

УДК 530.145

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (экономические и физико-математические науки)

РОЛЬ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЭКОНОМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

Крепышев Дмитрий Александрович
доцент, канд. экон. наук
SPIN-код: 8507-4755
e-mail krepyshev.d@kubsau.ru
ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

Лытнев Николай Николаевич
ассистент кафедры компьютерных технологий и систем
SPIN-код: 8896-9058
e-mail lytnev.nikolai@yandex.ru
ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

Косников Максим Сергеевич
студент факультета прикладной информатики
РИНЦ SPIN-код: 5280-2805
e-mail max.kosnikov@yandex.ru
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

Бурусова Вероника Евгеньевна
студентка 3 курса направления 09.03.03 «Прикладная информатика», бакалавриат
e-mail burusova.veronika@gmail.com
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

Квантовая механика и квантовые вычисления стали одним из самых актуальных направлений в современной науке, экономике и сфере информационных технологий. Квантовые вычисления позволяют решать задачи, которые не могут быть выполнены на обычных компьютерах за короткое время или вообще не поддаются классическому анализу, а также ускоряют процесс решений задач, для которых потребовались бы десятилетия, до нескольких минут (такое ускорение называют квантовым превосходством). Одной из областей использования квантовых вычислительных технологий является экономический анализ. Он включает в себя моделирование финансовых рынков, прогнозирование цен на товары и услуги, оптимизация производственных процессов, создание рекомендаций пользователям и другие

UDC 530.145

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods in economics (economic and physical and mathematical sciences)

THE ROLE OF QUANTUM COMPUTING IN ECONOMIC ANALYSIS

Krepyshev Dmitry Alexandrovich
Senior lecturer
RSCI SPIN-code: 8507-4755
e-mail krepyshev.d@kubsau.ru
FSAU HE Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

Litnev Nikolai Nikolaevich
Assistant of the Department of Computer Technologies and Systems
RSCI SPIN-code: 8896-9058
e-mail lytnev.nikolai@yandex.ru
FSAU HE Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

Kosnikov Maxim Sergeevich
student of the Faculty of Applied Informatics
RSCI SPIN-code: 5280-2805
e-mail max.kosnikov@yandex.ru
FSAU HE Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

Burusova Veronika Evgenievna
3rd year student, direction 03/09/03 “Applied Informatics”, bachelor’s degree
e-mail burusova.veronika@gmail.com
Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia

Quantum mechanics and quantum computing have become one of the most urgent directions in modern science, economics and information technology. Quantum computing solves problems that cannot be solved by conventional computer in a short time or cannot be analyzed at all, and also accelerates the process of doing long tasks from decades to a few minutes of time (such acceleration is called quantum superiority). One of the most important sphere where we use quantum computing systems is economic analysis. It consists of such tasks as modeling financial markets, forecasting prices, optimizing production processes, creating recommendations for users and other tasks that require processing large amounts of data. In this article we analyzed the market of quantum technologies in the world and in Russia. Also we calculated acceleration of solving economic analysis task. The example was the

задачи, требующие обработки большого объема данных. Был проведен анализ рынка квантовых технологий в мире и в России. Также были проведены расчеты коэффициента ускорения решения задачи экономического анализа на примере рекомендательных систем компании Ozon при использовании квантовых вычислений. Результаты расчетов и проведенного анализа показали их значительное преимущество и возможности в ускорении решения задач, использующих сейчас стандартные технологии в компании Ozon, в миллионы раз. Научной новизной полученных результатов является то, что были проведены вычисления и продемонстрировано их сравнение на реальной экономической задаче. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования расчетов разбираемой задачи для интерпретации их под задачи любой компании и вычисления возможных преимуществ и экономической выгоды. Исходя из результатов исследования перспективами новых исследований стоит назвать привлечение внимания к выгодам использования квантовых технологиях в других областях, таких как нейронные сети и криптография

