

И.А. СУРОВ
ЦВЕТОВАЯ КОДИРОВКА КУБИТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Суров И.А. Цветовая кодировка кубитных состояний.

Аннотация. Трудности алгоритмической имитации естественного мышления указывают на несовершенство используемых для этого форматов представления информации. В этом отношении перспективна кодировка информации кубитными состояниями квантовой теории, структура которых согласуется с крупными теориями когнитивной семантики. Представлено развитие этого подхода, связывающее кубитные состояния с цветом как самостоятельным носителем эмоционально-смысловых значений. Основой для этого стало геометрическое подобие цветовых тел и Гильбертова пространства кубитных состояний, позволившее установить между ними взаимоднозначное математическое отображение. Для этого использовано оригинальное разложение кубита по тройке неортогональных векторов, соответствующих красному, синему и зелёному цветам. Действительные коэффициенты такого разложения являются томограммами кубитного состояния по соответствующим направлениям, связанными с компонентами вектора Стокса операцией поворота. При этом композиционные соотношения чёрного, белого и шести основных цветов (красный, зелёный, синий, жёлтый, фиолетовый, голубой) выражаются аналогичными суперпозициями кубитных состояний. Чистые и смешанные цвета соответствуют чистым и смешанным состояниям на поверхности и внутри сферы Блоха, тогда как оттенки серого отображаются на вертикальный диаметр сферы. При этом светлость цвета соответствует вероятности базисного кубитного состояния «1», тогда как насыщенность цвета и цветовой тон кодируют когерентность и фазу кубитного состояния. Полученный результат открывает возможности для использования квантовой информатики в задачах семантического анализа данных, обработки изображений и создания природоподобных вычислительных архитектур.

Ключевые слова: квант, кубит, цвет, эмоциональный смысл, квантовая информатика, обработка изображений, квант, код.

1. Введение. Кодировка информации определяет возможности строящихся на её основе алгоритмов. Широкая применимость современного искусственного интеллекта, например, обусловлена простотой и универсальностью двоичного кода, технологизированного в середине прошлого века. Огромное разнообразие форматов текстовой, графической, звуковой и другой информации на деле сводится к этому фундаментальному мета-коду.

Возможности алгоритмов на основе двоичного кода, однако, не безграничны. Примером тому являются трудности современного ИИ в имитации образного и смыслового мышления¹, играющего ключевую роль в живой природе [1–3]. Даже в хорошо формализуемых задачах вроде шахмат и го естественное мышление намного эффективнее компьютерного вычисления: в сравнении с несколькими тысячами пройденных гроссмейстером партий и 20 Вт энергопотребления среднего мозга, для сравнимого результата суперкомпьютерные системы требуют много большего объема ресурсов [4, 5].

Возникающая в этой связи задача нахождения более подходящих способов кодирования и алгоритмов обработки информации имеет множество решений. В их числе троичная логика [6, 7], волновые и (голо)графические вычисления [4, 8–10] и обработка образов [11–13]. Отдельным направлением «альтернативной» информатики является квантовая информатика, в которой информация кодируется квантовыми состояниями физических систем.

1.1. Кодирование информации квантовыми состояниями.

Достигнутые таким образом преимущества в задачах поиска, оптимизации, шифрования и факторизации больших чисел обусловлены новыми возможностями для построения алгоритмов в этой кодировке [14–16]. Такие алгоритмы реализуются как с помощью квантово-физических, так и с помощью классических носителей и законов природы. Алгоритмы второго типа, называемые квантово-подобными, выполняются на обычных компьютерах без привлечения «настоящих» квантовых состояний. Их преимущество по сравнению с классическими аналогами [17, 18], обусловленное в том числе контекстуальностью соответствующей теории вероятности² [19, 20], показывают эффект от смены кодировки наиболее явно.

Использование квантовых форматов информации затруднено необходимостью их интерпретации, пригодной для применения за пределами элементарных физических систем. Главную трудность в этом отношении представляет комплекснозначность квантовых состояний, являющихся векторами в многомерных Гильбертовых пространствах [14, 21]. Компоненты таких векторов, в частности, несут фазовые параметры с круговой топологией, не имеющие аналогов в

¹ В отличие от машинного вычисления, естественное мышление работает с образами и знаками на основе их значений для субъекта. Термин «смысловое мышление» указывает на это свойство.

² Т.е. возможностью учитывать изменение вероятностных закономерностей в различных условиях наблюдения (контекстах).

двоичном коде; примером такого параметра является фаза ϕ кубитного состояния, структура которого показана на рисунке 1(а). В отсутствие интерпретации фазовых параметров использование квантовых кодировок носит формальный характер, что затрудняет развитие алгоритмов обработки данных на этой основе.

1.2. Интерпретации кубитного состояния в алгоритмах обработки изображений. Интерпретируемое кодирование информации квантовыми состояниями используется для обработки изображений. Как и в классических подходах, изображение кодируется путём его разбивки на элементарные ячейки – пиксели, цвет каждого из которых кодируется отдельным кубитным состоянием [22]. Использованная при этом цветовая разметка пространства кубитных состояний, однако, не полна. На рисунке 1(а) она задействует лишь полярный угол θ , тогда как фазы ϕ (представляющие наибольший интерес для интерпретации квантовых состояний) не используются [23–25]. Цвет пикселя при этом кодируется лишь частично, т.к. из трёх параметров тон – насыщенность – светлость, показанных на рисунке 1(б), охватывается только цветовой тон. Даже такой ограниченный формат, однако, позволил усовершенствовать алгоритмы хранения, сжатия, шифрования, поиска и других задач обработки изображений на основе методов квантовой информатики [28–31].

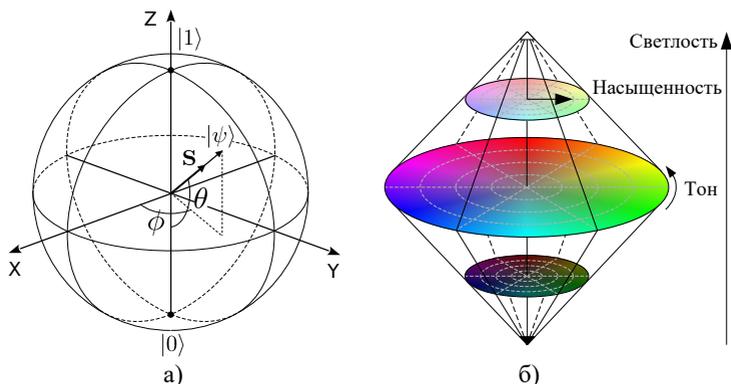


Рис. 1. а) пространство кубитных состояний в представлении сферы Блоха; б) цветное тело в модели оттенок – насыщенность – светлость (HSL) [26, 27].
Оттенок (тон, hue) определяет расположение цвета в хроматическом спектре (например, в радуге). Светлость (lightness) определяет близость цвета к белому и чёрному. Насыщенность цвета (чистота, saturation) определяет его похожесть на серый цвет той же светлости

1.3. Проблема и подход к решению. Расширенная цветовая кодировка кубитных состояний предложена рядом авторов в 2021-2022 г. В работе [32] цветовой тон впервые кодируется не полярным, а азимутальным углом ϕ в соответствии с циклической структурой цветового круга [33, 34]. Полярный угол при этом отводится для кодирования насыщенности, тогда как светлость записывается в дополнительном регистре кубитных состояний. В альтернативном подходе [35] насыщенность и цвет кодируются различными интервалами полярного угла.

Общим недостатком перечисленных способов кодировки является произвольность их построения, так что параметры цвета сопоставляются определённым диапазонам значений кубитных состояний без какого-либо теоретического основания. При трёх параметрах цвета, двух либо трёх параметрах кубитного состояния и неограниченной свободе соотношения диапазонов соответствующих значений число возможных кодировок при таком подходе неограниченно велико. Нахождение наилучшей из них предполагает сравнение эффективности разработанных для каждого случая алгоритмов решения интересующих задач, что путём слепого перебора вряд ли возможно.

Решение этой проблемы возможно с помощью теории, ограничивающей число возможных кодировок на основе дополнительных соображений. Примером такого подхода является согласование искомой разметки со структурными моделями эмоций человека, напрямую связанных с цветом. Полученная таким образом цветовая кодировка азимутального угла ϕ [36] использована для создания эмоционально-компетентных роботов [37].

Более полная цветовая разметка кубитных состояний предложена в работе [38]. В отличие от вышеупомянутых эмпирических аналогов, эта разметка построена из первых принципов квантовой теории и согласуется с моделями функциональной семиотики (смыслопорождения), а также пространственными моделями цветосемантики и эмоционально-смысловых состояний [39, 40]. Полученное математическое отображение, однако, приведено иллюстративно без объяснения использованной логики и рассмотрения свойств, важных для практической работы с кодом. Эти недостатки устраняются в настоящей статье.

2. Кубитные состояния на сфере Блоха

2.1. Чистые состояния. Произвольное кубитное состояние представляется нормированным двумерным вектором

$$\begin{bmatrix} a_0 e^{i\phi} \\ a_1 \end{bmatrix} = a_0 e^{i\phi} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + a_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a_0 и a_1 есть действительные амплитуды, а $e^{i\phi}$ есть комплекснозначный множитель, определяемый значением фазы $\phi \in [0, 2\pi)$. В отличие от стандартной записи [21] этот множитель отнесён к нулевой компоненте вектора для удобства последующих вычислений. В обозначениях Дирака кубитные состояния отмечаются угловыми скобками, так что (1) принимает вид

$$|\psi\rangle = a_0 e^{i\phi} |0\rangle + a_1 |1\rangle, \quad (2)$$

где кубитное состояние $|\psi\rangle$ есть суперпозиция базисных векторов $|0\rangle$ и $|1\rangle$ в правой части (1).

