



Квантовые вычисления: перспективы для бизнеса

Краткий обзор аналитического доклада ПАО «Сбербанк». 2023г.

Материалы внутренних семинаров компании Nihol

Информация об источнике

Аналитический доклад «Квантовые вычисления: перспективы для бизнеса» подготовлен коллективом авторов Сбербанка в партнерстве с ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова» и Институтом искусственного интеллекта AIRI с использованием материалов, представленных ГК «Росатом», Российским квантовым центром, а также рядом авторитетных российских и зарубежных источников.

В докладе представлена оценка текущего состояния и сделаны выводы о развитии квантовых вычислений, препятствиях и ограничениях, которые предстоит преодолеть на пути практического применения квантовых компьютеров по состоянию на 2023 год.

Введение в квантовые вычисления

Концепция квантовых вычислений зародилась в 1980-е гг. в работах Д. Дойча, Ю. И. Манина и Р. Фейнмана.

Первоначальная идея заключалась в том, что симуляцию квантовых физических и химических систем эффективнее проводить на компьютере, который тоже имеет квантовую природу. Задача симуляции остаётся актуальной и сегодня.

Позже, также в 1980-е и затем в 1990-е гг., было осознано, что за счёт явления «квантового параллелизма» квантовый компьютер позволяет решать быстрее и задачи, не связанные с физикой или химией.

Широкую известность концепция квантовых вычислений приобрела в 1994 г., когда **Питер Шор** разработал квантовый алгоритм, позволяющий эффективно раскладывать целые числа на простые сомножители.

Есть гипотеза о том, что не существует алгоритма для классического компьютера, который бы решал эту задачу за время, пропорциональное какой бы то ни было, пусть даже и большой, степени n . Это делает разложение больших целых чисел на традиционном компьютере невозможным за разумное время.

Эта гипотеза лежит в основе некоторых современных методов защиты информации (т. н. криптографических систем с открытым ключом). Поэтому открытие квантового алгоритма, эффективно решающего эту задачу, привело к новым исследованиям в области разработки квантовых компьютеров и дальнейших квантовых алгоритмов.

Квантовый бит (кубит)

Квантовый бит (кубит) — элементарная единица квантовой информации, аналог классического бита. Логический кубит представляет собой идеальную систему, способную находиться как в двух различных состояниях 0 и 1, так и в их произвольной **суперпозиции**.

Базовые объекты, используемые квантовым компьютером в качестве логического кубита, являются квантовыми состояниями квантовых частиц. Традиционный двоичный компьютер также использует электроны, но они создаются, управляются и измеряются как двоичные объекты или состояния. Они либо 0, либо 1 (либо «вкл», либо «выкл»). Квантовый компьютер, использующий квантовые частицы и измеряющий квантовые состояния этих частиц, видит все представленные квантовые состояния.

В качестве физической реализации кубита могут выступать: сверхпроводниковые кубиты — планарные структуры из сверхпроводящего металла, фотоны, ионизированные или нейтральные атомы в ловушках. Физические кубиты не являются идеальными: записанная в них информация живет конечное время, называемое **временем когерентности**

Процесс, когда вследствие взаимодействия с окружением кубиты теряют определённые значения, называется **декогеренцией**. В этом процессе **когерентная суперпозиция** распадается и квантовые вычисления становятся невозможными.

Набор кубитов, связанных между собой, называется **квантовым процессором**.

В силу неидеальности физических кубитов логические операции обладают конечным уровнем ошибок, или «шумом».

Квантовый бит (кубит)

В системе квантового процессора возможно выполнять однокубитные (1Q) логические операции, меняющие индивидуальное состояние каждого из кубитов, либо двухкубитные (2Q) логические операции, где выполняются условные операции над состоянием пары кубитов.

Есть задачи при решении которых традиционному бинарному компьютеру либо потребуется очень, очень много времени, чтобы вычислить ответ, либо он никогда не решит такую задачу (например разложению числа на простые множители). Квантовый компьютер с достаточным количеством кубитов сможет генерировать правильный ответ менее чем за время исчисляемое в минутах. В этом сила квантовых компьютеров.

Если будет создана система из тысяч кубитов, каждый из которых одновременно является системой с двумя состояниями, и из-за суперпозиции они являются всеми возможными состояниями тысяч кубитов одновременно, она сможет обеспечить фантастическую скорость и логические возможности.

Пример:

Двоичная система из 3-х бит может находиться в одном из 8 возможных состояний, но в каждый момент времени может вернуть **только одно состояние**, участвующее в решении задачи.

Система из 3-х кубитов может иметь в каждый момент времени **одновременно все 8 состояний**, участвующих в решении задачи. Т.е. 3-х кубитная система – это 8 кратное улучшение состояния по сравнению с 3-х битной системой. 4-х кубитная система – 16 кратное улучшение состояния по сравнению с 4-х битной системой и т. д.

Квантовый алгоритм

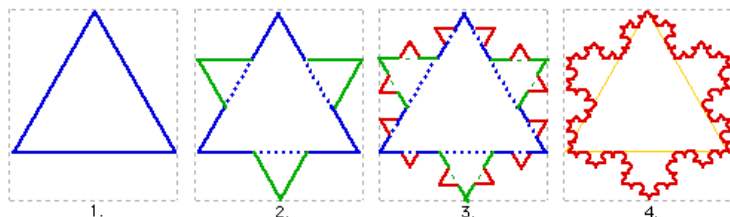
Квантовый компьютер нуждается в разработке библиотеки квантовых алгоритмов, которые позволят процессору на новых физических принципах превзойти классические суперкомпьютеры по мощности и скорости вычислений

Квантовый алгоритм это классический алгоритм, который задает последовательность унитарных операций (гейтов, или вентилях) с указанием, над какими именно кубитами их надо совершать..

