

14.35.07, 14.35.09

## **Возможности обучающей системы Black Oral для квантовых вычислений**

### ***Черкасова О.А.***

Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
(ФГБОУ ВО СГУ имени Н.Г. Чернышевского)  
г. Саратов, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3031-7477>  
e-mail: CherkasovaOA@yandex.ru

### ***Чурочкина С.В.***

Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
(ФГБОУ ВО СГУ имени Н.Г. Чернышевского)  
г. Саратов, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2028-195X>  
e-mail: klechshevskaya@mail.ru

### ***Чурочкин Д.В.***

Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
(ФГБОУ ВО СГУ имени Н.Г. Чернышевского)  
г. Саратов, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-6729>  
e-mail: churd2000@mail.ru

В настоящее время сотни компаний и исследовательских институтов, тысячи ученых и десятки инвестиционных институтов сосредоточены на том, чтобы вывести на рынок практическое и широкое использование квантовых вычислений. Однако возникает потребность в персонале, т.к. просто недостаточно обученных квантовых работников для поддержки роста отрасли. Когда сформируется мощная индустрия квантовых вычислений, компаниям и организациям понадобятся обученные ученые-квантоведы, физики и инженеры. В связи с этим необходимо иметь онлайн курсы или учебники, которые позволили бы восполнить пробел знаний о квантовых процедурах у большого числа людей. В статье рассматриваются возможности одной из образовательных платформ по квантовым вычислениям – Black Oral на примере детального разбора простого квантовой операции X. Описание соответствующих операций представлено в нескольких форматах: математическом, графическом и текстовом, что позволит быстро

освоить базовый материал не подготовленному слушателю без дополнительного профессионального образования. При рассмотрении каждой из операций было обращено особое внимание на поведение фазы. Таким образом, предложенный уровень наглядности и пояснений позволит быстро освоить базовые однокубитные операции, что увеличит цифровую грамотность и возможность использования квантовых технологий и алгоритмов для различных задач.

**Ключевые слова:** кубит, квантовые вычисления, онлайн-курс, Q-CTRL.

**Для цитаты:** Черкасова О.А., Чуручкина С.В., Чуручкин Д.В. Возможности обучающей системы Black Oral для квантовых вычислений // Цифровая гуманитаристика и технологии в образовании (DHTE 2024): сб. статей V международной научно-практической конференции. 14–15 ноября 2024 г. / Под ред. В.В. Рубцова, М.Г. Сороковой, Н.П. Радчиковой. М.: Издательство ФГБОУ ВО МГППУ, 2024. 232–248 с.

## Введение

Современные компьютеры, несмотря на все их чудеса, работают по тому же фундаментальному принципу, что и механические устройства, придуманные Чарльзом Бэббиджем в 19 веке и позже формализованные Аланом Тьюрингом: одно стабильное состояние машины представляет одно число. Даже, казалось бы, нестандартные вычислительные модели, такие как модель, основанная на ДНК, разделяют этот основной принцип. Тем не менее, физики показали, что законы, описывающие мир природы, – это не простые законы классической механики, а более тонкие законы квантовой физики, и они побуждают нас по-другому думать о вычислениях [7].

Столетнее развитие квантовой механики и несомненные успехи, связанные с ее применением, привели к возникновению массового запроса на визуализацию концептуальных основ этой науки [3, 10]. Для формирования массовой квантовомеханической культуры мышления предпринимаются колоссальные усилия как со стороны масс медиа, так и со стороны технологических гигантов (сериалы, школы IBM, платформы и т.д.). В этом же русле идет и работа ряда университетов (например, QuSoft research centre in Amsterdam- collaboration between University of Amsterdam (UvA) and Centrum Wiskunde & Informatica, the Cluster of Excellence CASA

of the Ruhr-Universität Bochum, University of Sydney). В связи с чем необходимо как можно более раннее формирование квантовомеханического кластера в мышлении человека, чтобы уже выпускник школы мог квалифицированно потреблять товары и услуги на основе квантовых технологий, а также, при желании, принять участие в их разработке. В классических вычислениях, в качестве фундаментального понятия для минимальных операций используется бит. По аналогии в квантовой информации и квантовых вычислениях используются специальные квантовые объекты, названные квантовыми битами, или кубитами, которые подчиняются законам квантовой механики.