Нормировка кубитного состояния выражается соотношением

$$\begin{aligned} \langle\psi|\psi\rangle &= a_0^2 + a_1^2 = 1, \\ \langle\psi| &= |\psi\rangle^\dagger = [a_0 e^{-i\phi} \quad a_1], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\langle\psi|$ есть Эрмитово сопряжение вектора (2). В силу (3) коэффициенты a допускают тригонометрическую параметризацию, в которой состояние (2) принимает вид

$$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} e^{i\phi} |0\rangle + \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle, \quad \theta \in [0, \pi]. \quad (4)$$

В результате произвольное кубитное состояние представляется единичным вектором в трёхмерном Евклидовом пространстве как показано на рисунке 1(а). Каждой точке на полученной сфере (Пуанкаре-Блоха) соответствует единственное кубитное состояние (1), (4), однозначно характеризующееся полярным углом θ и азимутальным углом ϕ . Такие состояния называются *чистыми*.

2.2. Смешанные состояния. Кубитные состояния, норма которых (3) меньше единицы, называются *смешанными*. Длина соответствующего вектора составляет дополнительную степень свободы смешанных состояний. Произвольное такое состояние характеризуется

вектором Стокса

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad |\mathbf{S}|^2 = x^2 + y^2 + z^2 \leq 1. \quad (5)$$

Компоненты этого вектора образуют Эрмитову матрицу

$$\hat{\rho} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - z & x + iy \\ x - iy & 1 + z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

имеющую единичный след и неотрицательные собственные значения. Такая *матрица плотности* однозначно определяет любое кубитное состояние. Чистые состояния, в частности, соответствуют равенству в (5). В этом случае вектор Стокса состояния (4) есть

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ -\cos \theta \end{bmatrix}, \quad (7)$$

как видно из рисунка 1(а).

Матрица плотности (6) также представима в виде

$$\hat{\rho} = \begin{bmatrix} p_0 & c\sqrt{p_0 p_1}e^{i\phi} \\ c\sqrt{p_0 p_1}e^{-i\phi} & p_1 \end{bmatrix}, \quad c \in [0, 1], \quad (8)$$

где на диагонали находятся вероятности $p_0 + p_1 = 1$ осуществления в эксперименте исходов 0 и 1, соответствующие квадратам амплитуд чистого состояния (3). При отсутствии недиагональных элементов $c = 0$ матрица плотности эквивалентна классическому вероятностному пространству двухвариантной неопределённости. Наибольшее значение $c = 1$ соответствует насыщению неравенства (5) и чистому состоянию (1), (4), не имеющему аналога в теории вероятности Колмогорова. Параметр

$$c\sqrt{p_0 p_1} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{2}, \quad 0 \leq c\sqrt{p_0 p_1} \leq 0,5, \quad (9)$$

таким образом характеризует «квантовость», т.е. *когерентность* кубитного состояния [41]. Вариация этой величины описывает переход между классическим и квантовым пределами квантовой теории вероятности [42].

3. Опорные точки

3.1. Красный, зелёный, синий. Цветовая кодировка кубитных состояний строится на основе трёх главных цветов: красного (R), зелёного (G) и синего (B). Этим цветам соответствуют кубитные состояния, нахождение которых показано на рисунке 2:

1. Цветовой куб RGB (а) вписывается в сферу Блоха так, что её полюса соответствуют белому (W) и чёрному (K) цветам (б)

$$|W\rangle = |1\rangle, \quad |K\rangle = |0\rangle. \quad (10)$$

2. Угловое положение куба вокруг вертикальной оси Z фиксируется так, что зелёный цвет располагается в плоскости XZ (в).

3. Полученные точки касания сферы и куба определяют угловые координаты чистых кубитных состояний, соответствующих главным цветам согласно (4).

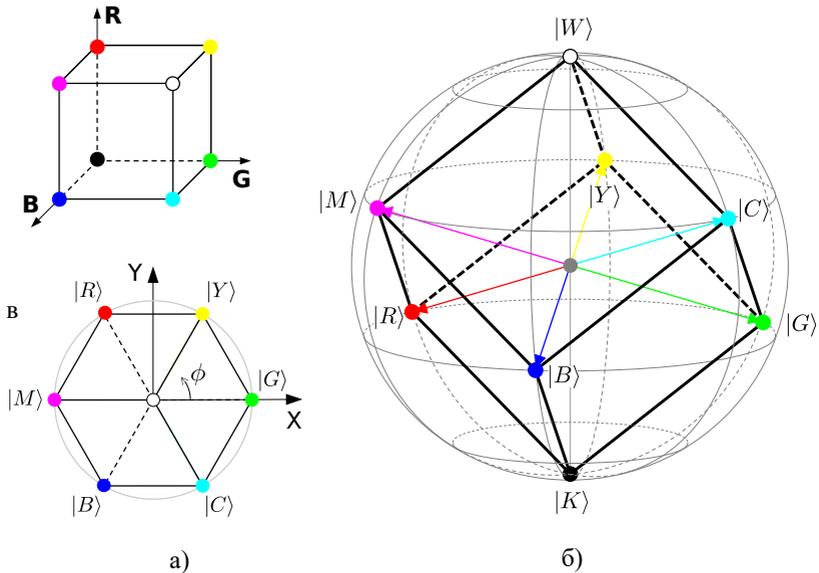


Рис. 2. Кубитные состояния: а) восемь главных цветов в вершинах цветового куба, представляющего аддитивную цветовую модель RGB; б) вписание цветового куба в сферу Блоха (рисунок 1); в) расположение главных цветов в экваториальной плоскости XY

А именно, главные цвета R, G, B лежат в горизонтальной плоскости, определяемой полярным углом

$$\begin{aligned} \theta_{\text{RGB}} &= \arccos \frac{1}{3} \approx 1,23 \approx 70,5^\circ, \\ \cos \frac{\theta_{\text{RGB}}}{2} &= \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad \sin \frac{\theta_{\text{RGB}}}{2} = \sqrt{\frac{1}{3}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Азимутальные углы этих цветов кратны 120° как следует из рисунка 2(в). Соответствующие кубитные состояния (4) есть

$$\begin{aligned} |R\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2}e^{i\phi_R} \\ 1 \end{bmatrix}, & \phi_R &= 2\pi/3, \\ |G\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2}e^{i\phi_G} \\ 1 \end{bmatrix}, & \phi_G &= 0, \\ |B\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2}e^{i\phi_B} \\ 1 \end{bmatrix}, & \phi_B &= 4\pi/3. \end{aligned} \quad (12)$$

Эти состояния нормированы, однако не ортогональны между собой

$$\begin{aligned} \langle R|R\rangle &= \langle G|G\rangle = \langle B|B\rangle = 1, \\ \langle G|R\rangle &= \langle R|B\rangle = \langle B|G\rangle = i/\sqrt{3}. \end{aligned} \quad (13)$$

3.2. Голубой, фиолетовый, жёлтый. Одновременно с главными определяются кубитные кодировки производных цветов: голубой (C, cyan), фиолетовый (M, magenta) и жёлтый (Y, yellow). Им соответствует полярный угол

$$\begin{aligned} \theta_{\text{CMY}} &= \arccos \frac{-1}{3} \approx 1,91 \approx 109,5^\circ, \\ \cos \frac{\theta_{\text{CMY}}}{2} &= \sqrt{\frac{1}{3}}, \quad \sin \frac{\theta_{\text{CMY}}}{2} = \sqrt{\frac{2}{3}}, \end{aligned} \quad (14)$$

так что плоскости RGB и CMY делят вертикальный диаметр сферы Блоха на три равные части. Кубитные состояния этих цветов есть

$$\begin{aligned}
|C\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} e^{i\phi_C} \\ \sqrt{2} \end{bmatrix}, & \phi_C &= 5\pi/3, \\
|M\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} e^{i\phi_M} \\ \sqrt{2} \end{bmatrix}, & \phi_M &= \pi, \\
|Y\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} e^{i\phi_Y} \\ \sqrt{2} \end{bmatrix}, & \phi_Y &= \pi/3.
\end{aligned} \tag{15}$$

Аналогично (13)

$$\begin{aligned}
\langle C|C\rangle &= \langle M|M\rangle = \langle Y|Y\rangle = 1, \\
\langle M|C\rangle &= \langle C|Y\rangle = \langle Y|M\rangle = \frac{3 + i\sqrt{3}}{6}.
\end{aligned} \tag{16}$$

3.3. Ортогональность. Противоположные вершины цветового куба (рисунок 2б) образуют четыре пары дополнительных цветов (т.е. таких, смешение которых в равных пропорциях даёт серый цвет в центре куба): белый-чёрный, красный-голубой, синий-жёлтый и зелёный-фиолетовый. Это свойство выражается ортогональностью соответствующих кубитных состояний. Например

$$\langle R|C\rangle = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \sqrt{2}e^{-2i\pi/3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{5i\pi/3} \\ \sqrt{2} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} (e^{i\pi} + 1) = 0,$$

где использовано определение Эрмитова сопряжения (3); аналогично

$$\langle G|M\rangle = \langle B|Y\rangle = \langle W|K\rangle = 0.$$

Эти соотношения эквивалентны противоположности соответствующих векторов Стокса (7)

$$\begin{aligned}
\mathbf{S}_R &= [-\sqrt{2}/3 \quad \sqrt{2}/3 \quad -1/3]^T = -\mathbf{S}_C, \\
\mathbf{S}_G &= [\sqrt{8}/9 \quad 0 \quad -1/3]^T = -\mathbf{S}_M, \\
\mathbf{S}_B &= [-\sqrt{2}/3 \quad -\sqrt{2}/3 \quad -1/3]^T = -\mathbf{S}_Y, \\
\mathbf{S}_W &= [0 \quad 0 \quad 1]^T = -\mathbf{S}_K.
\end{aligned} \tag{17}$$

Таким образом дополнительность цветов в кубитной кодировке получает строгое геометрическое выражение³.

