

МУРАЛЬ Даниил Владимирович,
аспирант,
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
e-mail: mural.daniil.2001@yandex.ru

МАРТЫНЕНКО Татьяна Владимировна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
автоматизированных систем управления,
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
e-mail: mural.daniil.2001@yandex.ru

КВАНТОВО-ВДОХНОВЛЁННЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ВЫСОКОРАЗМЕРНЫХ ДАННЫХ

Аннотация. В статье рассматриваются квантово-вдохновлённые алгоритмы (QI) для задач классификации высокоразмерных данных. Современные области применения — компьютерное зрение, анализ сигналов, обработка текстов и графовых структур — характеризуются большим числом признаков, что приводит к росту вычислительных затрат и проблемам масштабирования классических методов классификации. QI-алгоритмы используют математический аппарат квантовой механики — суперпозицию, интерференцию, тензорные представления состояний и вероятностные измерения — реализуя их на классическом оборудовании. Рассматриваются три основных направления развития: деквантованные алгоритмы и матричные аппроксимации, тензорные сети с пространственно-эволюционной блочной децимацией, а также квантово-вдохновлённые метаэвристики для глобальной оптимизации. Проводится анализ их вычислительной эффективности, включая влияние ранга и числа обусловленности входных матриц, а также преимущества в невыпуклых и многомерных пространствах признаков. Делается вывод, что QI-подходы обеспечивают существенное ускорение вычислений при работе с экстремально высокоразмерными данными и позволяют преодолевать ограничения классических детерминированных методов, включая локальные оптимумы и экспоненциальный рост пространства признаков. Результаты исследования показывают потенциал интеграции QI-алгоритмов в существующие системы машинного обучения и комбинаторной оптимизации для повышения эффективности, масштабируемости и надежности классификации.

Ключевые слова: Квантово-вдохновлённый алгоритм, высокоразмерные данные, классификация, тензорные сети, деквантование, матричные аппроксимации, метаэвристики, глобальная оптимизация, суперпозиция, интерференция.

MURAL Daniil Vladimirovich,
Postgraduate Student,
Donetsk National Technical University

MARTYNENKO Tatyana Vladimirovna,
PhD in Engineering, Associate Professor, Department of
Automated Control Systems,
Donetsk National Technical University

QUANTUM-INSPIRED ALGORITHMS FOR HIGH-DIMENSIONAL DATA CLASSIFICATION

Annotation. This paper explores quantum-inspired (QI) algorithms for high-dimensional data classification. Modern application domains such as computer vision, signal analysis, text processing, and graph structures are characterized by a large number of features, leading to increased computational costs and scalability challenges for classical classification methods. QI algorithms leverage the mathematical framework of quantum mechanics — superposition, interference, tensor representations of states, and probabilistic measurements — implemented on classical hardware. Three main directions are analyzed: dequantization and matrix approximations, tensor networks with spatially-evolutionary block decimation, and quantum-inspired metaheuristics for global optimization. The study evaluates computational efficiency, including the impact of

matrix rank and condition number, as well as advantages in non-convex and high-dimensional feature spaces. It is concluded that QI approaches provide significant acceleration in processing extremely high-dimensional data, overcoming limitations of classical deterministic methods, such as local optima and exponential growth of feature space. The results highlight the potential for integrating QI algorithms into existing machine learning and combinatorial optimization systems to enhance efficiency, scalability, and reliability of classification.

Key words: *quantum-inspired algorithm, high-dimensional data, classification, tensor networks, dequantization, matrix approximations, metaheuristics, global optimization, superposition, interference.*

Современные прикладные области, такие как компьютерное зрение, анализ сигналов и обработка графовых структур, характеризуются экстремально большим числом признаков, что порождает проблему «проклятия размерности». Основная сложность заключается в комбинаторном взрыве, при котором пространство решений растёт экспоненциально с каждым новым компонентом или ограничением системы. Традиционные детерминированные алгоритмы классификации при масштабировании на системы сверхвысокой размерности либо выдают субоптимальные решения, либо требуют вычислительных ресурсов, делающих их использование в реальном времени невозможным. Более того, классические тензорные методы сталкиваются с экспоненциальным ростом «запутанности» в динамических системах, что накладывает жесткие ограничения на глубину анализа данных.

