

Квантово-классическая бинарная классификация изображений: эксперименты на квантовом компьютере

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО

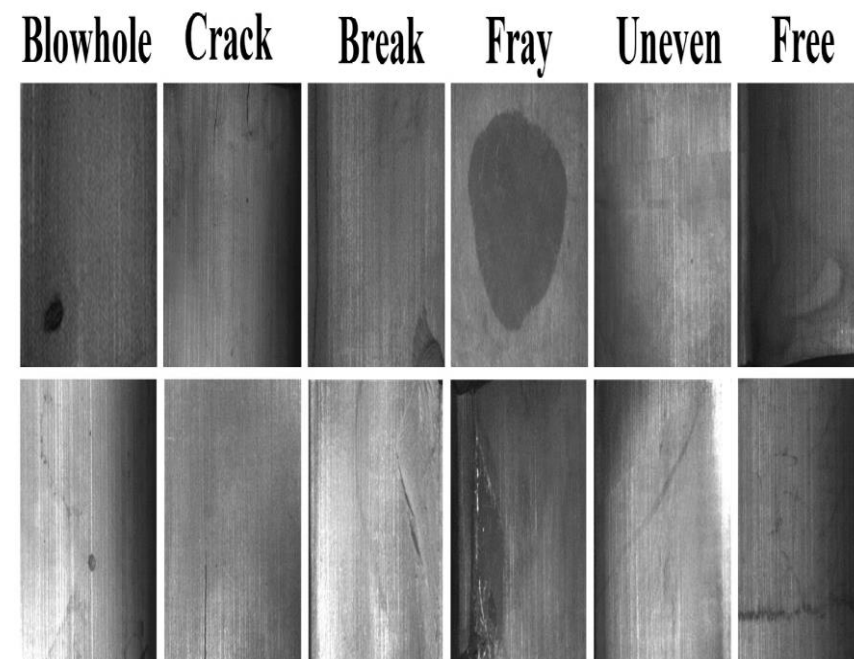
АВТОРЫ: А.Д. ИВЛЕВ, А.В. ЛИНЕВ, М.В. БАСТРАКОВА,
М.В. ИВАНЧЕНКО



Постановка задачи

- Исследовать возможность применения гибридной квантово-классической нейронной сети для решения прикладных задач бинарной классификации изображений на примере задачи анализа дефектов магнитных плиток
- Сравнить точность и эффективность предложенной модели на симуляторе идеального квантового компьютера, на российском квантовом компьютере Snowdrop 4Q ver2 (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и его шумном симуляторе для оценки применимости гибридных квантово-классических сетей в эпоху NISQ
- Исследовать два подхода, обеспечивающие переносимость квантовых слоёв на различные квантовые устройства

Данная работа является продолжением статьи: A. D. Ivlev, A. V. Liniov, M. V. Bastrakova, V. D. Kustikova, and I. B. Meyerov. Hybrid Quantum-Classical Neural Networks for Analyzing Magnetic Tile Images for Defects //Lobachevskii Journal of Mathematics, 2026, Vol. 47, No. 1, P. 190–199



Примеры изображений магнитных плиток
<https://github.com/Charmve/Surface-Defect-Detection/tree/master/Magnetic-Tile-Defect>

Схема структуры гибридной квантово-классической нейронной сети



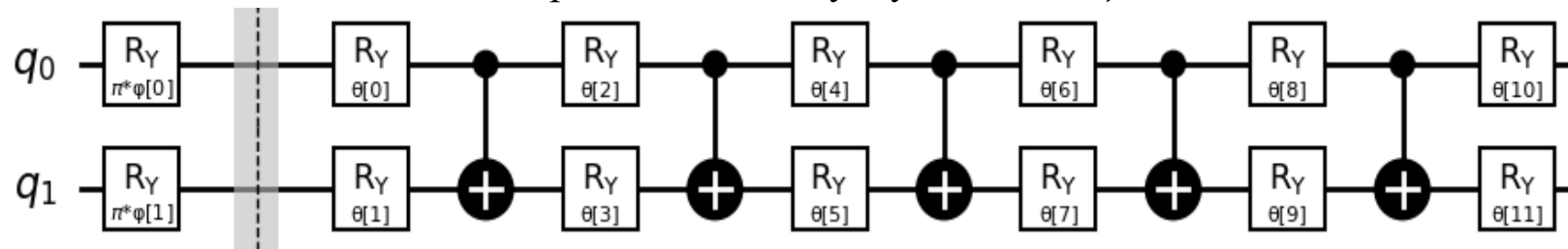
Для построения квантово-классической нейронной сети предлагается использовать подход трансферного обучения, в которой предварительно обученная классическая сеть модифицируется вариационной квантовой схемой. Также предлагается гибридный подход, в которой квантовый и линейный слой используются параллельно.