3.4. Суперпозиция. Кубитные состояния голубого, фиолетового и жёлтого цветов (15) являются симметричными суперпозициями тройки базисных состояний (12). Например

$$\frac{|G\rangle + |B\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \left[\frac{\sqrt{2}}{2} (1 + e^{4\pi i}) \right] = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{e^{5\pi i/3}}{\sqrt{2}} \right] = |C\rangle. \quad (18)$$

Аналогично

$$\frac{|B\rangle + |R\rangle}{\sqrt{2}} = |M\rangle, \quad \frac{|R\rangle + |G\rangle}{\sqrt{2}} = |Y\rangle. \quad (19)$$

Эти соотношения выражают композицию дополнительных цветов С, М, Y в аддитивной цветовой модели согласно геометрии куба на рисунке 2(а)

$$C = G + B, \quad M = B + R, \quad Y = R + G. \quad (20)$$

Таким образом цветовая кодировка рассмотренных кубитных состояний сохраняет их суперпозиционные отношения, играющие ключевую роль в алгоритмах квантовой информатики.

Особенность приведённых суперпозиций в том, что суммируемые состояния не ортогональны (как например в простейшем кубитном состоянии $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$), однако нормировочный множитель в левых частях (18), (19) тем не менее равен $1/\sqrt{2}$. Это объясняется мнимостью попарных перекрытий (13), в силу чего например

$$\begin{aligned} \langle M|M \rangle &= \frac{\langle R| + \langle B|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|R\rangle + |B\rangle}{\sqrt{2}} = \\ &= \frac{\langle R|R \rangle + \langle B|B \rangle + \langle R|B \rangle + \langle B|R \rangle}{2} = \frac{1 + 1 + i/\sqrt{3} - i/\sqrt{3}}{2} = 1. \end{aligned}$$

Этим же обусловлена величина знаменателя в кубитном разложении базисного состояния $|1\rangle$ (10)

$$|W\rangle = \frac{|R\rangle + |B\rangle + |G\rangle}{\sqrt{3}}, \quad (21)$$

³Цвета в левой и правой частях строк (17) образуют два правильных тетраэдра, вершины каждого из которых равномерно покрывают сферу Блоха. Вершинам тетраэдра RGBW соответствуют четыре типа светочувствительных клеток в сетчатке человеческого глаза.

что соответствует композиции белого цвета

$$\mathbf{W} = \mathbf{R} + \mathbf{G} + \mathbf{B} \quad (22)$$

в аддитивной цветовой модели.

4. Чистые состояния

4.1. Начальное разложение. Цветовая кодировка произвольного чистого состояния следует из его разложения в базисе основных цветов (12)

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} e^{i\phi} \\ \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} = r |R\rangle + g |G\rangle + b |B\rangle, \quad r, g, b \in \mathbb{R}. \quad (23)$$

В отличие от стандартной в квантовой информатике формы (1), (2) с комплекснозначными амплитудами, коэффициенты разложения можно ограничить действительными числами благодаря использованию трёх базисных векторов.

Значения коэффициентов r, g, b определяются путём перекрытия состояния (23) с соответствующим базисным вектором (12) с учётом (13). Для зелёного цвета, например

$$\begin{aligned} \langle G|\psi\rangle &= [\sqrt{2/3} \quad \sqrt{1/3}] \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} e^{i\phi} \\ \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} = \\ &= r \langle G|R\rangle + g \langle G|G\rangle + b \langle G|B\rangle = g + \frac{i}{\sqrt{3}}(r - b), \end{aligned} \quad (24)$$

откуда значение коэффициента g получается как функция от угловых координат раскладываемого состояния

$$g(\theta, \phi) = \text{Re} \langle G|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \phi \right). \quad (25)$$

График этой функции показан на рисунке 3(а).

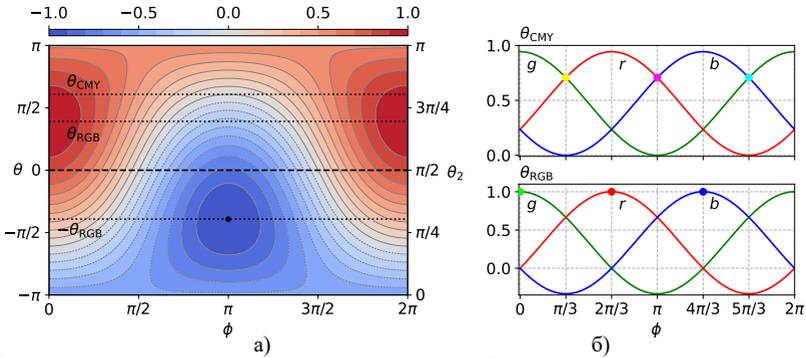


Рис. 3. Амплитуда зелёного цвета g разложения (23): а) в зависимости от угловых координат кубитного состояния (4) согласно решению (28); б) в зависимости от азимутального угла при фиксированных θ_{RGB} и θ_{CMY}

При $\phi = 0$, т.е. в плоскости ZX, функция (25) есть просто

$$g(\theta, 0) = \cos \frac{\theta - \theta_{\text{RGB}}}{2} = \sqrt{\frac{1 + \cos(\theta - \theta_{\text{RGB}})}{2}}, \quad (26)$$

откуда видно что величину (25) (с точностью до знака) также можно определить как

$$g^2(\theta, \phi) = \frac{1 + \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}_G}{2}, \quad (27)$$

где \mathbf{S} и \mathbf{S}_G есть вектора Стокса (5) состояний $|\psi\rangle$ и $|G\rangle$ (23)⁴. При $\theta = 0$ – пиксель на рисунке 3(а) – также имеет место простая гармоническая зависимость. Аналогичные (25) функции для остальных коэффициентов

$$\begin{aligned} r(\theta, \phi) &= \text{Re} \langle R|\psi\rangle = g\left(\theta, \phi - \frac{2\pi}{3}\right), \\ b(\theta, \phi) &= \text{Re} \langle B|\psi\rangle = g\left(\theta, \phi - \frac{4\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (28)$$

получаются сдвигом азимутального угла на ϕ_R и ϕ_B (12) соответственно.

Значения амплитуд r, g, b в зависимости от азимутального угла ϕ при фиксированных значениях полярного угла θ показаны на рисунке 3(б) соответствующими цветами. Верхний график соответствует θ_{CMY} ,

⁴Функция (27) есть томограмма кубитного состояния по направлению $|G\rangle$, т.е. вероятность исхода $|G\rangle$ при измерении состояния (23) в базисе $|G\rangle, |M\rangle$ [43].

при котором значения $\phi = \pi/3$, π и $5\pi/3$ соответствуют жёлтому, фиолетовому и голубому цветам (раздел 3.2).

В этих точках амплитуды противоположных цветов равны нулю, тогда как остальные две равны $1/\sqrt{2}$ в соответствии с выражениями (18), (19). Нижний график соответствует θ_{RGB} , при котором $\phi = 0$, $2\pi/3$ и $4\pi/3$ соответствуют зелёному, красному и синему (раздел 3.1). Соответствующие амплитуды в этих точках принимают наибольшее значение 1, тогда как остальные равны нулю.

4.2. Геометрия решения. Величины (25), (28) удовлетворяют соотношению

$$r^2(\theta, \phi) + g^2(\theta, \phi) + b^2(\theta, \phi) \equiv 1. \quad (29)$$

как того требует нормировка $\langle \psi | \psi \rangle = 1$ правой части (23) при условии (13). Этот же результат можно получить прямым решением векторного уравнения (23), эквивалентного системе

$$\cos \frac{\theta}{2} e^{i\phi} = \sqrt{\frac{2}{3}} (r e^{i\phi_R} + g e^{i\phi_G} + b e^{i\phi_B}), \quad (30a)$$

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{r + g + b}{\sqrt{3}}. \quad (30b)$$

Таким образом, коэффициенты разложения любого чистого состояния (23) располагаются на единичной сфере (29) в трёхмерном Евклидовом пространстве. Сечение этой сферы плоскостью (30b) определяет вид решения в зависимости от полярного угла θ

– При максимальном для кубитного состояния (4) $\theta = \pi$ плоскость (30b) пересекается со сферой (29) в единственной точке касания $r = g = b = 1/\sqrt{3}$. Эта точка соответствует белому цвету (21) на северном полюсе сферы Блоха $|1\rangle$.

– При уменьшении θ пересечение становится окружностью, на которой точка с углом ϕ соответствует решению (25), (28). Соответствующая зависимость коэффициентов r, g, b от фазы ϕ при θ_{CMY} и θ_{RGB} показана на рисунке 3(б).

– При наименьшем для кубитного состояния (4) $\theta = 0$ плоскость (30b) пересекает сферу (29) по экватору $r + g + b = 0$, показанному на рисунке 3(а) пунктиром.

– Формальная подстановка $\theta = -\pi$ даёт симметричную точку касания $r = g = b = -1/\sqrt{3}$, снова соответствующую белому цвету (21) с отрицательным знаком.

Таким образом сфера Блоха на рисунке 1 соответствует половине сферы (29), вторая половина которой в разложении (23) не используется. Для построения искомой кодировки данное обстоятельство затруднительно т.к. полусфера топологически отличается и от сферы Блоха и от цветковых тел. Кроме того, южный полюс последней $|0\rangle$ соответствует всем цветам на экваторе сферы (29), т.е. разложение (23) для этого состояния не является однозначным. Эта неоднозначность проявляется также в функции (26), период которой составляет два оборота вокруг сферы Блоха. Данная проблема решается с помощью замены полярного угла в кубитном состоянии.

