

18. Kureychik V.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I. Modeli parallelizma evolyutsionnykh vychisleniy [Models of parallelism of evolutionary calculations], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov state University of railway engineering], 2011, No. 3 (43), pp. 93-97.
19. Kureychik V.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I., Gladkov L.A. Osnovy teorii evolyutsionnykh vychisleniy [Fundamentals of the theory of evolutionary computation]. Rostov-on-Don: YuFU, 2010.
20. Rodzin S.I., Kureychik V.V. Teoreticheskie voprosy i sovremennye problemy razvitiya kognitivnykh bioinspirirovannykh algoritmov optimizatsii [Theoretical questions and contemporary problems of the development of cognitive bio-inspired algorithms for optimization], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2017, No. 3, pp. 51-79.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.Г. Буланов.

Кравченко Юрий Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Нацкевич Александр Николаевич – e-mail: natskevich.a.n@gmail.com; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Kravchenko Yury Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

Natskevich Alexander Nikolaevich – e-mail: natskevich.a.n@gmail.com; the department of computer aided design; graduate student.

УДК 004.032

DOI 10.23683/2311-3103-2019-3-43-50

В.С. Потапов

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КЛАССИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В КВАНТОВОЕ СОСТОЯНИЕ, ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛУТОНОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В БИНАРНОЕ*

Данная статья посвящена решению задачи исследования и разработки методов функционирования квантовых алгоритмов и моделей квантовых вычислительных устройств. Квантовый алгоритм, реализованный в работе, позволяет произвести преобразование классического изображения в квантовое состояние, выделения границ и преобразование полутонного изображения в бинарное, показывает возможности квантовой теории информации в интерпретации классических задач. Целью работы является компьютерное моделирование квантового алгоритма для решения задачи преобразования классического изображения с использованием квантовых вычислительных средств и методов, изучение существующих алгоритмов распознавания образов и создание эффективной модели распознавания с помощью свойств и методов квантовых вычислений. Данная статья посвящена решению задачи исследования и разработки методов функционирования квантовых алгоритмов и моделей квантовых вычислительных устройств. Актуальность данных исследований заключается в математическом и программном моделировании и реализации квантового алгоритма для решения классов задач классического характера. Научная новизна данного направления в первую очередь выражается в постоянном обновлении и дополнении поля квантовых исследований по ряду направлений, а компьютерная симуляция квантовых физических явлений и особенностей слабо освещена в мире. В настоящее время во многих передовых странах мира интенсивно ведутся научно-исследовательские работы по разработке и созданию квантовых компьютеров и их программного обеспечения, наблюдается

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № НК 19-07-01082.

стремительный рост интереса к квантовым компьютерам. Публикуется большое количество статей и монографий. В работе приведены основные теоретические и практические результаты в области квантового компьютеринга.

Квантовая симуляция; квантовый алгоритм; квантовый бит; модель квантового вычислителя; квантовое запутывание; суперпозиция; квантовый параллелизм.

V.S. Potapov

IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM FOR TRANSFORMING A CLASSICAL IMAGE INTO A QUANTUM CONDITION, ALLOCATION OF BORDERS AND TRANSFORMATION OF A HALFTONE IMAGE TO A BINARY ONE

This article is devoted to solving the problem of research and development of methods for the functioning of quantum algorithms and models of quantum computing devices. The quantum algorithm implemented in the work allows the classical image to be transformed into a quantum state, the selection of boundaries and the transformation of a halftone image into a binary one, shows the possibilities of quantum information theory in interpreting classical problems. The aim of the work is a computer simulation of a quantum algorithm for solving the problem of transforming a classical image using quantum computing means and methods, studying existing pattern recognition algorithms and creating an effective recognition model using properties and methods of quantum computing. This article is devoted to solving the problem of research and development of methods for the functioning of quantum algorithms and models of quantum computing devices. The relevance of these studies lies in the mathematical and software modeling and implementation of a quantum algorithm for solving classes of problems of a classical nature. The scientific novelty of this area is primarily expressed in the constant updating and addition of the field of quantum research in a number of areas, and computer simulation of quantum physical phenomena and features is poorly covered in the world. Currently, in many advanced countries of the world intensively conducted research work on the development and creation of quantum computers and their software, there is a rapid growth of interest in quantum computers. A large number of articles and monographs are published. The paper presents the main theoretical and practical results in the field of quantum computing.

