

Научная статья  
УДК 004.032+519.714  
ББК 32.971.329.2  
Г 93  
DOI: 10.53598/2410-3225-2023-3-326-48-56

**Разработка и исследование квантовой модели обработки информации с учетом присутствия квантового шума**  
(Рецензирована)

**Вячеслав Филиппович Гузик<sup>1</sup>, Сергей Михайлович Гушанский<sup>2</sup>, Виктор Сергеевич Потапов<sup>3</sup>**

<sup>1-3</sup> Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

<sup>1</sup> vfguzik@sfedu.ru

<sup>2</sup> smgushanskiy@sfedu.ru

<sup>3</sup> vpotapov@sfedu.ru

**Аннотация.** В статье исследуется проблема обработки информации в квантовых системах с учетом присутствия квантового шума. Квантовый шум является одним из основных факторов, ограничивающих точность и эффективность квантовых вычислений и коммуникаций. Целью исследования является разработка и анализ квантовой модели, способной учитывать влияние квантового шума на обработку информации. Рассматриваются различные источники квантового шума, такие как шум нулевой точки, шум фотонов и шум квантовых измерений. Представлены основные концепции и методы для оценки и минимизации квантового шума, включая методы коррекции ошибок, контроль окружающей среды и оптимизацию квантовых состояний. Описывается разработанная квантовая модель обработки информации с учетом шума. Производится анализ влияния квантового шума на различные квантовые алгоритмы и протоколы. Также представлены результаты численных экспериментов, демонстрирующие эффективность предложенной модели в условиях реалистического шумового окружения. Работа обобщает полученные результаты и даёт рекомендации по применению квантовой модели обработки информации с шумом в различных прикладных областях, таких как квантовые вычисления, квантовая коммуникация и квантовые сенсорные системы. Работа имеет большое значение для развития практических квантовых технологий, позволяющих эффективно работать в условиях реальных шумовых режимов и повышать надежность и точность квантовых систем обработки информации.

**Ключевые слова:** квантовая модель, запутанность, кубит, квантовый гейт, квантовый симулятор

Original Research Paper

**Development and research of quantum information processing model considering the presence of quantum noise**

**Vyacheslav F. Guzik<sup>1</sup>, Sergey M. Gushansky<sup>2</sup>, Viktor S. Potapov<sup>3</sup>**

<sup>1-3</sup> Southern Federal University, Taganrog, Russia

<sup>1</sup> vfguzik@sfedu.ru

<sup>2</sup> smgushanskiy@sfedu.ru

<sup>3</sup> vpotapov@sfedu.ru

**Abstract.** The article investigates the problem of information processing in quantum systems, considering the presence of quantum noise. Quantum noise is one of the main factors limiting the accuracy and efficiency of quantum computing and communications. The aim of the study is to develop and analyze a quantum model that can consider the impact of quantum noise on information processing. The article discusses various sources of quantum noise, such as zero-point noise, photon noise,

*and quantum measurement noise. Basic concepts and methods for estimating and minimizing quantum noise are presented, including error correction methods, environmental control, and optimization of quantum states. The article describes the developed quantum model of information processing considering noise effect. The influence of quantum noise on various quantum algorithms and protocols is analyzed. The authors present the results of numerical experiments, demonstrating the effectiveness of the proposed model in a realistic noise environment. The work summarizes the results obtained and puts forward recommendations for the application of the quantum model of information processing with noise in various applied areas, such as quantum computing, quantum communication and quantum sensor systems. The work is of significant importance for the development of practical quantum technologies that allow efficient operation in real noise conditions and improve the reliability and accuracy of quantum information processing systems.*

**Keywords:** *quantum model, entanglement, qubit, quantum gate, quantum simulator*

## **Введение**

В настоящее время информационные системы [1] все больше сталкиваются с проблемой шума памяти [2], который может привести к сбоям и ошибкам в обработке данных. Для преодоления этой проблемы и достижения эффекта порядка ученые разрабатывают квантовые модели обработки информации [3]. В настоящей статье предлагается реализация модели, которая основана на использовании принципов квантовой физики. Опишем принципы работы такой модели и рассмотрим ее преимущества перед классическими алгоритмами обработки информации. Рассмотрим также возможности применения этой модели в различных областях, таких как криптография [4], искусственный интеллект и оптимизация алгоритмов [5]. Следует подчеркнуть, что квантовые модели обработки информации с шумом памяти представляют большой потенциал для улучшения производительности информационных систем и повышения эффективности обработки данных.

