

# Квантовые вычисления: вчера, сегодня, завтра



**Руслан ЮНУСОВ,**  
руководитель проектного офиса Госкорпорации  
«Росатом» по квантовым технологиям

## Базовые отличия

Базовые термины, к которым мы будем неоднократно обращаться на протяжении всего материала, – это понятия квантовых вычислений и суперпозиции. Чтобы исключить любую возможную путаницу, предлагаю начать с самых азов.

Квантовые вычисления, как и привычные нам классические, подразумевают ввод данных на то или иное устройство, выполнение с ними ряда операций и последующий вывод полученного ответа. Разница состоит лишь в том, что в квантовых вычислениях процесс решения задач происходит за счет манипуляции квантовыми объектами – атомами, молекулами, электронами, фотонами и другими микроструктурами, что позволяет использовать в работе принципиально новые и ранее недостижимые вычислительные мощности.

В основе классических вычислений лежит бит – минимальная

Квантовые вычисления сейчас – одна из самых популярных, но в то же время сложных для понимания технологий. Исследователи связывают с развитием квантов и производство новых материалов, и лечение сложных заболеваний, и сверхвысокий уровень защиты информации. Как во всем этом задействован квантовый компьютер, чем текущие разработки отличаются от уже существующих приборов и устройств, основанных на квантовых эффектах, и на каком месте в квантовой гонке находится Россия, разобрал руководитель проектного офиса Госкорпорации «Росатом», глава Национальной квантовой лаборатории Руслан Юнусов.

единица измерения информации, которая принимает значение 0 или 1. Квантовый аналог называется кубитом и способен одновременно находиться в обоих состояниях сразу – и 0, и 1. Это свойство кубита называется суперпозицией: благодаря ему квантовые компьютеры получают преимущество над классическими.

Суперпозиция и квантовая запутанность позволяют кубитам выполнять вычисления моментально, а не перебирать последовательно все возможные варианты системы, как это делают классические вычислительные устройства. Соответственно система решает задачи в сотни и тысячи раз быстрее. Для того чтобы разложить число с 500 десятичными знаками на простые множители, классическому компьютеру понадобится 5 млрд лет, квантовому в теории – секунды. Речь не идет исключительно о фундаментальной науке – финансовые, логистические, производственные компании постоянно сталкиваются с необходимостью решать оптимизационные задачи.

## Не будущее, но настоящее

Квантовые технологии начали активно развиваться с середины XX века, однако многие до сих

пор не понимают, что ежедневно пользуются их плодами. Вся наша техника работает на транзисторах и интегральных схемах, которые обязаны своим появлением квантовой теории твердого тела. Полупроводники, лазеры, а с ними GPS, MPT, интернет и мобильная связь – все это результат первой квантовой революции, основанной на коллективных квантовых явлениях – одновременном управлении большим количеством квантовых систем.

Вторую квантовую революцию связывают с управлением отдельными квантовыми объектами и созданием многокубитного квантового компьютера. По своей значимости и влиянию на все сферы человеческой жизни появление квантового компьютера будет сопоставимо с открытием Интернета. Едва ли останется хоть одна область, которую это открытие не изменит до неузнаваемости.

## Не компьютером единым

В работе над квантовым компьютером применяется несколько подходов. В первую очередь это модель вентиля (цифровая), на основе которой строят так называемые универсальные квантовые компьютеры, способные реализовывать произвольные

квантовые алгоритмы. Решение задачи на подобном устройстве выглядит следующим образом: исследователь берет исходное состояние квантовой системы, программирует к ней преобразования и считывает полученное состояние – оно и является ответом на заданный машине вопрос. Над построением подобных систем работают Google, Intel, IBM и ряд других технологических гигантов.

Еще одной популярной парадигмой являются адиабатические вычисления, основанные на одноименной теореме квантовой механики, сформулированной Максом Борном и Владимиром Фоком. Адиабатические компьютеры – вычислительные устройства на основе квантового отжига, способные решать исключительно задачи оптимизации, но в то же время куда более эффективно, чем это делают классические компьютеры или суперкомпьютеры. В 2020 году D-Wave Systems представила подобную машину на 5000 кубитах, но стоит помнить, что такие квантовые вычислители не являются квантовым компьютером в его привычном понимании.