Развитие квантовых вычислений обещает экспоненциальное ускорение, однако текущее состояние квантового оборудования препятствует их широкому внедрению. В этой связи критическую актуальность приобретают квантово-вдохновлённые алгоритмы, которые переносят математический аппарат квантовой механики — суперпозицию, интерференцию, туннелирование и проективные измерения — на классическую вычислительную инфраструктуру. Такие подходы позволяют эффективно перемещаться в невыпуклых и высокоразмерных ландшафтах оптимизации, достигая сублинейной или полилогарифмической сложности вычислений относительно размерности входных данных.

Несмотря на теоретический потенциал, практическая эффективность QI-алгоритмов часто ограничивается специфическими характеристиками данных, такими как ранг и число обусловленности матриц. Существует значительный разрыв между теоретическими доказательствами и практическими сценариями применения этих методов в задачах классификации.

Целью данной работы является систематизация и теоретическое исследование концептуальных основ квантово-вдохновлённых подходов для определения их потенциала и границ эффективного использования в задачах обработки и классификации данных большой размерности.

Для достижения цели сформированы следующие задачи:

1. Проанализировать фундаментальные механизмы адаптации квантового математического аппарата для реализации в рамках классических

вычислительных моделей.

2. Изучить структурные особенности квантово-вдохновлённых алгоритмов различных классов, направленные на минимизацию вычислительных затрат и оптимизацию представления признаков пространств.

3. Оценить характер масштабируемости рассматриваемых методов в сравнении с традиционными парадигмами классификации при увеличении сложности и размерности систем.

4. Выявить критические условия, определяющие целесообразность перехода к квантово-вдохновлённому инструментарию в зависимости от архитектурных свойств обрабатываемых данных.

1. Обзор квантово-вдохновлённых алгоритмов

Квантово-вдохновлённые алгоритмы представляют собой класс классических вычислительных методов, которые используют математический формализм и принципы квантовой механики — такие как суперпозиция, интерференция и туннелирование — для решения сложных задач на стандартном оборудовании [1]. Такие алгоритмы не требуют квантовых компьютеров, но позволяют эффективно работать с высокоразмерными данными при оптимизации, которые традиционно сложны для классических детерминированных подходов [2].

На основе современных исследований можно выделить три ключевых направления развития QI-алгоритмов:

1.1. Алгоритмы «деквантования» и матричные аппроксимации

Данное направление фокусируется на задачах линейной алгебры, таких как сингулярное разложение, обращение матриц и решение систем линейных уравнений — традиционно рассматриваются как одна из наиболее перспективных областей применения квантовых вычислений, в том числе в контексте машинного обучения, обеспечивая сублинейную сложность вычислений относительно размерности входных данных.

В основе алгоритмов лежит допущение, что матрица данных A имеет низкий ранг k или может быть эффективно аппроксимирована низкоранговым представлением. Это характерно для многих прикладных задач, включая рекомендательные системы и анализ высокоразмерных данных [3].

Вместо обработки всей матрицы используется вероятностный подход, при котором строки и столбцы выбираются пропорционально их нор-

мам Фробениуса. Для реализации такого сэмплирования за логарифмическое время требуется использование специализированных древовидных структур, данных [3].

Является фундаментом данного подхода. Алгоритм позволяет построить малую матрицу C размера $g \times s$ путём выборки ограниченного числа строк и столбцов из исходной матрицы A . Вычислительная экономия достигается за счет того, что сингулярное разложение выполняется для малой матрицы C , чьи размеры не зависят от исходных размерностей n и m , а определяются требуемой точностью и рангом [3].