Результат работы квантового алгоритма носит **вероятностный характер**. За счёт увеличения количества операций в алгоритме (или его повторений) можно приблизить вероятность получения правильного результата к единице.

Множества задач, допускающих решение на квантовом компьютере и на классическом, совпадают. Квантовый компьютер не увеличивает число алгоритмически разрешимых задач. **Весь смысл применения квантового компьютера в том, что некоторые задачи он способен решить существенно быстрее, чем любой из классических. Для этого квантовый алгоритм должен по ходу вычисления генерировать и использовать запутанные квантовые состояния**

Любая задача, решаемая квантовым алгоритмом, может быть решена и классическим компьютером путём прямого вычисления явного вида квантовых состояний. Аналогично, проблемы, неразрешимые на классических компьютерах (например, проблема остановки), остаются неразрешимыми и на квантовых.



Проблема остановки — одна из центральных проблем в теории алгоритмов: *Даны описание процедуры и её начальные входные данные, требуется определить, завершится ли когда-либо выполнение процедуры с этими данными или она будет работать всё время без остановки. Пример: Снежинка Коха*

Квантовый алгоритм

Однако прямое моделирование на классических компьютерах требует экспоненциального времени, и потому возникает возможность, используя квантовый параллелизм, ускорять на квантовом компьютере некоторые классические алгоритмы.

С фундаментальной стороны упомянутый ранее **алгоритм Шора** впервые продемонстрировал следующий феномен: класс сложности задачи изменяется в зависимости от того, на каких физических принципах строится вычислительный процесс (при условии справедливости вышеозначенной гипотезы).

Появление полномасштабного квантового компьютера, на котором можно реализовать алгоритм Шора для разложения на множители больших целых чисел, ставит, таким образом, под угрозу многие существующие системы защиты информации. Для преодоления этой проблемы в настоящее время активно работают над квантовой криптографией и постквантовой криптографией.

Другой широко известный квантовый алгоритм – алгоритм поиска в неупорядоченном списке Л. Гровера (1996). Если нам дан неупорядоченный список из n элементов, в котором необходимо найти требуемый нам единственный элемент, то в классической парадигме надо сделать в среднем порядка $n/2$ обращений к списку. Квантовый алгоритм Гровера позволяет достичь той же цели за порядка \sqrt{n} обращений.

Поиск технологий, способных изменить рынки и бизнес-модели

В последние несколько лет технологии квантовых вычислений всё больше перемещаются из научных лабораторий в бизнес-среду, превращаясь из научно-исследовательской задачи в реальные приложения и инструменты. Появляются прототипы коммерческих квантовых компьютеров, доступных для аренды или покупки.

В «квантовую гонку» включается всё больше игроков, которые рассчитывают занять место в технологической нише способной изменить рынки и бизнес-модели за счет использования прорывных инноваций, выводящих из конкурентной гонки старые технологии и «традиционные» бизнес-модели.

Квантовые технологии становятся всё более популярными у бизнеса — растёт число инвестиций как в разработку и создание собственных исследовательских подразделений, так и в стартапы, специализирующиеся в этой области.

Мир технологий находится на пороге эпохи преобразований, и «кванты» наиболее вероятно станут центром этой революции.



Поиск технологий, способных изменить рынки и бизнес-модели

Экспоненциальный рост вложений — интеллектуальных и финансовых — в область квантовых вычислений во многом обусловлен тем, что:

- почти достигнут предел развития микроэлектроники на основе кремния, что требует принципиально новых решений;
- развитие ИИ требует более мощных вычислительных возможностей;
- квантовые технологии несут новые риски информационной безопасности, что требует создания опережающих систем защиты, в том числе с применением тех же квантовых технологий.

Ожидается, что квантовые вычисления обеспечат:

1. Стимул для развития новых индустрий, основанных на обработке больших данных.
2. Повышение производительности и эффективности алгоритмов искусственного интеллекта.
3. Более точные модели и симуляции сложных систем, таких как химические реакции или физические процессы.
4. Новый уровень расчётов в финансах и логистике, неуязвимый для взлома квантовый интернет, новые решения климатических проблем.
5. Криптографические алгоритмы, которые обеспечат более высокий уровень безопасности.
6. Сочетание технологий ИИ и квантовых вычислений — это именно тот драйвер, который необходим для ускорения технологического развития, поскольку последние обещают быть более эффективными в обработке больших объёмов данных и решении сложных задач.

Поиск технологий, способных изменить рынки и бизнес-модели

2022 г. был богат на научные достижения, приблизившие квантовые вычисления к практике:

- Нобелевская премия по физике 2022 г. присуждена пионерам в изучении квантовой запутанности Алену Аспе, Джону Клаузеру и Антону Цайлингеру.
- Количество опубликованных по тематике квантовых технологий научных статей составило больше 44 тыс.
- В 2022 г. в мире выдано и опубликовано почти 1600 патентов, связанных с квантовыми технологиями. Патенты оформляются во всех подобластях квантовых вычислений: от физических реализаций квантового оборудования и коррекции ошибок до ИИ и машинного обучения. Несомненные лидеры - Китай и США.
- IBM представила процессор Osprey (433 кубита) и обновила свою дорожную карту с целью разработать процессор на 4000+ кубитов уже в 2025 г.