Квантовые модели обработки информации основаны на принципах квантовой механики [6], которые позволяют эффективно обрабатывать данные и преодолевать проблему шума памяти. В классических компьютерах данные представляются в виде битов - единиц и нулей, что ограничивает точность и эффективность обработки информации. В квантовой физике вместо битов используются кубиты [7], которые могут находиться в суперпозиции [8] состояний и иметь различные значения одновременно.

Это позволяет проводить операции сразу над несколькими состояниями и значительно увеличивает вычислительную мощность квантовых систем. Кроме того в квантовых моделях используются операции измерения и суперпозиции, которые позволяют обрабатывать данные с высокой точностью и уменьшать влияние шума памяти. Это достигается благодаря принципу квантового вероятностного представления данных [9], который позволяет решать задачи, экспоненциально превышающие возможности классических компьютеров. Преимущества квантовых моделей обработки информации заключаются в их высокой параллельности, эффективности и точности. Эти модели могут значительно ускорить выполнение сложных задач, таких как факторизация больших чисел [10], оптимизация алгоритмов или решение задач машинного обучения [11]. Возможности применения квантовых моделей обработки информации огромны. Они могут быть использованы в криптографии для создания непреодолимой квантовой защиты данных. Также эти модели могут быть применены в искусственном интеллекте для более эффективного обучения и принятия решений. Они могут свести к минимуму время выполнения сложных алгоритмов оптимизации и улучшить производительность информационных систем в целом.

Квантовые модели обработки информации представляют собой перспективное направление развития информационных систем. Они могут эффективно преодолеть проблему шума памяти, увеличить точность и скорость обработки данных, а также найти применение в различных областях. Одним из основных вызовов, стоящих перед

квантовыми моделями, является разработка и реализация аппаратных устройств, способных эффективно работать с квантовыми состояниями. В настоящее время существуют несколько типов квантовых устройств, таких как квантовые компьютеры, квантовые имитаторы и квантовые симуляторы [12]. Алгоритмы квантовых компьютеров учитывают принципы квантовой механики, такие как суперпозиция и интерференция [13], чтобы достичь максимальной эффективности и точности. При этом одной из проблем квантовых моделей является устойчивость к ошибкам, которые могут возникать в процессе обработки информации. Исправление ошибок в квантовых системах требует использования специальных методов и алгоритмов, таких как квантовая коррекция ошибок. Разработка эффективных методов для исправления ошибок остается активной областью исследований в квантовой информатике.

Несмотря на эти вызовы, квантовые модели обработки информации представляют большой потенциал для решения сложных задач и улучшения производительности информационных систем. Поэтому их развитие весьма перспективно и они могут стать основой для новых революционных технологий и применений в различных областях, от науки до бизнеса. Для достижения максимальной эффективности и успешной реализации квантовых моделей необходимо продолжать исследования и разработку в этой области.

### **1. Шум памяти и состояние шума**

Квантовый шум – это флуктуации [14] в измерениях и процессах, связанных с квантовой механикой. В квантовой механике все физические системы испытывают некоторую степень неопределенности и флуктуаций даже в состояниях с минимальной энергией, таких как нулевая точка энергии. Эти флуктуации проявляются как квантовый шум. Квантовый шум возникает из-за свойств квантовых объектов, таких как электроны и фотоны, которые обладают дуальной природой частицы и волны. Они подчиняются принципу неопределенности Гейзенберга [15], который гласит, что нельзя точно измерить как момент, так и положение квантовой частицы одновременно. Квантовый шум является нежелательным явлением в различных квантовых системах, таких как квантовые компьютеры и квантовые датчики. Он может вносить ошибки в результаты измерений и ограничивать точность и чувствительность таких систем. Поэтому исследования и разработки направлены на минимизацию квантового шума и разработку методов коррекции ошибок, чтобы улучшить производительность квантовых устройств.

Квантовый шум проявляется в различных аспектах квантовых систем и может иметь различные источники. Некоторые из основных источников квантового шума включают:

1. Шум нулевой точки: даже при абсолютном нуле температуры квантовые системы испытывают нулевой показатель энергии из-за нулевой точки энергии. Это приводит к флуктуациям в различных физических величинах, таких как электрический заряд и электромагнитное поле.