Quantum simulation; quantum algorithm; quantum bit; quantum computing model; quantum entanglement; superposition; quantum parallelism.

Введение. В современной науке и технике постоянно возникает необходимость в решении таких стратегически важных задач, как предсказание погоды и расчет климатических изменений, создание онкологических препаратов, обработка сигналов из Вселенной для поиска внеземных цивилизаций, обработка символической информации, криптоанализ [1], опережающий расчет траекторий движущихся воздушных и космических объектов и другие задачи. Практическая реализация перечисленных задач на современных, даже суперкомпьютерных, системах требует недопустимо большого промежутка времени или вообще невозможна. В последнее время наблюдается стремительный рост интереса к квантовым компьютерам [2]. Современные методики по распознаванию объектов имеют ряд существенных недостатков: погрешности поиска в базах данных [3] большой размерности и определения объекта при смене его положения, ухудшение качества по определению объектов в зависимости от качества освещения [4], средства маскировки [5]. Предполагается использование алгоритмов [6] квантовой природы при определении объектов и образов. В последнее время наблюдается стремительный рост интереса к квантовым компьютерам, особенно после продажи действующих квантовых вычислителей. Использование квантовых компьютеров, позволяет существенно увеличить скорость решения вычислительных задач и, самое главное, экспоненциально увеличить скорость решения NP полных проблем, которые на классических машинах могут решаться за неприемлемое время.

1. Процесс формирования набора кубитов. На рис. 1 представлен вычислительный процесс при моделировании запутанных квантовых вычислений в области квантовых алгоритмов, что подразумевает в первую очередь применение описанных в работе квантовых вычислений различного рода в работе квантовых алгоритмов и формирование набора кубитов для состояния управляющих сигналов нормализации в конкретный момент времени.

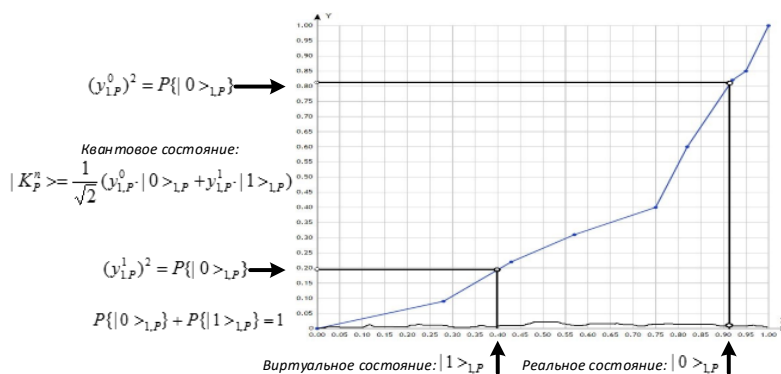


Рис. 1. Процесс формирования набора кубитов

Применяя тензорное произведение между преобразованиями Адамара, получим члены вида $K_P^n \otimes K_D^{n_2}$ и аналогичные комбинации коэффициентов усиления. Пример, описанный выше, свидетельствует о существовании шестнадцати вероятностных состояний, которые описывают вариации среди корреляций в соответствии с их типом и видом.