Ключевые слова: КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

recommendation system of Ozon. We modeled this system using quantum computing. The results of calculations showed significant advantage of quantum computing techniques and possibilities in accelerating the speed of solving problems in economics (which is approximately million times quicker). The scientific novelty of the obtained results is that the calculations using mathematical methods were carried out and their comparison on a real economic task was demonstrated. Practical significance of the study lies in the possibility of using the calculations of the analyzed problem to interpret them for the problems of any company that uses Big Data (such as Netflix, Amazon, Target etc.) and calculate the possible advantages and economic benefits. Based on the results of the study the prospects for new research should be analyzing the attention to the benefits of using quantum technologies in other areas, such as neural networks and cryptography. As directions for further research, we proposed studying the comparison of the advantages of neural networks (AI) and machine learning algorithms in economics. Alternatively, it may be worth conducting research into what economic benefits quantum computing could bring to enterprises

Keywords: QUANTUM TECHNOLOGIES, QUANTUM COMPUTING, BIG DATA, MACHINE LEARNING, ECONOMIC ANALYSIS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-194-006>

1. Введение

Одной из наиболее перспективных наук сейчас в мире является квантовая механика, изучающая поведение частиц на микроскопическом уровне. Квантовые вычисления являются понятием квантовой механики, сочетающим в себе аспекты различных наук[1]. Квантовые вычисления используются для ускорения решения некоторых задач, которые считаются сложными или невыполнимыми для обыкновенных алгоритмов и методов физики и математики. Изучение квантовых вычислений включает в себя также и исследование оборудования и программного обеспечения для него. В квантовой физике устройство, сочетающее в себе как архитектуру обычного суперкомпьютера, так и квантовые технологии (как правило,

<http://ej.kubagro.ru/2023/10/pdf/06.pdf>

квантовый процессор), называется квантовым компьютером[2]. Основными отличиями квантового компьютера от неклассического аналога заключаются в логике: обычный компьютер использует биты с операциями NOT, AND, OR, XOR, квантовый – кубиты, использующие систему операций под названием «квантовые вентили»[3]. Квантовый компьютер включает в себя такие компоненты, как квантовая плоскость данных, плоскость управления и измерения, плоскость процессора управления и процессора хостинга[4]. Или, говоря иначе, он является обычным компьютером с областью размещения кубитов и метода передачи им сигналов. Кубит является своего рода аналогом бита в квантовом компьютере. Однако в отличие от бита, кубит может принимать не только два дифференцированных значения 0 или 1, но и находиться в состоянии суперпозиции или когерентности. Благодаря этому факту для взаимодействия с ними необходимо было создать специальные алгоритмы (алгоритмы Шора, Гровера и другие[5]), вместо стандартных алгоритмов. Также кубиты имеют свойство, называемое «квантовой запутанностью» – соотношение квантов, когда результаты измерения одних частиц влияют на состояние других. Таким образом, зная значение одного кубита в запутанной квантовой системе, можно узнать состояние остальных кубитов. Это свойство позволяет квантовым компьютерам обрабатывать в разы больше информации, чем обычные суперкомпьютеры.

Тем не менее, несмотря на существенное повышение производительности, квантовые системы нередко допускают ошибки. Они происходят из-за так называемой декогеренции – понятия, обратного суперпозиции. При декогеренции из-за различных внешних факторов происходит потеря квантового состояния в кубите. Это влияет и на процесс создания квантовых компьютеров, так как появляется необходимость учитывать вероятность декогеренции кубита, что делает создание системы из большого числа кубитов бессмысленным[6].

Целью исследования является определение перспектив использования квантовых вычислений в экономике и описание преимущества квантовой технологии над обычными технологиями для экономического анализа.