Эти показатели являются признаком того, что наиболее **«простые»** проблемы в сфере квантовых вычислений уже решены, хотя остается еще очень много пробелов в фундаментальных знаниях, и еще предстоит пройти большой путь — как в физике, так и в инженерии.

Необходимым условием использования новых технологий является введение единых отраслевых стандартов.

В 2023 г. Европейская Оперативная группа по квантовым технологиям опубликовала Дорожную карту стандартизации, учитывающую потребности Европы в регламентировании квантовых вычислений, квантовой связи и квантовой метрологии.

Поиск технологий, способных изменить рынки и бизнес-модели

Текущее состояние дел в сфере квантовых вычислений на практике :

➤ Инвестиции:

- число стартапов в экосистеме квантовых технологий - 350
- мировой бизнес вложил в 2022 г. в стартапы в области квантовых технологий - \$2,35 млрд
- объём 3-х крупнейших инвестиций в квантовые технологии (с 2001 по 2022 г.) \$350 млн — \$500 млн

➤ Экосистема:

• **Облачные платформы:**

IBM Quantum, Microsoft Azure Quantum, Google Quantum AI, Amazon Braket, D-Wave Leap, Quantinuum, Xanadu Quantum Cloud, QuTech Quantum Inspire, Alibaba Cloud Quantum

• **Квантовое ПО и алгоритмы:**

QcWare, 1Qbit, Nvidia, Zapata Computing, SandboxAQ, Terra Quantum

➤ Первые пользователи:

- JP Morgan, CaixaBank, BMW, Hyundai Motor, LG Electronics, Cleveland Clinic, Roche, Airbus, Boeing и многие другие
- к 2035 г. ожидаемый экономический эффект для финансовой отрасли - \$700 млрд

Поиск технологий, способных изменить рынки и бизнес-модели

Физические платформы квантовых компьютеров

1. Сверхпроводниковая платформа

- IBM Osprey — 433 кубита,
- IBM Eagle — 127 кубитов + продемонстрировано подавление ошибок.
- Google: Bristlecone — 72 кубита,
- Sycamore — 54 кубита

2. Фотонная платформа

- Xanadu Borealis — 216 кубитов

3. Ионная платформа

- Quantinuum H2 — 32 кубита

4. Кремниевая платформа

- Intel Tunnel Falls — 12 кубитов



прямое непосредственное сравнение технологических платформ между собой по количеству кубитов не является корректным, поскольку они основаны на разных физических принципах. До появления общепризнанных тестов производительности квантовых компьютеров сравнивать их предпочтительно в рамках одной платформы.

Поиск технологий, способных изменить рынки и бизнес-модели

Уровень готовности квантовых технологий по шкале TRL

- Уровень готовности квантовых технологий в мире по шкале уровней технологической готовности (TRL - Technology Readiness Level) оценивается следующим образом:
 - отдельные типов кубитов: от TRL 1
 - квантовое распределение ключей: до TRL 8
- Несмотря на положительную динамику развития, квантовые вычисления всё ещё находятся на ранних стадиях развития, и их коммерческое применение имеет ряд ограничений

Шкала уровней технологической готовности (TRL) :

Была разработана НАСА в США в 70-80-х годах прошлого века, чтобы отмечать этапы разработки новых технологий..

- | | | |
|---|---|--------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• TRL 1: Сформулирована фундаментальная концепция, обоснована полезность новой технологии• TRL 2: Сформулирована техническая концепция, установлены возможные области применения• TRL 3: Разработан макетный образец технологии для демонстрации ее ключевые характеристики• TRL 4: Разработан детальный макет решения для демонстрации работоспособности технологии | } | Становление, оценка, испытания |
| <ul style="list-style-type: none">• TRL 5: Демонстрация технологии на детализированном макете в условиях, приближенным к реальным• TRL 6: Демонстрация работоспособности технологии на полнофункциональном прототипе.• TRL 7: Прототип системы может быть показан в составе других систем в реальных условиях. | | |
| <ul style="list-style-type: none">• TRL 8: Сборка реального устройства, которое тестируется в составе системы в ожидаемых условиях.• TRL 9: Реальная демонстрация технологии в завершеном виде, принятие в серийный выпуск. | } | Производство |



переход от TRL4 к TRL7 называется “долиной смерти”, так как требует инвестиций, времени, готовности к рискам и, часто, участия государства.

Инвестиции и стартапы

В неограниченный потенциал квантов продолжают верить инвесторы — в 2022 г. общий объём вложений в стартапы в области квантовых технологий — вычислений, сенсорики и коммуникаций — достиг \$2,35 млрд.