4.3. Замена полярного угла. Перечисленные затруднения устраняются параметризацией кубитного состояния полярным углом θ так, чтобы северному и южному полюсам $|1\rangle$, $|0\rangle$ соответствовали значения $\theta = \pm\pi$. Простейшая такая параметризация получается заменой в исходном кубитном состоянии (4) полярного угла θ на

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \frac{\theta + \pi}{2}, & \theta &\in [-\pi, \pi], & \theta_2 &\in [0, \pi], \\ \sin \frac{\theta}{2} &= -\cos \theta_2, & \cos \frac{\theta}{2} &= \sin \theta_2. \end{aligned} \quad (31)$$

Вместе с исходным азимутальным углом ϕ новый угол θ_2 определяет кубитное состояние

$$|\psi_2\rangle = \cos \frac{\theta_2}{2} e^{i\phi} |0\rangle + \sin \frac{\theta_2}{2} |1\rangle, \quad (32)$$

сфера Блоха которого обладает требуемым свойством как показано на рисунке 4. В силу тождеств (31) и (11) амплитуда зелёного цвета для $\phi = 0$ (25) принимает вид

$$\begin{aligned} g(\theta_2, 0) &= \frac{-1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 + \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 \\ &= \cos \left(\theta_2 - \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right) \right), & \alpha &= \frac{\theta_{\text{RGB}}}{2}. \end{aligned} \quad (33)$$

Согласно геометрии рисунка 4 величина $\alpha \approx 35^\circ$ есть угол между вектором \mathbf{G} и горизонтальной плоскостью. Угол $\alpha + \pi/2 \approx 125^\circ$ задаёт направление вектора \mathbf{G} на сфере Блоха кубита (32) при отсчёте от диаметра как показано на рисунке 4.

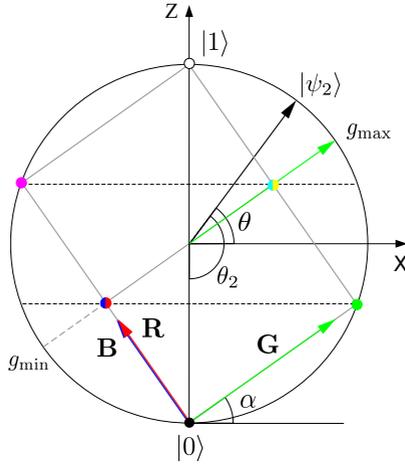


Рис. 4. Кубитное состояние (32), параметризованное симметричным диапазоном полярного угла $\theta \in [-\pi, \pi]$ с помощью замены (31). Показано сечение сферы Блоха плоскостью XZ. Вектора \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} соответствуют главным цветам в аддитивной цветовой модели (20), (22), рисунок 2(а). Серым показан контур цветового куба в соответствии с рисунком 2(б)

Для произвольной фазы ϕ , зависимость от которой остаётся без изменений, коэффициент (33) равен

$$g(\theta_2, \phi) = \frac{\sqrt{2} \sin \theta_2 \cos \phi - \cos \theta_2}{\sqrt{3}} = \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{G}, \quad (34)$$

где \mathbf{S}_2 есть вектор Стокса чистого состояния (32). Величина (34) имеет максимум $g_{\max} = 1$ в точке $\phi = 0$, $\theta_2 = \alpha + \pi/2 \approx 125^\circ$ и минимум $g_{\min} = -1$ в противоположной точке $\phi = \pi$, $\theta_2 = \pi/2 - \alpha \approx 55^\circ$, как отмечено на рисунке 4. Минимум также показан точкой на рисунке 3(а). Амплитуды остальных цветов по-прежнему получаются из (34) смещением фазы ϕ согласно (28)

$$\begin{aligned} r(\theta_2, \phi) &= g\left(\theta_2, \phi - \frac{2\pi}{3}\right) = \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{R}, \\ b(\theta_2, \phi) &= g\left(\theta_2, \phi - \frac{4\pi}{3}\right) = \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{B}. \end{aligned} \quad (35)$$

Таким образом коэффициенты (25), (28) разложения (23) отображаются на всю поверхность сферы Блоха кубитного состояния (32). Для восьми опорных точек на поверхности сферы (раздел 3) эти коэффициенты в виде вектора $\mathbf{Q} = [r, g, b]^T$ равны

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_R &= \frac{1}{\sqrt{3}} [1 \quad -1 \quad -1]^T = -\mathbf{Q}_C, \\ \mathbf{Q}_G &= \frac{1}{\sqrt{3}} [-1 \quad 1 \quad -1]^T = -\mathbf{Q}_M, \\ \mathbf{Q}_B &= \frac{1}{\sqrt{3}} [-1 \quad -1 \quad 1]^T = -\mathbf{Q}_Y, \\ \mathbf{Q}_W &= \frac{1}{\sqrt{3}} [1 \quad 1 \quad 1]^T = -\mathbf{Q}_K. \end{aligned} \tag{36}$$

Эти вектора лежат в вершинах куба с длиной ребра $2/\sqrt{3}$, вписанного в единичную окружность как показано на рисунках 2(б) и 4.

4.4. Приведение к модели RGB. В силу одинаковой топологии сферические коэффициенты r, g, b (34), (35) соотносятся с компонентами аддитивной цветовой модели RGB на рисунке 2(а) простым геометрическим преобразованием. А именно, сфера единичного радиуса (29) растягивается так, что её поверхность ложится на поверхность куба со стороной 2, тогда как точки касания остаются на своих местах. Это достигается делением всех компонент разложения на модуль наибольшей из них. Полученный куб далее смещается в положительный октант $r, g, b \geq 0$ и сжимается вдвое. Полученные величины, лежащие в диапазоне $[0, 1]$, отождествляются с компонентами модели RGB

$$[R, G, B] = \frac{1}{2} \left(\mathbf{1} + \frac{[r, g, b]}{\max\{|r|, |g|, |b|\}} \right), \quad 0 \leq R, G, B \leq 1. \tag{37}$$

При этом вектора (36) преобразуются в стандартные коды восьми основных цветов: $R = (1, 0, 0)$, $G = (0, 1, 0)$, $Y = (1, 1, 0)$ и т. д.

Совместно с (34) и (35), преобразование (37) задаёт взаимоднозначное отображение между кубитными состояниями (32) и цветом в модели RGB. Двумерность чистых кубитных состояния позволяет представить это отображение в виде цветowych карт на рисунке 5.

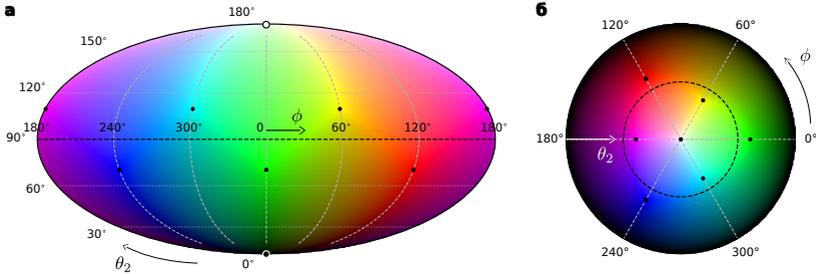


Рис. 5. Цветовая кодировка чистых кубитных состояний (34), (35), (37): а) картографическая проекция сферы Блоха; б) развёртка сферы в круг, при которой угловой и радиальной координатам соответствуют полярный и азимутальный углы кубитного состояния (32). Точками показаны положения основных цветов. Построено с помощью библиотеки Matplotlib версии 3.3.4 [44]

На графике (а) показана картографическая (сохраняющая площадь, Моллвейда) проекция сферы Блоха, при которой северный и южный полюса располагаются на вертикальной оси, а экватор показан горизонтальной прямой. На графике (б) азимутальный угол соответствует угловой координате, а полярный угол - радиальной. Точками показаны главные цвета, пунктиром - экватор сферы Блоха.

5. Смешанные состояния. Чистому кубитному состоянию (23) соответствует матрица плотности

$$\hat{\rho}_2 = |\psi_2\rangle\langle\psi_2| = \begin{bmatrix} \cos^2 \frac{\theta_2}{2} & \sin \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} e^{i\phi} \\ \sin \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} e^{-i\phi} & \sin^2 \frac{\theta_2}{2} \end{bmatrix},$$

которая в силу замены (31) приводится к виду

$$\hat{\rho}_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} e^{i\phi} \\ \cos \frac{\theta}{2} e^{-i\phi} & 1 + \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}, \quad (38)$$

в котором элементы матрицы подчиняются уравнениям (30).