2. Актуальность

Квантовые технологии – одно из наиболее стремительно развивающихся направлений в науке, информатике и экономике на 2023 год. Область их применения не ограничивается наукой, у них есть потенциал применения в экономике, химии, фармацевтике и других сферах. Например, экспонентное увеличение сложности моделирования системы, обусловленное усложнением строения молекул, не дает ученым проводить многие химические имитационные моделирования. Квантовое моделирование способно разрешить эту проблему. Так, на сегодняшний день уже было создано решение QUBEC, автоматизирующее процесс выполнения квантовых вычислений для построения моделей такой сложности. Другие задачи, которые могут решить квантовые вычисления: факторизация больших чисел, задачи оптимизации (к примеру, оптимизации поставок, производства, кредитных портфелей), квантовый брутфорс, блокчейн, а также одна из рассматриваемых далее – оптимизация метода машинного обучения[7]. Одни из наиболее перспективных аспектов внедрения квантовых вычислений – разработка и развитие нейросетей. Доступ к обработке большого количества данных за короткий промежуток времени и новым усовершенствованным алгоритмам с использованием основ квантовой механики позволит искусственному интеллекту обучаться быстрее и допускать меньше неточностей. Уже сейчас нейросети стали одним из самых популярных нововведений в области информационных технологий. Их используют для создания видео, кодинга, генерации изображений, звуков и даже создания

чат-партнеров для общения. С ростом потенциала нейросетей благодаря внедрению квантовых вычислений можно предположить, что их использование распространится во все сферы экономики.

Безусловно, стремительное возрастание необходимости внедрения инновационных технологий в экономике и увеличение процента автоматизации процессов в компаниях приводит к высокой популярности исследований на тему квантовых вычислений. Однако квантовые технологии можно назвать неустойчивыми и ненадежными в нынешней мировой экономике в связи со сложностью их интеграции и некоторыми рисками. Они заключаются в том, что неконтролируемая декогеренция, геометрическое возрастание ошибок с добавлением новых кубитов в систему, а также сложность разработки систем, основанных более чем на полусотне кубитов, могут привести к дополнительным затратам и непредвиденным ошибкам в проведенном экономическом анализе. Поэтому на 2023 год квантовые технологии считаются перспективной, но слабо исследованной областью. В мире на данный момент существуют следующие нововведения в этой области:

— Google утверждает о достижении «квантового превосходства» на 53-кубитном квантовом процессоре.

— IBM создает 433-кубитный квантовый процессор, Microsoft – 80-кубитный с доступом к облачному сервису Azure Quantum¹ с языком программирования Q#, Intel – 144-кубитный с технологией спин-кубитов.

— Amazon создает облачный сервис Amazon Bracket².

— В Китае анонсируют выпуск квантового компьютера с 11-кубитным процессором.

¹ Данные об облачном сервисе Azure Quantum взяты с официального электронного источника <https://azure.microsoft.com/ru-ru/free/>.

² Данные об облачном сервисе взяты с электронного источника <https://aws.amazon.com/ru/braket/>

— На рынке поставщиков квантовых процессоров и компьютеров утверждаются компании Pascal, Rigetti, IONQ.

Общий мировой рынок по прогнозам Boston Consulting Group составит не менее \$800 млрд. уже через 20 лет. Однако на данный момент здесь Россия отстает от своих конкурентов.

Была создана Национальная квантовая лаборатория (НКЛ). К 2024 году планируется создание компьютеров на процессорах русского производства от 30 кубитов. В 2023 году в России было поручено до 15 ноября создать условия для того, чтобы привлечь в страну ученых в области квантовых технологий. Была выдвинута идея по созданию университета в этой же области. С бюджетом в 23,6 миллиардов рублей создана программа запуска «квантового интернета» к 2030 году в России (объединение квантовых компьютеров в общую сеть). Также были выделены 300 миллионов рублей на развитие квантовой коммуникационной платформы цифровой экономики для формирования общей сети квантовых компьютеров.