Суть квантового отжига состоит в том, что при необходимости низкой температуре система всегда находится в своем обычном состоянии с минимальной энергией. Такой уровень наименьшей энергии определяется гамилтонианом, который задается видом исследуемой функции – ее минимум достигается с помощью перераспределения энергии между ближайшими кубитами, в процессе чего регистр релаксирует к состоянию термодинамического равновесия. Изменившееся (эволюционировавшее) состояние системы считывается в качестве ответа.

Квантовые вычислительные системы не ограничиваются исключительно компьютером, существуют еще один класс систем – квантовые симуляторы. Они могут решать довольно узкий круг задач за счет имитации качеств и функций реальных квантовых систем. Симуляторы можно назвать своеобразными предшественниками полноценных устройств, поскольку они

позволяют в более управляемом режиме фиксировать их текущие несовершенства: например, повышать время жизни кубитов или работать над эффективностью алгоритмов для компенсации ошибок.

## Квантовые процессоры

Математический аппарат квантовой теории готов с середины XX века, поэтому наибольшую сложность сейчас представляет именно аппаратная реализация. Мировое квантовое сообщество не может однозначно определить, процессоры на какой платформе покажут наибольшую эффективность, – по этой причине технологические державы развивают сразу несколько направлений.

Россия не стала исключением: дорожная карта по развитию квантовых вычислений, утвержденная Правительством в июле 2020 г., подразумевает создание квантовых процессоров на четырех основных платформах – сверхпроводниках, нейтральных атомах, ионах и фотонах. По каждой сформирован подробный план работ. Рассмотрим подробнее основные направления.

Долгое время сверхпроводники ввиду своей изученности считались самым перспективным вариантом для построения квантового процессора, однако в последние несколько лет мировые лаборатории заговорили о тройке лидеров, добавив в список ионы и атомы.

На основе сверхпроводящих цепочек разрабатываются системы с малым рассеиванием, сверхчувствительные магнитометры и электрометры. На сегодняшний день точность вычислений ограничена неизбежным распадом квантовой информации в системе – согласно последним экспериментам, время распада составляет 1 секунду. Ученые ожидают, что по мере улучшения экспериментальных методов оно будет расти.

К 2024 г. российские исследователи планируют преодолеть большинство сложностей, с которыми сопряжено создание такой системы, и построить процессор на 30 кубитах с точностью

двухкубитных операций, равной 0,97 единицы.

Квантовые системы на ионах имеют длительное время когерентности, высокую точность и полностью взаимосвязанные кубиты. Вместе с тем платформа обладает и существенными недостатками: технологическое ограничение максимального размера квантового регистра и эффект аномально-нагрева препятствуют миниатюризации размеров ловушек.

Квантовые устройства на ионах достаточно популярны. Сейчас на рынке представлена разработка американского стартапа IonQ на 32 кубитах, которая строится на основе ионов в ловушках, созданных из изотопов редкого металла иттербия. Российский квантовый процессор на ионах в 2024 г. будет обладать 100 кубитами и точностью операций равной 0,99.

Фотонными системами называют оптические квантовые платформы, объединяющие квантовые вычисления и квантовую связь. Они обладают критически низким уровнем декогеренции, поскольку слабо взаимодействуют с окружающей средой. Кроме того, линейные оптические элементы могут быть простейшими строительными блоками для реализации квантовых операций.

Однако наряду с этим из-за отсутствия физических механизмов взаимодействия между фотонами реализовать многокубитные преобразования не представляется возможным. В планах отечественных ученых – создать квантовый процессор на основе фотонных чипов на 50 единиц. Ожидаемая точность двухкубитных операций на нем составит 0,99 единицы.

Процессоры на основе ультрахолодных атомов входят в тройку лидеров по созданию систем квантовых вычислений. Но основная сложность по-прежнему состоит в извлечении, охлаждении и контроле движения каждого отдельного атома. Для решения этой проблемы современные ученые планируют использовать систему лазерного охлаждения. К 2024 г. количество кубитов

в отечественном квантовом процессоре на основе нейтральных атомов достигнет 100, а точность операций – 0,97 единицы.

Помимо ключевых существуют и другие платформы, над которыми идет активная работа, однако они не являются целевыми в рамках работы над дорожной картой. Самые распространенные из них – поляритоны и кремний.

На основе первых могут быть созданы достаточно габаритные квантовые процессоры, работающие при комнатной температуре, которые будут способны решать задачи в 10–100 тысяч быстрее устройств на сверхпроводниках. Однако для этого необходимо добиться высокого уровня нелинейности и ограничивающего потенциала.

