

# Применение моделей квантового Машинного Обучения в финансовой аналитике

---

Авторы:

Чередов Николай

Никулина Анастасия

# Quantum Bit

10110 = BIT

$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  = Qubit



## Суперпозиция

$$\langle \psi \rangle = \begin{pmatrix} a+i\cdot c \\ b+i\cdot d \end{pmatrix} \xrightarrow{M} \begin{array}{c} \text{0} \\ \text{1} \end{array}$$

1. Новые

Вычислительные Инструменты

## Связанность

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ac \\ ad \\ bc \\ bd \end{pmatrix} \Leftrightarrow 2^{N_Q}$$

2. Новые

Вычислительные  
Мощности

# Сфера применения квантовых вычислений

Оптимизация	Распознавание и Классификация	Криптография и безопасность	Моделирование
<ul style="list-style-type: none"><li>• Оптимизация инвестиционного портфеля</li><li>• Аллокация активов</li><li>• Балансировка портфеля</li><li>• Хеджирование финансовых рисков</li><li>• Управление ликвидностью</li><li>• Оптимизация капитальных резервов</li><li>• Оптимизация торговых стратегий</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Кредитный скоринг</li><li>• Оценка вероятности дефолта</li><li>• Фрод-мониторинг</li><li>• Выявление аномалий транзакций</li><li>• Сегментация клиентов</li><li>• Поведенческий анализ</li><li>• Рейтинговая оценка заемщиков</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Постквантовая криптография</li><li>• Генерация криптографических ключей</li><li>• Цифровые подписи</li><li>• Защищённый обмен финансовыми данными</li><li>• Шифрование банковских транзакций</li><li>• Управление доступом к данным</li><li>• Защита распределённых реестров</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Прайсинг деривативов</li><li>• Монте-Карло симуляции</li><li>• Stress-testing портфелей</li><li>• Оценка рыночных рисков</li><li>• Сценарный анализ</li><li>• Прогнозирование волатильности</li><li>• Анализ макроэкономических факторов</li></ul>

# QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm)

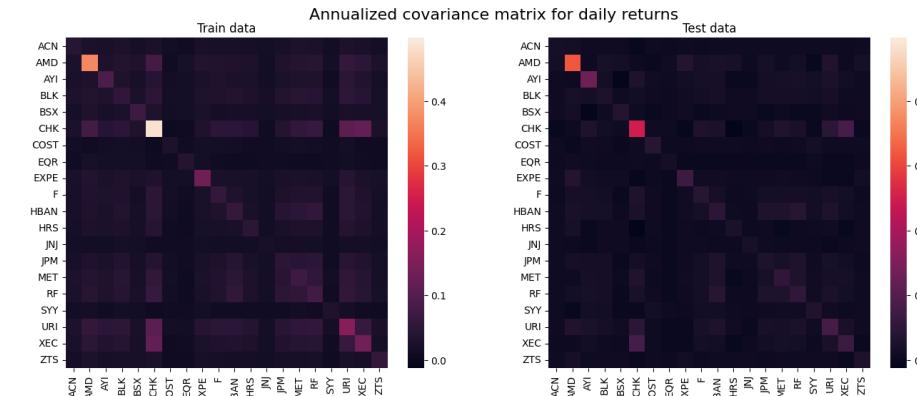
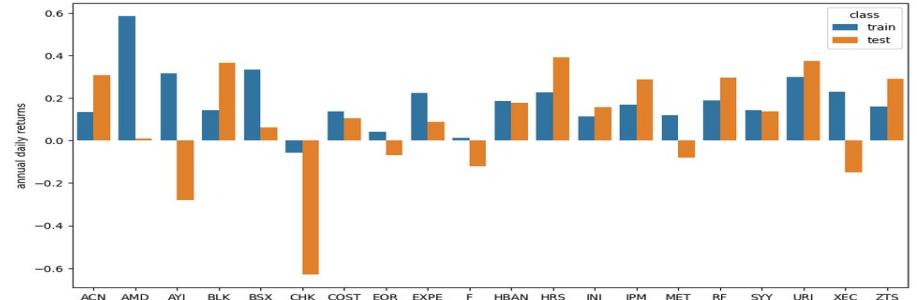
*Задача: оптимизация инвестиционного портфеля*

Мы решаем данную задачу с помощью популярного квантового алгоритма оптимизации QAOA. В качестве сравнения, мы рассматриваем точное решение, приводимое с помощью классического алгоритма через eigensolver.

