначать различные явления: превосходство в специально выбранной вычислительной задаче, улучшение точности измерения, расширение диапазона моделируемых систем или принципиально проверяемую безопасность канала. Сопоставление таких результатов требует указания конкретной задачи и критерия сравнения.

Неодинакова и степень изученности направлений. Квантовая связь, моделирование, вычисления, сенсоры и метрология уже имеют устойчивые исследовательские программы, тогда как часть междисциплинарных платформ сохраняет преимущественно перспективный или экспериментальный характер. Дорожная карта европейского научного сообщества была связана с подготовкой 150-страничного документа и его последующим обновлённым резюме; в ней долгосрочные ожидания представлены как возможные траектории развития, а не как гарантированные технологические результаты [3]. Следовательно, исследовательская проблема состоит не в простом ранжировании платформ, а в установлении соответствия между физическим ресурсом, задачей, методом верификации и системными ограничениями.

Карта исследовательских направлений и физических платформ

Современный ландшафт квантовых технологий удобно описывать через сочетание решаемой задачи и используемого физического ресурса. Сверхпроводниковые NISQ-системы обеспечивают быстрое управление кубитами и рассматриваются как инструменты для исследования многочастичной квантовой физики. Атомы Ридберга используют воспроизводимость атомных систем, богатую структуру уровней и управляемые сильные взаимодействия. Гибридные архитектуры соединяют компоненты, оптимальные для передачи, хранения и обработки квантовой информации, а оптомеханические устройства используют взаимодействие света и механического движения. Наконец, вычислительные комплексы моделирования материалов создают программную инфраструктуру для анализа электронной структуры.

Таксономическая матрица квантовых платформ и условий их применимости

Платформа	Используемый ресурс	Основная задача	Преимущество	Ограничение или условие применимости
NISQ-системы	Управляемые квантовые состояния и операции над кубитами	Вычисления и исследование многочастичной физики	Возможность выполнять отдельные задачи при масштабе порядка 50-100 кубитов	Шум ограничивает размер схем, выполняемых надёжно
Атомы Ридберга	Долгоживущие многоуровневые состояния и сильные взаимодействия	Вычисления, измерение электромагнитных полей, квантовая оптика	Идентичность атомов и широкий диапазон связи с электромагнитными полями	Преимущество требует точного управления квантовыми числами и взаимодействиями
Гибридные системы	Сочетание фотонов, спинов и сверхпроводниковых элементов	Передача, память и обработка квантовой информации	Взаимодополняемость компонентов	Надёжная интеграция различных компонентов остаётся нерешённой задачей
Оптомеханические платформы	Квантовое движение и взаимодействие оптических и механических мод	Зондирование, обработка сигналов, подготовка состояний	Доступ к неклассическим механическим состояниям и запутанности	Практическая ценность зависит от качества подготовки и сохранения состояний
QUANTUM ESPRESSO	Численное моделирование электронной структуры	Моделирование материалов	Модульная открытая среда с различными типами псевдопотенциалов	Результат определяется выбранной моделью и вычислительными предпосылками

Для NISQ-подхода принципиально различать размер устройства и надёжность вычисле-

ния. Оценка диапазона примерно 50–100 кубитов указывает на возможность выполнения отдельных задач, превосходящих возможности современных классических цифровых компьютеров, но сама по себе не означает универсального превосходства или промышленной масштабируемости. Потенциальная ценность таких устройств прежде всего связывается с исследованием многочастичной квантовой физики и специализированными приложениями [4].

Атомы Ридберга образуют иную платформенную логику. Их состояния сравнительно долгоживущи и обладают множеством энергетических уровней, благодаря чему они могут взаимодействовать с электромагнитными полями в диапазоне более шести порядков частот. Идентичность атомов снижает проблемы изготовления и неоднородности, характерные для искусственных устройств, а сила взаимодействия управляется выбором главного квантового числа или орбитального углового момента. Это создаёт условия для приложений в вычислениях, измерении полей и квантовой оптике [5].

Гибридные системы не являются просто ещё одним типом устройства: их смысл состоит в распределении функций между компонентами. Фотоны удобны для передачи квантовой информации, слабо взаимодействующие спины — для долговременной памяти, а сверхпроводящие элементы — для быстрой обработки. Теоретические концепции уже сопровождаются первыми экспериментальными реализациями, однако ожидаемое преодоление ограничений отдельных платформ остаётся условным и зависит от качества соединения компонентов [6].