- В 2022 г. наибольший объём инвестиций — \$500 млн — получил основанный в том же году стартап SandboxAQ (США).
- Инвесторы поддерживают одновременно разные аппаратные платформы — сверхпроводники, фотонику, ионы, холодные атомы и кремний. При этом до сих пор не сформировалась лидирующая технологическая платформа, которая стала бы основной для последующего совершенствования и распространения квантовых компьютеров
- Обещания отдельных квантовых разработчиков представляются завышенными на фоне их технологических возможностей. В 2022 г. критике подвергся стартап IonQ который был обвинён в дезинформировании инвесторов о создании 32-кубитного процессора.
- В области квантовых вычислений наиболее активно стартап-комьюнити развивается в США, Канаде и Европе.
- В 2022 г. стали публичными два крупных квантовых стартапа — D-Wave (Канада) и Rigetti (США).
- В сегмент квантовых вычислений активно заходят крупные игроки — бигтехи, такие например, как Amazon Web Services. Совместно с Гарвардским университетом Amazon Web Services представили масштабируемую квантовую память, которая применяется для построения квантовых сетей — защищённых каналов передачи данных

Инвестиции и стартапы

Топ 10 стартапов по размеру частных инвестиций за время существования стартапа, \$ млн

Стартап	Специализация	Год основания	Частные инвестиции
IonQ (США)	Квантовый компьютер на ионах, University of Maryland	2016	684
PsiQuantum (США)	Фотонный квантовый компьютер	2016	665
SandboxAQ (ВБ,США)	Решения на стыке квантовых технологий и ИИ	2022	500
Quantinuum (США)	Квантовый компьютер на ионах	2021	428
Rigetti (США)	Сверхпроводниковый квантовый компьютер и полный стек ПО	2013	298
D-Wave (Канада)	Сверхпроводниковый квантовый симулятор, облачный доступ, приложения, ПО	1999	294
Xanadu (Канада)	Фотонный квантовый компьютер, облачный доступ, ПО	2016	262
IQM (Финляндия)	Сверхпроводниковый квантовый компьютер	2018	247
Origin Quantum (Китай)	Все ведущие типы квантовых компьютеров, облачный доступ, приложения, ПО	2017	148 (2022 г.)
Infleqtion (США, ВБ, Австралия)	Компания-учредитель ColdQuanta (ультра холодные атомы) и Super.Tech	2007	110 (2022 г.)
Cornami (США)	Полупроводники, квантовые вычисления и FHE(Fully Homomorphic Encryption)	2012	68 (2022 г.)

Инвестиции и стартапы

Ведущие страны мира: национальные программы

- Правительства развитых стран осознают прорывной потенциал квантовых технологий, поэтому включают это направление в национальные программы, выделяя на его реализацию соответствующие бюджеты.
- Лидер по объёму государственных инвестиций — Китай. Общий объем вложений Поднебесной в «кванты» составил \$15,3 млрд, превысив аналогичный показатель США — в 4 раза, и ЕС — в 2 раза.

Страна	Гос.инвестиции (\$ млрд)
Китай	15,3
Евросоюз	8,4
США	3,7
Япония	1,8
Великобритания	1,3
Канада	1,1

Страна	Гос.инвестиции (\$ млрд)
Индия	1,0
Россия	0,7
Израиль	0,5
Сингапур	0,3
Тайвань	0,3
Австралия	0,1

- Разница между объёмом квантовых инвестиций США и Китая заключается в разных экономических моделях стран. Китай имеет более высокие гос. расходы, помимо расходов на НИОКР, по сравнению с США. При этом частные инвестиции в квантовые технологии, исследования и стартапы в США существенно выше, чем в Китае.
- В США квантовые вычисления развиваются в первую очередь с помощью частных компаний. Европа делает ставку на университеты и научно-исследовательские центры. Россия — на государственные корпорации и компании с государственным участием

Инвестиции и стартапы

Подготовка специалистов

- Для практического применения квантовых технологий критически важно преодолеть кадровый голод — выстроить эффективную систему подготовки специалистов для новой индустрии
- Индустрия квантовых технологий, как любая зарождающаяся отрасль, сталкивается с острым дефицитом кадров и высококвалифицированных сотрудников. Сокращение дефицита планируется, прежде всего, путём расширения образовательных программ.
- Количество университетов, предлагающих степени магистра в области квантовых технологий, почти удвоилось в 2022 г. Более того, по мнению экспертов, потребности отрасли могут закрываться выпускниками из областей, связанных с квантовыми технологиями, — а это около 350 000 магистров в мире. Речь идёт о биохимии, химии, электронике и химической инженерии, информационных и коммуникационных технологиях, математике, статистике и, конечно, физике.
- Наибольшее количество квантовых специалистов сосредоточено в Европейском союзе: в 2020 г. на миллион жителей ЕС насчитывалось 303 выпускника магистратуры в областях, имеющих отношение к квантовым технологиям. ЕС имеет максимальную численность и концентрацию специалистов в области квантовых технологий

Бигтехи и квантовые вычисления

Проводят исследования и строят экосистемы

- Практически все корпорации — лидеры цифровых технологий в той или иной степени заняты разработками в области квантовых вычислений. Наибольшую активность проявляют IBM, Microsoft, Alphabet, Intel и Amazon.
- Большинство корпораций работает над созданием полного стека технологий для квантовых вычислений, особенно те, кто имеет опыт разработки аппаратного обеспечения.
- При этом компании могут как выступать поставщиками квантовых B2B-решений для клиентов (IBM, Intel), так и применять квантовые вычисления для улучшения собственных процессов (Amazon). Из самых крупных технологических корпораций только Apple и Meta не предпринимают видимых действий в этой области.
- Корпорации не раскрывают объёмы затрат на разработку собственно квантовых технологий, поэтому оценить корпоративные инвестиции в квантовые технологии затруднительно, равно как и сравнить активность компаний между собой.
- IBM — пионер в создании инфраструктуры для классических вычислений, которая стала отраслевым стандартом, делает всё, чтобы повторить успех уже с квантовыми вычислениями. Компания работает над широким набором ПО как для собственно квантовых вычислений, так и для построения взаимодействия между классическими и квантовыми машинами. IBM единственная из крупных технологических компаний, которая публикует свои планы по достижению прогресса в квантовых вычислениях



