

О КВАНТОВОМ КОМПЬЮТЕРЕ И КВАНТОВОЙ МЕДИЦИНЕ

БОРИСЕВИЧ М.Н.

Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины, г. Витебск, Республика Беларусь

Вестник ВГМУ. – 2021. – Том 20, №2. – С. 18-24.

ABOUT QUANTUM COMPUTER AND QUANTUM MEDICINE

BORISEVICH M.N.

Vitebsk State Awarded the «Badge of Honour» Order Veterinary Medicine Academy, Vitebsk, Republic of Belarus

Vestnik VGMU. 2021;20(2):18-24.

Резюме.

Основы квантовой физики были заложены Максом Планком, который предположил, что энергия не может поглощаться и излучаться непрерывно, а только отдельными порциями. Эти порции и были названы квантами. Высказанные им идеи получили подтверждение в многочисленных экспериментах, посвященных фотоэффекту, строению атома и атомного ядра, блестяще выполненных Бором и Резерфордом. Все это в совокупности позволило устранить границу между материей и волнами, предсказанную еще Луи де Бройлем. Так были заложены основы квантовой механики. Эту работу проделали Гейзенберг и Шрёдингер.

Многие проявления квантовой физики уже сегодня можно наблюдать в повседневной жизни. Это и оптические квантовые генераторы, и компьютерные компакт-диски, и интегральные микросхемы и многое другое. В последние годы исследователи обратили внимание и на другие приложения квантовой физики, связанные с вычислениями. По их замыслу, в будущем эту работу будут выполнять квантовые компьютеры.

В статье представлено краткое сообщение о квантовом компьютере и перспективах его использования в квантовой медицине.

Ключевые слова: детерминизм, компьютер, медицина, квантовый.

Abstract.

The foundations of quantum physics have been laid by Max Planck, who suggested that energy couldn't be absorbed and radiated continuously, but only in separate portions – these portions were called quanta. His ideas were confirmed in numerous physical experiments on the photo effect, the structure of the atom and atomic nucleus, brilliantly performed by Bohr and Rutherford. All this in the aggregate made it possible to eliminate the border between matter and waves, predicted by Louis de Broil. In this way the foundations of quantum mechanics were laid = Heisenberg and Schrödinger did this work.

Many manifestations of quantum physics can already be observed in everyday life. These are optical quantum generators, computer CDs, and integrated circuits and lots and lots of this.

In recent years, the researchers have drawn their attention to other quantum physics applications related to queries. By their design, this work will be carried out in the future by quantum computers.

The article presents a short report on the quantum computer and the prospects for its use in quantum medicine.

Key words: determinism, computer, medicine, quantum.

Квантовая физика родилась в далеком 1900 году. Ее начала были заложены Максом Планком, который предположил, что энергия не может поглощаться и излучаться непрерывно, а только отдельными порциями. Эти порции и были названы

квантами. Идея, которую высказал Макс Планк, не осталась незамеченной в научном мире. В ее подтверждение появились исследования в области фотоэффекта, теории строения атома и атомного ядра, выполненные Бором и Резерфордом.

Все это в совокупности позволило устранить границу между материей и волнами, предсказанную Луи де Бройлем. Так были заложены основы квантовой механики. Эту работу проделали Гейзенберг и Шрёдингер [1-3].

Понять квантовую физику непросто. Объясняется это сложностью ее математического аппарата. Тем не менее многие ее проявления уже сегодня можно наблюдать в повседневной жизни [4]. Это и оптические квантовые генераторы, компьютерные компакт-диски, интегральные микросхемы и многое другое. Все они обязаны своим появлением квантовой физике. Поэтому неудивительно, что исследователи обратили свой взор и на другие ее приложения, связанные, в частности, с вычислениями. И эту работу, по замыслу ученых, должны будут в будущем выполнять квантовые компьютеры [5].

Объяснить, что представляет собой квантовый компьютер, значительно проще, если обратиться к компьютеру обычному, с которым человек работает уже не одно десятилетие и принципы работы которого хорошо известны. Классический компьютер работает на тех же базовых технологиях, что и любой компьютер мира – это конечный двоичный мир, в котором информация кодируется в битах – единицах и нулях, существующих только в двух состояниях (вкл. и выкл.).

Работа обычного компьютера по большому счету определяется только двумя параметрами: первый – память компьютера, второй – скорость выполняемых им операций.