2. Выполнение преобразования классического изображения в состояние квантовой суперпозиции. Рассмотрим квантовый метод [18], направленный на представление и обработку цветной пиксельной фотографии или изображения. Предполагается преобразование каждого пикселя изображения $x(i, j)$ в некое квантовое состояние [19] $|q(i, j)\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$. Произведем кодирование цветовой палитры пиксельного набора в рамках комплексных амплитудных квантовых состояний [20]:

$$\delta: R^3 \rightarrow C_1^2, (x_1, x_2, x_3) \mapsto (r_1 e^{i\phi_1}, r_1 e^{i\phi_2}), \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 – значения системы цветов RGB, $r_1 := \sqrt{1 - x_3^2}$, $r_2 := x_3$, $\phi_1 := \arcsin(2x_1 - 1)$, $\phi_2 := \arcsin(2x_2 - 1)$. Пусть $z_1 = r_1 e^{i\phi_1}$, $z_2 = r_2 e^{i\phi_2}$, далее получим пиксельный набор цветов в форме $|q_1\rangle = z_1|0\rangle + z_2|1\rangle$. Следующим этапом является процесс кодирования [21] координат цветовой палитры пиксельного набора:

$$|k\rangle = |x\rangle|y\rangle = |x_{n-1}x_{n-2} \dots x_0\rangle |y_{n-1}y_{n-2} \dots y_0\rangle, x_i, y_i \in \{0, 1\}, \quad (2)$$

где $|x\rangle, |y\rangle$ – квантовые состояния, кодирующие пиксельную координатную сетку. В зависимости от используемого преобразующего алгоритма выборка амплитудных [22] значений вероятности кодирующие пиксельные цвета фотографии, могут существенно различаться. Создадим суперпозицию вычислительного процесса. Пиксельная суперпозиция состояний квантовой системы фотографии или изображения на входе:

$$|I\rangle = \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^{2^{2n}-1} |q_k\rangle \otimes |k\rangle. \quad (3)$$

Рассмотренный метод трансляции классического изображения в квантовое состояние суперпозиции характеризует фотоизображение, которое состоит из пиксельного набора, в форме унифицированной суперпозиции с характеристиками всего набора пикселей. Вектор состояния и вероятностная амплитуда [23] сохраняются в с-

теме отдельными значениями, поскольку речь идет о разработанной модели квантового вычислительного устройства [24] и алгоритма, входящего в состав модели, а также хранении пиксельного набора в вычислительном устройстве классического образца.

При получении на входе модели квантового вычислительного устройства и алгоритма серого изображения и трансляции его в бинарное состояние необходимым и достаточным является предварительная обработка пиксельного набора средствами классических методов, средств и алгоритмов, направленных на распознавание объектов. Данный процесс повторяется многократно на нескольких этапах вычислительного процесса алгоритма. Область применения данного алгоритма – задачи сжатия исходного набора пикселей с помощью устранения информации избыточного характера. Преимуществом изображения бинарного природы – наименьшее количество требуемой памяти и времени процессора с точки зрения процесса обработки. Алгоритм требует выполнения ряда этапов:

Этап 1. Пусть имеем изображение размерности $M \times N$ с полутоновым набором пикселей. Произведем трансляцию всего набора пикселей поступающей на вход фотографии $x(i, j)$ в состояние $|q(i, j)\rangle$ квантовой системы. При интенсивности всего пиксельного набора, тогда вероятностные распределения $|c_0|^2$ и $|c_1|^2$ вычисляются с помощью определения сумм s_1 и s_2 так:

$$s_1 = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=0}^1 x(i-k, j-l) + x(i, j+1) + x(i, j+2), \quad (4)$$

$$s_2 = x(i-1, j-1) + x(i-1, j) + x(i, j-1). \quad (5)$$

Если $P = (s_1 + s_2)/5$, то $|c_0|^2 = f(P)$, $|c_1|^2 = 1 - f(P)$, где $f(P) = \frac{1}{1+e^{\frac{P+a}{b}}}$.