2. Шум фотонов [16]: фотоны, которые являются квантами света, также могут вносить флуктуации и шум в измерения. Например, в оптических системах, где используются слабые сигналы, флуктуации числа фотонов могут вносить шум.

3. Шум спонтанной эмиссии: в квантовых системах, таких как атомы и кубиты, процесс спонтанной эмиссии может вносить флуктуации в излучение или энергетические уровни системы.

4. Шум квантовых измерений: когда производятся измерения квантовых систем, принцип неопределенности Гейзенберга приводит к флуктуациям и шуму в результатах измерений. Это ограничивает точность и чувствительность измерений.

5. Шум окружающей среды: внешние факторы, такие как температура, электромагнитные поля и воздействие других частиц, могут также вносить квантовый шум в системы.

Для уменьшения квантового шума и его воздействия на квантовые системы исследователи и инженеры разрабатывают различные стратегии и методы. Это включает использование методов коррекции ошибок, контроль окружающей среды, охлаждение систем до близкого к абсолютному нулю, а также разработку специальных квантовых состояний и устройств, которые могут уменьшить влияние квантового шума.

## 2. Квантовая модель обработки информации

В неопределенных случаях принятия решений человек выбирает реакцию в соответствии с предпочтениями, которые абстрагируются как когнитивное состояние. Следовательно, эволюция когнитивного состояния является ядром модели обработки информации. Рассмотрим два механизма, которые определяют эволюцию когнитивного состояния модели обработки информации с квантово-математическим формализмом [17], то есть непосредственная обратная связь и шумовое возмущение. Модель обработки информации представлена на рисунке 1.

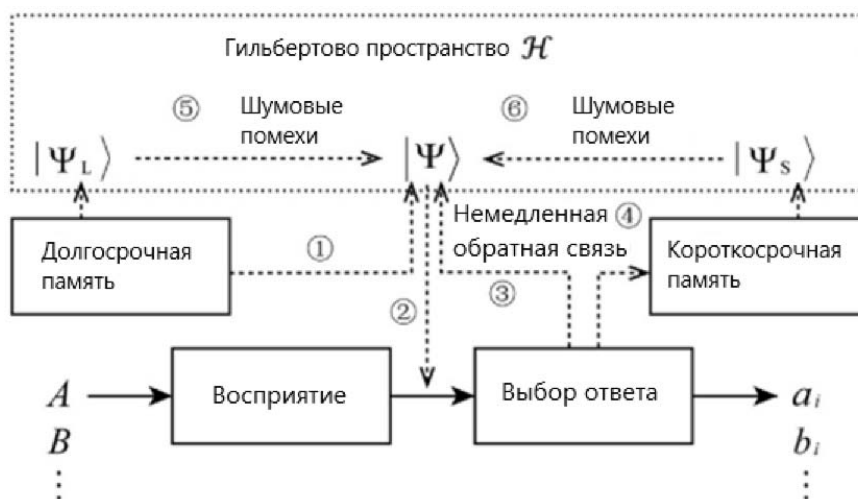


Рис. 1. Квантовая модель обработки информации

Fig. 1. Quantum model of information processing

Долговременная память обеспечивает исходное когнитивное состояние для неопределенного принятия решений (путь ①), которое связано со знаниями, опытом и привычками. При обработке информации входная информация сначала ощущается и понимается посредством органов чувств и восприятий. Затем исходное когнитивное состояние определяет выбор ответа из возможных ответов (путь ②). После выбора ответа механизм немедленной обратной связи обновляет исходное когнитивное состояние [18] до нового состояния (путь ③), и решение временно сохраняется в кратковременной памяти (путь ④). По сравнению с исходным когнитивным состоянием новое состояние более нестабильно. Перед последующей обработкой информации  $L$ -шум из долговременной памяти непрерывно эволюционирует из нового нестабильного состояния в сторону стабильного состояния  $L$ -шума, то есть исходного когнитивного состояния (путь ⑤). Когнитивное состояние, возможно, не достигло состояния  $L$ -шума, когда начинается последующая обработка информации. Это может быть состояние суперпозиции вновь сформированного состояния за счет непосредственной обратной связи и исходного когнитивного состояния. Кроме того, если повторяющаяся информация воспринимается при следующей обработке информации,  $S$ -шум может далее развить ког-

нитивное состояние до состояния  $S$ -шума (путь ⑥). Степень эволюции может быть связана с готовностью повторить реакцию.