Несмотря на это, квантовые технологии в России развиты не достаточно по сравнению с другими странами. Однако многие аналитики приходят к выводу, что рост рынка решений на основе квантовых вычислений в России составляет 30%. По прогнозам до 2030 года ПО, оборудование, услуги в области квантовых технологий на рынке (в криптографии, блокчейне, ИИ, химпроме, фармацевтике, машинном обучении и т.д.) займут долю, равную \$4,9-5,3 млрд. По итогам прошлого года можно сказать, что квантовые технологии стремительно набирают популярность в России. Сумма инвестиций в них в 2022 году доходит до \$2,35 млрд. Однако, по сравнению с лидерами «квантовой гонки» США, Китаем и Японией, Российские компании практически не регистрируют патентов в этой сфере в последние года. Наиболее активные компании конкурентов в этой сфере (2020 год): IBM (169), D-Wave (184), NGSC

(110), Google LLC (110). Можно заметить очень стремительный рост вложений и инвестиций в данную сферу (общий объем превышает \$1 млрд в год). С точки зрения экономики, существует множество прогнозов о том, что в ближайшее время квантовые вычисления произведут революцию³.

3. Методы и материалы

Методология исследования основана на решении реальной экономической задачи посредством использования формул расчета вычислительной мощности алгоритмов анализа данных и методах классификации и анализа статистических данных. Исследование изучает систему рекомендаций пользователей Ozon, основой работы которой является машинное обучение на стандартном алгоритме. Результаты работы этого алгоритма будут сравниваться со смоделированными результатами алгоритма на основе квантовых вычислений. Также проводится анализ информации на новостном портале (TAdviser.ru) для сбора и анализа информации о тенденциях и нововведениях в сфере квантовых технологий в мире и России для определения перспектив этой области в экономике.

4. Результаты и обсуждения

Экономический анализ (способ изучения и исследования экономических сущностей и процессов) во многих отраслях экономики сейчас невозможно представить без использования больших данных (Big Data). Сейчас с ними работает около половины компаний в Азии и США, а инвестиции в эту область продолжают стремительно расти. Несмотря на все перспективы и преимущества больших данных, их сложно анализировать, так как чем больше исследуется параметров для

³ Все статистические данные были собраны благодаря исследованию новостного портала TAdviser.ru, а также следующих электронных источников: <https://sk.ru/news/analiz-patentnoj-aktivnosti-v-oblasti-kvantovyh-tehnologij-trendy-i-lidery-rynka/>, <https://quantum-computing.ibm.com/>

прогнозирования, тем больше появляется ошибок, и тем мощнее должен быть вычислительный ресурс⁴.

На данный момент способов анализа больших данных существует не так много, а именно: анализ при помощи искусственного интеллекта Data mining, краудсорсинг, создание имитационных моделей. Самым популярным из них можно назвать метод машинного обучения (ML). Он включает в себя такие методы, как SVM for Active Learning, k-Nearest Neighbor algorithm, алгоритм многоклассовой классификации и т.д.[8].

По собранным статистическим данным из электронного портала TAdviser.ru, было определено, что машинное обучение используется примерно в трети предприятий в России на данный момент. В сфере продаж на 2023 год доля использования алгоритмов машинного обучения составила больше половины, во многих других сферах – около трети. В остальных сферах экономики доля машинного обучения составляет менее 17%. На графике ниже (рис.1) представлены типы решений на базе анализа больших данных (при помощи нейросетей), используемые компаниями в России.

⁴ Данные об основных областях применения были взяты с электронного ресурса <https://www.entrepreneur.com/growing-a-business/5-strategies-from-top-firms-on-how-to-use-machine-learning/310708>