Данные по акциям, которые мы будем использовать для исследования, взяты с датасета kaggle/samp500, и представляют собой уровень цен за пять лет по списку акций S&P 500.

В целях эффективности работы алгоритмов, мы произвольно выбрали из пула акций 12 пунктов, распределенных по ценовым категориям. Рассчитав среднюю годовую доходность по средним значениям, мы перешли к вычислениям.

# Исследовательский анализ данных



# Параметры модели

Модель Марковица, 1952 г.

$\max: \mu^T x - q \cdot x^T \Sigma x$ , где  $\mu$  – вектор доходов,  $\Sigma$  – ковариация доходов,  $q$  – коэффициент риска.

$\sum_{i=1}^n x_i = B$ , где  $B$  – бюджет, максимальная сумма допустимых вложений.

Исследуемый интервал параметров

`budget = [3, 4, 5]`

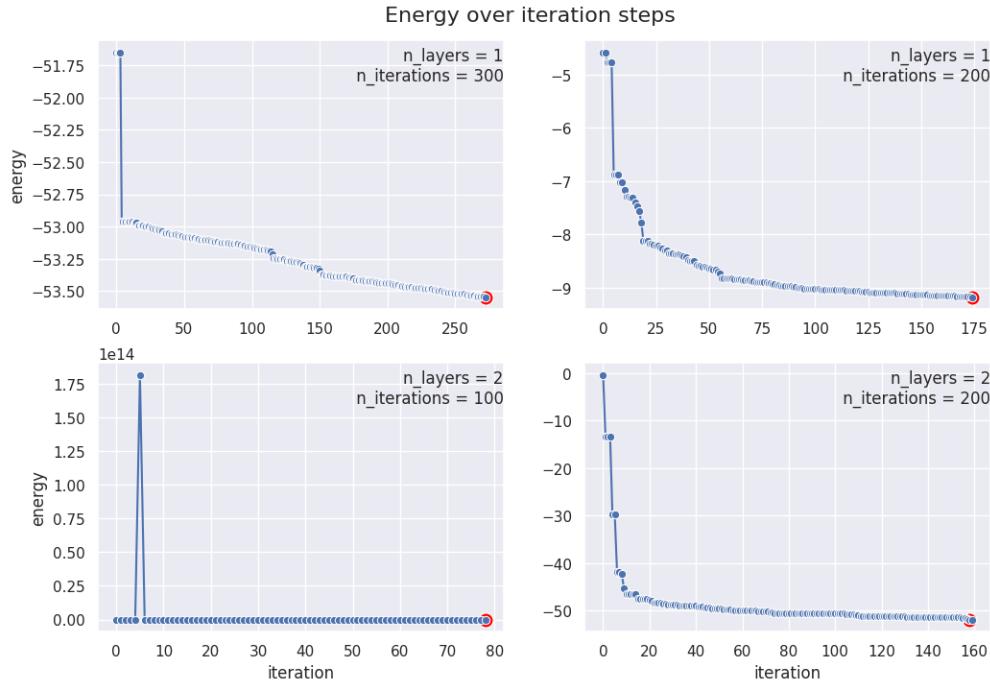
`risk_factor = [0.3, 0.5, 0.7]`

`n_layers = [1, 2, 3, 4]` – параметр глубины квантовой схемы.

`n_iter = [100, 200, 300]` – максимальное количество итераций оптимизатора.

# Процесс оптимизации модели

```
scipy.optimize.minimize(energy, ..., method='COBYLA', options={'maxiter': n_iter}, ...)
```



