

# Метод Адаптации Цифровых Изображений Для Людей с Аномальным Цветовосприятием (Дихроматов).

В.А. Ковалёв, Э.В. Снежко, В.И. Архипов  
Объединённый институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
{vassili.kovalev, eduard.snezhko, arkipau}@gmail.com

## Резюме

В статье представлен новый подход к адаптации мультимедийного контента для людей с нарушенным цветовосприятием (дихроматов). При обработке изображения (или видео) представленным способом, учитываются его цветовые характеристики, что позволяет оптимально контрастировать его для лучшего восприятия дихроматом.

**Ключевые слова:** *цветной медиаконтент, компьютерная графика, восприятие цветов.*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Общепризнанно, что наиболее действенными подходами повышения эффективности донесения визуальной информации являются персонализация и адаптация визуального содержимого под предпочтения пользователя и его индивидуальные характеристики. Цвет является одной из ключевых составляющих визуального содержимого. Однако около 8% мужчин (и очень малая доля женщин) имеют аномальное цветовосприятие.

Большинство людей (трихроматы) различают множество цветов, образующих в ортогональном цветовом пространстве трёхмерную фигуру, называемую «гамут». Люди с аномальным цветовосприятием (дихроматы) различают цвета, множество которых образует двумерную поверхность, вписанную в гамут. Таким образом, всё трёхмерное пространство цветов, различаемых трихроматами значительно сужается для дихромата. Многие цвета, значительно отличающиеся для трихромата для дихромата практически неразличимы, снижается цветовой контраст.

Среди дихроматов выделяются три группы: протанопы, деутеранопы и тританопы, отличающиеся формой множества воспринимаемых цветов.

В данной статье рассматриваются две наиболее распространённые группы дихроматов протанопы (PRO) и деутеранопы (DEU).

Авторами был разработан новый метод преобразования цветов, который улучшает восприятие цветных сцен, изменяя цветовой контраст, воспринимаемый дихроматами, таким образом, чтобы он стал близок контрасту, воспринимаемому людьми с трихроматическим зрением. Предложенный метод преобразования цветов является адаптивным и предоставляет решение для каждого отдельного изображения, серии изображений или относительно однородной видеопоследовательности. Данный метод может быть использован для репродукции

мультимедийных материалов различного типа, включая художественные картины, цифровые изображения и фотографии, видеоматериал различных типов. Визуальное содержимое, адаптированное для дихроматов, делается персонализированным, а также более эффективным для донесения основной идеи и ключевых акцентов, присутствующих на большинстве видов визуального содержимого.

Предложенный метод преобразования цветов может быть использован во всех областях деятельности, в которых цветоаномалы нуждаются в адаптации отображаемой информации для их индивидуального зрительного восприятия. Они включают в себя использование мобильных устройств различных типов, цифровую фотографию, кинофильмы и видео-музыкальные продукты, Интернет, игровую индустрию, персонализированное телевидение, цветные объекты культурного и исторического наследия, публичные и профессиональные библиотеки и т. д. Одной из наиболее широкой областью применения является широкий набор современных мобильных устройств (мобильные телефоны, смартфоны, наладонные устройства). Второй обширной рыночной нишей является реализованные аппаратно решения для преобразования цветов, встроенные в дорогие компьютерные мониторы высшего ценового уровня, используемые в профессиональной обработке изображений, видеопоследовательностей и компьютерной графики людьми с аномальным цветовосприятием.

## 2. МЕТОДЫ И РАБОЧЕЕ ОКРУЖЕНИЕ

По сути метод адаптации цветного содержимого заменяет присутствующие на оригинальном изображении цвета на другие. В соответствии с обобщенной формулировкой этого метода, замена не имеет никаких ограничений, то есть белый цвет может быть заменен на черный. Единственной целью адаптации является минимизация некоторой функции стоимости посредством итеративного процесса. Функция стоимости задается таким образом, чтобы отразить, насколько «плохим» является оригинальное изображение в смысле цветового контраста для дихроматов.

Задавая определенным образом целевую функцию, можно достичь различных целей. Эти цели могут быть разделены следующим образом. Во-первых, использование адаптированного цветного содержимого в личном окружении, то есть во всех случаях, когда цветовая палитра некоторого устройства может быть настроена пользователем-цветоаномалом при помощи просто включения функции адаптации цветов (в мобильных телефонах, компьютерных мониторах, телевизионных приемниках и т. д.).