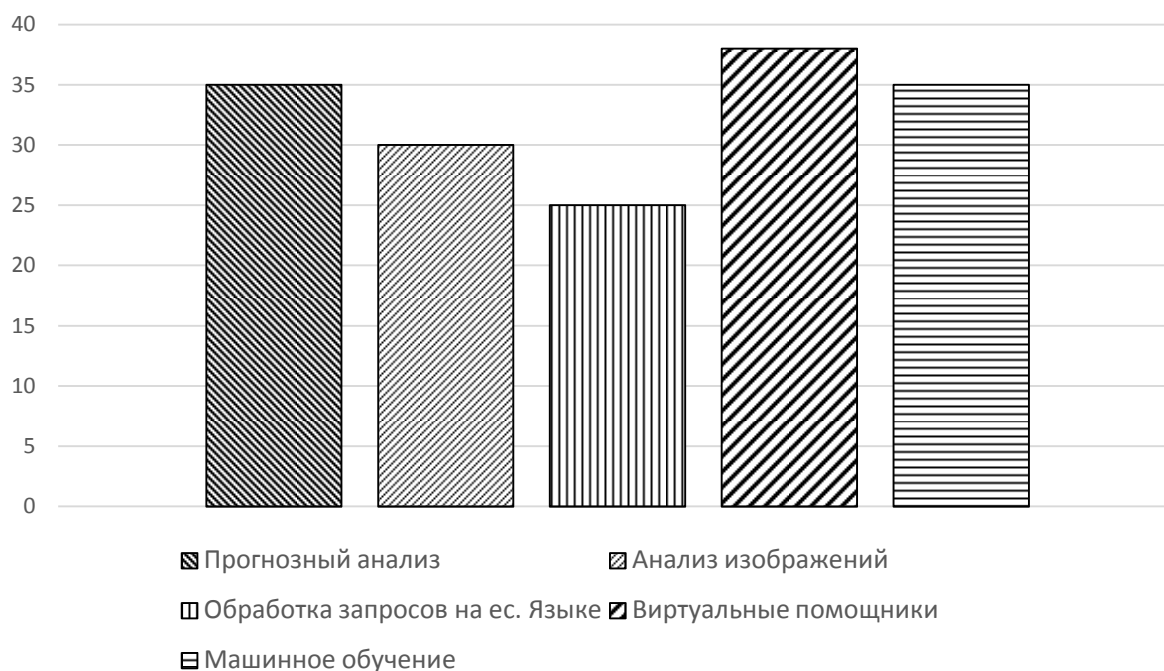


Рис 1. – Доли использования ML по сферам деятельности в 2023 г.

*источник: данные электронного портала TAdviser.ru – <https://clck.ru/SnYAt>

Несмотря на то, что технологии машинного обучения довольно популярны (35% от общего числа используемых решений), они несовершенны. Однако, проблемы больших данных, описанные ранее, решаются внедрением квантовых технологий. На данный момент уже существует такая технология – квантовое машинное обучение (QML). QML использует квантовые вычисления в алгоритмах машинного обучения, тем самым позволяя более чем в сотни тысяч раз быстрее обрабатывать большие данные, чем мощные суперкомпьютеры, использующие обыкновенные алгоритмы машинного обучения[9]. Также как и обычные алгоритмы машинного обучения, алгоритмы QML используются при анализе больших данных для осуществления маркетинговых исследований и создании рекомендаций, а также изучении поведения клиентов.

У интернет-магазина Ozon за прошлый год прирост активных покупателей составил 9,6 млн. Всего на данный момент активных

пользователей Ozon около 35,2 млн. человек. Во многом этот интернет-магазин своей высокой популярностью у покупателей обязан методу «умных» рекомендаций. Алгоритм рекомендаций основан на технологии машинного обучения, анализирующей данные покупателей, и проводится в несколько этапов: отбор товаров-кандидатов, ранжирование товаров, их бустинг, обеспечение разнообразия и само отображение рекомендаций. На этапе ранжирования товаров Ozon применяет технологию машинного обучения. На основании некоторых параметров (в общей сложности, число таких параметров доходит до 300), технология предсказывает вероятность покупки этого товара пользователем⁵.

Пример параметров, учитываемых при ранжировании:

- Параметры популярности,
- Совпадающие атрибуты,
- Соотношение стоимости,
- Наименование бренда,
- Вид категории и т.д.

Таким образом, на одного пользователя система рекомендации рассчитывает $N = 300$ параметров, у каждого из которых примерно 10 различных значений в среднем. Исходя из этих данных, можно рассчитать общую вычислительную сложность алгоритма, используемого в машинном обучении при ранжировании.