Оптомеханика расширяет карту платформ за счёт квантового движения механических элементов, связанных с оптическими или электромеханическими модами. Такие системы применяются для обработки и преобразования сигналов, квантового зондирования, исследования топологической физики и термодинамики малых систем. Регулярное достижение квантового режима делает возможными неклассические механические состояния и запутанность, но демонстрация этих состояний ещё не тождественна готовому прикладному устройству [1].

Особое место занимает программная инфраструктура моделирования. QUANTUM ESPRESSO объединяет расчёты электронной структуры и моделирование материалов на основе теории функционала плотности, плоских волн и псевдопотенциалов; в единой среде поддерживаются сохраняющие норму, ультрамягкие и проекторно-дополненные псевдопотенциалы. Открытая модульная архитектура позволяет добавлять алгоритмы и программные компоненты, связывая квантовое моделирование с коллективной разработкой вычислительных методов [7].

Методы и доказательная база

Доказательность результатов в квантовых технологиях формируется на нескольких уровнях. На физическом уровне проверяется подготовка состояния, управление взаимодействиями и регистрация сигнала. На вычислительном уровне оцениваются точность алгоритма, размер схемы и сравнение с классическими методами. На инженерном уровне рассматриваются интерфейсы, энергопотребление, охлаждение, стабильность и воспроизводимость. Смещение этих уровней приводит к тому, что демонстрация физического эффекта ошибочно интерпретируется как доказательство практической эффективности всей системы.

В моделировании материалов важна связь между вычислительным результатом и выбранной моделью. QUANTUM ESPRESSO использует теорию функционала плотности, плоские волны и псевдопотенциалы, то есть результат зависит от математического представления электронной структуры и параметров численного расчёта. Поэтому открытая и модульная программная архитектура повышает воспроизводимость и расширяемость вычислений, но не устраняет необходимость проверять физические предпосылки

конкретной модели [7].

В сенсорных и метрологических задачах ключевым становится не только наличие квантового сигнала, но и его оцениваемость. Она описывается отношением сигнал/шум и числом измерений, необходимым для достижения заданной относительной погрешности. Квантовая информация Фишера и симметричная логарифмическая производная задают формальный инструментарий для анализа предельной точности оценивания параметров [8]. Такой подход переводит разговор о «повышенной чувствительности» в количественную плоскость.

Особую методологическую сложность создают величины, которые не являются прямыми квантовыми наблюдаемыми. Запутанность и чистота представляют собой нелинейные функции матрицы плотности, поэтому их нельзя измерить одной непосредственной процедурой наблюдения. Их оценивание формулируется как задача оптимизации оценщика и требует косвенной реконструкции или специально выбранных измерительных схем. Тем самым заявленная точность зависит не только от состояния, но и от геометрии квантовой статистической модели, измерительного шума и числа повторений [8].

Инженерная доказательная база требует включать в оценку не только энергию отдельной операции. В сверхпроводниковой логике RSFQ существенная часть энергопотребления связана со статическим рассеянием мощности в резисторах постоянного смещения. Поэтому перспективность энергоэффективных семейств ERSFQ/eSFQ должна оцениваться вместе с характеристиками выходных интерфейсов и криогенной системы [9].

Уровни оценки квантовых технологий

Уровень	Основной вопрос	Показатели или процедуры
Физический	Воспроизводится ли квантовое состояние и управляемо ли взаимодействие?	Подготовка состояний, запутанность, регистрация сигнала
Вычислительный	Даёт ли устройство ценность для конкретной задачи?	Размер схемы, точность, сравнение с классическим вычислением
Измерительный	С какой погрешностью оценивается параметр?	Отношение сигнал/шум, число измерений, квантовая информация Фишера
Инженерный	Может ли система работать в составе масштабируемой инфраструктуры?	Операции на ватт, джоули на бит, интерфейсы, криогенная нагрузка

Таким образом, формальные пределы точности и показатели отдельных операций не заменяют системную оценку. Для вычислительных и коммуникационных систем всё более важными становятся операции на ватт и джоули на бит, однако эти метрики должны рассчитываться с учётом интерфейсов и инфраструктуры охлаждения. Именно совмещение физических, информационных и инженерных показателей позволяет отделить потенциальное преимущество архитектуры от реально достижимой эффективности [9].