Память – это главная характеристика компьютера. Все, что в ней находится, обрабатывается компьютером с определенной скоростью, память можно читать и в память можно писать информацию. Компьютер может выполнять и все известные математические операции. Элементарные действия, выполняемые компьютером, можно объединять в программу, которая управляет обработкой информации. Так работают базы и банки данных, поиск в огромных массивах данных и практически все другие программные средства. И для всех из них важна скорость выполнения операций и чем она выше, тем лучше.

Таким образом, любые действия классического компьютера, к которому мы привыкли, детерминистичны (что в принципе характерно и для всех без исключения вычислительных систем) – все они работают по заранее составленной программистом программе. В программе нет неопределенности, она однозначна, в машинных

кодах ноль есть всегда ноль, а единица есть всегда единица. В этом незыблемость классических положений [6]. Однако даже для классического компьютера можно назвать случай, когда неопределенность все же проявляется, например, при работе со случайными числами, генерируемыми компьютерной программой. И хотя сделать эти числа истинно случайными крайне сложно, обрабатываются они классическим компьютером однозначно и по вполне определенным законам.

У квантового компьютера все по-другому [7]. В основе его работы логика, понять которую чисто интуитивно практически невозможно. Подобно компьютеру обычному, он также может производить вычисления, но выполняются они по совершенно иным законам, отличным от классических и принадлежащим миру квантовой физики.

Классический мир и классическая механика, как уже упоминалось, по своему содержанию детерминистичны. Это означает, что значение любого регистра памяти в обычном компьютере всегда четко определено – это либо ноль, либо единица. В квантово-механической системе такой четкости и однозначности не существует, существует лишь вероятность того, что это ноль либо вероятность того, что это единица. Именно вероятность определяет сущность квантовой механики и является ее важнейшим понятием. С позиций вероятности значения регистра памяти могут быть одновременно и нулем и единицей и также с заданной вероятностью. Эта неопределенность и является отражением реального физического мира [8].

Таким образом, в классической физике вероятностный процесс не имеет места: здесь всегда все совершенно определено и однозначно. В квантовой физике все иначе: процессы носят вероятностный характер и даже теоретически нельзя предсказать, что произойдет в следующую секунду.

Кроме вероятности, в квантовой механике есть еще одно важное понятие – суперпозиция [9]. В обычном компьютере бит находится строго в значениях 0 или 1. В квантовых компьютерах нет битов, а есть квантовые биты, их называют кубитами. Квантовый бит может находиться в состоянии 0 или в состоянии 1 с некоторой вероятностью. Он может находиться и одновременно в этих состояниях, притом в самых разных комбинациях, эти комбинации и называются суперпозицией. Кубиты могут существовать и в бесчисленных состояниях одновременно. Грубо говоря, N кубит может существовать в 2^N разных состо-

ниях одновременно. Если набор из M классических бит хранит последовательность из M нулей и единиц, то в регистре из M кубит может быть записано несравнимо больше информации – суперпозиция всех возможных последовательностей из M нулей и единиц. Таким образом, квантовый компьютер может выполнять экспоненциально больше работы. Это свойство называется квантовым параллелизмом, и, следовательно, теоретически квантовый процессор может работать экспоненциально быстрее классического.

Отсюда следует еще одно важное положение квантовой механики: когда система (кубит) находится одновременно только в состояниях 0 или 1, можно говорить о больших вероятностях, если же состояний много, то система может также одновременно находиться и во всех из них, но уже со значительно меньшей вероятностью [10].

В классической программе в каждый конкретный момент времени каждая строка программы работает с определенным участком памяти. В квантовой программе она может работать одновременно со всеми участками памяти, сколько бы их ни было в наличии, и даже со всей памятью.

Если ввести в обычный компьютер последовательность из тридцати 0 и 1, будет примерно миллиард возможных значений этой последовательности, и компьютер, использующий обычные биты, должен проходить каждую их комбинацию по отдельности, требуя много времени и памяти. Квантовый компьютер может видеть все миллиарды последовательностей одновременно, что существенно сокращает временные и вычислительные затраты. По сути, квантовые компьютеры способны производить расчеты за секунды, на которые у обычных компьютеров может уходить десятки и тысячи лет.