Алгоритм SVM (Метод опорных векторов) – обладает в среднем вычислительной сложностью $O(N^2)$, в худшем случае - $O(N^3)$. Таким образом, при подсчете необходимого времени (T) на выполнение такого алгоритма для всех 300 параметров пользователей на обычном компьютере получаем:

$$T = (N^2/V) * M$$

⁵ Описание алгоритма представлено на официальном электронном ресурсе от Ozon: <https://docs.ozon.ru/legal/algorithms/recomendation-algorithms/>

$$T = (90\ 000 * 10 / 10^{13}) * 35\ 200\ 000$$

$$T = 3,168 \text{ секунды}$$

где:

T – необходимое время выполнения алгоритма

N – число параметров и их значений

M – число активных пользователей

V – количество операций в секунду (для примера был взят язык программирования C++)

По аналогу этого же алгоритма (Quantum SVM со сложностью O(N)) затрачиваемое время в случае использования квантового компьютера (его производительность в 2022 году на примере квантового компьютера Frontier составила 1 квинтиллион флопс (операций с плавающей точкой в секунду), что в 10^5 раз больше, чем у обычного компьютера) будет равно:

$$T = (300 * 10 / 10^{18}) * 35\ 200\ 000$$

$$T = 1,056e-7$$

Или приблизительно равно одной десятимиллионной доли секунды. Данные расчеты приведены без учета возможности ошибок как стандартного алгоритма, так и его квантового аналога. Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что использование квантовых технологий способно ускорить работу алгоритма рекомендаций Ozon примерно в тридцать миллионов раз. Ниже приведена таблица (таблица 1), в которой описано, во сколько раз ниже вычислительная сложность алгоритмов квантовых вычислений (тем самым определяя их ускорение по сравнению с обычными аналогами).

Таблица 1 – Типы алгоритмов квантовых вычислений по ускорению[10][11].

| Ускорение на $O\sqrt{N}$ | Ускорение на $O\log N$ |
|--|--|
| Bayesian Inference | Least squares fitting |
| Online Perception | Quantum BM |
| Quantum reinforcement learning | Quantum PCA |
| Classical BM | Quantum SVM |

Проведенный анализ доказывает, что квантовые технологии можно назвать инновационным решением для замены старых технологий в области экономического анализа. Можно сделать вывод о том, что квантовые технологии окажут огромное влияние на экономическую аналитику, в частности приведет к ускорению транзакций, обмена данными, анализа больших данных, совершенствованию логистики и построения путей. В финансовом моделировании они позволят проводить более точные прогнозы и создавать модели с большим количеством параметров для возможных улучшений в оценке инвестиционных проектов, стратегий развития предприятия.

5. Заключение

По итогам проведенного исследования были получены следующие результаты:

С помощью анализа состояния мирового и российского рынка в области квантовых технологий были определены размеры инвестиций в данную отрасль, перспективы ее развития и внедрения в экономику. Также были отмечены основные компании-инноваторы в данной сфере и описаны возможности современных технологических решений на основе квантовой механики. Было проанализировано место России на рынке квантовых технологий, из чего мы сделали вывод о необходимости увеличения

размера инвестиций в эту сферу для того, чтобы российские производители не отстали от зарубежных.

Исходя из статистических данных, было определено, что в экономическом анализе играет большую роль метод машинного обучения, который используется в трети всех компаний в России в основном в таких сферах, как продажи, обслуживание, логистика и аналитика. Из этого следует актуальность внедрения квантовых технологий, так как они помогут существенно повысить доходность этих предприятий и сделает их более конкурентоспособными на мировом рынке.

По результатам расчетов сделан вывод о том, что в перспективе внедрение алгоритмов на основе квантовых вычислений вместо стандартных аналогов позволит ускорить работу сервисов, использующих большие объемы данных для анализа, в десятки миллионов раз.