Схема квантового слоя

Типы и параметры двух последних уровней нейронной сети

Гибридная сеть			Гибридная сеть с параллельными слоями		
Тип слоя	Размерность выхода	Количество параметров	Тип слоя	Размерность выхода	Количество параметров
Квантовый	4	12	Квантовый и параллельный линейный	4/4	12/12
Линейный	2	10	Линейный	2	10

Параметризованная схема квантового слоя (её глубина – 12, количество однокубитных операций – 14, а двухкубитных – 5)

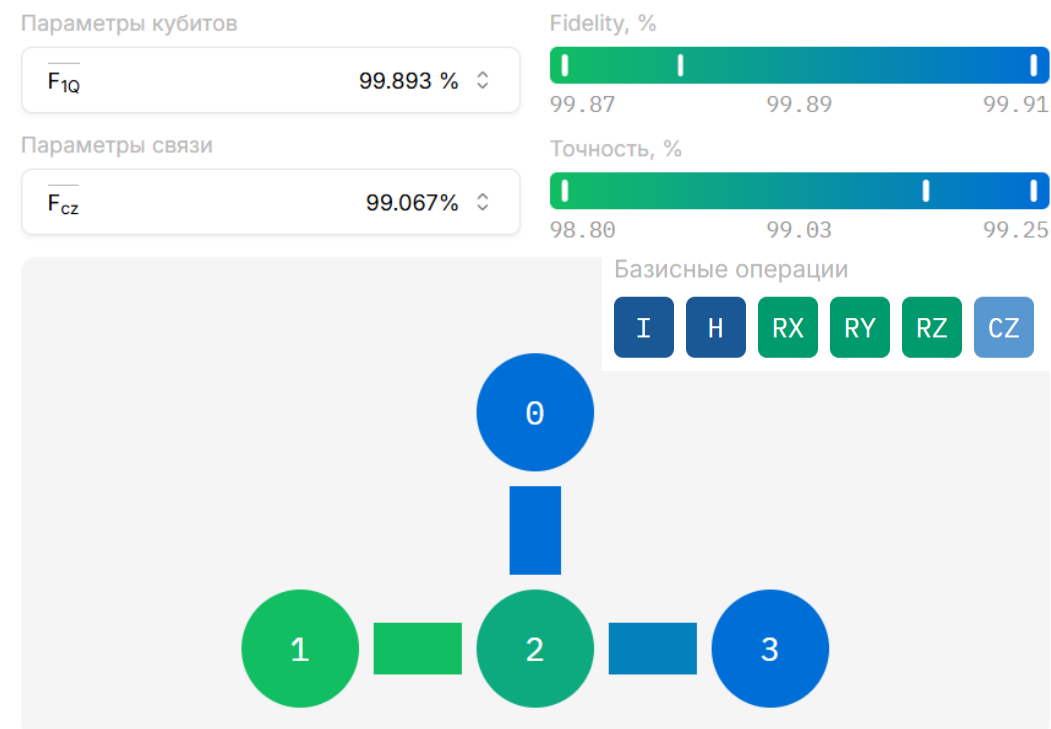


Параметры квантового компьютера Snowdrop 4Q ver2

Средние значения параметров:

- Точность однокубитных операций: $\sim 99.89\%$
- Точность двухкубитной операций CZ: $\sim 99.07\%$
- Время продольной релаксации T_1 : $\sim 27\ \mu\text{s}$
- Время поперечной релаксации T_2 : $\sim 7.3\ \mu\text{s}$
- Точность считывания F_{RO} : $\sim 94.86\%$