В данной работе были проанализированы форматы введения данного понятия и графические представления универсального набора унитарных операций в образовательной среде Black Opal, разработанной стартапом Q-CTRL (создан профессором Michael Biercik из университета Сиднея в 2017 году), которую предполагается использовать для подготовки рабочей силы в сфере квантовых технологий [9].

## Методы

По аналогии с классическим битом для кубита также возможны два состояния  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ . Обозначение типа « $| \rangle$ » называется *обозначением Дирака*, и является стандартным обозначением состояний в квантовой механике. Согласно квантовой модели атома, электрон может существовать в основном или возбужденном состоянии. За основное состояние примем  $|0\rangle$ , за возбужденное –  $|1\rangle$ . При взаимодействии с фотонами света атомные электроны получают достаточно энергии для перехода из состояния  $|0\rangle$  в состояние  $|1\rangle$ . Однако разница между битами и кубитами заключается в том, что кубит может находиться в состоянии суперпозиции [6]:

$$|\Psi\rangle = \alpha_0 |0\rangle + \alpha_1 |1\rangle. \quad (1)$$

Из условия нормировки следует, что  $\alpha_0^2 + \alpha_1^2 = 1$ .

Поскольку коэффициенты  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  – комплексные числа, то их можно представить в полярной системе координат в виде

$$\alpha_0 = r_0 e^{i\varphi_0} \quad \text{и} \quad \alpha_1 = r_1 e^{i\varphi_1} \quad (2)$$

где  $r_0$  и  $r_1$  – абсолютные величины, а  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$  – углы.

Подстановка (2) в (1) дает состояние рассматриваемого кубита. Использование условия нормировки позволяет записать состояние квантовой системы с помощью всего лишь двух вещественных параметров – углов  $\varphi$  и  $\theta$ , где  $\theta \in [0, \pi]$  – некоторый угол:

$$|\Psi'\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle \quad (3)$$

Поскольку углы  $\varphi$  и  $\theta$  независимы, то их можно рассматривать как «долготу» и «широту» соответственно на некоторой сфере, называемой сферой Блоха (см. рис. 1).

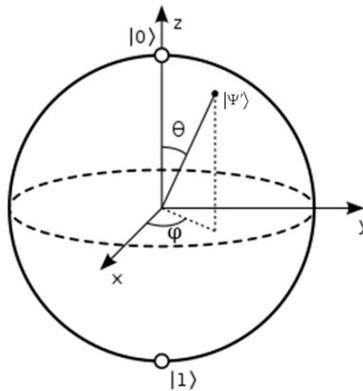


Рис. 1. Сфера Блоха

Следовательно, состояние кубита – это единичный вектор в трёхмерном комплексном векторном пространстве. Очень часто для визуализации состояния отдельного кубита используют сферу Блоха [1, 2, 4, 5, 8, 10], однако у неё есть ограничения: не существует обобщения сферы Блоха на множество кубитов. Помимо основных базисных состояний у кубита могут быть  $|+\rangle$ ,  $|-\rangle$ ,  $|i\rangle$ ,  $|-i\rangle$  состояния, однако при измерении кубита его состояние меняется на основные  $|0\rangle$  или  $|1\rangle$ . В результате одного измерения можно получить только один бит информации о состоянии кубита, разрешая, таким образом, квантовую запутанность.

Отсюда сразу возникает вопрос: какой объем информации представлен кубитом, если мы его не измеряем? Однако ответ не так прост, потому что невозможно количественно оценить информацию,

если ее нельзя измерить. При развитии замкнутой квантовой системы кубитов, если не производить никаких измерений, то система самостоятельно отслеживает все непрерывные переменные, описывающие её состояние. Следовательно, потенциальный объём этой дополнительной информации растёт экспоненциально с увеличением количества кубитов [2]. Между тем универсальный набор операций, с помощью которого может быть реализован произвольный квантовый алгоритм, должен содержать хотя бы одну двухкубитовую операцию, что делает актуальным вопрос о графическом представлении многокубитных систем и операций над ними.