### 2.1. Шумовые помехи

Для  $L$ -шума, между двумя шагами обработки информации создается когнитивное состояние, формирующее обратную связь для эволюции в сторону  $L$ -шумового состояния, то есть начального когнитивного состояния. Однако когда начинается последующая обработка информации эволюция, возможно, еще не достигла конца. Предположим, что когнитивное состояние, когда начинается очередная обработка информации, представляет собой суперпозицию конца и начала эволюции [19]:

$$|\psi_1\rangle \rightarrow_L |\psi_1'\rangle = \frac{\sqrt{p}|\psi_1\rangle + \sqrt{1-p}|\psi_L\rangle}{|\sqrt{p}|\psi_1\rangle + \sqrt{1-p}|\psi_L\rangle|} = \frac{\sqrt{p}|\psi_1\rangle + \sqrt{1-p}|\psi_0\rangle}{|\sqrt{p}|\psi_1\rangle + \sqrt{1-p}|\psi_0\rangle|} \quad (1)$$

где  $p$  – параметр, представляющий степень эволюции, и  $0 \leq p \leq 1$ . Знаменатель обеспечивает нормировку [20]  $|\psi_1'\rangle$ .

Шум может в дальнейшем развить когнитивное состояние до состояния  $S$ -шума, которое показывает готовность выбрать повторяющийся ответ. Точно так же когнитивное состояние, когда начинается выбор ответа, можно предположить как суперпозицию конца и начала эволюции:

$$|\psi_1\rangle \rightarrow_S |\psi_1''\rangle = \frac{\sqrt{q}|\psi_1'\rangle + \sqrt{1-q}|\psi_S\rangle}{|\sqrt{q}|\psi_1'\rangle + \sqrt{1-q}|\psi_S\rangle|}, \quad (2)$$

где  $q$  – параметр, представляющий степень эволюции, и  $0 \leq q \leq 1$ .  $q$  может зависеть от желания человека повторить решение. Если один человек обязательно повторит выбор без всяких сомнений, то  $q=0$ , то есть

$$|\psi_1'\rangle \rightarrow_S |\psi_1''\rangle = |\psi_S\rangle. \quad (3)$$

## 3. Моделирование квантового шума

Опишем три группы квантовых шумов:

- Ошибка Паули;
- Шум декогеренции из-за связи физических кубитов с окружающей средой;
- Когерентный или унитарный шум, возникающий из-за несовершенного контроля или неправильной калибровки.

### 3.1. Ошибка Паули

Первым распространенным шумом является ошибка Паули [21], которую можно использовать для имитации ошибок переключения битов и фазы. Предположим, что ошибка возникает с вероятностью  $p$ , тогда ошибки переворота бита и переворота фазы определяются с помощью операций Паули  $X$  и  $Z$  соответственно, в то время как операция Паули  $Y$  подразумевает, что обе ошибки переворота бита и переворота фазы происходят. Представим три репрезентативных ошибки Паули: ошибки однородной деполаризации, переворот бита и переворот фазы.

- *Равномерная деполаризация*

Однокубитный канал однородной деполаризации описывается, когда все три типа ошибок Паули имеют одинаковую вероятность возникновения. Его можно описать через представление суммы операторов:

$$p \mapsto D(p) = \sum_{i=0}^3 K_i K_i', \quad (4)$$

где  $\{K_i\}$  – операторы Крауса, определяемые равенством

$$K_0 = \sqrt{1-p}I, \quad K_1 = \sqrt{\frac{p}{3}}X, \quad K_2 = \sqrt{\frac{p}{3}}Y, \quad K_3 = \sqrt{\frac{p}{3}}Z. \quad (5)$$