Основное финансирование крупнейших бигтехов в области квантовых вычислений (Intel, IBM, Google и т.п.) и специальных программ, по разным оценкам, на порядок превосходит общедоступные цифры и официально не разглашается

Бигтехи и квантовые вычисления

Проводят исследования и строят экосистемы

- **Microsoft** — провайдер первой в мире экосистемы квантовых вычислений в открытом облаке. Компания занимается разработкой решений — от аппаратного обеспечения до квантового ПО — и работает над встраиванием квантовых вычислений в архитектуру классических. Решения, как собственные, так и от сторонних поставщиков, поставляются через облачную платформу Azure. Собственный квантовый компьютер корпорация пока не продемонстрировала, но активно ведет исследования разной степени успешности в области отдельных элементов соответствующего технологического стека.
- **Google** создаёт передовое оборудование и разрабатывает квантовый ИИ. Одна из целей корпорации — достичь 1 млн кубит до 2030 г. в формате отказоустойчивой квантовой машины. Можно ожидать, что Google попытается получить преимущество, интегрируя возможности квантового искусственного интеллекта во всю экосистему своих продуктов. Материнская компания Google, Alphabet, также имеет непубличную команду под названием Sandbox AQ, выделенную в отдельную компанию, для прикладных исследований квантовых технологий за пределами Google.
- **Intel** поставил цель разработать полный стек технологий для квантовых вычислений, включая процессор на спиновых кубитах, квантовый компилятор C++, квантовую среду исполнения кода (Quantum Runtime). Центральная разработка — Quantum Software Development Kit (SDK) - программный продукт для моделирования, который может взаимодействовать с квантовым оборудованием Intel. SDK позволяет разработчикам программировать квантовые алгоритмы при моделировании, обладает интуитивно понятным программным интерфейсом, написанным на C++ и должен обеспечивать взаимодействие с приложениями на C/C++ и Python.

Бигтехи и квантовые вычисления

Проводят исследования и строят экосистемы

- **Amazon** открыл центр квантовых вычислений AWS в Пасадене на базе Калифорнийского технологического института. Основные задачи центра — поддержка ученых и подготовка новых специалистов, которые будут работать над созданием отказоустойчивого квантового компьютера. в облачном сервисе Amazon представлены такие поставщики квантовых решений как IONQ, QuEra, D-WAVE, OQC и Rigetti.
- **Alibaba** в 2018 году стала второй компанией в мире после IBM, которая открыла облачный доступ к собственному 11-кубитному квантовому компьютеру. В 2022 году исследователи из Alibaba Quantum Laboratory опубликовали работу, в которой описали свойства нового типа кубитов — флуксониевых (fluxonium), — которые, по мнению авторов, могут существенно улучшить отказоустойчивость сверхпроводящих квантовых компьютеров за счёт своей большей стабильности и более продолжительного времени жизни.
- **Tencent** запустил лабораторию, сфокусированную на прикладных вопросах применения квантовых технологий в бизнесе. К октябрю 2022 года компания имела уже 93 патента, в том числе на собственный квантовый сверхпроводящий чип. В 2023 г. техгигант приобрел в долю в сингапурском стартапе Horizon Quantum Computing, чья разработка позволяет автоматически конструировать квантовые алгоритмы на основе программ для классических вычислителей. Все эти действия выглядят как попытка собрать полный стек квантовых вычислений от чипа до алгоритмов
- **Baidu** в 2022 году объявила о запуске своего сверхпроводящего 10-кубитного квантового компьютера интегрирующего всю цепочку: аппаратное обеспечение, системные и прикладные программы. Компания предоставляет кроссплатформенный — от мобильного телефона до облака — доступ к своему квантовому вычислителю..

Коммерческое использование технологии Квантовый симулятор D-Wave

Одной из немногих компаний, кому удалось в той или иной степени коммерциализировать свой квантовый компьютер — это компания **D-Wave**.

- В отличие от «молодых» американских коллег, сосредоточенных на сверхпроводниковых кубитах, D-Wave занимается квантовым отжигом уже более 20 лет, что дает возможность активного масштабирования системы при определенных ограничениях ее функциональных возможностей. В D-Wave наработан колоссальный задел в области систем управления сложными квантовыми системами и системотехнических решений, отраженных в запатентованных компанией решениях.
- Машины D-Wave не являются универсальными квантовыми компьютерами, и для поиска решения задач в них используется процесс, называемый **квантовым отжигом (или «квантовой релаксацией»)**. Квантовый отжиг предполагает процесс оптимизации для нахождения глобального минимума заданной целевой функции по набору решений-кандидатов .
- Даже при внушительном количестве кубитов в сверхпроводниковом процессоре (чип D-Wave Advantage включает более 5000 кубит), квантовый отжиг не подходит для реализации традиционных квантовых алгоритмов и квантовых вентилях, но идеально справляется с задачами оптимизации.
- Вычислители D-Wave используются в исследовательских целях компаниями Google, Lockheed Martin, Temporal Defense Systems и агентством NASA.