Технологии на основе кремния в целом изучены достаточно хорошо, поэтому ученые не исключают возможности построения квантовых систем на кремниевых процессорах. Сложность заключается в невозможности создания чистого кремния – так или иначе в нем будут присутствовать различные примеси, которые влияют на ход вычислений. Имеются и серьезные ограничения по масштабируемости: самый совершенный квантовый процессор на основе полупроводников, построенный голландскими исследователями, пока состоит только из четырех кубитов.

## Уровень развития квантовых вычислений и сферы применения

В 2017 г. американский физик Джон Прескилл ввел термин NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), который отражает эпоху «шумных промежуточных квантовых устройств». Термин описывает мировой этап развития квантовых вычислений, что соответствует QTRL-5. Устройства, реализованные на 50–100 кубитах, опережают по всем параметрам современные персональные компьютеры, но не имеют квантовых кодов коррекции ошибок.

Компании Rigetti Computing, IBM, Google, Intel соответствуют QTRL 4–5. В их разработках проблема коррекции ошибок не решена полностью, поэтому такие задачи, как алгоритм Шора, не могут быть полностью реализованы.

По итогам 2020 г. Россия поднялась на одну ступень в этой шкале – с третьей (QTRL 3) на четвертую (QTRL 4) из девяти возможных. В стране созданы 1–2-кубитные системы, что является базой для дальнейшего масштабирования.

С глобальным развитием квантовых технологий актуальным вопросом становится их внедрение в сферы экономики и реальный бизнес. Ниже представлены несколько отраслей, в которых ученые уже успели оценить потенциальный эффект от использования квантов.

Финансы. Использование квантовых технологий может кардинально изменить всю финансовую отрасль в перспективе 5–10 лет. Предсказание финансовых кризисов, квантовый трейдинг, оптимизация инвестиционных портфелей, квантовая криптография, распознавание мошеннических действий – это лишь малая часть процессов, которые трансформируются благодаря вычислительной мощности квантовых устройств.

Кроме того, потенциально более быстрая реакция на волатильность рынка позволит финансовым компаниям сохранять конкурентное преимущество, а увеличение скорости транзакций – масштабировать обработку финансовых операций с меньшими затратами, в том числе на оплату труда и покупку софта.

Медицина, фармацевтика и генетика. Сегодня сложность молекулярной биологии состоит в огромном временном промежутке между разработкой препарата и его практическим применением – тестирование активного вещества, выявление побочных эффектов и доказательство эффективности занимает годы. Квантовые технологии способны оптимизировать поиск белковых структур, что приведет к сокращению

времени производства новых лекарств вплоть до пары недель, персонализации медикаментов и повышению их качества.

Квантовые вычисления также применимы в процессе секвенирования геномов – определения последовательности нуклеотидов в молекуле ДНК. Если сейчас генетический тест помогает вычислить предрасположенность к заболеваниям в пределах нескольких поколений, то использование квантов увеличит точность прогнозов, позволив учесть большее количество переменных.

Логистика. С развитием квантовых вычислений логистические компании смогут оптимизировать маршруты в режиме реального времени с учетом огромного количества факторов: протяженности и сложности цепочек поставок, топливных затрат, количества остановок и пр. Сегодня на глобальном рынке уже представлено несколько пилотных проектов в области оптимизации трафика.

Например, в 2019 г. в Лиссабоне немецкий автопроизводитель Volkswagen заключил партнерство с производителем общественного транспорта Carris. Квантовое устройство в режиме близком к реальному времени рассчитало самый быстрый маршрут для 9 автобусов с учетом 26 остановок. Эксперимент показал, что расчет маршрута позволил избежать пробок в дорожном движении и сократить затраты на топливо. Разработчики утверждают, что по мере развития технологии система может быть применена к городским автопаркам любого размера.

Информационная безопасность. Современное шифрование RSA, основанное на 2048-битных числах, сегодня является самым надежным способом защиты данных, однако, используя алгоритм Шора, квантовые компьютеры способны во много раз сократить время дешифровки данных – даже защищенные криптографические системы с открытым ключом запросто могут быть скомпрометированы. Главное препятствие на пути к расшифровке ключей любых уровней сложности – количество кубитов.