В образовательной среде Black Opal графическое представление кубитов вводится через графическое представление комплексных коэффициентов в разложении состояния системы кубитов по вычислительному базису (для краткости, соответствующие обозначения будем называть круговыми).

Действительно, чистое состояние одного кубита из (1) полностью характеризуется своими комплексными коэффициентами (амплитудами)  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$ . Каждой амплитуде можно поставить в соответствие частично радиально заполненный круг единичного радиуса со «стрелкой» в комплексной плоскости (dial или circle notation – циферблат без цифр). Тогда степень заполнения круга характеризует модуль соответствующей комплексной амплитуды, а положение «стрелки», отсчитываемое от горизонтального положения против часовой стрелки, характеризует фазу (Рис. 2).

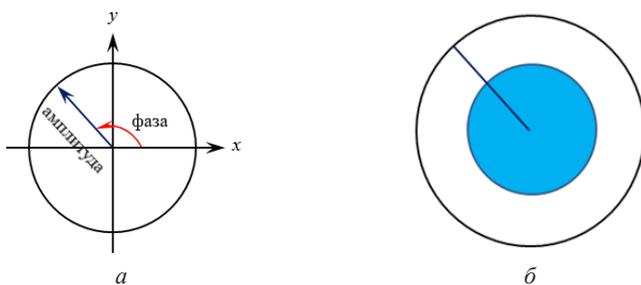


Рис. 2. Графическое представление комплексной амплитуды в разложении произвольного чистого состояния кубита по вычислительному базису

На рис. 2а представлен круговой шаблон, состоящий из круга с радиусом отличным от нуля и стрелкой, положение которой

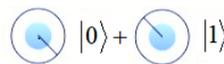
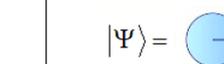
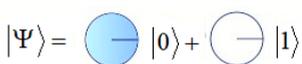
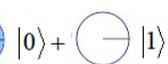
характеризует фазу комплексной амплитуды разложения кубита по базисным состояниям. Рис. 2б представляет собой заполненный круг из рис. 2а, расположенный внутри круга единичного радиуса. Положение стрелки совпадает с положением, указанным на рис. 2а.

### Результаты

Трансформацию произвольного состояния кубита можно представить в виде следующей последовательности шагов, сведенной для наглядности в табл. 1.

Таблица 1

**Графическое представление  
произвольного состояния кубита**

$ \Psi\rangle = \alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	
$ \Psi\rangle = $  $ 0\rangle + $  $ 1\rangle$ $ \alpha  \neq 0 \quad  \beta  \neq 0$	$ \Psi\rangle = $  $ 0\rangle + $  $ 1\rangle$ $ \alpha  \neq 0 \quad  \alpha =1 \quad  \beta =0$
 $ 0\rangle \quad  1\rangle$	 $ 0\rangle \quad  1\rangle$

Предложенную в табл. 1 трансформацию можно описать следующим образом:

1. В первой строке представлено разложение произвольного состояния по вычислительному базису.
2. Во второй строке амплитуды заменяются их графическим представлением в соответствии с рис. 2: левая колонка – произвольный случай, правая колонка – отличен от нуля только модуль амплитуды при базисе  $|0\rangle$ .
3. В третьей строке убраны знаки математических операций и оставлено сокращенное графическое представление соответствующих случаев из второй строки.