Квантовые вычисления и искусственный интеллект

- Основы квантового машинного обучения были изложены в статье «Quantum machine learning» в Nature в 2017г.
- Квантовые компьютеры могут качественно ускорить работу нейросетей, на порядки увеличив количество одновременно обрабатываемых данных, преодолеть существующие пределы наращивания сложности анализируемых моделей, в том числе экономя время и электроэнергию на вычисления. Такое ускорение достигается тем, что отказоустойчивый квантовый компьютер теоретически способен работать с большими массивами данных, обрабатывая все элементы массива одновременно. Квантовые вычислители также перспективны в тех задачах ИИ, где нужно выполнять ограниченный набор операций очень быстро.
- Основные перспективные направления развития квантовых вычислений для ИИ связаны с решением подкласса задач экспоненциальной сложности (например, квадратичной без ограничений двоичной оптимизации — Quadratic Unconstrained Binary Optimization, QUBO), где не требуется большой объем данных, но есть большой объем вычислений. Примером таких вычислительно напряженных задач является «задача коммивояжера»: оптимизация логистики, транспортных потоков — сложность таких задач растет экспоненциально с ростом узлов транспортной сети, что ведет к колоссальным объемам вычислений. Математически эти задачи сводятся к перемножению многомерных матриц, для чего квантовые компьютеры подходят наилучшим образом.
- Квантовые компьютеры позволяют включить в архитектуру сети слои, решающие вычислительно-напряжённые задачи, такие как QUBO и подобные, где сложность нарастает экспоненциально, создавая вычислительно эффективную модель смешанного типа: классического и квантового. Такое взаимодействие квантовых и классических вычислений называют **квантовым «сопроцессором»**.

Квантовые вычисления и искусственный интеллект

- Большие языковые модели — самый яркий, значимый и революционный продукт ИИ последнего времени. Неминуемо встаёт вопрос: можно ли ускорить работу этих гигантских и крайне затратных моделей с помощью квантовых компьютеров и алгоритмов? Это возможно, когда квантовый компьютер сможет выполнять операции, сравнимые с операциями, которые выполняются в больших моделях, таких как GPT-3. В первую очередь, это перемножение больших матриц. Такая возможность существует, так даже небольшое число кубитов кодирует огромное количество параметров, однако есть целый ряд сложностей, которые только предстоит решить (И. В. Оселедец, генеральный директор Института искусственного интеллекта AIRI)
- Одним из основных направлений квантового ИИ являются классические (ядерные) методы («kernel trick») классификаций. Состояния квантового компьютера могут быть приготовлены по входному вектору данных и использовать простые модели на этих состояниях. Так как количество параметров формально огромное, такие модели могут быть существенно более выразительными, чем классические, а методы позволят существенно ускорить классификации данных в сложных многомерных массивах. На текущем этапе невозможно оценить, насколько значимой будет экономия энергии при ускорении этих вычислений, т.к. современные квантовые компьютеры пока не слишком энергоэффективны, но теоретический эффект от алгоритмической части оценивается как существенный.

Квантовые вычисления и искусственный интеллект

Квантово-вдохновлённые алгоритмы

- На данный момент существует большое количество «квантово-вдохновлённых» (quantum-inspired) алгоритмов, которые уже успешно применяются на практике. По своей сути это обогащённые взятыми из практических экспериментов моделирования квантовых алгоритмов (в том числе и на квантовых симуляторах) классические алгоритмы. Такие алгоритмы уже сейчас позволяют улучшить обучение с подкреплением, экспоненциально ускорить операции с матрицами низкого ранга, на которых математически построены рекомендательные системы и модели оптимизации инвестиционных и кредитных портфелей.
- Классическое машинное обучение очень эффективно можно использовать для ускорения квантовых вычислений. Программирование квантовых компьютеров под решение конкретной задачи отличается от классического программирования необходимостью подбора характеристик самого квантового компьютера, а этот процесс подбора квантовых цепей можно решать как задачу классического машинного обучения
- В задачах машинного обучения широко применяется получение случайной величины из заданного распределения, что может быть реализовано на квантовой схеме.
- Совместная работа Amazon и Xanadu Nvidia продемонстрировала возможности ускорения гибридных квантовоклассических алгоритмов. Результаты экспериментов показали возможность увеличение скорости получения решения в 900 раз и снижение расходов в 3,5 раза
- Мировыми лидерами в области квантово-вдохновлённых алгоритмов являются несколько исследовательских групп в России (Сколтех, ИВМ РАН, РКЦ, МФТИ, МИСиС)

Квантовые вычисления – бизнес перспективы

Финансы

- Финансовая отрасль является одним из главных бенефициаров квантовых вычислений — экономический эффект, по оценкам аналитиков, может достичь \$700 млрд к 2035 г.
- Задачи для квантовых вычислений:
 1. Структура активов в оптимальном портфеле (оптимизационные модели)
 - ✓ Оптимальная торговая траектория
 - ✓ Оптимальные возможности арбитража
 - ✓ Оптимальный выбор функций в кредитном скоринге
 2. Обнаружение возможностей получения прибыли среди активов при торговле (Модели глубокого обучения)
 - ✓ Прогнозирование рынков
 - ✓ Классификация данных
 - ✓ Регрессия
 3. Оценка риска и доходности портфеля или целой компании (методы Монте-Карло)
 - ✓ Ценообразование финансовых деривативов
 - ✓ Анализ риска