## Результаты

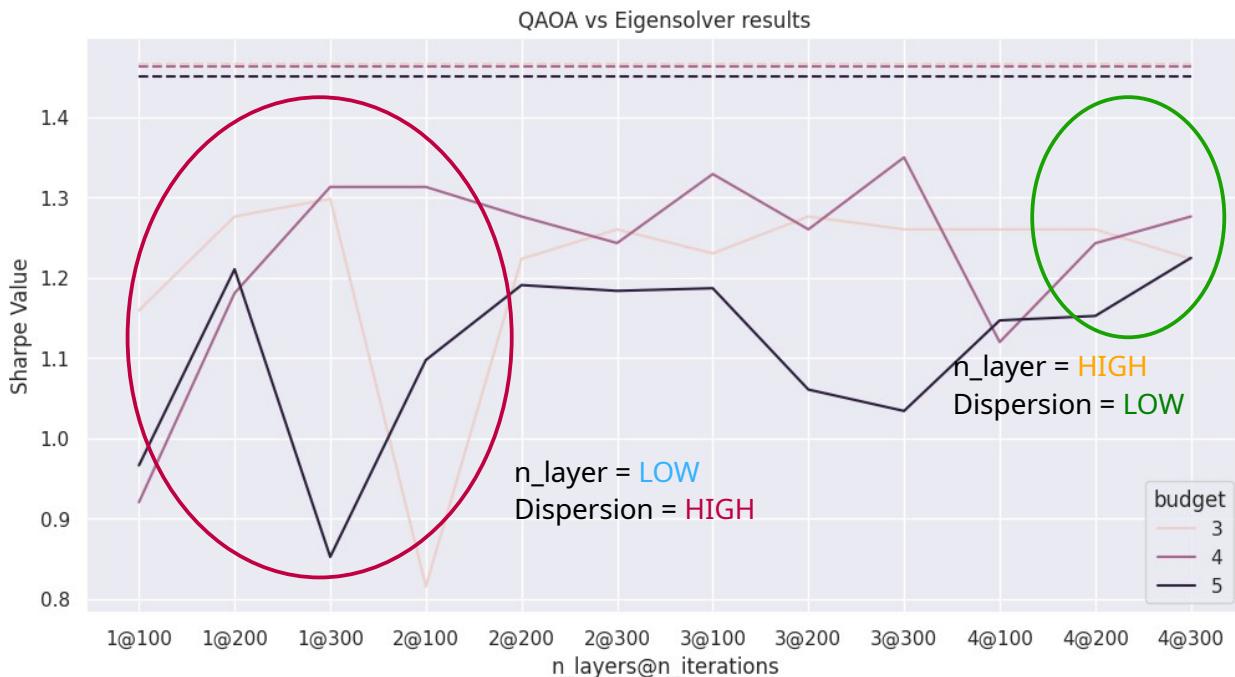
1. Оптимизатор выходит на плато достаточно рано.
2. Минимум достигается в большинстве случаев.

# Анализ вычислительных результатов

## Коэффициент Шарпа

$$S = (d - r_0) / r$$

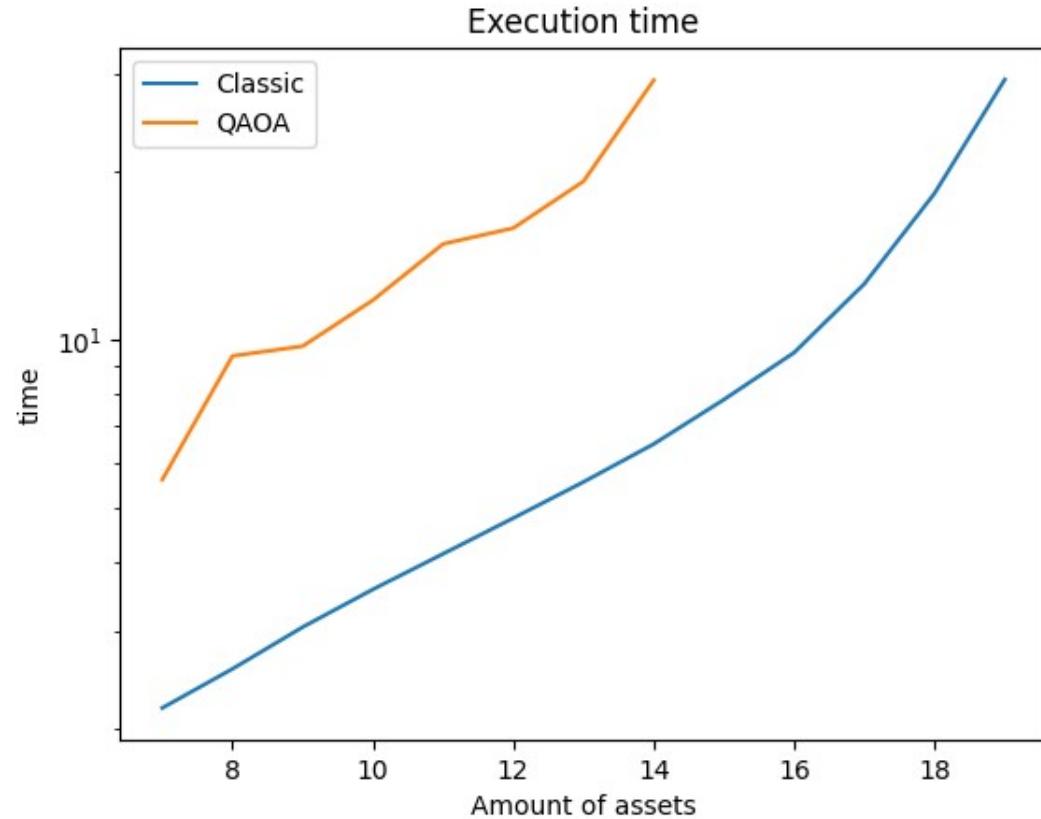
$r_0$  - доходность при нулевом риске, для нашего случая (S&P) это 0.035