Кубит содержит два числа в обычном машинном представлении (float – вещественный тип числа): первое – вероятность, что кубит находится в состоянии 0 и второе – вероятность, что кубит находится в состоянии 1. То есть один кубит соответствует двум вещественным числам одновременно. В этом имеется определенный выигрыш для квантового компьютера, поскольку для обычного компьютера для двух вещественных чисел нужно два машинных слова по 128 бит каждое. Может показаться, что квантовый компьютер в 128 раз лучше обычного. Но в действительности, как уже упоминалось и как показывают расчеты, он экспоненциально лучше обычного [11].

Продолжим рассуждения. Один кубит – это 2 вещественных числа. Два кубита – 4 вещественных числа. Но восемь кубит – это уже 256 потенциальных конфигураций восьми нулей и единиц, а точнее, два в восьмой степени.

Для одного кубита имеет место выигрыш в 128 раз, а для восьми кубит он значительно больше – $(256 \cdot 128) = 32768$. Система из N кубит эквивалентна 2^N вещественных чисел. При этом емкость квантовой памяти растет в геометрической прогрессии.

Память обычного ноутбука можно выразить в кубитах. Она эквивалентна 15 кубитам (столько же составляет и память обычного настольного компьютера). 40 кубитов – это память самого мощного вычислительного центра, а 50-60 кубитов – суммарная память всех вычислительных центров мира.

Три-четыре кубита квантового компьютера эквивалентны увеличению обычной классической памяти в 10-20 раз. Следовательно, квантовая память более вместительная, чем любые другие классические способы представления информации. И в этом заключается главный потенциал квантовых вычислений [12].

Однако экспоненциальный рост квантовой памяти приводит к проблемам. Когда растет число кубит, растет и сложность квантовой системы, поддерживать ее в изолированном состоянии становится все более проблематично (в физике это явление называется когерентностью). Если позволить квантовой системе взаимодействовать с окружающей средой, произойдет разрушение ее состояний – в ячейках квантовой памяти вместо нулей и единиц будет сплошной шум.

Любое «наблюдение» или «измерение», а в сущности, почти любой контакт с внешней средой приводит к тому, что квантовая система становится классической, это явление называется декогеренцией.

Можно попытаться поддерживать систему изолированной как можно дольше. Но чем больше квантовых операций осуществляется, тем больше времени на них уходит, а значит, все сложнее поддерживать систему в состоянии изоляции. Возникает парадокс: чем больше размер квантовой памяти (кубит), тем меньшее число выполняемых операций становится доступным. Поэтому время, в течение которого удастся удерживать квантовую систему изолированной и в ее рамках произвести некоторое число операций, является важнейшим параметром квантового компьютера.

Примерно как и у классического компьютера, у которого нет охлаждения: пока компьютер не перегреется, у него есть время что-то посчитать, а потом он выходит из строя и отключается [13].

Еще один важный момент. В классическом компьютере доступны любые операции умножения, деления, вычитания. В квантовом компьютере тоже так, но только в теоретическом плане. На практике для него значительно проще выполнять операции с соседними кубитами, которые расположены на прямой, в квадратном или прямоугольном массивах. Для работы со всеми кубитами потребуется очень сложная архитектура. Реализовать ее на практике пока не удастся.

Обозначенные выше направления квантового компьютера очень плотно конфликтуют друг с другом. Можно улучшить одно из них, но это непременно повлечет за собой ухудшение другого [14].

Как же решает задачи квантовый компьютер? Благодаря принципу суперпозиции квантовая система может находиться сразу во всех возможных состояниях, поэтому квантовый компьютер ищет среди них наилучший вариант. Однозначного ответа ждать не следует, но с каждым новым проходом повышается вероятность того, что наилучший вариант найден. Когда квантовый компьютер найдет решение, можно без труда проверить его правильность.

Если же окажется, что ответ не найден, квантовый компьютер запускается еще раз. Вероятность получения правильного ответа должна быть больше 50%, а часто и гораздо выше. Следовательно, за 2-4 запуска квантового алгоритма можно получить правильный ответ с вполне определенной вероятностью, которая, как правило, очень высока. Получается, что квантовый компьютер как бы гадает результат, но делает это на строго научной основе – за несколько итераций ответ можно найти и проверить его правильность [15].

В настоящее время над квантовыми компьютерами работают крупнейшие мировые компании Google, IBM, Intel, Microsoft. Все вместе они уже вложили огромные деньги в разработку, научные лаборатории и исследовательские центры.