Квантовые вычисления – бизнес перспективы

Нефтегаз

- Задачи нефтяной индустрии, решение которых даст наибольший эффект в случае применения квантовых алгоритмов:
 - ✓ Гидродинамическое моделирование в пористой среде.
 - ✓ Полноволновая сейсмическая инверсия.
 - ✓ Сейсмическая томография.
 - ✓ Регуляризация сейсмических данных.
 - ✓ Сейсмическая миграция.
 - ✓ Оптимальное планирование производства нефтепродуктов.
 - ✓ Динамическая оптимизация работы установок нефтеперерабатывающего завода.
 - ✓ Оптимизация логистики перемещения буровых установок.
 - ✓ Моделирование каталитического разложения метана.
 - ✓ Оптимизация работы химического реактора.

Квантовые вычисления – бизнес перспективы

Наука и Производство

- Примеры потенциального использования квантовых вычислений компаниями из нефинансовых индустрий:
 - ✓ Квантовое машинное обучение для автономных транспортных средств и квантовая оптимизация для маршрутизации
 - ✓ Обработка большого объема данных от телематики беспилотных автомобилей
 - ✓ Квантовые алгоритмы оптимизации для минимизации затрачиваемых временных и топливных ресурсов авиакомпаний. Оптимизация траектории полетов
 - ✓ Разработка коррозионно-стойких материалов, которые могут упростить обслуживание и содержание самолетов
 - ✓ Распознавание биомедицинских изображений и разработка новых молекул лекарств
 - ✓ Химическое моделирование лекарств, аккумуляторов и батарей, передовых материалов и химикатов
 - ✓ Разработка литий-кислородных аккумуляторов с большей плотностью энергии
 - ✓ Новые технологии аккумуляторов для электромобилей будущего
 - ✓ Стимулирование инноваций в области наук о жизни, разработка новых материалов, экологическая устойчивость и передовое производство
 - ✓ Поиск бозонов Хиггса и установление происхождения Вселенной

Квантовые вычисления

Основные выводы

- Несмотря на устойчивое движение к коммерциализации квантовых вычислений лидерами рынка, говорить о существенной доходности бизнеса пока чрезвычайно рано. Сегмент всё ещё остаётся по большей части зоной полезных моделей и ранних прототипов.
- «Старожилы» рынка инвестируют в сверхпроводящие схемы, в то время как стартапы — в ионные и фотонные процессоры. Сверхпроводящие кубиты являются наиболее зрелой технологией, но время покажет, какая из платформ победит в битве за потребителя.
- Сегменты системного и прикладного ПО, а также сервисов облачного доступа до сих пор остаются «голубым океаном» (Голубые океаны означают все отрасли, которые на сегодня не существуют, это неизвестные участки рынка). Начальная стадия развития этих трёх сегментов обусловлена общей незрелостью технологий и необходимостью существенных инвестиций для адаптации квантовых вычислений к решению задач пользователей.
- Три ключевых вызова в развитии и внедрении квантовых вычислений
 1. Нет устоявшейся платформы, на которой реализуются кубиты
 2. Слишком сложное оборудование. Требуется персонал с уникальными компетенциями. Существующего персонала недостаточно
 3. Необходимо адаптировать весь стек ПО и разработать новые алгоритмы. Нужна разработка квантовых алгоритмов для бизнес-задач и инструментов адаптации для программирования на квантовом языке

Квантовые вычисления

Основные выводы

- По оценкам исследователей, для решения сложных вычислительных задач, с которыми традиционные компьютеры не справляются, необходимо достижение порога мощности в 10 тысяч кубит.
- Не удалось продемонстрировать практическое квантовое превосходство. Квантовые вычисления всё ещё находятся на ранних стадиях технологической зрелости, и необходимы инвестиции и исследования в этой области.
- Достигнув квантового превосходства, нужно понимать, где его использовать. Использование этого превосходства, извлечение из него бизнес-эффекта потребует встречного движения от компаний, как минимум в подготовке специалистов. Квантовые компьютеры, как и классические, должны быть доступны по модели «как услуга», а также в отдельных случаях — по модели «on-premises», то есть путём сборки квантовых машин на стороне заказчика. Бизнес при этом должен быть готов внедрять эти новые решения. В случае совпадения этих встречных движений и возможно поступательное развитие квантовых вычислений

Эпилог

Создатели квантовой механики не раз признавались, что их открытия были сделаны под большим влиянием идей Альберта Эйнштейна. Доказательство квантовых свойств было впервые получено им в экспериментах с использованием фотонов при исследовании излучения, электромагнитных волн и фотоэлектрического эффекта за которое Эйнштейн был удостоен своей единственной Нобелевской премии в 1921 году. Работа Эйнштейна имела решающее значение для становления квантовой теории.