## Результаты

- Низкая точность квантовых вычислений.
- Вариационный характер квантовых вычислений ( $n_{shots} \sim 1K$ ).
- Интерполяция.** (Точность измерений увеличивается с глубиной квантовой схемы  $n_{layers}$ .)

# Сравнение сложности алгоритмов



## Результаты

- Сложность классического алгоритма –  $O(2^N)$ , неприменим при  $N > 20$ .
- Сложность QAOA –  $O(N*n_l)$ <sup>1</sup>, потенциально экспоненциальный рост вычислительных мощностей!

# QSVM (Quantum SVM) и VQC (Variational Quantum Classifier)

## *Задача: оценка кредитоспособности*

Данная задача представляет собой задачу классификации. На ней мы попробуем исследовать два квантовых метода машинного обучения – QSVM и VQC. Для сравнения результатов, мы используем классический алгоритм SVM.

Информация о многих данных используемых в финансовом секторе недоступна рядовому пользователю. Финансовые организации, в погоне за прибылью, используют всю возможную информацию о своих клиентах, и редко ей делятся. Поэтому для исследований в таких областях как *fraud detection* или *credit scoring* часто используются синтетические данные, как в данном случае.

Данный датасет предоставляет базовую и финансовую информацию о 1000 малых и средних бизнес предприятиях в Великобритании. В сумме он содержит более 200 атрибутов которые могут быть использованы для оценки выживаемости и успешности предприятий.

# Исследовательский Анализ Данных и последующая Предобработка

Процесс EDA был осложнен сильной разрозненностью (12 датасетов по разным параметрам), высоким объемом (до 1к позиций), зашумленностью, и отсутствием комментариев по данным, поэтому представлял собой интенсивный анализ базовых статистических метрик данных, без визуализации.

В результате продолжительного процесса обработки данных, был получен датафрейм 129 x 996. В качестве лейблов изначально присутствовали четыре столбца: дефолтеры(банкроты) по заемам, дефолтеры по кредитным картам, потенциальные дефолтеры по заемам, и потенциальные дефолтеры по кредитным картам. Вследствие малого количества семплов для обучения модели, классы были преобразованы в два, кредитоспособных и некредитоспособных клиентов.

# Процесс сравнения моделей



Initial data  
129 samples  
X  
996 features

Data Preprocessing

OneHotEncoder()  
OrdinalEncoder()  
train\_test\_split()  
StandardScaler()  
LDA()

Train data  
96 samples  
X  
6 features

Test data  
33 samples  
X  
6 features

оценка обучаемости модели

Cross Validation test

Финальное обучение модели

QSVM.fit()  
VQC.fit()

Результаты

- Accuracy
- F1-score
- Confusion Matrix
- ROC-AUC

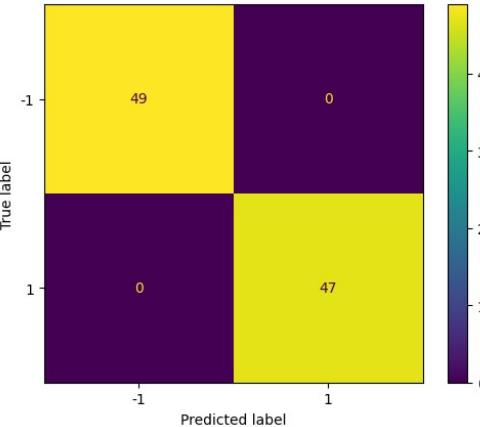
оценка финальной модели

QSVM.predict()  
VQC.predict()