Первые классические компьютеры занимали целые комнаты, работали на вакуумных лампах и так нагревались, что для них требовалось отдельное мощное охлаждение. Квантовые компьютеры на них очень похожи – это шкафы высотой по 3 метра, большую часть которых занимают

системы охлаждения. Компьютеры охлаждают до температуры близкой к абсолютному нулю, это нужно для того, чтобы квантовые системы могли устойчиво выполнять свои вычислительные функции [16].

Человечество находится сейчас в так называемой эре NISQ – Noisy Intermediate-Scale Quantum technology, что означает, что сейчас нет таких квантовых устройств, которые могли бы соперничать с классическими компьютерами. Пока нельзя создать квантовую систему, которая по всем параметрам превзойдет классическую: достаточно небольшую, универсальную и изолированную. Пока получают только системы, которые выполняют узкоспециальные задачи определенного сорта лучше, чем вычислительный кластер. Квантовые технологии пока непрактичны. Хотелось бы использовать этот огромный потенциал для своих ежедневных задач, но неизвестно, как это сделать.

Для квантовых компьютеров нужны и особые, квантовые языки программирования. Сегодня их уже около десятка [17]. Впрочем, основная их цель – не столько создание инструмента для программистов, сколько предоставление средств для исследователей с целью облегчения понимания работы квантовых вычислений.

В целом потенциал квантовых технологий и квантовых компьютеров в частности пока до конца не раскрыт, но уже сегодня можно однозначно утверждать, что они найдут свое применение и в медицине [18-21].

Квантовая медицина является сейчас одним из самых модных и многообещающих направлений. И здесь в будущем следует ожидать многих прорывных решений.

Важные подвижки могут быть достигнуты в поиске новых медицинских препаратов. На рынке уже и без того много хороших лекарств, однако скорость, с которой они производятся, а также их эффективность крайне ограничены. Даже с новейшим приростом скорости и точности, обеспечиваемым классическими компьютерами, последние весьма незначительны из-за ограничений, предъявляемых к существующим вычислительным системам. Существует бесчисленное множество способов, с которыми человеческий организм может реагировать на лекарства. Добавьте к этому безграничность генетического разнообразия на молекулярном уровне и потенциальные исходы для неспецифических лекарственных средств, все это в совокуп-

ности достигает миллиардных чисел. Справится с этим классические компьютеры не в состоянии. И только у квантовых компьютеров будет возможность изучить каждый возможный сценарий взаимодействия организма с препаратом и представить не только наилучший возможный план действий, но и шансы человека на успешный прием препарата – за счет комбинации более точного и ускоренного секвенирования ДНК и более точного понимания фолдинга белка. Несмотря на тонкости человеческой ДНК, ученые до сих пор поразительно мало знают о белках, которые кодирует ДНК. Добавим квантовые расчеты, которые в теории позволят ученым составлять «карту белков» так же, как удастся собирать карту генов. По сути, квантовые расчеты позволят моделировать сложные молекулярные взаимодействия на атомном уровне, что станет бесценным, если говорить о разработке новых методов медицинской фармацевтики. Доступной станет возможность смоделировать 20 000 белков и их взаимодействие с мириадами новых разных препаратов (даже тех, что еще не изобретены) с безукоризненной точностью. Анализ этих взаимодействий (опять же при помощи квантовых вычислений) приведет к созданию новых методов лечения пока неизлечимых заболеваний.

Квантовые компьютеры помогут обнаруживать и мутации в ДНК, которые пока еще кажутся совершенно случайными и их связь с квантовыми флуктуациями. Не менее важная задача – моделирование сворачивания белков, являющаяся одной из сложнейших задач биохимии. Классическими вычислительными методами на данный момент она не реализуется. И здесь квантовые компьютеры окажутся полезными.

В потенциале с помощью квантовых алгоритмов можно будет осуществлять моделирование динамики химических реакций, что, в свою очередь, откроет возможность разрабатывать новые, более эффективные лекарственные средства. В поле зрения квантовых компьютеров – точное моделирование молекулярных взаимодействий, поиск оптимальных конфигураций для химических реакций. Такая «квантовая химия» настолько сложна, что с помощью современных компьютеров удастся проанализировать только простейшие молекулы. Химические реакции имеют квантовую природу, поскольку образуют весьма запутанные квантовые состояния суперпозиции. Однако квантовые компьютеры смогут без проблем рассчитывать и эти сложные процессы.