В 2015 г. исследователи подсчитали, что для взлома шифрования RSA квантовому компьютеру понадобится миллиард кубитов – объем, который потенциально может быть достигнут в течение 15–25 лет. Особую угрозу подобные атаки представляют на национальном уровне, так как сообщения, которые сегодня передаются между посольствами или военными, могут иметь ценность и через десятки лет. Эксперты в области безопасности уже разработали квантовые и постквантовые методы защиты информации, однако пока мы не можем говорить об их повсеместном применении.

Химическая промышленность. С помощью квантовых вычислений скорость и моделирование структур композитных материалов возрастут в десятки и сотни раз. Так, перед началом синтеза молекулы в лабораторных условиях квантовый компьютер автоматически просчитает наиболее эффективные вариации химических конструкций для создания материалов с заданными параметрами. Доступ к такому виду вычислительных ресурсов значительно изменит сферу авиастроения: износостойкость материалов увеличится на 20–40%, в то время как вес воздушного судна снизится.

Использование гибридного подхода, сочетающего квантовые технологии, искусственный интеллект и оптимизацию, также способно ускорить сборку эффект-пигментов и создание OLED-архитектур для оптоэлектронных устройств с учетом заданной информации – толщины, цветопередачи, концентрации.

## Кванты в мире

Квантовые технологии переживают этап взрывного роста популярности. Около 10 лет назад ученые начали интересоваться исследованиями в этой области, а через несколько лет значительно возросло количество поданных патентов. С 2013 г. объем патентов ежегодно растет на 30%, в первую очередь за счет США и Китая. Сегодня общее число патентов



в сфере квантовых технологий, зарегистрированных частными и государственными китайскими организациями, превысило отметку в 3000, в США – в 2 раза меньше.

США является лидером в области квантовых вычислений. Так, в октябре 2014 г. началась федеральная межведомственная координация исследований, и уже четыре года спустя Конгресс США принял закон о Национальной квантовой инициативе, который содержит в себе информацию о совместной работе госсектора, частных учреждений и научных центров. Согласно этому положению в ближайшие десятилетия в квантовые технологии будет инвестировано свыше миллиарда долларов.

В стране функционируют 5 исследовательских центров, специализирующихся на квантовой информатике. В течение пяти лет государство планирует инвестировать в их работу \$625 млн, частный сектор совместно с американскими университетами – еще \$340 млн.

В США львиную долю рынка занимают частные компании, такие как IBM, Google, Honeywell, Rigetti, IonQ. Они не только инвестируют в развитие «железа» и софта, но и создают мощную научно-исследовательскую базу, наращивают кадровый потенциал государства.

Например, в 2019 г. IBM представила IBM Q System One, первую в мире интегрированную универсальную квантовую вычислительную систему, и открыла центр квантовых вычислений IBM в Нью-Йорке в целях предоставления доступа к ней коммерческим и исследовательским группам.

В октябре 2019 г. Google сделал объявление о достижении «квантового превосходства» с использованием программируемого сверхпроводящего процессора.

Китай в рамках 13-го пятилетнего плана, принятого в 2016 г., определил квантовые технологии ключевым приоритетом на ближайшие 10 лет. Страна лидирует в области квантовых телекоммуникаций: в 2016 г. стартовала программа по запуску в космос первого в мире квантового спутника связи в целях установки наиболее безопасной линии передачи данных на большие расстояния.

В 2017 г. правительство инвестировало \$10 млрд в создание Национальной лаборатории в городе Хэфэй. В декабре 2020 г. ведущая исследовательская группа ученых создала прототип квантового компьютера «Цзючжан» на 76 фотонах.

Основные коммерческие игроки Китая – Alibaba, Baidu

и Tencent – инвестируют миллиарды долларов в собственные лаборатории по изучению квантовых вычислений. К 2030 г. Alibaba планирует создать прототип компьютера на 50–100 кубитах для массового использования.

Канада входит в тройку мировых лидеров и является безусловным лидером по расходам в области квантовых технологий на душу населения. Национальный исследовательский совет государства оценил трудовые ресурсы рынка до 2040 г. в \$142,4 млрд, что эквивалентно 229 000 рабочих мест.

В рамках национальной инвестиционной стратегии страна сотрудничает с ведущим разработчиком квантовых компьютеров D-Wave Systems, выделив грант в размере 40 млн канадских долларов (свыше 26 млн евро). Средства позволят компании масштабировать доступ к своему облачному сервису, который, в свою очередь, поможет малому и среднему бизнесу Канады оптимизировать бизнес-процессы, не приобретая полноценного «железа». При этом D-Wave инвестирует почти 500 млн канадских долларов (330 млн евро) в НИОКР, создавая 200 рабочих мест и обязуясь нанимать до 10 студентов в год.

