АННОТАЦИЯ
к диссертации Муханбет Ақсултан Айтуарұлы на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D06102 – Компьютерная инженерия на тему: «Исследование и разработка гибридных квантово-классических алгоритмов для распознавания образов»

Актуальность темы исследования.

Пересечение квантовых вычислений и машинного обучения является одним из наиболее динамично развивающихся и стратегически значимых направлений современной науки и технологий. За последнее десятилетие классические методы глубокого обучения, особенно глубокие нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN), достигли значительных успехов в задачах компьютерного зрения, распознавания образов и анализа больших данных. Однако наряду с этими достижениями стали проявляться и фундаментальные ограничения классических подходов. В частности, непрерывный рост объёмов данных и увеличение потребности в вычислительных ресурсах снижают эффективность классических архитектур и создают серьёзные трудности при их масштабировании.

Современные глубокие архитектуры, такие как CNN, ResNet и VGG, могут содержать сотни миллионов и даже миллиарды обучаемых параметров. Обучение и применение таких сложных моделей требуют значительных вычислительных ресурсов, энергии и времени. Экспоненциальный рост числа параметров приводит к соответствующему увеличению вычислительных затрат, что делает проблему эффективного использования ресурсов особенно актуальной. Кроме того, такие модели, как правило, зависят от больших объёмов размеченных данных, что доступно не для всех прикладных задач. Наряду с этим, на текущем этапе развития чистые квантовые нейронные сети (Quantum Neural Networks, QNN) также имеют ряд ограничений. В частности, при классификации сложных цветных изображений их точность остаётся ограниченной: на устройствах эпохи NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) достигнутый уровень составляет около 82,78%. Это указывает на то, что, несмотря на высокий потенциал квантовых моделей, они всё ещё требуют дальнейшего совершенствования для практического применения.

Квантовое машинное обучение (Quantum Machine Learning, QML) рассматривается как одно из перспективных направлений для преодоления указанных ограничений. Основные принципы квантовой механики - суперпозиция, квантовая запутанность (entanglement) и интерференция - предлагают принципиально новые способы обработки информации. Эффективное использование этих свойств позволяет предположить, что квантовые нейронные сети могут достигать высокой производительности при значительно меньшем числе параметров по сравнению с классическими моделями.

Тем не менее, применение квантовых нейронных сетей в практических задачах ограничено рядом технических и технологических трудностей. Квантовые устройства эпохи NISQ характеризуются ограниченным числом кубитов, высоким уровнем шума и эффектами декогеренции. Эти факторы отрицательно влияют на стабильность и точность

квантовых вычислений. Кроме того, ограничения на глубину квантовых схем и количество вентилей не позволяют напрямую реализовывать сложные модели.

В качестве одного из эффективных подходов к решению указанных проблем предлагаются гибридные квантово-классические архитектуры. В таких подходах объединяются классические нейронные сети и квантовые вычислительные элементы, что позволяет эффективно использовать преимущества каждого из них. Гибридные модели QNN способны обеспечивать высокую точность классификации при значительном сокращении числа обучаемых параметров.

Особый интерес в задаче оптимизации архитектуры квантовых схем представляют генетические алгоритмы. Эти эволюционные методы обладают способностью эффективно искать решения в высокоразмерных и сложных пространствах. Использование генетических алгоритмов для автоматического построения и оптимизации квантовых схем является перспективным направлением разработки эффективных и NISQ-совместимых архитектур. В последние годы данное направление активно развивается и привлекает всё больше внимания научного сообщества.

В этой связи исследование задачи оптимизации архитектуры квантовых схем в квантовых сверточных нейронных сетях (Quantum Convolutional Neural Networks, QCNN) приобретает особую актуальность. В представленной диссертационной работе разработана новая архитектура гибридной квантово-классической нейронной сети (HQCNN), а также предложена её усовершенствованная версия на основе генетического алгоритма - модель HQCNN-REGA. Эффективность предложенных моделей была оценена в ходе комплексных экспериментальных исследований на широко используемых наборах данных, таких как MNIST, FashionMNIST и CIFAR-100. Полученные результаты демонстрируют высокую точность, вычислительную эффективность и практическую применимость предложенных подходов.

Цель диссертационной работы

Разработка и оптимизация гибридных квантово-классических нейронных сетей на основе квантовых схем с целью повышения точности квантовых алгоритмов и сокращения числа обучаемых параметров в задачах распознавания изображений.