Нововведения, которые будут открыты с помощью квантовых компьютеров, неизбежно приведут к лучшему пониманию того, как функционирует жизнь в целом, что впоследствии приведет к гораздо более точной ее трактовке, улучшению медицинских препаратов и результатов их действия.

Квантовые компьютеры помогут полностью понять мозг и вылечить нейродегенеративные болезни Паркинсона и Альцгеймера, которые сегодня излечить невозможно, поскольку невозможно просчитать всю последовательность активации нейронов – не хватает мощностей обычных компьютеров. Квантовые компьютеры помогут перепрограммировать мозг, чтобы повысить уровень счастья и уменьшить страдания. С их помощью можно создать более осознанного индивида, который сможет изжить свои страдания и внести свой вклад в искоренение страданий в обществе. Искусственный интеллект, подкрепленный квантовыми компьютерами, перевернет медицину. Квантовые датчики позволят регистрировать нейронную активность головного мозга, фактически делая возможным даже считывание мыслей.

Будущее в диагностике и терапии онкологических заболеваний будет всецело полагаться на квантовые датчики за счет визуализации с их помощью единичных клеток. С помощью датчиков можно измерять температуру каждой отдельной клетки. Известно, что температура раковых клеток выше, чем температура здоровых. Таким образом можно идентифицировать злокачественные образования, не затрагивая здоровые. Квантовые датчики представляют собой измерительные приборы, чувствительность которых за счет использования квантово-механических явлений выходит за пределы того, что позволяют датчики классические. Из-за очень малых размеров (несколько сотен нанометров) их можно внедрять в клетку живого организма без нарушения ее жизнедеятельности и с их помощью не только измерять ее температуру, но и мониторить все биологические внутриклеточные процессы, отслеживая таким образом различные заболевания на клеточном и молекулярном уровнях внутри живого организма.

Понимание того, как многие процессы происходят не на уровне определенных органов или тканей, а именно на уровне клеток или даже молекул, позволит медикам диагностировать и понимать процессы, которые запускают многие

заболевания. Например, это аутоиммунные или онкологические заболевания, которые сейчас лечатся, но не очень хорошо. Квантовые датчики могут дать здесь очень много информации для лечения этих заболеваний.

В настоящее время можно метить клетки, включать что-либо в клетку, например, наночастицы, которые обладают заданными оптическими и магнитными свойствами. Измерить всё это физики и химики уже готовы. Но обработать эту информацию, получить нужные данные – здесь требуются квантовые компьютеры.

Использование квантовых технологий делает доступным колоссальное количество знаний о жизнедеятельности даже отдельных частей клеток, развитии болезней, механизмов функционирования лекарств, что, в свою очередь, позволит продлить жизнь существенно дольше, замедлить процесс старения и даже повернуть его вспять. Можно взять клетку, которая состарилась и вернуть ей молодость. Можно изменить идентичность клетки, например, клетку кожи превратить в клетку печени, а также отрегулировать возраст клетки без изменения ее функций. Контролируя проблему старения, можно потенциально вылечить и все заболевания. И далее можно создавать органы, например, печень, мускулы, которые будут адаптированы под конкретного человека.

В последнее время обозначились квантовые успехи и с противодействием коронавирусу – новые методы диагностики, моделирование распространения вируса, оптимизация логистики в больницах. Известная компания D-Wave Systems, занимающаяся разработкой квантовых компьютеров, предоставила облачный доступ к своим процессорам всем, кто ведет разработки в этом направлении.

Менее чем за десять лет существования квантовой медицины (а к ней относят биорезонансную и МИЛ-терапию) получены положительные результаты при лечении около 60 болезней – квантовая терапия вполне сопоставима не с одним «чудодейственным» лекарством, а со всем комплексом фармацевтических средств современной медицины.

Учитывая невероятный потенциал квантовых технологий, будет нелишним заявить, что те, кто овладеет этой технологией в будущем, будут иметь существенное преимущество перед теми, кто не овладеет. И касается это не только медицины.

Завершить статью хотелось бы на оптими-

стичной ноте – будущее за квантовыми технологиями, можно без преувеличения сказать, что они перевернут мир и медицину в том числе.