Тем не менее Эйнштейн не был согласен с создателями квантовой механики в первую очередь с постулатом о статистическом описании физических явлений в квантовой механике. Эйнштейн всю жизнь был убежден, что физика помогает человеку получить точные знания об объективно существующем внешнем мире. А создатели квантовой механики (Макс Борн, Вернер Гейзенберг, Эрвин Шредингер и другие) придерживались другой точки зрения:

«Квантовая механика производит сильное впечатление. Но внутренний голос говорит мне, что не в ней суть проблемы. Эта теория дает многое, но вряд ли она приближает нас к разгадке тайны всевышнего. Во всяком случае, я убежден, что он (бог) не играет в кости»

А. Эйнштейн

«В каждый момент времени мы имеем лишь грубые, приближенные знания объективного мира, и отсюда с помощью определенных правил, вероятностных законов квантовой механики, мы можем сделать заключения о неизвестных (будущих) состояниях»

Макс Борн

Эпилог

Но с годами всё больше исследователей признают, что великий физик, возможно, был прав:

«Я не исключаю возможности, что в конце концов может оказаться правильной точка зрения Эйнштейна, потому что современный этап развития квантовой теории нельзя рассматривать как окончательный. Современная квантовая механика — величайшее достижение, но вряд ли она будет существовать вечно. Мне кажется весьма вероятным, что когда-нибудь в будущем появится улучшенная квантовая механика, в которой мы вернемся к причинности и которая оправдывает точку зрения Эйнштейна. Но такой возврат к причинности может стать возможен лишь ценой отказа от какой-нибудь другой фундаментальной идеи, которую сейчас мы безоговорочно принимаем. Если мы собираемся возродить причинность, то нам придется заплатить за это, и сейчас мы можем лишь гадать, какая идея должна быть принесена в жертву. Таковы основные положения, связанные с фундаментальными уравнениями новой механики и с их интерпретацией»

Поль Дирак

«На долгом и трудном пути познания природы мы снова и снова находим идеи, восходящие к Эйнштейну»

Яков Зельдович

Эпилог

«В «странные» свойства квантовых частиц трудно поверить. Тем не менее эти квантовые свойства и результаты не только были проверены и доказаны, но они являются одними из самых проверенных и признанных научных теорий в мире.

Они постоянно проверялись и оспаривались. Все эксперименты, которые были проведены, чтобы опровергнуть основные принятые теорией принципы квантовой механики, потерпели неудачу. Многие из неудач, в том числе и Эйнштейна, только в еще большей мере подтверждали квантовую теорию.

Большинство нобелевских премий по физике за последние 75 лет были присуждены ученым, которые улучшили наше понимание квантовой механики. В последние несколько десятилетий интерес к этой теме возрастает, и наше понимание квантовой механики с каждым годом улучшается.

Хотя перечисленные в предыдущем разделе факты могут при первом прочтении показаться невероятными, подлинность квантовой физики оказывается для нас все большей и большей реальностью и становится в один ряд с фактами существования цифровых камер, оптоволоконных кабелей, лазеров, компьютерных чипов, носителей и коммуникаций интернета. Очень вероятно, что реальность как раз и состоит в том, что каждая составляющая этой реальности основана на квантовой механике.»

Граймс Роджер

«Апокалипсис криптографии»

Использованные источники

1. «Квантовые вычисления: перспективы для бизнеса. Аналитический доклад», А. Р. Ефимов, Ю. И. Дюгованец, Д. В. Золотухина, Л. Ю. Матич, И. В. Оселедец, А. В. Андрияш, Н. С. Исмагилов, К. Э. Лежнев; под общ. ред. А. Р. Ефимова. , М.: ПАО «Сбербанк», 2023. — 60 с.: ил.
2. «Апокалипсис криптографии. Подготовка к квантовому прорыву» Роджер А. Граймс, М.: ДМК, 2020г.
3. «Альберт Эйнштейн и квантовая механика». Евгений Беркович, «ТРОИЦКИЙ ВАРИАНТ» №1, 2020, https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/435132/Albert_Eynshteyn_i_kvantovaya_mekhanika

Рекомендованные дополнительные материалы

1. «The Quantum Decade. A playbook for achieving awareness, readiness, and advantage». IBM for Business Value (IBV). IBM Corporation. December 2023. Fourth edition. <https://www.ibm.com/account/reg/us-en/signup?formid=urx-43376>

Прочтите «Квантовое десятилетие» , чтобы узнать, как вы тоже можете быть готовыми к квантовым технологиям и как эта передовая технология может помочь вам и вашему бизнесу процветать, когда квантовые компьютеры достигнут зрелости. Потому что этот момент ближе, чем ты думаешь».

Дарио Хиль. Старший вице-президент и директор IBM Research

Ещё новости....

Компанией IBM установлена система Quantum System One 127-кубитным процессором Eagle в вычислительном центре Вурхиса (Voorhees Computing Center) на территории политехнического института Ренсселера (Rensselaer Polytechnic Institute - RPI), недалеко от Олбани, штат Нью-Йорк. Это первый квантовый компьютер установленный в университетском кампусе. Исследователи, студенты и партнеры RPI теперь будет иметь выделенный доступ к системе, которую они смогут использовать для изучения насущных проблем в области химии, физики, материаловедения, а также других потенциальных вариантов использования

«The first IBM quantum computer installed on a university campus comes to RPI», <https://research.ibm.com/blog/rpi-ibm-quantum-system-one-installed>



IBM создала код квантового исправления ошибок, который примерно в 10 раз более эффективен, чем предыдущие методы, что является важной вехой в исследованиях квантовых вычислений

«IBM has created a quantum error-correcting code about 10 times more efficient than prior methods — a milestone in quantum computing research» <https://www.ibm.com/quantum/blog/nature-qldpc-error-correction>

СПАСИБО

2024 г.

Ронжин В.В.

Специально для компании Nihol