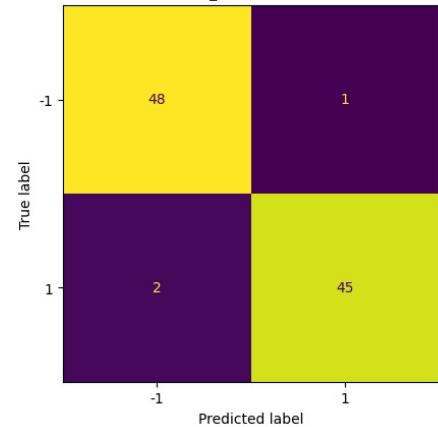
# Confusion Matrix Analysis

Cross-Validation

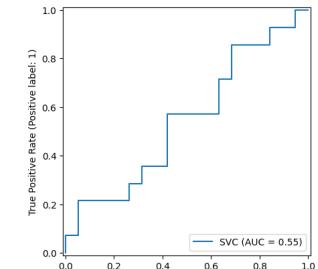
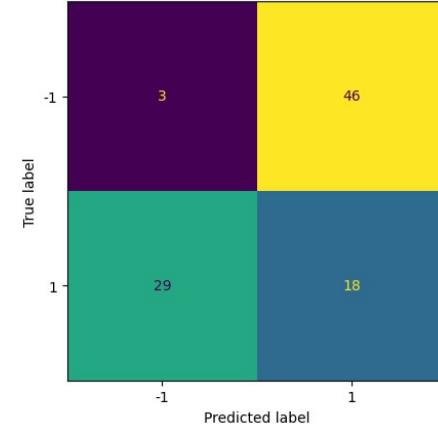
SVM



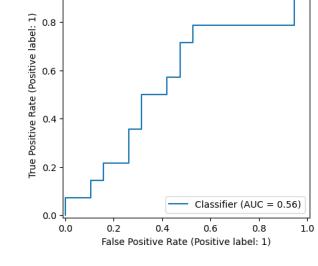
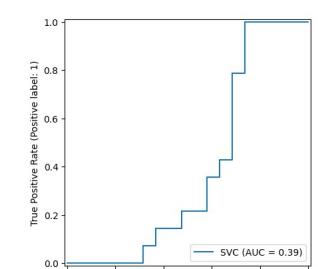
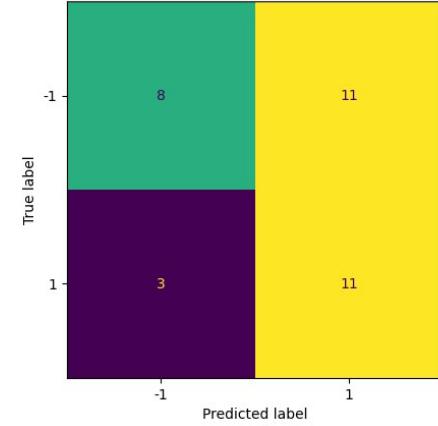
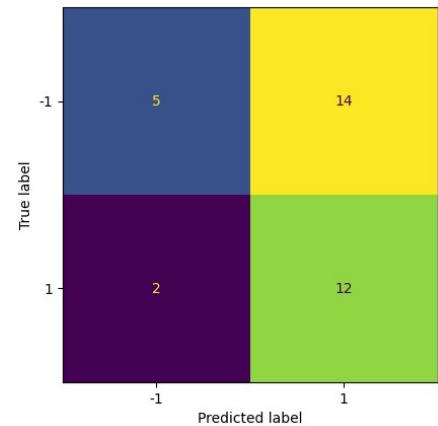
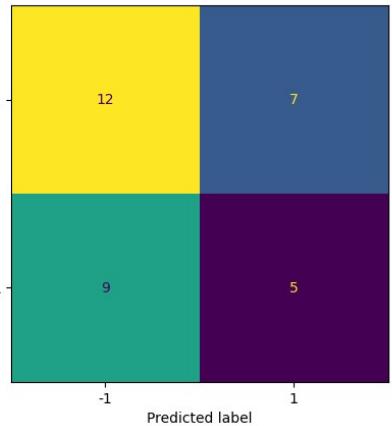
QSVM



VQC



Test



# Итоговое сравнение моделей

Все модели показали хорошую обучаемость на приведенных данных.