Представленные графические представления произвольного многокубитного состояния в образовательной среде Black Opal (Q-CTRL) будут полезными для улучшения интуитивного восприятия как профессионалам, так и не знакомым с основами

квантовой физики пользователями. Для более глубокого понимания рассмотрим эволюцию кубитного состояния под действием универсального набора унитарных операций. Унитарное преобразование, совершаемое в пространстве квантовых состояний над одним из кубитов, называется управляемым или условным, если его вид зависит от состояния остальных кубитов. Отсюда следует, что кубит, над которым совершается преобразование будет считаться управляемым, а кубиты, от состояния которых зависит вид преобразования, называются управляющими. Из теории квантовых вычислений известно, что такой набор должен содержать, по крайней мере, одну двухкубитную операцию и две однокубитные операции: амплитудное и фазовое вращение [2, 4, 10]. В связи с вышесказанным, в качестве иллюстрации выбрали однокубитную операцию  $X$ .

Весь набор однокубитных операций ( $X, Y, Z$ ) представляет собой соответствующие матрица Пауля:

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для того чтобы производить квантовые вычисления с кубитами необходимо выполнить несколько условий. Во-первых, создать квантовый компьютер с конечным множеством кубитов в определенном начальном состоянии  $|\psi_{\text{нач}}\rangle$ , например  $|\psi_{\text{нач}}\rangle = |0, 0, \dots, 0\rangle$ , при этом исключив возможность влияния на систему извне. Во-вторых, осуществить унитарное преобразование:  $|\psi_{\text{нач}}\rangle \rightarrow |\psi_{\text{кон}}\rangle$  в некоторое конечное состояние  $|\psi_{\text{кон}}\rangle$ . И, наконец, в-третьих, выполнить измерение конечного состояния, в результате чего имеем бинарную последовательность значений физических величин. В нашем случае имеем один кубит, следовательно, на него будем воздействовать матрицей Пауля  $\sigma_x$ . Результат последовательности шагов представлен в табл. 2.

Таблица 2

### Графическое представление операции $X$

Операция $X$
$X \Psi\rangle = X(\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle) = \alpha X 0\rangle + \beta X 1\rangle$

<b>Операция X</b>	
$X \Psi\rangle = X 0\rangle =  1\rangle$ $ \alpha  \neq 0,  \alpha  = 1,  \beta  = 0$	$X \left( \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array}$ $ 0\rangle \quad  1\rangle \quad  1\rangle \quad  0\rangle \quad  0\rangle \quad  1\rangle$
$X \Psi\rangle = X 1\rangle =  0\rangle$ $ \alpha  = 0,  \beta  \neq 0,  \beta  = 1$	$X \left( \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array}$ $ 0\rangle \quad  1\rangle \quad  1\rangle \quad  0\rangle \quad  0\rangle \quad  1\rangle$
$X \Psi\rangle = \alpha 1\rangle + \beta 0\rangle = \beta 0\rangle + \alpha 1\rangle$ $ \alpha  \neq 0,  \beta  \neq 0$	$X \left( \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array}$ $ 0\rangle \quad  1\rangle \quad  1\rangle \quad  0\rangle \quad  0\rangle \quad  1\rangle$ $X \left( \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array}$ $ 0\rangle \quad  1\rangle \quad  1\rangle \quad  0\rangle \quad  0\rangle \quad  1\rangle$ $X \left( \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} = \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array}$ $ 0\rangle \quad  1\rangle \quad  1\rangle \quad  0\rangle \quad  0\rangle \quad  1\rangle$

Формирование табл. 2, посвященной операции X, подчиняется следующей логике:

1. В строке два представлено общее правило действия операции X на произвольное однокубитное состояние, которое, как известно, определяется через действие на базисные вектора  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ .
2. В строке три, в левой колонке, отдельно представлен результат действия операции X на базисное состояние  $|0\rangle$ . При этом, базисное состояние трактуется как общее суперпозиционное состояние, у которого модуль амплитуды при  $|0\rangle$  равен 1, а модуль амплитуды при  $|1\rangle$  стремится к нулю.
3. В строке три, в правой колонке, графически представлено в круговых обозначениях состояние, математически описанное в левой колонке той же строки. А именно, операция X действует слева на скобку, содержащую соответствующее графическое представление состояния  $|0\rangle$ : круг в первой позиции, представляющий амплитуду при  $|0\rangle$ , полностью закрашен, а круг во второй позиции, представляющий амплитуду при  $|1\rangle$ , пуст. Фазы при  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ , при этом, зафиксированы и равны. После знака равенства графически представлен результат действия операции X, когда