Квантовые состояния $|0\rangle$, $|1\rangle$ соотносятся с векторами $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. В соответствии с этим кубиту $|q(i, j)\rangle$ сопоставляется вектор $\begin{pmatrix} 1-f(P) \\ f(P) \end{pmatrix}$, таким образом, интенсивность пиксельного набора фотографии представляется в двумерном пространстве.

Этап 2. С помощью измерения кубита $|q(i, j)\rangle$ всего пиксельного набора фотографии, подающейся на вход, происходит формирование матрицы пиксельной системы [25]. При соответствии квантовых состояний $|0\rangle$, $|1\rangle$ показателям 0, 1 выходного пиксельного набора фотографии на выходе получим бинарный объект. На рис. 2 изображена разработанная модель квантового вычислительного устройства и результат выполнения квантового алгоритма преобразования набора пикселей.

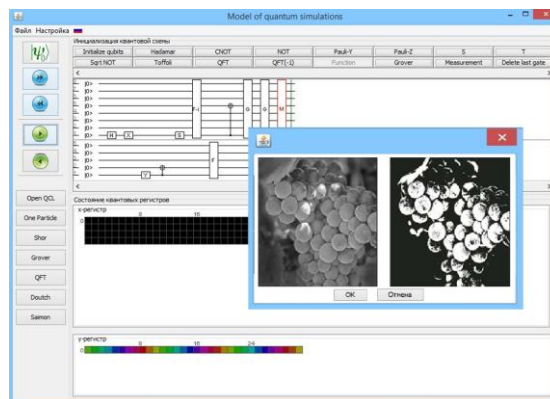


Рис. 2. Модель квантового вычислительного устройства

Процесс измерения заключается в разыгрывании числа случайного характера из промежутка $[0, 1]$. При попадании значения в интервал $[0, |c_1|^2]$ выходным значением измерительного процесса является базисное состояние бра вектора 0, в противном случае (интервал $[|c_1|^2, 1]$) – квантовое состояние бра вектора 1.

3. Вычислительный эксперимент. В настоящее время существует огромное количество методов и алгоритмов, направленных на распознавание объектов и лиц на требуемом изображении. Рассмотрим ряд классических методов и произведем сравнительный анализ с разработанным квантовым алгоритмом:

Метод главных компонент. Метод помогает в решении задач по уменьшению размера входных данных и потере наименьшего количества информации, позволяет выделять характерные признаки объекта и использовать их для реконструкции и восстановления. Данный метод основан на преобразовании Карунена–Лоэва.

Факторный анализ. Факторный анализ (ФА) базируется на гипотезе о том, что наблюдаемые переменные являются косвенными проявлениями относительно небольшого числа неких скрытых факторов. Цель ФА – получение модели изображения объекта, с помощью которой можно провести оценку близости тестового изображения к изображению объекта.

Метод опорных векторов. Метод опорных векторов позволяет построить классификатор, минимизирующий верхнюю оценку ожидаемой ошибки классификации. Применение метода опорных векторов к задаче обнаружения лица заключается в поиске гиперплоскости в признаковом пространстве, отделяющей класс изображений лиц от изображений "не лиц".

Искусственные нейронные сети. ИНС – это математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма.

Скрытые марковские модели. Скрытые марковские модели являются одним из способов получения математической модели (описания свойств) некоторого наблюдаемого сигнала. Скрытые марковские модели относятся к классу стохастических моделей. Стохастические модели пытаются охарактеризовать только статистические свойства сигнала, не обладая информацией о его специфических свойствах.