Несмотря на теоретическое экспоненциальное ускорение относительно размерности, данные алгоритмы обладают значительной полиномиальной зависимостью от ранга, числа обусловленности и требуемой точности. Эффективность деквантованных алгоритмов проявляется только на задачах экстремально большой размерности при условии сохранения очень низкого ранга и малого числа обусловленности входных матриц. Для зашумленных данных или матриц полного ранга квантовые алгоритмы по-прежнему сохраняют преимущество

1.2. Тензорные сети и алгоритмы на основе блочной децимации

Тензорные сети, в частности матричные произведения состояний, представляют собой эффективный математический аппарат для компактного представления высокоразмерных данных и моделирования сложных корреляций между их элементами. В контексте классификации это позволяет описывать многомерные векторы признаков, избегая экспоненциального роста вычислительных затрат.

Центральным методом в этом направлении является пространственно-эволюционная блочная децимация. Алгоритм заимствует принципы «голографических» квантовых симуляций и переиспользования кубитов, адаптируя их для классических вычислений. Основная идея заключается в использовании причинно-следственной структуры «светового конуса», при которой обработка данных происходит не по всей системе сразу, а последовательно вдоль диагональных пространственно-временных траекторий [4].

Главной проблемой классических тензорных методов является быстрый рост запутанности, что требует экспоненциального увеличения размерности связей для сохранения точности. В алгоритме SEBD к локальным подсистемам применяются проективные измерения сразу после достижения ими целевого состояния. Это позволяет мгновенно «распутывать» измеренные участки, локализуя сложность внутри светового конуса и значительно снижая требования к вычислительным ресурсам [5].

Для преодоления проблем статистического шума, характерного для стохастических мето-

дов, используется оптимизация ЕМ. В отличие от наивного сэмплирования битовых строк, ЕМ-протокол вычисляет точные математические ожидания на основе полной тензорной формы промежуточных состояний непосредственно перед их проекцией. Это позволяет снизить дисперсию сэмплирования и достичь высокой точности при использовании на порядок меньшего количества выборок.

1.3. Квантово-вдохновлённые метаэвристики

Квантово-вдохновлённые метаэвристики представляют собой семейство классических алгоритмов глобальной оптимизации, которые заимствуют математический аппарат квантовой механики для повышения эффективности поиска в сложных пространствах решений. В отличие от традиционных детерминированных методов, данные подходы используют вероятностные структуры для навигации в высокоразмерных, невыпуклых ландшафтах, что критически важно для задач машинного обучения и классификации.

Вместо использования классических битов, состояния решений представляются через кубиты, описываемые амплитудами вероятности. Это позволяет алгоритму одновременно представлять и оценивать суперпозицию множества потенциальных конфигураций признаков в рамках одной итерации [6].

Механизм интерференции используется для управления процессом поиска путём конструктивного усиления вероятностей нахождения в «перспективных» областях пространства решений и деструктивного подавления маловероятных или неоптимальных путей.

Математическая имитация туннельного эффекта позволяет алгоритму преодолевать высокие потенциальные барьеры между локальными оптимумами. Это свойство обеспечивает эффективный выход из ловушек локальных экстремумов, которые часто становятся препятствием для классических градиентных методов [7].

Таким образом, квантово-вдохновлённые метаэвристики позволяют перенести вычислительные преимущества квантовых систем на классическую инфраструктуру, обеспечивая надежный поиск оптимальных конфигураций в задачах классификации сверхвысокой размерности.

2. Анализ вычислительной эффективности и практических ограничений

Эффективность квантово-вдохновлённых алгоритмов в задачах классификации высокоразмерных данных определяется балансом между теоретическим ускорением и практическими затратами на выполнение процедур сэмплирования и аппроксимации.