коэффициент при  $|0\rangle$  становится коэффициентом при  $|1\rangle$  и, наоборот, коэффициент при  $|1\rangle$  становится коэффициентом при  $|0\rangle$ , так что круг в первой позиции, представляющий амплитуду при  $|1\rangle$ , полностью закрашен, а круг во второй позиции, представляющий амплитуду при  $|0\rangle$ , пуст. И, наконец, после второго знака равенства, возвращается стандартная расстановка круговых обозначений, то есть в первой позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|0\rangle$ , а во второй позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|1\rangle$ .

4. В строке четыре, в левой колонке, отдельно представлен результат действия операции  $X$  на базисное состояние  $|1\rangle$ . При этом, базисное состояние отражает общее суперпозиционное состояние, у которого модуль амплитуды при  $|1\rangle$  равен 1, а модуль амплитуды при  $|0\rangle$  стремится к нулю.
5. В строке четыре, в правой колонке, графически представлено в круговых обозначениях состояние, соответствующее математическому описанию в левой колонке той же строки. А именно, операция  $X$  действует слева на скобку, содержащую соответствующее графическое представление состояния  $|1\rangle$ : круг в первой позиции, представляющий амплитуду при  $|0\rangle$ , пуст, а круг во второй позиции, представляющий амплитуду при  $|1\rangle$ , полностью закрашен. Фазы при  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ , при этом, не изменяются и равны. После знака равенства графически представлен результат действия операции  $X$ , когда коэффициент при  $|0\rangle$  становится коэффициентом при  $|1\rangle$  и, наоборот, коэффициент при  $|1\rangle$  становится коэффициентом при  $|0\rangle$ , так что круг в первой позиции, представляющий амплитуду при  $|1\rangle$ , пуст, а круг во второй позиции, представляющий амплитуду при  $|0\rangle$ , полностью заполнен. И, наконец, после второго знака равенства, возвращается стандартная расстановка круговых обозначений, то есть в первой позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|0\rangle$ , а во второй позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|1\rangle$ .
6. В строке пять, в левой колонке, отдельно представлен результат действия операции  $X$  на произвольное суперпозиционное состояние  $|\psi\rangle$ . В результате действия операции, после знака равенства, в первой позиции оказывается состояние  $|1\rangle$ , в которое перешло состояние  $|0\rangle$ , с амплитудой, которая была у состояния  $|0\rangle$ ;

во второй позиции оказывается состояние  $|0\rangle$ , в которое перешло состояние  $|1\rangle$ , с амплитудой, которая была у состояния  $|1\rangle$ . После второго знака равенства, возвращается стандартная расстановка слагаемых, то есть в первой позиции представлено состояние  $|0\rangle$  с амплитудой, а во второй позиции представлено состояние  $|1\rangle$  с амплитудой.

7. В строке пять, в правой колонке, графически представлены в круговых обозначениях три характерных частных случая состояния, математически описанного в левой колонке той же строки, а именно:

а) В первой строке сверху, операция  $X$  действует слева на скобку, содержащую соответствующее графическое представление состояния равновероятной суперпозиции  $|\psi\rangle$ : в первой позиции, представляющей амплитуду при  $|0\rangle$ , заполнен круг с радиусом  $1/\sqrt{2}$ ; во второй позиции, представляющей амплитуду при  $|1\rangle$ , заполнен круг с тем же радиусом  $1/\sqrt{2}$ . Фазы при  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ , при этом, зафиксированы и неравны. Неравенство фаз отражается противоположным положением стрелки в круговых обозначениях. После знака равенства графически представлен результат действия операции  $X$ , когда коэффициент при  $|0\rangle$  становится коэффициентом при  $|1\rangle$   $|0\rangle$ , наоборот, коэффициент при  $|1\rangle$  становится коэффициентом при  $|0\rangle$ , так что круг в первой позиции, представляющий амплитуду при  $|1\rangle$ , заполнен с радиусом  $1/\sqrt{2}$  и положение стрелки соответствует фазе, которая первоначально была у состояния  $|0\rangle$ , а круг во второй позиции, представляющий амплитуду при  $|0\rangle$ , заполнен с радиусом  $1/\sqrt{2}$  и положение стрелки соответствует фазе, которая первоначально была у состояния  $|1\rangle$ . И, наконец, после второго знака равенства, возвращается стандартная расстановка круговых обозначений, то есть в первой позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|0\rangle$ , а во второй позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|1\rangle$ .