5.1. Переход к смешанным состояниям. Переход к смешанным состояниям производится заменой угловых параметров (31) на компоненты вектора Стокса (5) в соответствии с (7)

$$\begin{aligned}\sin \frac{\theta}{2} &= -\cos \theta_2 \rightarrow z, \\ \cos \frac{\theta}{2} e^{i\phi} &= \sin \theta_2 e^{i\phi} \rightarrow x + iy,\end{aligned}$$

так что (38) совпадает с матрицей плотности (6). Соответственно, уравнения (30) принимают вид

$$x = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left(g - \frac{r+b}{2} \right), \quad y = \frac{r-b}{\sqrt{2}}, \quad z = \frac{r+g+b}{\sqrt{3}}. \quad (39)$$

Решение этой системы

$$\begin{aligned}g &= \frac{z + \sqrt{2}x}{\sqrt{3}} = \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{G}, \\ r &= \frac{z - x/\sqrt{2} + \sqrt{3}/2y}{\sqrt{3}} = \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{R}, \\ b &= \frac{z - x/\sqrt{2} - \sqrt{3}/2y}{\sqrt{3}} = \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{B},\end{aligned} \quad (40)$$

обобщает формулы (34), (35) на весь объём сферы Блоха. Как и раньше, \mathbf{S}_2 есть вектор Стокса (5) кодируемого состояния, а $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ – единичные рёбра RGB куба, показанные на рисунке 4 соответствующими цветами

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \phi_R \\ \cos \alpha \sin \phi_R \\ \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \phi_G \\ \cos \alpha \sin \phi_G \\ \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \phi_B \\ \cos \alpha \sin \phi_B \\ \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (41)$$

5.2. Компоненты Стокса и матрицы Паули. Согласно решению (40), цветовые амплитуды r, g, b и компоненты x, y, z вектора Стокса связаны операцией поворота, совмещающего обычный базис $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ (рисунок 1) с базисом (41) кубической цветовой модели, показанным на рисунке 2 и 4

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_2, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T \\ \mathbf{G}^T \\ \mathbf{B}^T \end{bmatrix}, \quad (42)$$

причём длина вектора сферических цветовых амплитуд равна длине вектора Стокса кодируемого состояния

$$|\mathbf{Q}|^2 = r^2 + g^2 + b^2 = |\mathbf{S}_2|^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

В силу этих свойств цветовую кодировку произвольного кубитного состояния можно представить в матричном виде

$$\hat{\rho} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - z & x + iy \\ x - iy & 1 + z \end{bmatrix} = \frac{\hat{\mathbb{I}} + r\hat{\sigma}_r + g\hat{\sigma}_g + b\hat{\sigma}_b}{2} = \frac{\hat{\mathbb{I}} + \mathbf{Q} \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{\text{RGB}}}{2}, \quad (43)$$

где матрицы $\sigma_{r,g,b}$ соответствуют наблюдаемым кубита (32) по направлениям наибольших и наименьших значений цветовых амплитуд, показанных на рисунке 4 для зелёного цвета

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_r &= |r_{\max}\rangle\langle r_{\max}| - |r_{\min}\rangle\langle r_{\min}|, \\ \hat{\sigma}_g &= |g_{\max}\rangle\langle g_{\max}| - |g_{\min}\rangle\langle g_{\min}|, \\ \hat{\sigma}_b &= |b_{\max}\rangle\langle b_{\max}| - |b_{\min}\rangle\langle b_{\min}|. \end{aligned} \quad (44)$$

Выражение (43) аналогично стандартному разложению матрицы плотности кубитного состояния по матрицам Паули [21, раздел 1.7]. Вектор $\hat{\boldsymbol{\sigma}}_{\text{RGB}}$ матриц (44) связан с вектором обычных матриц Паули оператором поворота \mathbf{U} (42).

5.3. Приведение к модели RGB. Сферические коэффициенты (40) приводятся к стандартной RGB модели аналогично случаю чистых состояния в разделе 4.4. Для этого внутренние точки сферы Блоха растягиваются пропорционально своему расстоянию от центра $|\mathbf{Q}| = |\mathbf{S}_2|$, так, что

$$[R, G, B]^T = \frac{1}{2} \left(\mathbf{1} + \mathbf{Q} \frac{|\mathbf{Q}|}{\max\{|r|, |g|, |b|\}} \right). \quad (45)$$

Это выражение обобщает формулу (37).

Совместно с решениями (40), (42) формула (45) задаёт взаимоднозначное отображение между цветом и произвольным кубитным состоянием. При этом каждая точка в шаре Блоха кодируется цветовым вектором (45) в модели цвета RGB и каждому цвету соответствует единственное кубитное состояние. Это отображение показано на рисунке 6(б) в виде цветовых карт четырёх характерных сечений шара Блоха.

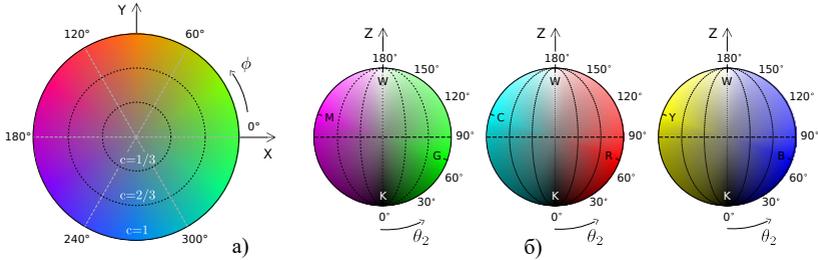


Рис. 6. Цветовая кодировка смешанных кубитных состояний (40), (45): а) экваториальное сечение сферы Блоха; б) вертикальные сечения сферы Блоха, проходящие через три пары противоположных цветов зелёный-фиолетовый, красный-голубой и синий-жёлтый. Пунктиром показаны состояния фиксированной чистоты (47). Построено с помощью Matplotlib 3.3.4 [44]

На графике (а) показано экваториальное сечение $z = 0$ плоскостью XY . На графике (б) показаны вертикальные сечения сферы Блоха, проходящие через три пары противоположных цветов зелёный-фиолетовый ($\phi = 0, \pi$, слева), красный-голубой ($\phi = 2\pi/3, 5\pi/3$, в середине) и синий-жёлтый ($\phi = 4\pi/3, \pi/3$, справа). В каждом сечении также находятся белый (W) и чёрный (K) цвет, лежащие на вертикальной оси Z.

5.4. Соответствие с моделью HSL. На практике интерес представляют цветовые кодировки таких параметров кубитного состояния, как вероятности получения базисных альтернатив, когерентность и фаза. Эти параметры соответствуют параметрам цвета в модели оттенков - насыщенность - светлость (HSL) [26, 27], показанной на рисунке 1(б), следующим образом.

5.4.1. Вероятность исхода «1»: светлость. Как видно из рисунка 6, на диаметре сферы Блоха $x = y = 0$ располагаются серые цвета, на полюсах переходящие в белый и чёрный. Согласно (40), произвольные оттенки серого кодируются равными суперпозициями базисных цветов с весами

$$r = g = b = \frac{z}{\sqrt{3}}, \quad \Leftrightarrow \quad R = G = B = \frac{z + 1}{2} = p_1, \quad (46)$$

где правая часть получена посредством отображения (45).

В цветовой модели HSL вероятности $0 \leq p_1 \leq 1$ исхода 1 соответствует *светлость* цвета, также принимающая значения от 0 до 1. Для произвольного цвета светлость определяется последним равенством (46) и последним уравнением системы (39).

5.4.2. Когерентность: насыщенность (чистота). Заданной когерентности c кубитного состояния соответствуют эллипсоиды вращения, сечения которых для $c = 1/3$ и $c = 2/3$ показаны на рисунке 6 пунктиром. Цветовое выражение когерентности определяется посредством определения (9) и уравнений (39)

$$c\sqrt{p_0p_1} = \sqrt{\frac{(r^2 + g^2 + b^2) - (gr + rb + bg)}{6}}. \quad (47)$$

В цветовом теле HSL, рисунок 1(б), эта величина определяет расстояние точки в цветовом теле от серого той же светлости, т.е. чистоту или *цветность* цвета. Относительная величина c соответствует насыщенности цвета, т.е. отношению его цветности к максимально возможной при данной светлости.

Максимальная когерентность кубитных состояний $c = 1$ задаёт поверхность шара Блоха $|\mathbf{Q}| = |\mathbf{S}_2| = 1$. Она же соответствует поверхности цветового тела, содержащей максимально насыщенные, т.е. *чистые* цвета. В этом пределе цветовая кодировка смешанных состояний (40) переходит в кодировку чистых состояний (34), (35), показанную на рисунке 5.

Нулевой когерентности $c = 0$ соответствуют рассмотренные выше оттенки серого на диаметре сферы Блоха. Таким образом переход от классической к квантовой теории вероятности (раздел 2.2) соответствует переходу от чёрно-белого к цветному изображению.

5.4.3. Фаза: цветовой оттенок (тон). Как показано на рисунке 1(а), фаза кубитного состояния ϕ , имеющая смысл только при ненулевой когерентности, определяет направление соответствующего вектора в плоскости XY. Цветовое выражение этой величины находится из уравнений (39) посредством определений (6) и (8):

$$\phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = \frac{\sqrt{3}(r-b)}{2g-r-b}. \quad (48)$$

В цветовой модели HSL, рисунок 1(б), этой величине соответствует цветовой *тон* или *оттенок* цвета.

Величины (46), (47), (48) выражены через сферические амплитуды r, g, b , откуда выражения через стандартные коэффициенты R, G, B можно получить посредством отображения (45). В этой форме рассмотренные величины, однако, принимают громоздкий и неудобный для использования вид в силу нелинейности этого отображения, связанной с негладкостью

кубической формы. Тем не менее, представленные выражения численно близки к определениям светлости, насыщенности и тона на основе линейной геометрии цветовых тел [26, 27].

6. Заключение. Формально, представленный результат есть сферическая модель цветового тела, геометрические аналоги которой рассматривались ранее наравне с кубической, конической, цилиндрической и другими формами [45, 46]. Оригинальность этой модели состоит в том, что посредством алгебры кубитных состояний сферическая геометрия цвета связывается с алгоритмами квантовых вычислений и квантово-подобными моделями когнитивной семантики и принятия решений [47, 48]. При этом эмоционально-смысловая функция цвета позволяет интерпретировать эти алгоритмы и модели в категориях естественного мышления. В частности, декартовы координаты X-Y-Z на сфере Блоха (рисунок 1) кодируют эмоционально-смысловые факторы сила – активность – оценка [49], тогда как фазовый параметр ϕ кодирует фазу жизненного цикла деятельности по разрешению базисной неопределённости [40]. Установленное математическое отображение может быть использовано для представления разномодальной информации в этой структуре.