В процессе вычислительного эксперимента было получено преимущество квантового алгоритма в сравнении с описанными выше классическими аналогами как по времени, так и по качеству распознавания необходимого лица или объекта на изображении. Для чистоты эксперимента было использовано единое изображение и весь вычислительный процесс проходил на одной вычислительной машине. В табл. 1 показаны сравнительные характеристики и результаты всего эксперимента.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов распознавания образов

	Метод главных компонент	Факторный анализ	Метод опорных векторов	Искусственные нейронные сети	Квантовый алгоритм	Скрытые марковские модели
Время выполнения процесса распознавания, с	8,4	7,9	8,1	7,6	6,9	8,8
Качество распознавания, %	84	91	89	86	93	82

Как видно из значений табл. 1 разработанный квантовый алгоритм в значительной мере выигрывает в скорости выполнения операция по распознаванию объектов на изображении. Что касается качества распознавания, то здесь выигрыш алгоритма квантовой природы минимален. Данный выигрыш обусловлен квантовыми преимуществами, а именно параллелизмом всего вычислительного процесса, позволяющим производить ряд вычислений по распознаванию объектов на изображении в асинхронном режиме в несколько потоков.

Заключение. Стремление повысить вычислительную мощность компьютеров и обеспечить непревзойденные масштабы решаемых задач является одним из определяющих факторов развития суперкомпьютерных технологий.

Основными преимуществами использования вычислений квантового характера [26] в области определения объектов и изображений: ускорение вычислительного процесса с помощью квантовых компонентов, устойчивость при различном ракурсе объекта, его движении / статике, обеспечение криптографической помехоустойчивости. Важное значение придается разработке фундаментально новых физических принципов вычислений, где наиболее перспективным направлением является квантовый компьютеринг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N. Massively parallel quantum computer simulator // Computer Physics Communications. – Vol. 176. – P. 121-136;
2. Boixo S., Isakov S.V., Smelyanskiy V.N., Babbush R., Ding N., Jiang Z., Martinis J.M., and Neven H. Characterizing quantum supremacy in near-term devices. arXiv pre-print arXiv:1608.00263;
3. Stierhoff G.C., Davis A.G. A History of the IBM Systems Journal In: IEEE Annals of the History of Computing. – Vol. 20, Issue1. – P. 29-35.
4. Lipschutz S., Lipson M. Linear Algebra (Schaum's Outlines). – 4th ed. McGraw Hill.
5. Collier, David. The Comparative Method. In Ada W. Finifter, ed. Political Sciences: The State of the Discipline II. Washington, DC: American Science Association. – P. 105-119.
6. Vectorization.<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vectorization&oldid=829988201>.
7. Williams C.P. Explorations in Quantum Computing. Texts in Computer Science, Chapter 2. Quantum Gates. – Springer, 2011. – P. 51-122.
8. Olukotun K. Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency. Morgan and Claypool Publishers (2007);
9. Potapov V., Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties In: Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing // Proceedings of 16-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2016, Bulgaria. – 2016. – Vol. 1. – P. 133-140. STEF92 Technology Ltd.
10. Inverter (logic gate). – [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inverter_\(logic_gate\)&oldid=844691629](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inverter_(logic_gate)&oldid=844691629).
11. Lachowicz P. Walsh – Hadamard Transform and Tests for Randomness of Financial Return-Series. – 2015. – <http://www.quantatrisk.com/2015/04/07/walsh-hadamard-transform-python-tests-for-randomness-of-financial-return-series/>.
12. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation In: Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 763. – P. 198-207.
13. Quantum phase estimation algorithm. (2016, Nov. 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2016. – https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789.
14. Richard G. Milner. A Short History of Spin // Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. – arXiv:1311.5016.
15. Гушанский С.М., Потанов В.С. Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // Информатизация и связь. – 2017. – № 3. – С. 101-104.

16. Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потанов В.С. Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двухмерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 6 (191). – С. 223-233.
17. Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потанов В.С. Реализация модуля конвертации моделей для среды MATLAB // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 6 (191). – С. 212-223.
18. Hales S. Hallgren. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, November 12 – 14, 2000. – P. 515.
19. Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M. The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes // 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. – P. 437-441.
20. Quantum programming. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:50, September 20, 2016. – https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291.
21. Wikipedia contributors. (2018, November 27). IBM Q Experience. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:28, January 31, 2019. – https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=87087480.
22. Quantum mechanics. (2017, March 29). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2017. – URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105.
23. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes // In Proceedings of Eurocrypt. – 2013. – P. 592-608.
24. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer Verlag, 2016. – Vol. 465. – P. 59-68.
25. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem // IEEE Transactions on Information Theory. – 2002. – Vol. 48. – P. 26-37.
26. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.