Задачи исследования:

– провести систематический и критический обзор современных научных исследований в области квантового машинного обучения (QML) и квантовых сверточных нейронных сетей (QCNN), а также проанализировать их преимущества и ограничения;

– изучить и систематизировать основные методы кодирования классических данных в квантовые состояния (угловое кодирование, амплитудное кодирование, basis encoding и др.), а также провести их сравнительную оценку с точки зрения вычислительной сложности и эффективности;

– разработать архитектуру гибридной квантово-классической нейронной сети (HQCNN), эффективно объединяющую классические и квантовые слои и включающую QConv2D-слои;

– разработать и реализовать генетический алгоритм, обеспечивающий одновременную оптимизацию ключевых параметров квантовой схемы, включая число слоев, набор квантовых вентилей и структуру запутанности между кубитами;

– разработать методику комплексной оценки эффективности предложенной гибридной модели и её версии, оптимизированной с использованием генетического алгоритма (HQCNN-REGA);

– провести масштабные экспериментальные исследования на наборах данных MNIST, FashionMNIST и CIFAR-100, а также выполнить всесторонний сравнительный анализ полученных результатов с классическими и чисто квантовыми моделями с точки зрения точности, устойчивости и вычислительной эффективности.

Методы исследования:

Систематический обзор литературы, квантовые вычисления, проектирование и обучение параметризованных квантовых схем (PQC), квантовые нейронные сети, гибридные квантово-классические нейронные сети, генетические алгоритмы, повторная загрузка данных.

Объект исследования

Гибридные квантово-классические нейронные сети для задач распознавания изображений.

Предмет исследования

Методы оптимизации квантовых схем в квантовых нейронных сетях.

Научная новизна полученных результатов:

1. Разработан гибридный квантово-классический алгоритм для задач распознавания изображений на основе новой архитектуры, совместно использующей квантовые свёрточные (QConv2D) и полносвязные (QDense) слои. В данной объединённой архитектуре параметризованные квантовые схемы эффективно применяются в качестве фильтров и операторов измерения.
2. Предложен новый эволюционный подход к оптимизации архитектуры квантовых схем в условиях ограниченного числа кубитов. В результате объединения квантового кодирования и генетических алгоритмов число обучаемых параметров в нейронной сети значительно сокращено, а вычислительная эффективность модели повышена.

Положения, выносимые на защиту:

3. Предложенный гибридный квантово-классический алгоритм на основе квантовых свёрточных (QConv2D) и квантовых полносвязных (QDense) слоёв обеспечивает точность классификации 97,4% на наборе данных CIFAR-100, что на 9–10% превышает показатели существующих аналогичных квантовых методов.
4. Эволюционный алгоритм для автоматического определения архитектуры квантовой схемы в условиях ограниченных ресурсов сокращает число обучаемых параметров при угловом кодировании (angle encoding) до 18 690, сохраняя при этом минимальную глубину квантовой схемы. Это сокращает число параметров в 47 раз по сравнению с традиционными классическими свёрточными нейронными сетями (CNN) и существенно повышает вычислительную эффективность.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость:

Данное исследование вносит существенный вклад в развитие теоретических основ оптимизации параметризованных квантовых схем (Parameterized Quantum Circuits, PQC). В частности, архитектурные параметры квантовых нейронных сетей - число слоёв, конфигурация вентилей и структура запутанности - рассматриваются как единая система, и задача их одновременной оптимизации исследуется комплексно. Такой подход позволяет перейти от традиционных эмпирических методов проектирования квантовых моделей к более системным и формализованным методам. Кроме того, в работе расширяются математические возможности эвристических методов оптимизации, таких как генетические алгоритмы, в контексте квантового машинного обучения. Рассматривается задача эффективного поиска в высокоразмерных, дискретных и

непрерывных пространствах параметров, а также предлагаются новые подходы к автоматизированному синтезу квантовых схем. Полученные результаты формируют теоретическую основу для разработки квантовых алгоритмов, в особенности ориентированных на создание компактных и эффективных архитектур, адаптированных к условиям NISQ-эпохи. Также работа способствует углублению научных представлений об экспрессивности и обобщающей способности гибридных квантово-классических моделей.