Изоморфизм кубитной структуры с моделями классической и прикладной семиотики позволяет рассматривать её в качестве кванта смысловой информации в естественных когнитивных системах [38, 39]. Имея в виду определение искусственного интеллекта как имитации естественного [50], эта кодировка информации представляется естественным технологическим решением. Этот подход рассматривался как перспективный для развития информационных технологий ещё до установления отмеченных соответствий [51, 52], [53–56]. Полученная разметка пространства кубитных состояний в цветовых и эмоционально-смысловых категориях позволяет использовать её для преодоления современных ограничений при моделировании смысловых аспектов естественного мышления [57–60] и разработки природоподобных информационных систем следующего поколения.

В этой связи встаёт вопрос о сопряжимости такого подхода с существующими алгоритмами ИИ. Элемент такого сопряжения представлен в работе [49], где декартовы оси кубитного смыслового пространства (рисунок 1) найдены в 300-мерном пространстве машинной модели естественного языка. В целом же рассматриваемая сопряжимость обеспечена простым переходом между кубитными состояниями и двоичным кодом: альтернативным состояниям бита соответствуют полюса сферы Блоха, тогда как диаметр между ними соответствует

классической (Колмогоровской) вероятностной модели двоичной неопределённости; сферическое пространство кубитных состояний порождается дополнением этого отрезка фазовой степенью свободы. Таким образом бит является частным случаем представленной кодировки в пределе нулевой когерентности подобно тому, как чёрно-белое зрение является частным случаем цветного в пределе нулевой насыщенности. Переход в природоподобным информационным системам состоит в аналогичном обобщении алгоритмов и вычислительных архитектур.

Литература

1. Налимов В.В. Спонтанность сознания: вероятностная архитектура смыслов и смысловая архитектоника личности. М: Прометей, 1989. 288 с.
2. Петренко В.Ф. Основы психосемантики. М: Эксмо, 2010. 480 с.
3. Кузнецов О.П. Когнитивная семантика и искусственный интеллект // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 4. С. 32–42.
4. Кузнецов О.П. Модели голографических процессов обработки информации в нейронных сетях // Автомат. и телемех. 1993. Т. 7. С. 160–172.
5. Дурнев Р.А., Жданенко И.В., Крюков К.Ю. Будущее искусственного интеллекта в спасательном деле // Технологии гражданской безопасности. 2018. Т. 15. № 4. С. 25–29
6. Кудрин В.Б., Хруцкий К.С. Трехзначная логика и троичная информатика Н.П. Брусенцова: их аристотелевские основания // Biocosmology – neo-Aristotelism. 2018. Т. 7. С. 337–388.
7. Bessmertny I., Sukhikh N., Vedernikov Ju., Koroleva Ju. Ternary Logics in Decision Making // Reliability and Statistics in Transportation and Communication. (Eds.: Kabashkin I., Yatskiv I., Prentkovskis O.). 2021. pp. 411–419. DOI: 10.1007/978-3-030-68476-1_38.
8. Васильев В.Н., Павлов А.В. Голографические технологии для систем искусственного интеллекта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2005. Т. 21. № 5. С. 95–99.
9. Aerts D., Czachor M. Cartoon computation: Quantum-like computing without quantum mechanics // J. Phys. A Math. Theor. 2007. vol. 40. no. 13. pp. 259–266. DOI: 10.1088/1751-8113/40/13/F01.
10. Кудряшова Е.С., Михайлова Н.Н., Хусаинов А.А. Моделирование конвейерных и волновых вычислений // Науковедение. 2014. № 1. 12 р.
11. Павельева Е.А. Обработка и анализ изображений на основе использования информации о фазе // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 6. С. 1022–1034.
12. Павлов А.В. Начальное порождение понятий при обработке образов на алгебре фурье-дуальных операций // Искусственный интеллект и принятие решений. 2018. С. 84–97.
13. Фоминых И.Б. Инженерия образов, творческие задачи, эмоциональные оценки // Онтология проектирования. 2018. Т. 8. № 2. С. 175–189. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-2-175-189.
14. Гуд А.К. Основы квантовой кибернетики. Омск: Полиграфический центр КАН, 2008. 204 с.
15. Соловьёв В.М. Квантовые компьютеры и квантовые алгоритмы. Часть 2. Квантовые алгоритмы // Известия Саратовского университета. Серия Математика, Механика,

- Информатика. 2016. Т. 16. № 1. С. 104–112. DOI: 10.18500/1816-9791-2016-16-1-104-112.
16. Melnikov A., Kordzanganeh M., Alodjants A.P., Lee R.-K. Quantum Machine Learning: from physics to software engineering // *Adv. in Physics X*. 2023. vol. 8. no. 1. DOI: 10.1080/23746149.2023.2165452.
 17. Manju A., Nigam M.J. Applications of quantum inspired computational intelligence: A survey // *Artificial Intelligence Review*. 2014. vol. 42. no. 1. pp. 79–156. DOI: 10.1007/s10462-012-9330-6.
 18. Bhattacharyya S., Maulik U., Dutta P. Quantum Inspired Computational Intelligence. Morgan Kaufmann, 2017. 506 p. DOI: 10.1016/C2015-0-01859-7.
 19. Howard M., Wallman J., Veitch V., Emerson J. Contextuality supplies the 'magic' for quantum computation // *Nature*. 2014. vol. 510. no. 7505. pp. 351–355. DOI: 10.1038/nature13460.
 20. Khrennikov A. Contextuality, Complementarity, Signaling, and Bell Tests // *Entropy*. 2022. vol. 24. no. 10. pp. 1380. DOI: 10.3390/e24101380.
 21. Холево А.С. Математические основы квантовой информатики. Лекционные курсы НОЦ, М: МИАН, 2018. 118 с.
 22. Venegas-Andraca S.E., Bose S. Storing, processing, and retrieving an image using quantum mechanic // *SPIE Quantum Information and Computation*. (Eds.: Donkor E., Pirich A.R., Brandt H.E.). 2003. vol. 5105. DOI: 10.1117/12.485960.
 23. Le P.Q., Dong F., Hirota K. A flexible representation of quantum images for polynomial preparation, image compression, and processing operations // *Quantum Information Processing*. 2011. vol. 10. no. 1. pp. 63–84. DOI: 10.1007/s11128-010-0177-y.
 24. Yuan S., Mao X., Xue Y., Chen L., Xiong Q., Compare A. SQR: A simple quantum representation of infrared images // *Quantum Inf. Process*. 2014. vol. 13. no. 6. pp. 1353–1379. DOI: 10.1007/s11128-014-0733-y.
 25. Sang J., Wang S., Li Q. A novel quantum representation of color digital images // *Quantum Information Processing*. 2017. vol. 16. no. 2. DOI: 10.1007/s11128-016-1463-0.
 26. Levkowitz H., Herman G.T. GLHS: A Generalized Lightness, Hue, and Saturation Color Model // *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*. 1993. vol. 55. no. 4. pp. 271–285. DOI: 10.1006/cgip.1993.1019.
 27. Tian-Yuan S. The reversibility of six geometric color spaces // *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*. 1995. vol. 61. no. 10. pp. 1223–1232.
 28. Iliyasa A.M. Towards realising secure and efficient image and video processing applications on quantum computers // *Entropy*. 2013. vol. 15. no. 8. pp. 2874–2974. DOI: 10.3390/e15082874
 29. Hai S.L., Qingxin Z., Ri G.Z. Multidimensional color image storage, retrieval, and compression based on quantum amplitudes and phases // *Information Sciences*. 2014. vol. 273. pp. 212–232. DOI: 10.1016/j.ins.2014.03.035.
 30. Yan F., Iliyasa A.M., Venegas-Andraca S.E. A survey of quantum image representations // *Quantum Information Processing*. 2016. vol. 15. no. 1. pp. 1–35. DOI: 10.1007/s11128-015-1195-6.
 31. Yan F., Iliyasa A.M., Le P.Q. Quantum image processing: A review of advances in its security technologies. *International Journal of Quantum Information*. 2017. vol. 15. no. 3. 18 p. DOI: 10.1142/S0219749917300017.
 32. Yan F., Li N., Hirota K. QHSL: A quantum hue, saturation, and lightness color model // *Information Sciences*. 2021. vol. 577. pp. 196–213. DOI: 10.1016/j.ins.2021.06.077.
 33. Pridmore R.W. Hue cycle described by graphs and color names // *Color Research and Application*. 1991. vol. 16. no. 2. pp. 114–121. DOI: 10.1002/col.5080160210.