REFERENCES

1. Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N. Massively parallel quantum computer simulator, *Computer Physics Communications*, Vol. 176, pp. 121-136;
2. Boixo S., Isakov S.V., Smelyanskiy V.N., Babbush R., Ding N., Jiang Z., Martinis J.M., and Neven H. Characterizing quantum supremacy in near-term devices. arXiv pre-print arXiv:1608.00263;
3. Stierhoff G.C., Davis A.G. A History of the IBM Systems Journal In: IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 20, Issue 1, pp. 29-35.
4. Lipschutz S., Lipson M. Linear Algebra (Schaum's Outlines). 4th ed. McGraw Hill.
5. Collier, David. The Comparative Method. In Ada W. Finifter, ed. Political Sciences: The State of the Discipline II. Washington, DC: American Science Association, pp. 105-119.
6. Vectorization. Available at: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vectorization&oldid=829988201>.
7. Williams C.P. Explorations in Quantum Computing. Texts in Computer Science, Chapter 2. Quantum Gates. Springer, 2011, pp. 51-122.
8. Olukotun K. Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency. Morgan and Claypool Publishers, 2007.
9. Potapov V., Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties In: Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, *Proceedings of 16-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2016, Bulgaria*, 2016, Vol. 1, pp. 133-140. STEF92 Technology Ltd.
10. Inverter (logic gate). Available at: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inverter_\(logic_gate\)&oldid=844691629](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inverter_(logic_gate)&oldid=844691629).

11. *Lachowicz P.* Walsh – Hadamard Transform and Tests for Randomness of Financial Return-Series, 2015. Available at: <http://www.quantatrisk.com/2015/04/07/walsh-hadamard-transform-python-tests-for-randomness-of-financial-return-series/>.
12. *Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M.* The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation, *In: Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Springer, 2019, Vol. 763, pp. 198-207.
13. Quantum phase estimation algorithm. (2016, Nov. 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2016. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789.
14. *Richard G. Milner.* A Short History of Spin // Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. arXiv:1311.5016.
15. *Gushanskiy S.M., Potapov V.S.* Metodika razrabotki i postroeniya kvantovykh algoritmov [Methods of development and construction of quantum algorithms], *Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and communication]*, 2017, No. 3, pp. 101-104.
16. *Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S.* Realizatsiya komp'yuternogo modelirovaniya sistemy s chastitsey v odnomernom i dvukhmernom prostranstve na kvantovom urovne [Implementation of computer simulation of a system with a particle in one-dimensional and two-dimensional space at the quantum level], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2017, No. 6 (191), pp. 223-233.
17. *Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S.* Realizatsiya modulya konvertatsii modeley dlya sredy MATLAB [Implementation of model conversion module for MATLAB] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2017, No. 6 (191), pp. 212-223.
18. *Hales S. Hallgren.* An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, November 12–14, 2000*, pp. 515.
19. *Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M.* The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes, *11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, pp. 437-441.
20. Quantum programming. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:50, September 20, 2016. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291.
21. Wikipedia contributors. (2018, November 27). IBM Q Experience. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:28, January 31, 2019. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=87087480.
22. Quantum mechanics. (2017, March 29). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2017. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105.
23. *Boneh D., Zhandry M.* Quantum-secure message authentication codes, *In Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608.
24. *Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M.* Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model, *Advances in Intelligent Systems and Computing.* Springer Verlag, 2016, Vol. 465, pp. 59-68.
25. *Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V.* Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, Vol. 48, pp. 26-37.
26. *Kleppner D., Kolenkow R.* An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.Ю. Поленов.

Потанов Виктор Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Potapov Viktor Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; postgraduate.