6. Направления дальнейших исследований

Полученные результаты определили преимущества квантовых технологий над стандартными аналогами в сфере машинного обучения и анализа больших данных. В будущем в перспективе роль анализа больших данных будет отведена также и инновационному методу – анализу при помощи нейросетей. В следствие чего можно также исследовать преимущества использования нейросетей и машинного обучения в сравнительном анализе. Также возможно оценить увеличение прибыли и другие экономические выгоды для предприятий на основе результатов сравнения технологий, продемонстрировав, какую выгоду ускорение работы алгоритмов экономического анализа данных сможет принести.

Литература

1. Основы квантовых вычислений. Торгаев С.Н., Шульга И.Д., Юрченко Е.А., Громов М.Л.; Издательство STT (2020): 19 с. – 26 с.
2. Квантовые технологии. Казаков В.И., Казиева Т.В., Москалец О.Д., Родимин В.Е.; Санкт-Петербург, 2021.

3. Quantum Materials, Lateral Semiconductor Nanostructures, Hybrid Systems and Nanocrystals. Heitmann D.; Springer (2010).
4. Квантовый скачок технологии; В сборнике: Наука и образование третьего тысячелетия. Джаханова Б.Н., Серікұлы Ж., Шыныбек А., Торехан С.; Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. 2018. С. 22-23.
5. Математические методы для задач квантовых технологий и динамика открытых квантовых систем. Печень А.Н.; Отчет о НИР № 17-11-01388. Российский научный фонд. 2018.
6. Обзор текущего состояния квантовых технологий. Душкин Р.В.; Компьютерные исследования и моделирование, 2018, т. 10, № 2, с. 165-179
7. Управление базами данных на основе облачных, квантовых, блокчейн-технологий и технологий обработки больших данных. Гаджиев Н.К., Магомедов М.А., Абдулмукинова Э.М.; Журнал прикладных исследований. 2023. № 8. С. 45-50.
8. <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6c/Malenichev2014iip.pdf>
9. Advances in quantum machine learning, 9 Dec 2015. Adcock J., Allen E., Day M., Frick S., Hinchliff J., Johnson M., Morley-Short S., Pallister S., Price A., and Stanisic S.; arXiv:1512.02900.
10. Quantum machine learning algorithms. Aaronson S. ; Nature Physics, 11(4):291–293, April 2015.
11. Modern computer arithmetic. Richard P., Zimmermann P.; Cambridge University Press (2010). ISBN978-0-521-19469-3

References

1. Basics of quantum computing. Torgaev S.N., Shulga I.D., Yurchenko E.A., Gromov M.L.; STT Publishing (2020): 19 p. – 26 s.
2. Quantum technologies. Kazakov V.I., Kazieva T.V., Moskalets O.D., Rodimin V.E.; St. Petersburg, 2021.
3. Quantum Materials, Lateral Semiconductor Nanostructures, Hybrid Systems and Nanocrystals. Heitmann D.; Springer (2010).
4. Quantum leap of technology; In the collection: Science and education of the third millennium. Dzhakhanova B.N., Serikuly Zh., Shynybek A., Torekhan S.; Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference. In 2 parts. 2018. pp. 22-23.
5. Mathematical methods for problems of quantum technologies and dynamics of open quantum systems. Liver A.N.; Research report No. 17-11-01388. Russian Science Foundation. 2018.
6. Review of the current state of quantum technologies. Dushkin R.V.; Computer Research and Modeling, 2018, vol. 10, no. 2, p. 165-179
7. Database management based on cloud, quantum, blockchain and big data processing technologies. Gadzhiev N.K., Magomedov M.A., Abdumukminova E.M.; Journal of Applied Research. 2023. No. 8. P. 45-50.
8. <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6c/Malenichev2014iip.pdf>
9. Advances in quantum machine learning, 9 Dec 2015. Adcock J., Allen E., Day M., Frick S., Hinchliff J., Johnson M., Morley-Short S., Pallister S., Price A., and Stanisic S.; arXiv:1512.02900.
10. Quantum machine learning algorithms. Aaronson S.; Nature Physics, 11(4):291–293, April 2015.

11. Modern computer arithmetic. Richard P., Zimmermann P.; Cambridge University Press (2010). ISBN978-0-521-19469-3