• *Ошибка переворота бита*

Однокубитный канал с переворотом битов описывается уравнением  $p \mapsto D(p) = K_0 p K_0' + K_1 p K_1'$  со следующими операторами Крауса:

$$K_0 = \sqrt{1-p}I, \quad K_1 = \sqrt{p}X. \quad (6)$$

• *Ошибка переворота фазы*

Однокубитовый канал с переворотом фазы описывается уравнением  $p \mapsto D(p) = K_0 p K_0' + K_1 p K_1'$  со следующими операторами Крауса:

$$K_0 = \sqrt{1-p}I, \quad K_1 = \sqrt{p}Z. \quad (7)$$

### 3.2. Шум декогеренции

Эта группа ошибок имитирует эффекты взаимодействия физических кубитов с окружающей их средой, которые часто описываются неединичными операциями. В-первых, рассматриваем канал затухания амплитуды, связанный с возникающей во времени тепловой релаксацией, которая включает обмен энергией между кубитами и их окружением. Если моделируем среду, начиная с основного состояния  $|0\rangle$ , то этот процесс приводит кубиты к основному состоянию  $|0\rangle$ . Еще один шумовой процесс, который считается исключительно квантово-механическим, – это канал фазового затухания, который описывает потерю квантовой информации без потери энергии. Здесь собственные состояния энергии не зависят от времени, но их фазы пропорциональны собственному значению. Следовательно, относительные фазы между собственными энергетическими состояниями могут быть потеряны по мере развития системы в течение длительного времени. С учетом скорости затухания  $\gamma$  канал затухания можно описать как  $p \mapsto D(p) = K_0 p K_0' + K_1 p K_1'$ , где операторы Крауса  $K_0$  и  $K_1$  определяются для каждого канала.

• *Амплитудное демпфирование*

Канал затухания амплитуды с одним кубитом описывается следующими операторами Крауса:

$$K_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-\gamma} \end{pmatrix}, \quad K_1 = \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\gamma} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

• *Фазовое демпфирование*

Однокубитный фазовый демпфирующий канал описывается следующими операторами Крауса:

$$K_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-\gamma} \end{pmatrix}, \quad K_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\gamma} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

### 3.3. Когерентный или унитарный шум

Эта группа ошибок описывает когерентные ошибки, когда результирующая операция является унитарной, но вызывает изменение целевого состояния. Эти ошибки могут возникать из-за несовершенного контроля или неправильной калибровки. Рассматриваем следующие унитарные шумы, чтобы имитировать возможный эффект когерентных ошибок в нашей схемной модели с уровнем шума  $\varepsilon = s\varepsilon_{\max}$ , где

$s$ -Uniform(0, 1) дискретизируется для каждого кубита.

- *Однокубитная чрезмерная ротация*

В общем случае когерентной ошибки, описывающей чрезмерное вращение одного кубита,

$$R_x(\theta) \rightarrow R_x(\theta(1+\varepsilon)), \quad R_z(\theta) \rightarrow R_z(\theta(1+\varepsilon)), \quad (10)$$

где углы поворота масштабируются с коэффициентом  $1+\varepsilon$ .

- *Смещение CNOT*

Чтобы смоделировать чрезмерное вращение вентилей CNOT, условное вращение  $X$  масштабируется с коэффициентом  $1+\varepsilon$ :

$$C_x = \begin{pmatrix} I & \\ & R_x(\pi) \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} I & \\ & R_x(\pi(1+\varepsilon)) \end{pmatrix}. \quad (11)$$

- *Непреднамеренное запутывание (onehop, twohop)*

Чтобы смоделировать непреднамеренное запутывание между соседними кубитами, применяется следующее небольшое условное вращение фактора:

$$\begin{pmatrix} I & \\ & R_x(\pi\varepsilon) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Называем их односкачковым перепутателем, если эти шумы применяются между физически связанными кубитами, и двухскачковым перепутателем, если они применяются между физически несвязанными кубитами на расстоянии двух переходов.

Шумы и точность переноса состояний представлены на рисунке 2.