2.1. Асимптотическое ускорение и масштабируемость

Основным преимуществом QI-алгоритмов является достижение сублинейной или полило-

гарифмической сложности ($\text{polylog}(n, m)$) относительно размерности входных данных, что позволяет обрабатывать массивы, недоступные для классических детерминированных методов. Это достигается за счёт перехода от обработки полных матриц к работе с их низкоранговыми аппроксимациями и вероятностному сэмплированию из векторов, представленных через сингулярное разложение. При увеличении сложности инфраструктуры, например, в облачных вычислениях, такие алгоритмы демонстрируют благоприятные кривые масштабирования, потребляя значительно меньше памяти и ресурсов для эквивалентных объёмов задач по сравнению с традиционными подходами. Кроме того, стохастическая природа алгоритмов обеспечивает тривиальную параллелизуемость внешних циклов сэмплирования, что позволяет эффективно использовать ресурсы высокопроизводительных кластеров для сокращения реального времени вычислений [7].

2.2. Влияние ранга и числа обусловленности

Практическая производительность QI-алгоритмов критически зависит от структурных характеристик матрицы, данных — её ранга (k) и числа обусловленности (κ). Теоретический анализ показывает, что сложность таких алгоритмов для линейных систем может достигать $O(\kappa^{16} k^6 \|A\| F^6 / \epsilon^6)$, что подразумевает значительные накладные расходы при отклонении от идеальных условий низкого ранга. Экспериментальные данные подтверждают, что точность аппроксимации заметно деградирует при увеличении этих параметров, что делает QI-методы менее эффективными для разреженных матриц высокого ранга, которые типичны для многих практических датасетов. Таким образом, асимптотическое преимущество квантово-вдохновлённых методов реализуется только на задачах экстремально большой размерности, где линейное скалирование классических методов становится запретительным [8].

2.3. Преимущества в невыпуклых ландшафтах оптимизации

Квантово-вдохновлённые подходы демонстрируют превосходство при работе с невыпуклыми и многомерными ландшафтами оптимизации, характерными для классификации визуальных образов и сложных систем.

Квантовое туннелирование позволяет алгоритмам избегать «ловушек» локальных оптимумов, через которые классические градиентные методы пройти не могут.

Применение тензорных сетей и алгоритма SEBD позволяет подавлять рост «запутанности» в данных, что обеспечивает возможность моделирования динамики системы на более длительных интервалах при фиксированных вычислительных затратах [4].

Использование запутанных измерений позволяет снизить дисперсию сэмплирования, обеспечивая высокую точность классификации при

использовании на порядок меньшего количества статистических траекторий по сравнению с обычным сэмплированием битовых строк.

В итоге, выбор QI-алгоритма оправдан в сценариях комбинаторного взрыва, где пространство решений растёт экспоненциально с каждым новым компонентом системы, а традиционные детерминированные алгоритмы выдают субоптимальные решения.

Заключение

В работе выполнен теоретический анализ квантово-вдохновлённых алгоритмов классификации высокоразмерных данных, ориентированный на оценку их вычислительных преимуществ и практических ограничений. Показано, что данные методы формируют эффективный промежуточный класс между классическими и квантовыми вычислениями, позволяя использовать элементы квантового формализма на существующей классической вычислительной инфраструктуре.

Для деквантованных алгоритмов и методов матричных аппроксимаций установлено, что их ключевым преимуществом является достижение сублинейной сложности по размерности входных данных при условии низкого ранга и малого числа обусловленности матриц. Вместе с тем выявлено, что рост этих параметров приводит к существенному увеличению вычислительных затрат, что ограничивает практическую применимость данного подхода для зашумлённых и полноранговых датасетов.

Анализ тензорных сетей и алгоритмов пространственно-эволюционной блочной децимации показал их высокую эффективность для представления и обработки высокоразмерных признаков пространств за счёт локализации вычислительной сложности и подавления роста корреляций. Данный подход особенно перспективен для задач классификации со сложной структурой зависимостей между признаками, однако требует дальнейших исследований в части автоматического контроля точности и устойчивости к статистическому шуму.

Квантово-вдохновлённые метаэвристики продемонстрировали наибольший потенциал при работе с невыпуклыми и комбинаторно сложными ландшафтами оптимизации. Использование механизмов суперпозиции, интерференции и туннелирования позволяет эффективно избегать локальных экстремумов, что делает данные алгоритмы перспективными для обучения классификаторов в условиях экспоненциального роста пространства решений.