Топология квантового компьютера Snowdrop 4Q ver2, его базисные операции и точность их исполнения

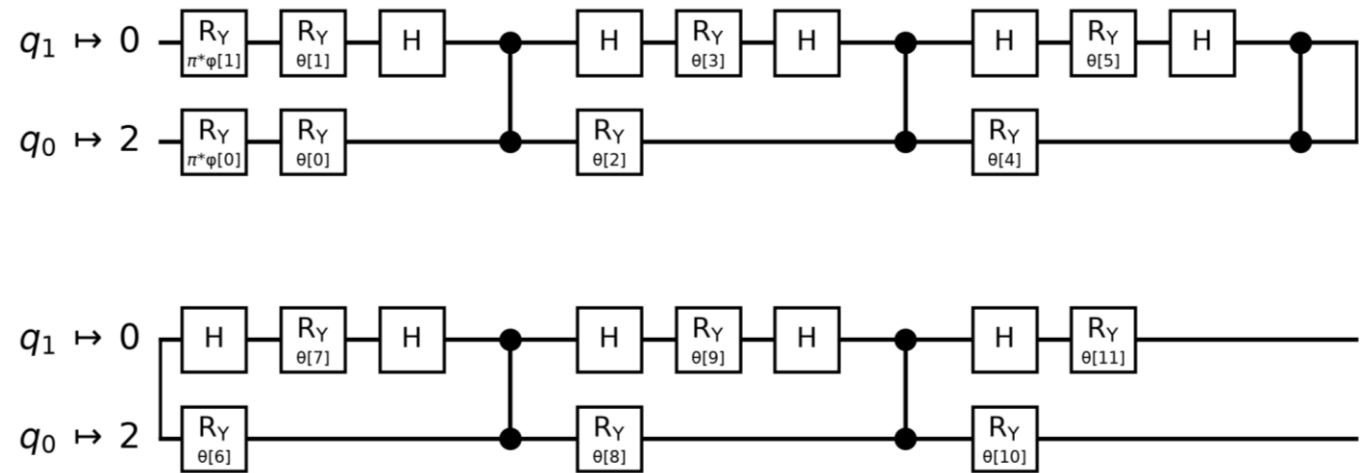


Способы переноса квантовых слоёв на различные квантовые устройства

Первый, классический подход, заключается в однократном преобразовании и оптимизации параметризованных квантовых схем перед проведением экспериментов.

Полученная схема представлена на рисунке, её глубина – 22, число однокубитных операций – 24, двухкубитных – 5.

Параметризованная квантовая схема, преобразованная и оптимизированная для Snowdrop 4Q ver2