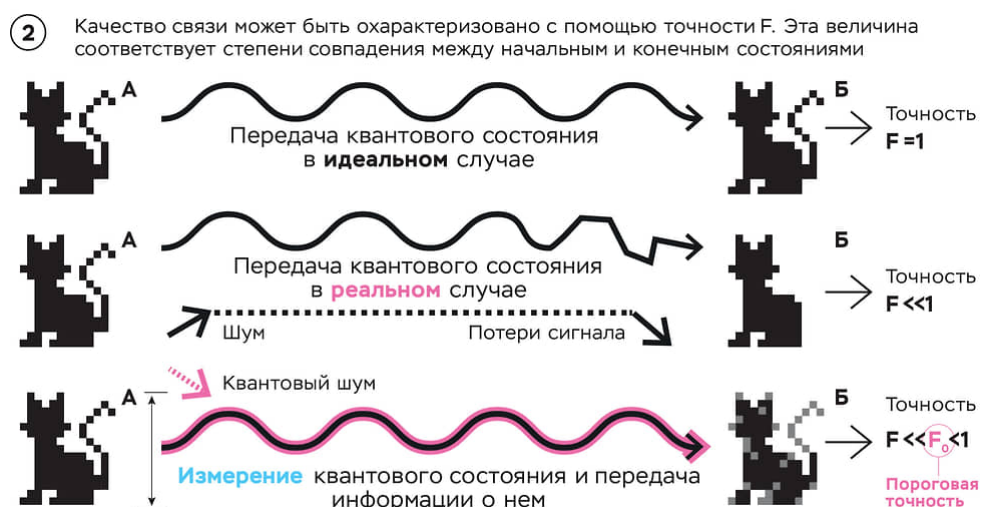


Рис. 2. Шумы и точность переноса состояний

Fig. 2. Noise and accuracy of states transfer

### Заключение

В заключение можно сделать вывод, что квантовая модель обработки информации с шумом памяти представляет собой перспективное направление исследований в области квантовой информатики. Эта модель позволяет учитывать особенности квантовых систем, таких как суперпозиция и интерференция, и эффективно применять их для решения сложных задач обработки информации. Однако одним из основных вызовов в развитии квантовой модели обработки информации с шумом памяти является управление и устранение шумов, которые могут серьезно повлиять на точность и надежность квантовых вычислений. Несмотря на это, дальнейшие исследования и разра-

ботки в этой области могут привести к созданию новых алгоритмов и методов, которые существенно расширят возможности квантовой обработки информации и приведут к появлению новых технологических решений.

### Примечание

1. Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M. The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes // 11<sup>th</sup> International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT) / Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2017. P. 437–441.
2. Devoret M.H., Schoelkopf R.J. Superconducting circuits for quantum information: An outlook // Science. 2013. No. 339 (6124). P. 1169-1174.
3. Quantum computers / T.D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme [et al.] // Nature. 2010. No. 464 (7285). P. 45-53.
4. Kitaev A.Y. Fault-tolerant quantum computation by anyons // Annals of Physics. 2003. No. 303 (1). P. 2-30.
5. Gottesman D. An introduction to quantum error correction and fault-tolerant quantum computation // Quantum Information Science and Its Contributions to Mathematics. American Mathematical Society. 2009. P. 3-58.
6. Interactive proofs for quantum computations. Communications of the ACM / D. Aharonov, M. Ben-Or, E. Eban, G. Landau. 2019. No. 62 (3). P. 129-137.
7. Shor P.W. Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory // Physical Review A. 1995. No. 52 (4). P. 2493-2496.
8. Knill E., Laflamme R., Zurek W.H. Resilient quantum computation: error models and thresholds // Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1998. No. 454 (1969). P. 365-384.
9. Preskill J. Quantum information and physics: some future directions // Journal of Modern Optics. 2000. No. 47 (2-3). P. 127-137.
10. Quantum non-demolition measurements of qubit states using the photon number parity basis / D. Riste, S. Gustavsson, M. Lettner, W.D. Oliver // Nature. 2020. No. 584 (7819). P. 551-556.
11. Helsen J., Fannes M. Quantum channels, quantum noise and quantum operations // Reports on Mathematical Physics. 2021. No. 88 (2). P. 243-289.
12. Campagne-Ibarcq P., Campagne-Ibarcq N., Devore, M.H. Quantum error correction and annealing with superconducting qubits // Nature Physics. 2022. No. 18 (5). P. 426-432.
13. Hu R., Nori F. Quantum error correction and fault-tolerant quantum computation with superconducting qubits // Physics Reports. 2022. No. 976. P. 1-64.
14. Terhal B.M. Quantum error correction for quantum memories // Reviews of Modern Physics. 2015. No. 87 (2). P. 307-346.
15. Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Потапов В.С. Количественные характеристики степени запутанности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 3. С. 76–86.
16. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model / V. Potapov, S. Gushansky, V. Guzik, M. Polenov // Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer Verlag. 2016. Vol. 465. P. 59-68.
17. Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms / Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. 2-е изд. Москва: Вильямс, 2006. 1328 с.
18. Cortese J.A., Braje T.M. Loading Classical Data into a Quantum Computer. 2018 // arXiv: 1803.01958v1.
19. Black-box quantum state preparation without arithmetic / Y.R. Sanders, G.H. Low, A. Scherer, D. W. Berry. 2018 // arXiv: 1807.03206v1.
20. Kerenidis I., Prakash A. Quantum Recommendation Systems. 2016 // arXiv: 1603.08675v3.
21. Gilyén A., Arunachalam S., Wiebe N. Optimizing quantum optimization algorithms via faster quantum gradient computation. 2018 // arXiv: 1711.00465v3.