Другими словами, установленные амплитуды и фазы в результате действия операции  $X$  на произвольное суперпозиционное состояние  $|\psi\rangle$  должны поменяться местами. Проверим данное утверждение для других состояний.

- b) Во второй строке сверху, операция  $X$  действует слева на скобку, содержащую соответствующее схематическое графическое представление состояния сильно неравновероятной суперпозиции  $|\psi\rangle$   $|0\rangle$  когда вероятность получения в результате измерения состояния  $|0\rangle$  много больше вероятности получения в результате измерения состояния  $|1\rangle$ : в первой позиции, представляющей амплитуду при  $|0\rangle$ , заполнен круг с радиусом близким к единице; во второй позиции, представляющей амплитуду при  $|1\rangle$ , заполнен круг с радиусом близким к нулю. Фазы при  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ , при этом, зафиксированы и неравны. Неравенство фаз отражается разным положением стрелки в круговых обозначениях. После знака равенства графически представлен результат действия операции  $X$ , когда коэффициент при  $|0\rangle$  становится коэффициентом при  $|1\rangle$  и, наоборот, коэффициент при  $|1\rangle$  становится коэффициентом при  $|0\rangle$ , так что круг в первой позиции, представляющий амплитуду при  $|1\rangle$ , заполнен с радиусом близким к единице и положение стрелки соответствует фазе, которая первоначально была у состояния  $|0\rangle$ , а круг во второй позиции, представляющий амплитуду при  $|0\rangle$ , заполнен с радиусом близким к нулю и положение стрелки соответствует фазе, которая первоначально была у состояния  $|1\rangle$ . И, наконец, после второго знака равенства, возвращается стандартная расстановка круговых обозначений, то есть в первой позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|0\rangle$ , а во второй позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|1\rangle$ .
- c) В третьей строке сверху, операция  $X$  действует слева на скобку, содержащую соответствующее схематическое графическое представление состояния сильно неравновероятной суперпозиции  $|\psi\rangle$ , когда вероятность получения в результате измерения состояния  $|0\rangle$  много меньше вероятности получения в результате измерения состояния  $|1\rangle$ : в первой позиции, представляющей амплитуду при  $|0\rangle$ , заполнен круг с радиусом близким к нулю; во второй позиции, представляющей амплитуду при  $|1\rangle$ , заполнен круг с радиусом близким к единице. Фазы при  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ , при этом, зафиксированы и неравны. Неравенство фаз отражается неодинаковым положением стрелки в круговых обозначениях. После знака

равенства графически представлен результат действия операции  $X$ , когда коэффициент при  $|0\rangle$  становится коэффициентом при  $|1\rangle$  и, наоборот, коэффициент при  $|1\rangle$  становится коэффициентом при  $|0\rangle$ , так что круг в первой позиции, представляющий амплитуду при  $|1\rangle$ , заполнен с радиусом близким к нулю и положение стрелки соответствует фазе, которая первоначально была у состояния  $|0\rangle$ , а круг во второй позиции, представляющий амплитуду при  $|0\rangle$ , заполнен с радиусом близким к единице и положение стрелки соответствует фазе, которая первоначально была у состояния  $|1\rangle$ . И, наконец, после второго знака равенства, возвращается стандартная расстановка круговых обозначений, то есть в первой позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|0\rangle$ , а во второй позиции представлено круговое обозначение для амплитуды при  $|1\rangle$ .