Синтез результатов и основные дискуссии

Главная дискуссия в области квантовых технологий связана с условиями, при которых квантовое преимущество становится практически значимым. Исследовательская демонстрация физического эффекта является необходимой, но недостаточной: требуется показать ценность для определённой задачи, устойчивость результата к шуму и возможность

включения устройства в более широкую систему. Поэтому NISQ-вычисления, атомные сенсоры, оптомеханические эксперименты и гибридные устройства нельзя корректно сравнивать по одному универсальному показателю.

NISQ-подход привлекателен тем, что допускает работу с устройствами промежуточного масштаба и может быть полезен для исследования многочастичных систем. При этом диапазон примерно 50–100 кубитов характеризует возможность выполнения отдельных задач, а не готовность к универсальным вычислениям. Шум ограничивает глубину схем, которые можно выполнить надёжно, поэтому демонстрация превосходства в специально выбранной задаче должна отделяться от утверждения о широком вычислительном превосходстве [4].

Атомные платформы предлагают иной баланс свойств. Идентичность атомов и управляемые сильные взаимодействия уменьшают некоторые проблемы изготовления искусственных квантовых устройств и открывают приложения, выходящие за пределы вычислений, включая измерение электромагнитных полей. Их преимущество заключается не в универсальности как таковой, а в сочетании воспроизводимости, многоуровневой структуры и широкого диапазона взаимодействия с полями [5].

Гибридные архитектуры отвечают на противоположную проблему — недостаточную универсальность отдельных физических ресурсов. Распределение функций между фотонами, спинами и сверхпроводящими элементами потенциально позволяет объединить передачу, долговременное хранение и быстрое управление. Однако именно это преимущество создаёт новый класс рисков: несовместимость режимов, потери на интерфейсах и усложнение контроля могут нивелировать выигрыш от объединения компонентов. Поэтому гибридность следует оценивать как стратегию согласования свойств, а не как автоматически более совершенную архитектуру [6].

Оптомеханические системы демонстрируют, что квантовые технологии включают не только обработку дискретных кубитов. Подготовка квантовых состояний и создание запутанности в оптических и электромеханических платформах расширяют область применимых ресурсов до неклассического механического движения. Их результативность особенно очевидна на уровне фундаментального зондирования и преобразования сигналов, но переход к устойчивым прикладным системам требует сохранения состояния, контроля шума и совместимости с внешними интерфейсами [1].

Согласующей тенденцией для разных направлений является переход от демонстрации принципа к измеримой системной характеристике. В моделировании это проявляется в развитии открытых модульных вычислительных комплексов; в метрологии — в использовании квантовой информации Фишера и анализа числа измерений; в сверхпроводниковой логике — в переходе от оценки импульса или элемента схемы к показателям операций на ватт и джоулей на бит [7][8][9].

Тем самым центральный компромисс проходит между универсальностью, точностью, энергоэффективностью, устойчивостью к шуму и сложностью интеграции. NISQ-устройства обеспечивают доступ к новым режимам вычислений, но ограничены шумом; атомы Ридберга предлагают воспроизводимые и управляемые системы, но требуют специфического контроля; гибридные архитектуры объединяют взаимодополняющие ресурсы, но усложняют интерфейсы; сверхпроводниковая логика может быть энергоэффективной на уровне логических операций, однако общая эффективность зависит от криогенной инфраструктуры. Ни одна из рассмотренных платформ не устраняет все ограничения одновременно.

Ограничения, исследовательские пробелы и перспективы

Наиболее чётко ограничения проявляются в NISQ-вычислениях. Ошибки квантовых вентилей ограничивают размер схем, которые устройство способно выполнять надёжно. По-

этому дальнейшее продвижение за пределы NISQ связано не только с увеличением числа кубитов, но и с повышением точности операций, развитием коррекции ошибок и созданием полностью отказоустойчивых квантовых компьютеров [4]. Даже компьютер со 100 кубитами следует рассматривать прежде всего как важную веху на пути к более мощным системам, а не как устройство, автоматически вызывающее непосредственные общественные преобразования [4].

Гибридные устройства сталкиваются с ограничением другого типа. Их перспективы зависят от надёжного соединения различных квантовых компонентов, каждый из которых оптимизирован под собственную функцию. Пока интеграция остаётся недостаточно устойчивой, преимущество распределения функций не может быть напрямую переведено в преимущество готовой системы [6].