Сравнение качества финансовых моделей осложнено небольшим количеством сэмплов в тестовом сете.

## Ключевые замечания

- QSVM – гибридный (квантово-классический) алгоритм, использует метод классической библиотеки `sklearn.SVC(kernel=...)` с квантовым ядром – пример **расширения функционала** за счет квантовых вычислений.
- VQC – QAOA и QSVM для оптимизации используют классические алгоритмы, в то время как VQC использует для данной задачи квантовую нейронную сеть. Это пример **нового функционала**, вносимого квантовыми алгоритмами.

# Проблемы квантовых вычислений

## Эра NISQ (Noisy-Intermediate-Scale-Quantum)

- Декогеренция – потеря точности
- Шум вентилей – потеря точности с количеством слоев
- Количество кубитов – низкий объем вычислений

## Эра Quantum Supremacy

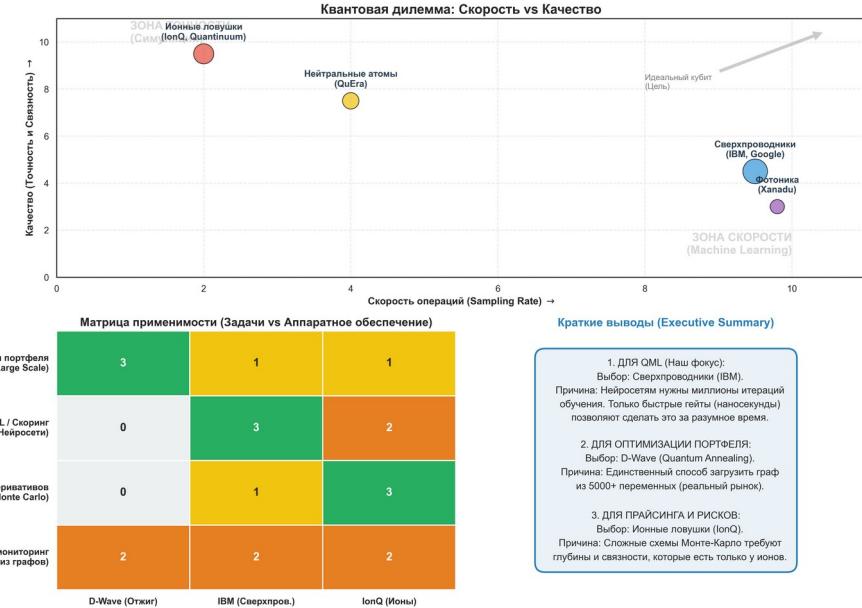
- Все вышеперечисленные трудности рассчитывается решить к 2030-2040 году.

# Технические решения

Сравнительный анализ аппаратных комплексов (Hardware Matrix 2025)

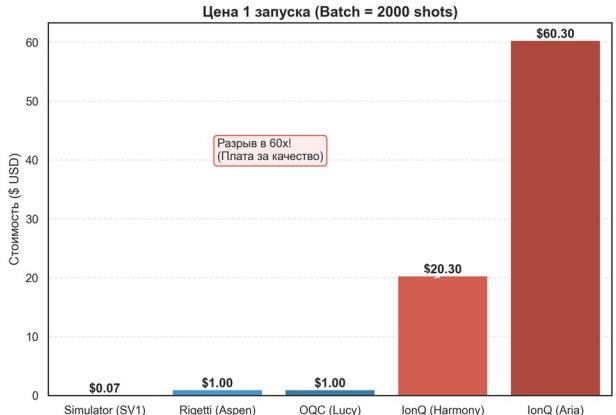
Платформа	IBM Quantum (System Two)	IonQ (Forte)	D-Wave (Advantage)	QuEra (Aquila)	SpinQ (Gemini)
Технология	Сверхпроводники	Ионные ловушки	Квантовый отжиг	Нейтральные атомы	Desktop NMR
Кубиты (Физич.)	127 - 156	32 (AQ)	5000+	256	2
Связность	Низкая (Соседи)	Высокая (All-to-All)	Спец. (Pegasus)	Динамическая	Полная
Скорость (Gate)	Наносекунды (Fast)	Микросекунды (Slow)	N/A (20 мкс/cycle)	Микросекунды	Миллисекунды
Точность (Fidelity)	99.8% (Good)	>99.9% (Best)	N/A	99.5%	Low (Edu)
Стоимость	Высокая (Runtime)	Очень высокая (Shots)	Средняя (Time)	Средняя (Task)	\$8,500 (Разово)
Доступность	IBM Cloud	AWS / Azure	AWS / Leap	AWS Braket	Доставка
Назначение	ML & AI (VQE)	Сложные симуляции	Оптимизация (QUBO)	Графы / Фрод	Обучение / Демо