### References

1. Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M. The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes // 11<sup>th</sup> International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT) / Institute of Electrical and Electronics Engineers.



2017. P. 437–441.

2. Devoret M.H., Schoelkopf R.J. Superconducting circuits for quantum information: An outlook // Science. 2013. No. 339 (6124). P. 1169-1174.

3. Quantum computers / T.D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme [et al.] // Nature. 2010. No. 464 (7285). P. 45-53.

4. Kitaev A.Y. Fault-tolerant quantum computation by anyons // Annals of Physics. 2003. No. 303 (1). P. 2-30.

5. Gottesman D. An introduction to quantum error correction and fault-tolerant quantum computation // Quantum Information Science and Its Contributions to Mathematics. American Mathematical Society. 2009. P. 3-58.

6. Interactive proofs for quantum computations. Communications of the ACM / D. Aharonov, M. Ben-Or, E. Eban, G. Landau. 2019. No. 62 (3). P. 129-137.

7. Shor P.W. Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory // Physical Review A. 1995. No. 52 (4). P. 2493-2496.

8. Knill E., Laflamme R., Zurek W.H. Resilient quantum computation: error models and thresholds // Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1998. No. 454 (1969). P. 365-384.

9. Preskill J. Quantum information and physics: some future directions // Journal of Modern Optics. 2000. No. 47 (2-3). P. 127-137.

10. Quantum non-demolition measurements of qubit states using the photon number parity basis / D. Riste, S. Gustavsson, M. Lettner, W.D. Oliver // Nature. 2020. No. 584 (7819). P. 551-556.

11. Helsen J., Fannes M. Quantum channels, quantum noise and quantum operations // Reports on Mathematical Physics. 2021. No. 88 (2). P. 243-289.

12. Campagne-Ibarcq P., Campagne-Ibarcq N., Devore, M.H. Quantum error correction and annealing with superconducting qubits // Nature Physics. 2022. No. 18 (5). P. 426-432.

13. Hu R., Nori F. Quantum error correction and fault-tolerant quantum computation with superconducting qubits // Physics Reports. 2022. No. 976. P. 1-64.

14. Terhal B.M. Quantum error correction for quantum memories // Reviews of Modern Physics. 2015. No. 87 (2). P. 307-346.

15. Guzik V.F., Gushansky S.M., Potapov V.S. Quantitative characteristics of the degree of entanglement // Proceedings of the Southern Federal University. Technical Sciences. 2016. No. 3. P. 76–86.

16. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model / V. Potapov, S. Gushansky, V. Guzik, M. Polenov // Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer Verlag. 2016. Vol. 465. P. 59-68.

17. Introduction to Algorithms / Thomas H. Corman, Charles I. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Williams, 2006. 1328 p.

18. Cortese J.A., Braje T.M. Loading Classical Data into a Quantum Computer. 2018 // arXiv: 1803.01958v1.

19. Black-box quantum state preparation without arithmetic / Y.R. Sanders, G.H. Low, A. Scherer, D.W. Berry. 2018 // arXiv: 1807.03206v1.

20. Kerenidis I., Prakash A. Quantum Recommendation Systems. 2016 // arXiv: 1603.08675v3.

21. Gilyén A., Arunachalam S., Wiebe N. Optimizing quantum optimization algorithms via faster quantum gradient computation. 2018 // arXiv: 1711.00465v3.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Статья поступила в редакцию 03.07.2023; одобрена после рецензирования 30.07.2023; принята к публикации 31.07.2023.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

*The article was submitted 03.07.2023; approved after reviewing 30.07.2023; accepted for publication 31.07.2023.*

© В.Ф. Гузик, С.М. Гушанский, В.С. Потапов, 2023