Практическая значимость:

Разработанные архитектуры гибридных квантово-классических нейронных сетей (HQCNN и HQCNN-REGA) демонстрируют высокую эффективность с практической точки зрения и могут быть применены для решения реальных прикладных задач. Предложенные модели обеспечивают существенное сокращение числа обучаемых параметров по сравнению с классическими архитектурами глубокого обучения, что, в свою очередь, приводит к уменьшению времени обучения, снижению вычислительных затрат и сокращению энергопотребления. Это особенно важно для систем с ограниченными ресурсами и в задачах, где критична энергоэффективность.

Предложенные архитектуры разработаны с учётом ограничений современных квантовых устройств NISQ, включая глубину квантовых схем, количество вентилей и структуру связности между кубитами. Это обеспечивает возможность их реализации на существующих квантовых аппаратных платформах (таких как IBM Quantum, Rigetti и другие). Таким образом, результаты исследования представляют собой не только теоретический вклад, но и практико-ориентированные решения, пригодные для использования в реальных вычислительных средах.

Объём и структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырёх основных глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет около 80 страниц, включая таблицы, рисунки и формулы. Список литературы насчитывает более 50 наименований.

В первой главе представлен обзор литературы по квантовому машинному обучению, математическим основам квантовых вычислений и квантовым свёрточным нейронным сетям.

Во второй главе рассматриваются основы параметризованных квантовых схем для задач распознавания изображений: методы кодирования данных, структура PQC, вариационные алгоритмы.

В третьей главе описываются гибридная архитектура HQCNN, метод Data Re-uploading и проектирование слоёв QConv2D и QDense.

В четвёртой главе излагаются разработка генетического алгоритма для оптимизации квантовых схем, результаты экспериментальных исследований на наборах данных MNIST, FashionMNIST и CIFAR-100, а также сравнительный анализ.

Апробация работы

Результаты работы обсуждались на научных семинарах факультета информационных технологий и искусственного интеллекта Казахского национального университета им. аль-Фараби, а также были представлены на международных конференциях:

– International Conference of Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education (CITech-2025), (Алматы, Казахстан, 2025);
– Международная научная конференция «IEEE Smart Information Systems and Technologies» (Астана, Казахстан, 2024).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 4 - в изданиях, рекомендованных ККСОН РК, 3 - в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах цитирования («Web of Science» и/или «Scopus»), 1 - в сборниках трудов международных конференций.

- Mukhanbet, A., & Daribayev, B. (2025). A Hybrid Quantum–Classical Architecture with Data Re-Uploading and Genetic Algorithm Optimization for Enhanced Image Classification. Computation, 13(8), 185. (79th) https://doi.org/10.3390/computation13080185
- Daribayev, B., Mukhanbet, A., Makhmut, E., Azatbekuly, N., & Imankulov, T. (2025). Quantum–Classical Hybrid Architecture for Solving the Muskat–Leverett Model. IET Quantum Communication, 6(1). (79th) https://doi.org/10.1049/qtc2.70022
- Azatbekuly, N., Mukhanbet, A., & Bekele, S. D. (2024). Development of an Intelligent Video Surveillance System Based on YOLO Algorithm. In 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST) (pp. 498–503). 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). IEEE. https://doi.org/10.1109/sist61555.2024.10629617
- Mukhanbet, A., Azatbekuly, N., & Daribayev, B. (2025). DEVELOPMENT OF HYBRID QUANTUM-CLASSICAL MODELS FOR COMPUTER VISION. Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies, 3(1), 45–55. https://doi.org/10.26577/jpcsit20253105
- Mukhanbet, A., Azatbekuly , N., & Daribayev, B. (2024). OPTIMIZING QUANTUM ALGORITHMS FOR SOLVING THE POISSON EQUATION. Scientific Journal of Astana IT University, 18, 55–65. https://doi.org/10.37943/18REAT9767
- Mukhanbet, A. A., Nakibayeva, M. T., & Daribayev, B. S. (2023). Development of a quantum calculator on the IBM Quantum experience platform and its application for converting the decimal number system to binary. Bulletin of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, 87(1), 65–76. https://doi.org/10.47533/2020.1606-146x.217.
- Mukhanbet, A., Nakibayeva, M., & Daribayev, B. (2023). IMPLEMENTATION OF QUANTUM ARITHMETIC OPERATIONS WITH INTEGER CHARACTERS USING THE QUANTUM FOURIER TRANSFORM. Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies, 1(1). https://doi.org/10.26577/jpcsit.2023.v1.i1.09