Анализ аппаратного обеспечения: Инженерные компромиссы и стратегия



# Программные Решения

## Сравнение стоимости облачных вычислений



## Тарифная сетка (Cloud Pricing)

Провайдер	Тип	Старт задачи (\$)	Цена за Shot (\$)
Simulator (SV1)	Virtual	0.0	3.5e-05
Rigetti (Aspen)	Supercond.	0.3	0.00035
OQC (Lucy)	Supercond.	0.3	0.00035
IonQ (Harmony)	Trapped Ion	0.3	0.01
IonQ (Aria)	Trapped Ion	0.3	0.03

## Популярные программные библиотеки

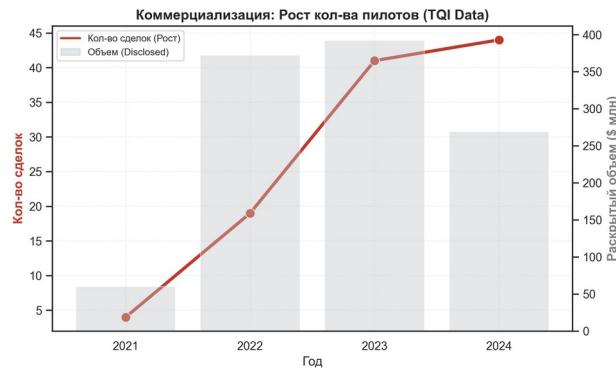
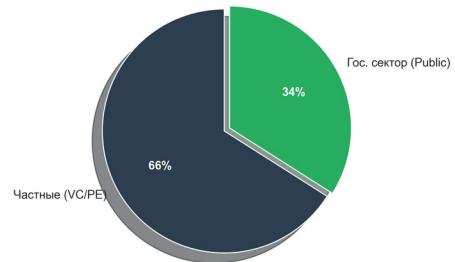
Характеристика	Qiskit (IBM)	PennyLane (Xanadu)	Ocean (D-Wave)
Основной фокус	Универсальный (Gate)	Квантовый ML (QNN)	Оптимизация (QUBO)
Интеграция PyTorch	Через врапперы (сложно)	Нативная (First Class)	Нет
Градиенты	Parameter Shift	Backprop / Adjoint	Нет
Поддержка железа	IBM + плагины	Все (через плагины)	Только D-Wave
Порог входа	Высокий (Low level)	Низкий (как NumPy)	Средний (графы)
Вердикт для нас	Хорош для R&D	ЛУЧШИЙ ДЛЯ QML	ЛУЧШИЙ ДЛЯ ОПТ.

# Общая Активность Рынка

## Обзор рынка квантовых вычислений для финтеха (2025)



## Структура финансирования 2024: Рост гос. участия



## Ключевые экосистемы и SDK

Компания	Платформа	Фокус
IBM	Qiskit / IBM Quantum	Full Stack & Cloud Access
Google	Cirq (NISQ)	R&D, Sycamore Processors
Xanadu	PennyLane	Дифф. программирование (QML)
D-Wave	Ocean SDK	Квантовая оптимизация (Annealing)
AWS / Azure	Braket / Quantum	Унифицированный облачный доступ
IonQ	IonQ SDK	High-Fidelity Hardware

## Результаты

Гипотеза о наличии активности и интереса рынка подтверждается на качественном уровне. Активность развития технологий и пользовательской инфраструктуры обосновывают целесообразность рассмотрения квантовых вычислений для финансовых задач на последующих этапах.

### ИСТОЧНИКИ:

1. McKinsey: 'The Year of Quantum: From concept to reality in 2025' (Финансы 1, 3B – > 2.0B и сегмент Public/Private).
2. BCG: 'The Long-Term Forecast' (оценка 2023 г. - \$1.2B).
3. Deloitte: 'Quantum computing next 5 years'.
3. The Quantum Insider: 'Annual Report 2023' (данные по сделкам и верхняя оценка VC \$2.4B).

# Спасибо за Внимание!