Литература

1. Квантовая механика и развитие информационных технологий / Ю. И. Богданов [и др.] // Информ. технологии и вычисл. системы. – 2012. – № 1. – С. 17–31.
2. Strengths and Weaknesses of Quantum Computing / C. H. Bennett [et al.] // SIAM J. Comput. – 1997. – Vol. 26, N 5. – P. 1510–1523.
3. Medium for interaction between two qubits in quantum computations / T. Klimov [et al.] // Quantum Computer and Quantum Computing. – 2001. – Vol. 2, N 2. – P. 79–84.
4. Loss, D. Quantum Computation with Quantum Dots / D. Loss, D. DiVincenzo // Phys. Rev. – 1998 Jan. – Vol. 57, N 1. – P. 120–126.
5. Valiev, K. A. Quantum computers and quantum computing / K. A. Valiev // UFN. – 2005. – Vol. 175, N 1. – P. 3–39.
6. Jones, J. A. Implementation of a quantum algorithm on a nuclear magnetic resonance quantum computer / J. A. Jones // J. Chem. Phys. – 1998. – Vol. 109, N 5. – P. 1648–1653.
7. Shor, P. W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer / P. W. Shor // SIAM J. Comput. – 1997. – Vol. 26, N 5. – P. 1484–1509.
8. Nielsen, M. Quantum Computation and Quantum Information / M. Nielsen, I. Chuang. – 10th anniversary ed. – New York : Cambridge University Press, 2010. – 698 p.
9. Rieffe, E. Quantum computing: a gentle introduction. Scientific and Engineering Computation / E. Rieffe, W. Polak. – Cambridge, Massachusetts ; London, England : MIT Press, 2011. – 389 p.
10. Belinskij, A. V. Quantum nonlocality and the absence of a priori values for measurable quantities in experiments with photons / A. V. Belinskij // Phys. Usp. – 2003. – Vol. 46, N 8. – P. 877–883.
11. Bouwmeester, D. The Physics of Quantum Information / D. Bouwmeester, F. Ekert, A. Zeilinger. – Switzerland : Springer, 2000. – 315 p.
12. Менский, М. Б. Квантовые измерения и декогеренция. Модели и феноменологии / М. Б. Менский. – Москва : Физматлит, 2001. – 232 с.
13. Cory, D. G. Experimentally Accessible Paradigm for Quantum Computing / D. G. Cory, M. D. Priceb, T. F. Havel // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1998 Sep. – Vol. 120, N 1/2. – P. 82–101.
14. Algebraic and Number Theoretic Algorithms [Electronic resource]. – Mode of access: <https://quantumalgorithmzoo.org/>. – Date of access: 04.03.2021.
15. Venegas-Andraca, S. E. Quantum Walks for Computer Scientists. Synthesis Lectures on Quantum Computing / S. E. Venegas-Andraca. – Morgan Claypool, 2008. – 119 p.
16. Kastrenakes, J. Researchers smash through quantum computer storage record [Electronic resource] / J. Kastrenakes. – Mode of access: <https://www.theverge.com/2013/11/14/5104668/qubits-stored-for-39-minutes-quantum-computer-new-record>. – Date of access: 04.03.2021.
17. State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit / J. Kelly [et al.] // Nature. –

2015. – Vol. 519. – P. 66–69.
18. Vale, R. D. Switches, latches, and amplifiers: common themes of G proteins and molecular motors / R. D. Vale // J. Cell. Biol. – 1996 Oct. – Vol. 135, N 2. – P. 291–302.
19. Howard, C. B. The rotary motor of bacterial flagella / C. B. Howard // Ann. Rev. Biochem. – 2013. – Vol. 72. – P. 19–54.
20. Adleman, L. M. Molecular computation of solutions to combinatorial problems / L. M. Adleman // Science. – 2014 Nov. – Vol. 266, N 5187. – P. 1021–1024.
21. Rothmund, P. W. K. Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns / P. W. K. Rothmund // Nature. – 2006 Mar. – Vol. 440, N 7082. – P. 297–302.

Поступила 25.01.2021 г.

Принята в печать 15.04.2021 г.