Европа прилагает максимум усилий, чтобы не отставать от лидеров, оставаясь на повестке дня. В 2013 г. Великобритания стала первой страной, объявившей о собственной квантовой инициативе, инвестировав 370 млн евро в развитие технологий в течение пяти лет.

В мае 2016 г. 3400 представителей науки и исследований подписали «Quantum Manifesto» – документ, призывающий Европейскую комиссию сформулировать совместную стратегию для объединения усилий стран ЕС в создании квантового компьютера. В итоге в 2018 г. был дан старт общеевропейской программе Quantum Flagship с бюджетом в 1 млрд евро. Программа уже поддержала порядка 20 исследовательских проектов.

Кроме того, некоторые страны ЕС поддерживают национальные программы развития квантовых

технологий, бюджет которых заметно превышает общеевропейский. Так, 2018 г. Германия начала разработку национальной программы с бюджетом 650 млн евро, направленной на вывод квантовых технологий на рынок и их практическое применение. В июле 2020 г. канцлер Германии Ангела Меркель сообщила об увеличении финансирования программы еще на 2 млрд евро. В январе 2021 г. о старте национальной квантовой программы с бюджетом 1,8 млрд евро объявила Франция. Нидерланды, также являясь крупным европейским игроком, запустили пятилетнюю программу с бюджетом 615 млн евро.

В Европе помимо создания национальных инициатив ставка делается на ключевые университеты: страны инвестируют в уже существующие и создают новые. Франция планирует объединить исследователей квантовой физики, специалистов прикладных и теоретических вычислений, инженеров и предпринимателей из технологического сектора, создав три междисциплинарных института в Париже, Сакле и Гренобле.

## Кванты в России

Россия позже других стран приступила к разработке квантовых технологий: по-настоящему активная работа с государственной поддержкой ведется лишь последние несколько лет. В 2019 г. Правительство РФ разработало дорожную карту по развитию квантовых технологий, а позже приняло решение разбить ее на три отдельные дорожные карты: по развитию квантовых вычислений, квантовых коммуникаций и квантовых сенсоров.

За квантовые коммуникации отвечает ОАО «РЖД». С учетом секвестирования бюджета выделенная на технологии сумма составила 16,7 млрд рублей. Госкорпорация занимается развитием квантовой криптографии и передачей квантовой информации по защищенным линиям связи. В апреле 2021 г. дочерняя компания РЖД «Транстелеком» сообщила

о завершении строительства квантовой линии связи между Москвой и Петербургом с расстоянием 800 км. Эксплуатация по плану – со второго квартала 2021 г.

Создание квантовых сенсоров поручили «Ростеху», выделив бюджет 18,4 млрд руб. Сенсоры имеют необходимый потенциал фундаментального преобразования наших измерительных возможностей и обеспечивают невозможную ранее чувствительность и точность. По данным российских медиа, расходы на данное направление потенциально могут быть сокращены на 7 млрд руб.

Работу над квантовыми вычислениями возглавила Госкорпорация «Росатом». Бюджет на развитие субтехнологии составил 23,7 млрд руб, около 45% пришлось на внебюджетные источники. Основная цель дорожной карты заключается в построении к 2024 г. отечественных квантовых компьютеров на четырех различных платформах, а также создании специализированного облачного софта.

Чтобы реализовать намеченный план мероприятий, в конце ноября 2020 г. был запущен научно-технологический консорциум «Национальная квантовая лаборатория», в который вошли ключевые участники российского квантового сообщества: Росатом, НИУ «ВШЭ», НИТУ «МИСиС», МФТИ (НИУ), Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Российский квантовый центр и Фонд «Сколково». НКЛ нацелена на развитие квантовых и смежных с квантовыми технологий, а также обеспечение глобальной конкурентоспособности российских квантовых технологий, продуктов и сервисов.

Подводя итоги, следует сказать, что квантовые вычисления несомненно приведут к масштабным изменениям как в фундаментальной науке, так и в бизнесе уже в ближайшее десятилетие. Поэтому именно государственная поддержка и развитие квантовых дорожных карт позволят нам сократить отставание от ведущих технологических держав с десятилетия до трех-пяти лет. ■