Таким образом, результат действия операции  $X$  на произвольное суперпозиционное состояние  $|\psi\rangle$  при заданных амплитудах и фазах можно определить как перестановку позиций амплитуды и фазы при стандартной записи. Аналогичный подход применим и к другим одно- и многокубитовой квантовой системы.

### Обсуждение

Смысл предложенного исследования состоял в том, чтобы в максимально доступной, для совершенно не владеющих предметом пользователей, форме изложить графическое представление универсальной операции  $X$  в обучающей системе Black Oral. На наш взгляд посчитали актуальным предложить описание соответствующей операции сразу в трех форматах: математическом и графическом, сведенных в таблицы, и в виде текста в форме детальной инструкции. Предполагается, что такая форма подачи материала позволит быстро освоить материал максимально большой аудитории, стимулируя, в конечном счете, возникновение кластера профессионалов в тематике квантовых технологий. Формат видеороликов и короткого текстового описания, предложенный в самой программе, несомненно является полезным подспорьем. Однако при использовании только этого формата существует опасность клипового восприятия материала, что не способствует его закреплению в «долгой» памяти мозга, и как следствие, невозможности появления устойчивых профессиональных навыков.

При рассмотрении каждой из операций было обращено особое внимание на поведение фазы. В частности, предполагалось, что даже если круг пуст, то это означало зануление только амплитуды соответствующего коэффициента, значение фазы при этом вовсе не означало зануление, а приобретало соответствующее операции значение. Таким образом, мы хотели подчеркнуть принципиальную важность понятия фазы в квантовых технологиях, и приучить начинающего изучать предмет слушателя к выработке автоматизма в учете фактора фазы при любых исследованиях в сфере квантовых технологий. Мы все прекрасно знаем, что фазы являются важным компонентом для понимания квантовой запутанности, алгоритмов квантовых вычислений, таких как алгоритм Гровера, и других протоколов квантовых вычислений.

В целом, достигнутый в системе Black Opal уровень наглядности посредством системы круговых обозначений, также активно используемой в книге [4], с учетом дополнительного материала предложенного в работе, позволяет довольно быстро освоить базовый материал по тематике квантовых технологий. Разработка дополнительного материала к графическому представлению квантовых алгоритмов, является предметом будущих исследований.

С развитием квантовых компьютеров, квантовой оптики, квантовых сенсоров и других квантовых устройств, мы можем ожидать революции в области вычислений, коммуникаций, криптографии и многих других областях. Квантовые компьютеры могут применяться для оптимизации процессов в различных отраслях, включая фармацевтику, финансы и логистику. Кроме того, они могут использоваться для моделирования сложных систем, таких как климатические изменения или взаимодействие молекул, что поможет нам лучше понять и решить глобальные проблемы. Квантовая оптика и квантовая связь могут привести к созданию более безопасных коммуникационных систем. Квантовая криптография, использующая принципы квантовой механики, может предложить непреодолимую защиту от взлома и подделки данных. Дальнейшие исследования в этом направлении – по мнению авторов – являются очень перспективными и, несомненно, они будут продолжаться.

## Литература

1. Менский М.Б. Человек и квантовый мир. Фрязено: «Век2», 2007. 320 с.
2. Шемякина М.А. Моделирование квантового алгоритма Шора на классическом компьютере // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 4–2. С. 55–59. DOI 10.24411/2500–1000–2019–10751.
3. Coecke B., Kissinger A. Picturing Quantum Processes: A First Course in Quantum Theory and Diagrammatic Reasoning. New York: Cambridge University Press, 2017. 16 p.
4. Johnston E.R., Harrigan N. and Gimeno-Segovia M. Programming Quantum Computers: Essential Algorithms and Code Samples. O'Reilly Media, Incorporated, 2019. 317 p.
5. Kaye Ph., Laflamme R. & Mosca M. An Introduction to Quantum Computing. Oxford, England: Oxford University Press UK, 2006. 284 p.
6. Nielsen M.A. & Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information. New York: Cambridge University Press, 2010. 676 p.
7. Singh R., Ratnaparkhi P., Behera B., Panigrahi P. (2018). Getting Started With Quantum Computation: Experiencing The Quantum Experience // Student Journal of Physics. 2018. Vol. 16 (4). P. 143–152. DOI: 10.13140/RG.2.2.24079.23207.
8. Steane A. Quantum computing // Rep. Prog. Phys. 1998. Vol. 61. P. 117–173. DOI: 10.1088/0034-4885/61/2/002
9. Q-CTRL and the Quad Investors Network partner to build diverse quantum workforces in Australia and the US [Электронный ресурс]. URL: <https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-and-the-quad-investors-network-partner-to-build-diverse-quantum-workforces-in-australia-and-the-us> (дата обращения 20.08.2024 г.)
10. Yanofsky N.S., Mannucci M.A. Quantum computing for computer scientists. NY: Cambridge University Press, 2008. 402 p.