References

1. Bogdanov YuI, Kokin AA, Lukichev VF, Orlikovskiy AA, Semenikhin IA, Chernyavskiy AY. Quantum mechanics and information technology development. Inform Tekhnologii Vychisl Sistemy. 2012;(1):17-31. (In Russ.)
2. Bennett CH, Bernstein E, Brassard G, Vazirany U. Strengths and Weaknesses of Quantum Computing. SIAM J Comput. 1997;26(5):1510-23. doi: 10.1137/S0097539796300933
3. Klimov T, Neizvestny IG, Suprun SP, Shumsky VN. Medium for interaction between two qubits in quantum computations. Quantum Computer and Quantum Computing. 2001;2(2):79-84.
4. Loss D, DiVincenzo D. Quantum Computation with Quantum Dots. Phys Rev. 1998 Jan;57(1):120-26. doi: 10.1103/PhysRevA.57.120
5. Valiev KA. Quantum computers and quantum computing. UFN. 2005;175(1):3-39. doi: 10.3367/UFNr.0175.200501a.0003
6. Jones JA. Implementation of a quantum algorithm on a nuclear magnetic resonance quantum computer. J Chem Phys. 1998;109(5):1648-53. doi: 10.1063/1.476739
7. Shor PW. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. SIAM J. Comput. 1997;26(5):1484-509. doi: 10.1137 / S0097539795293172
8. Nielsen M, Chuang I. Quantum Computation and Quantum Information. 10th anniversary ed. New York: Cambridge University Press; 2010. 698 p.
9. Rieffe E, Polak W. Quantum computing: a gentle introduction. Scientific and Engineering Computation. Cambridge, Massachusetts; London, England: MIT Press; 2011. 389 p.
10. Belinskii AV. Quantum nonlocality and the absence of a priori values for measurable quantities in experiments with photons. Phys Usp. 2003;46(8):877-83. doi: 10.1070/PU2003v046n08ABEH001393
11. Bouwmeester D, Ekert F, Zeilinger A. The Physics of Quantum Information. Switzerland: Springer; 2000. 315 p. doi: 10.1007/978-3-662-04209-0
12. Menskii MB. Quantum measurements and decoherence. Models and phenomenology. Москвa, RF: Fizmatlit; 2001. 232 p. (In Russ.)
13. Cory DG, Price MD, Havel TF. Experimentally Accessible Paradigm for Quantum Computing. Physica D: Nonlinear Phenomena. 1998 Sep;120(1-2):82-101. doi: 10.1016/S0167-2789(98)00046-3
14. Algebraic and Number Theoretic Algorithms. Available from: <https://quantumalgorithmzoo.org/>. [Accessed 04th Mar 2021].
15. Venegas-Andraca SE. Quantum Walks for Computer Scientists. Synthesis Lectures on Quantum Computing. Morgan Claypool; 2008. 119 p. doi: 10.2200/S00144ED1V01Y200808QMC001
16. Kastrenakes J. Researchers smash through quantum computer storage record. Available from: <https://www.theverge.com/2013/11/14/5104668/qubits-stored-for-39-minutes-quantum-computer-new-record>. [Accessed 04th Mar 2021].
17. Kelly J, Barends R, Fowler AG, Megrant A, Jeffrey E, White TC, et al. State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit. Nature. 2015;519:66-9.
18. Vale RD. Switches, latches, and amplifiers: common themes of G proteins and molecular motors. J Cell Biol. 1996 Oct;135(2):291-302. doi: 10.1083/jcb.135.2.291.
19. Howard CB. The rotary motor of bacterial flagella. Annu Rev Biochem. 2003;72:19-54. doi: 10.1146/annurev.biochem.72.121801.161737
20. Adleman LM. Molecular computation of solutions to combinatorial problems. Science. 1994 Nov;266(5187):1021-4. doi: 10.1126/science.7973651
21. Rothmund PWK. Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns. Nature. 2006 Mar;440(7082):297-302. doi: 10.1038/nature04586

Submitted 25.01.2021

Accepted 15.04.2021

Сведения об авторах:

Борисевич М.Н. – к.физ.-мат.н., доцент, заведующий кафедрой компьютерного образования, Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины.

Information about authors:

Borisevich M.N. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, head of the Chair of Computer Education, Vitebsk State Awarded the «Badge of Honour» Order Veterinary Medicine Academy.

Адрес для корреспонденции: Республика Беларусь, 210619, г. Витебск, ул. 1-я Доватора, 7/11, Витебская ордена «Знак почета» государственная академия ветеринарной медицины, кафедра компьютерного образования. E-mail: komputeryvsavm@tut.by – Борисевич Михаил Николаевич.

Correspondence address: Republic of Belarus, 210619, Vitebsk, 7/11 the 1st Dovator str., Vitebsk State Awarded the «Badge of Honour» Order Veterinary Medicine Academy, Chair of Computer Education. E-mail: komputeryvsavm@tut.by – Mikhail N. Borisevich.