34. McCamy C.S. The primary hue circle // *Color Research and Application*. 1993. vol. 18. no. 1. pp. 3–10. DOI: 10.1002/col.5080180104.
35. Li N., Yan F. A single-qubit-based HSL color model for efficient quantum image security applications // *Optical and Quantum Electronics*. 2022. vol. 54. pp. 1–39. DOI: 10.1007/s11082-022-04078-9.
36. Yan F., Iliyasa A.M., Zhen-Tao L. Bloch Sphere-Based Representation for Quantum Emotion Space // *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*. 2019. vol. 19. no. 1. pp. 134–142. DOI: 10.20965/jaciii.2015.p0134.
37. Yan F., Iliyasa A.M., Sihao J. Quantum Structure for Modelling Emotion Space of Robots // *Applied Sciences*. 2019. vol. 9. no. 16. pp. 3351. DOI: 10.3390/app9163351.
38. Surov I.A. Quantum core affect. Color-emotion structure of semantic atom // *Frontiers in Psychology*. 2022. vol. 13. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.838029.
39. Surov I.A. Natural Code of Subjective Experience // *Biosemiotics*. 2022. vol. 15. no. 2. pp. 109–139. DOI: 10.1007/s12304-022-09487-7.
40. Суров И.А. Какая разница? Прагматическая формализация смысла // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2023. № 1. С. 78–89. DOI: 10.14357/20718594230108.
41. Baumgratz T., Cramer M., Plenio M.B. Quantifying coherence // *Physical Review Letters*. 2014. vol. 113. no. 14. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.140401.
42. Warmuth M.K., Kuzmin D. Bayesian generalized probability calculus for density matrices // *Machine Learning*. 2010. vol. 78. no. 1-2. pp. 63–101. DOI: 10.1007/s10994-009-5133-7.
43. Fedorov A.K., Kiktenko E.O. Quaternion Representation and Symplectic Spin Tomography // *Journal of Russian Laser Research*. 2013. vol. 34. no. 5. pp. 477–487. DOI: 10.1007/s10946-013-9378-z.
44. Hunter J.D. Matplotlib: A 2D graphics environment // *Computing in Science Engineering*. 2007. vol. 9. no. 3. pp. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
45. Kuehni R.G. *Color Space and Its Divisions. Color Order from Antiquity to the Present*. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003. 408 p.
46. Rossi M., Buratti G. The Architecture of Color: Number and Shapes as Measurement and Representation Tools // *Nexus Network Journal*. 2015. vol. 17. no. 2. pp. 547–569. DOI: 10.1007/s00004-015-0243-y.
47. Khrennikov A. *Ubiquitous Quantum Structure. From psychology to finance*. Springer. 2010. 216 p. DOI: 10.1007/978-3-642-05101-2.
48. Суров И.А. Алоджанц А.П. *Модели принятия решений в квантовой когнитивистике (учебное пособие)*. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. 63 с.
49. Суров И.А. Открытие чёрного ящика: Извлечение семантических факторов Осгуда из языковой модели word2vec // *Информатика и автоматизация*. 2022. Т. 21. № 5. С. 916–936. DOI: 10.15622/ia.21.5.3.
50. Указ президента Российской Федерации «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». 2019. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>.
51. Widdows D., Bruza P. Quantum Information Dynamics and Open World Science // *AAAI Spring Symposium: Quantum Interaction*. 2007. pp. 126–133.
52. Widdows D., Kitto K., Cohen T. Quantum Mathematics in Artificial Intelligence // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2021. vol. 72. pp. 1307–1341. DOI: 10.1613/jair.1.12702.
53. Ezhov A.A., Ventura D. Quantum Neural Networks / (Eds.: Kasabov N.) // *Future Directions for Intelligent Systems and Information Sciences*. Springer. 2000. pp. 213–235. DOI: 10.1007/978-3-7908-1856-7_11.

54. Петренко В.Ф., Супрун А.П. Методологические пересечения психосемантики сознания и квантовой физики. М: УРСС, 2018. 304 с.
55. Кленов Н.В., Кузнецов А.В., Щеголев А.Е., Соловьев И.И., Куприянов М.Ю., Терешонок М.В., Бакурский С.В. Нейрон на основе одного потокового кубита // Физика низких температур. 2019. Т. 45. № 7. С. 898–905.
56. Колесниченко О.Ю., Смолин В.С., Щербаков Д.А., Колесниченко Ю.Ю. Нейросети и понимание работы мозга в квантовом мире // Материалы VIII Международной конференции: Знания – Онтологии – Теории. 2021. С. 112–121.
57. Brachman R.J. Systems that know what they're doing // IEEE Intelligent Systems. 2002. vol. 17. no. 6. pp. 67–71.
58. Samsonovich A., Goldin R.F., Ascoli G.A. Toward a semantic general theory of everything // Complexity. 2009. vol. 16. no. 4. pp. 12–18. DOI: 10.1002/cplx.20293.
59. Райков А.Н. Слабый vs сильный искусственный интеллект // Информатизация и связь. 2020. № 1. С. 81–88. DOI: 10.34219/2078-8320-2020-11-1-81-88.
60. Roli A., Jaeger J., Kauffman S.A. How Organisms Come to Know the World: Fundamental Limits on Artificial General Intelligence // Frontiers in Ecology and Evolution. 2022. vol. 9. DOI: 10.3389/fevo.2021.806283.

Суров Илья Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, научный сотрудник, Университет ИТМО. Область научных интересов: когнитивно-поведенческое моделирование, квантовая семантика. Число научных публикаций — 30. ilya.a.surov@itmo.ru; Кронверкский проспект, 49А, 197101, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)232-1467.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-00136).

I.A. SUROV
COLOR CODING OF QUBIT STATES

Surov I.A. Color Coding of Qubit States.

Abstract. Difficulties in algorithmic simulation of natural thinking point to the inadequacy of information encodings used to this end. The promising approach to this problem represents information by the qubit states of quantum theory, structurally aligned with major theories of cognitive semantics. The paper develops this idea by linking qubit states with color as fundamental carrier of affective meaning. The approach builds on geometric affinity of Hilbert space of qubit states and color solids, used to establish precise one-to-one mapping between them. This is enabled by original decomposition of qubit in three non-orthogonal basis vectors corresponding to red, green, and blue colors. Real-valued coefficients of such decomposition are identical to the tomograms of the qubit state in the corresponding directions, related to ordinary Stokes parameters by rotational transform. Classical compositions of black, white and six main colors (red, green, blue, yellow, magenta and cyan) are then mapped to analogous superposition of the qubit states. Pure and mixed colors intuitively map to pure and mixed qubit states on the surface and in the volume of the Bloch ball, while grayscale is mapped to the diameter of the Bloch sphere. Herewith, the lightness of color corresponds to the probability of the qubit's basis state «1», while saturation and hue encode coherence and phase of the qubit, respectively. The developed code identifies color as a bridge between quantum-theoretic formalism and qualitative regularities of the natural mind. This opens prospects for deeper integration of quantum informatics in semantic analysis of data, image processing, and the development of nature-like computational architectures.

Keywords: qubit, color, semantic space, affective meaning, quantum information, image processing, quantum, code.

References

1. Nalimov V.V. Spontannost' soznaniya: verojatnostnaja arhitektura smyslov i smyslovaja arhitektonika lichnosti [Spontaneity of consciousness: probabilistic architecture of meanings and semantic archinectionics of personality]. M: Prometey, 1989. 288 p. (In Russ.).
2. Petrenko V.F. Osnovy psihosemantiki. [Foundations of psychosemantics]. M: Eksmo, 2010. 480 p. (In Russ.).
3. Kuznetsov O.P. Cognitive semantics and artificial intelligence. Sci. Tech. Inf. Process. 2013. vol. 40. no. 5. pp. 269–276. DOI: 10.3103/S0147688213050067.
4. Kuznetsov O.P. [Models of golographic processes of information processing in neural networks]. Avtomatika i telemekhanika – Automatics and telemechanics. 1993. vol. 7. pp. 160–172. (In Russ.).
5. Durnev R.A., Zhdanenko I.V., Krjukov K.Ju. [Future of artificial intelligence in resque practice]. Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti – Civil Security Technology. 2018. vol. 15. no. 4. pp. 25–29. (In Russ.).
6. Kudrin V.B., Hruckij K.S. [N.P. Brusentsov's Three-valued logic and Ternary Computer Science: their Aristotelian foundations]. Biocosmology – neo-Aristotelism. 2017. vol. 7. pp. 337–388. (In Russ.).
7. Bessmertny I., Sukhikh N., Vedernikov Ju., Koroleva Ju. Ternary Logics in Decision Making. Reliability and Statistics in Transportation and Communication. 2021. pp. 411–419. DOI: 10.1007/978-3-030-68476-1_38.

8. Vasil'ev V.N., Pavlov A.V. [Holographic technologies for artificial intelligence systems]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki – Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2005. vol. 21. no. 5. pp. 95–99. (In Russ.).
9. Aerts D., Czachor M. Cartoon computation: Quantum-like computing without quantum mechanics. *J. Phys. A Math. Theor.* 2007. vol. 40. no. 13. pp. 259–266. DOI: 10.1088/1751-8113/40/13/F01.
10. Kudrjashova E.S., Mihajlova N.N., Husainov A.A. [Modeling of pipeline and wave computations]. *Naukovedenie – Science studies*. 2014. no. 1. (In Russ.).
11. Pavel'eva E.A. [Image processing and analysis based on the use of phase information]. *Komp'yuternaja optika – Computer optics*. 2018. vol. 42. no. 6. pp. 1022–1034. (In Russ.).
12. Pavlov A.V. [Conceptual thinking generation by patterns processing by algebra of fourier-dual operations]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij – Artificial intelligence and decision making*. 2018. pp. 84–97. (In Russ.).
13. Fominyh I.B. [Mental image engineering, creative problems, emotional evaluations]. *Ontologija proektirovanija – Ontology of designing*. 2018. vol. 8. no. 2. pp. 175–189. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-2-175-189. (In Russ.).
14. Guz A.K. *Osnovy kvantovoj kibernetiki [Basics of quantum cybernetics]*. Omsk: Polygraphic center KAN, 2008. 204 p. (In Russ.).
15. Solovyev V.M. [Quantum Computers and Quantum Algorithms. Part 2. Quantum Algorithms]. *Izvestija Saratovskogo universiteta. Serija Matematika, Mehanika, Informatika – News of Saratov University. Mathematics, Mechanics, Computer Science Series*. 2016. vol. 16. no. 1. pp. 104–112. DOI: 10.18500/1816-9791-2016-16-1-104-112. (In Russ.).
16. Melnikov A., Kordzanganeh M., Alodjants A.P., Lee R.-K. Quantum Machine Learning: from physics to software engineering. *Adv. in Physics X*. 2023. vol. 8. no. 1. DOI: 10.1080/23746149.2023.2165452.
17. Manju A., Nigam M.J. Applications of quantum inspired computational intelligence: A survey. *Artificial Intelligence Review*. 2014. vol. 42. no. 1. pp. 79–156. DOI: 10.1007/s10462-012-9330-6.
18. Bhattacharyya S., Maulik U., Dutta P. *Quantum Inspired Computational Intelligence*. Morgan Kaufmann, 2017. 506 p. DOI: 10.1016/C2015-0-01859-7.
19. Howard M., Wallman J., Veitch V., Emerson J. Contextuality supplies the 'magic' for quantum computation. *Nature*. 2014. vol. 510. no. 7505. pp. 351–355. DOI: 10.1038/nature13460.
20. Khrennikov A. Contextuality, Complementarity, Signaling, and Bell Tests. *Entropy*. 2022. vol. 24. no. 10. pp. 1380. DOI: 10.3390/e24101380.
21. Holevo A.S. *Matematicheskie osnovy kvantovoj informatiki. [Mathematical foundations of quantum information]*. M: MIAN, 2018. 118 p. (In Russ.).
22. Venegas-Andraca S.E., Bose S. Storing, processing, and retrieving an image using quantum mechanic. *SPIE Quantum Information and Computation*. 2003. vol. 5105. DOI: 10.1117/12.485960.
23. Le P.Q., Dong F., Hirota K. A flexible representation of quantum images for polynomial preparation, image compression, and processing operations. *Quantum Information Processing*. 2011. vol. 10. no. 1. pp. 63–84. DOI: 10.1007/s11128-010-0177-y.
24. Yuan S., Mao X., Xue Y., Chen L., Xiong Q., Compare A. SQR: A simple quantum representation of infrared images. *Quantum Inf. Process.* 2014. vol. 13. no. 6. pp. 1353–1379. DOI: 10.1007/s11128-014-0733-y.
25. Sang J., Wang S., Li Q. A novel quantum representation of color digital images. *Quantum Information Processing*. 2017. vol. 16. no. 2. DOI: 10.1007/s11128-016-1463-0.