## Информация об авторах

Черкасова Ольга Алексеевна, доцент, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиотехники и электродинамики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (ФГБОУ ВО СГУ), г. Саратов, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3031-7477>, e-mail: CherkasovaOA@yandex.ru

Чулочкина Светлана Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (ФГБОУ ВО СГУ), г. Саратов, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2028-195X>, e-mail: klechshevskaya@mail.ru

*Чурочкин Дмитрий Викторович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (ФГБОУ ВО СГУ), г. Саратов, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-6729>, e-mail: [churd2000@mail.ru](mailto:churd2000@mail.ru)

## **Black Opal Quantum Computing Training System Capabilities**

### ***Olga A. Cherkasova***

Saratov State University, Saratov, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3031-7477>

e-mail: CherkasovaOA@yandex.ru

### ***Svetlana V. Churochkina***

Saratov State University, Saratov, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2028-195X>

e-mail: klechshevskaya@mail.ru

### ***Dmitry V. Churochkin***

Saratov State University, Saratov, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-6729>

e-mail: churd2000@mail.ru

Currently, hundreds of companies and research institutes, thousands of scientists and dozens of investment institutions are focused on bringing practical and widespread use of quantum computing to the market. However, there is a need for personnel, since there are simply not enough trained quantum workers to support the growth of the industry. When a powerful quantum computing industry is formed, companies and organizations will need trained quantum scientists, physicists and engineers. In this regard, it is necessary to have online courses or textbooks that would fill the gap in knowledge of quantum procedures for a large number of people. The article considers the capabilities of one of the educational platforms for quantum computing – Black Opal, using the example of a detailed analysis of a simple quantum operation X. The description of the corresponding operations is presented in several formats: mathematical, graphical and text, which will allow an unprepared listener to quickly master the basic material without additional professional education. When considering each of the operations, special attention was paid to the behavior of the phase. Thus, the proposed level of clarity and explanation will allow one to quickly master basic single-qubit operations, which will increase digital literacy and the ability to use quantum technologies and algorithms for various tasks.

**Keywords:** qubit, quantum computing, online course, Q-CTRL.

**For citation:** Cherkasova O.A., Churochkina S.V., Churochkin D.V. Black Opal Quantum Computing Training System Capabilities // *Digital Humanities and Technology in Education (DHTE 2024): Collection of Articles of the*

*V International Scientific and Practical Conference. November 14–15, 2024 / V.V. Rubtsov, M.G. Sorokova, N.P. Radchikova (Eds). Moscow: Publishing house MSUPE, 2024. 232–248 p. (In Russ., abstr. in Engl.).*

***Information about the authors***

*Olga A. Cherkasova*, PhD in Physics, Associate Professor, Department of Radio Engineering and Electrodynamics, Saratov State University, Saratov, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3031-7477>, e-mail: CherkasovaOA@yandex.ru

*Svetlana V. Churochkina*, PhD Physics, Associate Professor, Department of Solid State Physics, Saratov State University, Saratov, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2028-195X>, e-mail: klechshevskaya@mail.ru

*Dmitry V. Churochkin*, PhD Physics, Associate Professor, Department of Solid State Physics, Saratov State University, Saratov, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-6729>, e-mail: churd2000@mail.ru