В качестве направлений дальнейших исследований целесообразно выделить разработку гибридных квантово-вдохновлённых и классических алгоритмов классификации, формализацию критериев применимости QI-методов в зависимости от структуры данных, а также их интеграцию в задачи комбинаторной оптимизации и масштабируемые системы машинного обучения.

Список литературы:

- [1] Sakhamuri N. S. B. Quantum-Inspired Optimization of Cloud Infrastructure for Reliability and Cost Efficiency // *European Journal of Computer Science and Information Technology*. — 2025. — №. 40. — С. 163–186.
- [2] Sudharson K., Badi A. A Comparative Analysis Of Quantum-based Approaches For Scalable And Efficient Data Mining In Cloud Environments // *Quantum Information and Computation*. — 2023. — №. 9. — С. 783-813.
- [3] Arrazola J. M., Delgado A., Bardhan B. R., Lloyd S. Quantum-inspired algorithms in practice // *Quantum*. — 2020. — №. 4. — С. 307.
- [4] Foss-Feig M., Hayes D., Dreiling J. M., Figgatt C., Gaebler J. P., Moses S. A., Pino J. M., Potter A. C. Holographic quantum algorithms for simulating correlated spin systems // *Physical Review Research*. — 2021. — №. 3.
- [5] Xiao B., Kloss B., Stoudenmire E. M. Investigating a Quantum-Inspired Method for Quantum Dynamics // *arXiv*. — 2025 .
- [6] Yahia H. S., ZeebareeS. R. M., Sadeeq M. A. M., Salim N. O. M., Comprehensive Survey for Cloud Computing Based Nature-Inspired Algorithms Optimization Scheduling // *Asian Journal of Computer Science And Information Technology*. — 2021. — №. 8. — С. 1-16.
- [7] Biamonte J., Wittek P., Pancotti N., Rebentrost P., Wiebe N., Lloyd S. Quantum machine learning // *Nature*. — 2017. — №. 549. — С. 195–202.
- [8] Montiel O., Rubio Y., Olvera C., Rivera A. Quantum-Inspired Acromyrmex Evolutionary Algorithm // *Scientific Reports*. — 2019. — №. 9.

References:

- [1] Sakhamuri N. S. B. Quantum-Inspired Optimization of Cloud Infrastructure for Reliability and Cost Efficiency // *European Journal of Computer Science and Information Technology*. — 2025. — №. 40. — С. 163–186.
- [2] Sudharson K., Badi A. A Comparative Analysis Of Quantum-based Approaches For Scalable And Efficient Data Mining In Cloud Environments // *Quantum Information and Computation*. — 2023. — №. 9. — С. 783-813.
- [3] Arrazola J. M., Delgado A., Bardhan B. R., Lloyd S. Quantum-inspired algorithms in practice // *Quantum*. — 2020. — №. 4. — С. 307.
- [4] Foss-Feig M., Hayes D., Dreiling J. M., Figgatt C., Gaebler J. P., Moses S. A., Pino J. M., Potter A. C. Holographic quantum algorithms for simulating correlated spin systems // *Physical Review Research*. — 2021. — №. 3.
- [5] Xiao B., Kloss B., Stoudenmire E. M. Investigating a Quantum-Inspired Method for Quantum Dynamics // *arXiv*. — 2025 .
- [6] Yahia H. S., ZeebareeS. R. M., Sadeeq M. A. M., Salim N. O. M., Comprehensive Survey for Cloud Computing Based Nature-Inspired Algorithms Optimization Scheduling // *Asian Journal of Computer Science And Information Technology*. — 2021. — №. 8. — С. 1-16.
- [7] Biamonte J., Wittek P., Pancotti N., Rebentrost P., Wiebe N., Lloyd S. Quantum machine learning // *Nature*. — 2017. — №. 549. — С. 195–202.
- [8] Montiel O., Rubio Y., Olvera C., Rivera A. Quantum-Inspired Acromyrmex Evolutionary Algorithm // *Scientific Reports*. — 2019. — №. 9.