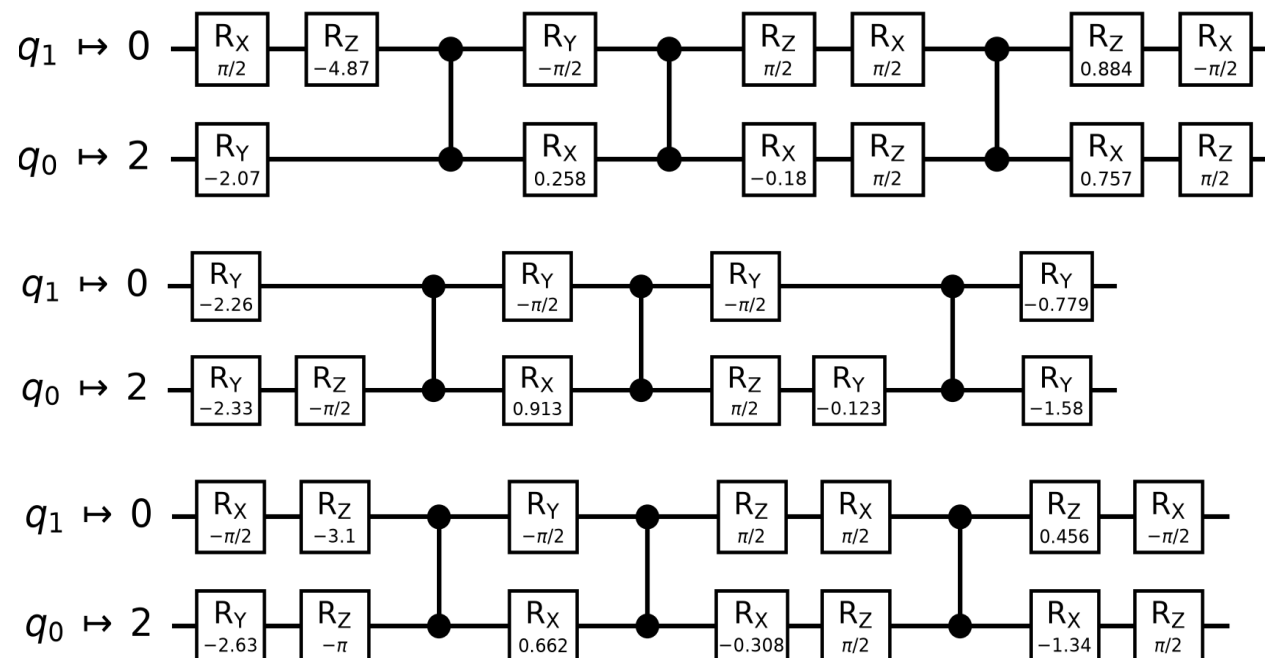


Способы переноса квантовых слоёв на различные квантовые устройства

Второй подход, предлагаемый нами, заключается в преобразовании и оптимизации квантовых схем перед каждым запуском на устройстве после подстановки в них значений всех параметров.

Средние значения параметров для полученных квантовых схем меньше, чем для первого подхода и даже исходной схемы: глубина – 10.773, количество однокубитных операций – 11.523, двухкубитных – 3.

Примеры квантовых схем, преобразованных и оптимизированных (с точностью до глобальной фазы) для Snowdrop 4Q ver2 после подстановки параметров



Методика проведения и результаты экспериментов

Результаты классификации при первом подходе к переносимости квантовой схемы и эталонные значения, полученные на симуляторе идеального квантового компьютера

Тип исполнительного устройства для квантовой схемы	Гибридная сеть		Гибридная сеть с параллельными слоями	
	Среднее значение функции потерь	Точность	Среднее значение функции потерь	Точность
Идеальный симулятор	0.496	0.982	0.369	0.946
Шумный симулятор	0.520	0.982	0.371	0.946
Квантовый компьютер	0.528	0.982	0.392	0.946

Результаты классификации при втором подходе к переносимости квантовой схемы

Тип исполнительного устройства для квантовой схемы	Гибридная сеть		Гибридная сеть с параллельными слоями	
	Среднее значение функции потерь	Точность	Среднее значение функции потерь	Точность
Шумный симулятор	0.508	0.982	0.370	0.946
Квантовый компьютер	0.521	0.982	0.386	0.946

Методика проведения экспериментов:

- Модели предобучены с использованием симулятора идеального квантового компьютера
- Тестовая выборка состоит из 168 изображений, из которых 49 содержат дефекты
- Функция потерь: CrossEntropyLoss
- Квантовые схемы запускались с 2048 измерениями

Заключение

- Гибридная квантово-классическая нейронная сеть показала устойчивость к погрешностям возникающим при исполнении на квантовом компьютере Snowdrop 4Q ver2 и его шумном симуляторе
- Преобразование и оптимизация квантовых схем перед каждым запуском на устройстве после подстановки в них значений всех параметров позволило уменьшить глубину и размер квантовых схем в среднем в 1.8 раза по сравнению с классическим подходом, соответственно средние значения функции потерь снизились и стали ближе к эталонным. При этом среднее время, затраченное на преобразование и оптимизацию, составило 0.216 с, что значительно меньше, чем среднее время исполнения на квантовом компьютере – 16.6 с (с учётом накладных расходов на удалённый доступ)

Результаты показывают возможность применения гибридных квантово-классических нейронных сетей с использованием современных квантовых компьютеров эпохи NISQ для решения задач классификации и целесообразность проведения дальнейших исследований в данном направлении.

Исследование выполнено при поддержке программы развития региональных научно-образовательных математических центров, соглашение Минобрнауки № 075-02-2026-1346