26. Levkowitz H., Herman G.T. GLHS: A Generalized Lightness, Hue, and Saturation Color Model. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*. 1993. vol. 55. no. 4. pp. 271–285. DOI: 10.1006/cgip.1993.1019.
27. Tian-Yuan S. The reversibility of six geometric color spaces. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1995. vol. 61. no. 10. pp. 1223–1232.
28. Iliyasu A.M. Towards realising secure and efficient image and video processing applications on quantum computers. *Entropy*. 2013. vol. 15. no. 8. pp. 2874–2974. DOI: 10.3390/e15082874.
29. Hai S.L., Qingxin Z., Ri G.Z. Multidimensional color image storage, retrieval, and compression based on quantum amplitudes and phases. *Information Sciences*. 2014. vol. 273. pp. 212–232. DOI: 10.1016/j.ins.2014.03.035.
30. Yan F., Iliyasu A.M., Venegas-Andraca S.E. A survey of quantum image representations. *Quantum Information Processing*. 2016. vol. 15. no. 1. pp. 1–35. DOI: 10.1007/s11128-015-1195-6.
31. Yan F., Iliyasu A.M., Le P.Q. Quantum image processing: A review of advances in its security technologies. *International Journal of Quantum Information*. 2017. vol. 15. no. 3. 18 p. DOI: 10.1142/S0219749917300017.
32. Yan F., Li N., Hirota K. QHSL: A quantum hue, saturation, and lightness color model. *Information Sciences*. 2021. vol. 577. pp. 196–213. DOI: 10.1016/j.ins.2021.06.077.
33. Pridmore R.W. Hue cycle described by graphs and color names. *Color Research and Application*. 1991. vol. 16. no. 2. pp. 114–121. DOI: 10.1002/col.5080160210.
34. McCamy C.S. The primary hue circle // *Color Research and Application*. 1993. vol. 18. no. 1. pp. 3–10. DOI: 10.1002/col.5080180104.
35. Li N., Yan F. A single-qubit-based HSL color model for efficient quantum image security applications. *Optical and Quantum Electronics*. 2022. vol. 54. pp. 1–39. DOI: 10.1007/s11082-022-04078-9.
36. Yan F., Iliyasu A.M., Zhen-Tao L. Bloch Sphere-Based Representation for Quantum Emotion Space. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*. 2019. vol. 19. no. 1. pp. 134–142. DOI: 10.20965/jaciii.2015.p0134.
37. Yan F., Iliyasu A.M., Sihao J. Quantum Structure for Modelling Emotion Space of Robots. *Applied Sciences*. 2019. vol. 9. no. 16. pp. 3351. DOI: 10.3390/app9163351.
38. Surov I.A. Quantum core affect. Color-emotion structure of semantic atom. *Frontiers in Psychology*. 2022. vol. 13. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.838029.
39. Surov I.A. Natural Code of Subjective Experience. *Biosemiotics*. 2022. vol. 15. no. 2. pp. 109–139. DOI: 10.1007/s12304-022-09487-7.
40. Surov I.A. [What is the Difference? Pragmatic Formalization of Meaning]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij – Artificial intelligence and decision making*. 2023. no. 1. p. 78–89. DOI: 10.14357/20718594230108. (In Russ.).
41. Baumgratz T., Cramer M., Plenio M.B. Quantifying coherence. *Physical Review Letters*. 2014. vol. 113. no. 14. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.140401.
42. Warmuth M.K., Kuzmin D. Bayesian generalized probability calculus for density matrices. *Machine Learning*. 2010. vol. 78. no. 1-2. pp. 63–101. DOI: 10.1007/s10994-009-5133-7.
43. Fedorov A.K., Kiktenko E.O. Quaternion Representation and Symplectic Spin Tomography. *Journal of Russian Laser Research*. 2013. vol. 34. no. 5. pp. 477–487. DOI: 10.1007/s10946-013-9378-z.
44. Hunter J.D. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science and Engineering*. 2007. vol. 9. no. 3. pp. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
45. Kuehni R.G. *Color Space and Its Divisions. Color Order from Antiquity to the Present*. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003. 408 p.

46. Rossi M., Buratti G. The Architecture of Color: Number and Shapes as Measurement and Representation Tools. *Nexus Network Journal*. 2015. vol. 17. no. 2. pp. 547–569. DOI: 10.1007/s00004-015-0243-y.
47. Khrennikov A. *Ubiquitous Quantum Structure. From psychology to finance*. Springer. 2010. 216 p. DOI: 10.1007/978-3-642-05101-2.
48. Surov I.A., Alodjants A.P. *Modeli prinjatija reshenij v kvantovoj kognitivistike [Models of decision making in quantum cognition]*. Saint-Petersburg: ITMO University, 2018. 63 p. (in Russ.).
49. Surov I.A. [Opening the Black Box: Finding Osgood’s Semantic Factors in Word2vec Space]. *Informatizacija i svjaz’ – Informatics and automation*. 2022. vol. 21. no. 5. pp. 916–936. DOI: 10.15622/ia.21.5.3. (In Russ.).
50. Ukaz prezidenta Rossijskoj Federacii «O razvitii iskusstvennogo intellekta v Rossijskoj Federacii» [Decree of the President of the Russian Federation "On the development of artificial Intelligence in the Russian Federation"]. 2019. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>. (accessed 26.06.2023). (In Russ.).
51. Widdows D., Bruza P. *Quantum Information Dynamics and Open World Science*. AAAI Spring Symposium: Quantum Interaction. 2007. pp. 126–133.
52. Widdows D., Kitto K., Cohen T. *Quantum Mathematics in Artificial Intelligence*. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2021. vol. 72. pp. 1307–1341. DOI: 10.1613/jair.1.12702.
53. Ezhov A.A., Ventura D. *Quantum Neural Networks. Future Directions for Intelligent Systems and Information Sciences*. Springer. 2000. pp. 213–235. DOI: 10.1007/978-3-7908-1856-7_11.
54. Petrenko V.F., Suprun A.P. *Metodologicheskie peresecheniya psihosemantiki soznaniya i kvantovoj fiziki. [Methodological intersections of psychosemantics of consciousness and quantum physics]*. M: URSS, 2018. 304 p. (In Russ.).
55. Klenov N.V., Kuznecov A.V., Shchegolev A.E., Solov’ev I.I., Kupriyanov M.Yu., Tereshonok M.V., Bakurskij S.V. [Neuron based on a single flux qubit] *Fizika nizkikh temperatur – Low Temperature Physics*. 2019. vol. 45. no. 7. pp. 898–905. (In Russ.).
56. Kolesnichenko O.Yu., Smolin V.S., Shcherbakov D.A., Kolesnichenko Yu.Yu. [Neural networks and understanding of the brain in the quantum world] *Materialy VIII Mezhdunarodnyj konferencii: Znaniya – Ontologii – Teorii [ZONT proceedings]*. 2021. pp. 112–121. (In Russ.).
57. Brachman R.J. *Systems that know what they’re doing*. *IEEE Intelligent Systems*. 2002. vol. 17. no. 6. pp. 67–71.
58. Samsonovich A., Goldin R.F., Ascoli G.A. *Toward a semantic general theory of everything*. *Complexity*. 2009. vol. 16. no. 4. pp. 12–18. DOI: 10.1002/cplx.20293.
59. Raikov A.N. [Weak vs strong artificial intelligence]. *Informatizacija i svjaz’ – Informatization and communication*. 2020. no. 1. pp. 81–88. (In Russ.). DOI: 10.34219/2078-8320-2020-11-1-81-88.
60. Roli A., Jaeger J., Kauffman S.A. *How Organisms Come to Know the World: Fundamental Limits on Artificial General Intelligence*. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2022. vol. 9. DOI: 10.3389/fevo.2021.806283.

Surov Ilya — Ph.D., Associate Professor, Researcher, ITMO University. Research interests: cognitive-behavioral modeling, quantum semantics. The number of publications — 30. ilya.a.surov@itmo.ru; 49A, Kronverksky Av., 197101, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)232-1467.

Acknowledgements. This research is supported by RNF (grant № 20-71-00136).