Энергоэффективность сверхпроводниковых технологий также нельзя оценивать только по характеристикам логического элемента. Для стандартной RSFQ статическое рассеяние в резисторах постоянного смещения составляет основную часть энергопотребления схемы. Развитие ERSFQ/eSFQ и аналогичных решений должно сопровождаться совершенствованием выходных интерфейсов и криогенной системы, а сравнительные выводы следует строить на согласованных метриках операций на ватт и джоулей на бит [9].

Сопоставление рассмотренных направлений позволяет сформулировать конкретный исследовательский пробел. Уже установлено, что различные платформы обладают специализированными преимуществами: NISQ-системы открывают доступ к отдельным вычислительным задачам, атомы Ридберга обеспечивают воспроизводимые многоуровневые системы, гибридные архитектуры распределяют функции между физическими компонентами, а оптомеханика позволяет управлять неклассическими механическими состояниями. Нерешённым остаётся вопрос о том, как согласовать эти преимущества с надёжностью, масштабируемостью, измеримой энергоэффективностью и системной интеграцией в воспроизводимых условиях.

Перспективные направления поэтому должны включать повышение точности управления и разработку отказоустойчивых архитектур, совершенствование гибридных интерфейсов, стандартизацию энергетических и измерительных метрик, а также проверку долгосрочных прогнозов на воспроизводимых экспериментальных данных. Дорожные карты полезны как средство координации и постановки целей, но их ожидаемые результаты должны регулярно сопоставляться с фактическими ограничениями платформ и подтверждёнными характеристиками устройств [3][2].

Заключение

Квантовые технологии представляют собой не единую технологию, а совокупность направлений, объединённых использованием управляемых квантовых эффектов. Их область включает вычисления, моделирование, связь, сенсорику и метрологию, но каждое направление реализует собственный тип преимущества и требует специфического критерия проверки.

Наиболее устойчивым результатом рассмотренных исследований является формирование специализированных физических платформ и методов их количественной оценки. NISQ-устройства уже обладают ценностью для отдельных вычислительных задач и исследования многочастичной физики, атомы Ридберга предоставляют воспроизводимые и управляемые системы, гибридные архитектуры объединяют взаимодополняющие ресурсы, а оптомеханика расширяет набор доступных квантовых состояний. Вместе с тем эти достижения не отменяют шума, ограничений измерения, сложности интеграции и инфраструктурных затрат.

Следовательно, основная граница современного этапа проходит между физической демонстрацией и системной реализуемостью. Практическая значимость квантового пре-

имущества определяется не только качеством квантового состояния, но и точностью операций, числом измерений, энергоэффективностью, интерфейсами и возможностью масштабирования. Главная перспектива области связана с согласованием этих уровней в воспроизводимых отказоустойчивых системах, а главный исследовательский пробел — с отсутствием универсальной, сопоставимой и системно полной оценки такого согласования.

Список литературы

1. Barzanjeh S., Xuereb A., Gröblacher S., Paternostro M., Regal C. A., Weig E. M. Оптомеханика для квантовых технологий. Nova Science Publishers, 2022. SCID: 54.1/wkm55h6y.
2. Dowling J. P., Milburn G. J. Квантовая технология: вторая квантовая революция. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2003. SCID: 54.1/7yaafwj4.
3. Acín A., Bloch I., Buhrman H. et al. Дорожная карта квантовых технологий: взгляд европейского сообщества. *New Journal of Physics*, 2018. SCID: 54.1/bhgnm8q5.
4. Preskill J. Квантовые вычисления в эпоху NISQ и за её пределами. *Quantum*, 2018. SCID: 54.1/2dn973hs.
5. Adams C. S., Pritchard J. D., Shaffer J. P. Квантовые технологии на основе атомов Ридберга. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2019. SCID: 54.1/858krkjp.
6. Kurizki G., Bertet P., Kubo Y. et al. Квантовые технологии с гибридными системами. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015. SCID: 54.1/q33qdhjb.
7. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N. et al. QUANTUM ESPRESSO: модульный программный проект с открытым исходным кодом для квантового моделирования материалов. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009. SCID: 54.1/5mgcyak4.
8. Paris M. G. A. Квантовое оценивание для квантовых технологий. *International Journal of Quantum Information*, 2009. SCID: 54.1/gp56emzr.
9. Mukhanov O. A. Энергоэффективная технология однокуантовой логики. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011. SCID: 54.1/u5dn3crm.