Второй целью является использование адаптированного цветового содержимого в публичном окружении. Данная область приложения также очень обширна (диаграммы, транспортные карты, финансовые графики, географические карты и т. д.). Такой тип визуальной информации должен быть хорошо воспринимаем как пользователями с трихроматическим зрением, так и с дихроматическим. Также следует отметить, что «удовлетворительность» в восприятии должна быть не только в смысле заметного для всех цветового контраста, но также быть эстетически приемлемой.

В данной работе мы оперируем с цветами, присутствующими на каждом статичном изображении, в пространстве CIELAB (CIE 1976 L\*a\*b\*) [1]. Цветовое пространство CIELAB было использовано по той причине, что оно изначально было разработано с целью задания координат цветов таким образом, что координаты любых двух цветов (то есть расстояние между ними) позволило бы предсказать из визуальную разницу.

Тем не менее, авторы понимают, что система CIELAB не была разработана как система визуального представления. Евклидово расстояние, метрика CMC(1:c) либо метрика CIE2000 между двумя точками в CIELAB дают только приближение воспринимаемого различия между соответствующими цветами. Однако пока отсутствует лучшая формулировка использовать данное пространство представляется разумным. Далее по тексту данное пространство будет обозначаться как LAB для краткости.

Цвета большинства визуального содержимого заданы в пространстве RGB. Поэтому для того, чтобы работать с цветами в пространстве LAB, нам вначале следует перевести их из RGB в LAB. Преобразование из RGB в LAB и обратно осуществлялось с использованием конвейера  $RGB \Leftrightarrow XYZ \Leftrightarrow LAB$  в соответствии с формулами, приведенными в разделе 2.1.

Тесты по преобразованию цветов были проведены с различными комбинациями параметров для преобразования из RGB в LAB и обратно (таких как стандартный наблюдатель MKO, стандартное излучение MKO, тип рабочего пространства RGB). Наиболее приемлемыми параметрами были признаны следующие:

стандартный наблюдатель  $2^0$ , стандартный излучатель D50 и рабочее пространство Beta RGB. В данной работе оно было использовано по причине приемлемой комбинации параметров «эффективность области видимости в LAB» (процент всей области видимости LAB пространства, покрываемого данным пространством RGB), а также «эффективность кодирования» (доля кодирующего пространства (RGB), которая представляет реальные цвета). Для Beta RGB эти значения составляют приблизительно 69,3% и 99,0% соответственно. Все примеры и изображения далее по тексту были сформированы с использованием приведенного набор параметров.

## 2.1. Вычисления

Учитывая все вышеупомянутые параметры (стандартный наблюдатель  $2^0$ , стандартный излучатель D50, рабочее пространство Beta RGB и координаты соответствующей точки белого

$$(X_n, Y_n, Z_n) = (0.96422, 1.00000, 0.82521),$$

для преобразования из RGB в XYZ были использованы следующие матрицы:

$$M = \begin{pmatrix} 0.67125 & 0.17458 & 0.11838 \\ 0.30327 & 0.66379 & 0.03294 \\ 0.0000 & 0.04070 & 0.78451 \end{pmatrix}$$

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} 1.68323 & -0.42824 & -0.23601 \\ -0.77102 & 1.70656 & 0.04469 \\ 0.04000 & -0.08854 & 1.27236 \end{pmatrix}$$

$$RGB \Rightarrow XYZ: [XYZ] = [rgb]M, \text{ где } r = R^\gamma, \\ g = G^\gamma, b = B^\gamma, \text{ если система RGB - HE sRGB.}$$

$$XYZ \Rightarrow RGB: R = r^{\frac{1}{\gamma}}, G = g^{\frac{1}{\gamma}}, B = b^{\frac{1}{\gamma}}, \text{ опять же, если система RGB - HE}$$

$$\text{sRGB. } [rgb] = [XYZ]M^{-1}. \text{ Параметр } \gamma \text{ в обоих случаях зависит от типа рабочего пространства RGB и для Beta RGB } \gamma = 2.2.$$

Имея вычисленные координаты  $(X, Y, Z)$  некоторого цвета и координаты точки белого  $(X_n, Y_n, Z_n)$ , компоненты в LAB вычислялись следующим образом:

$$L = 116f_y - 16$$

$$a = 500(f_x - f_y)$$

$$b = 200(f_y - f_z), \text{ где}$$

$$f_x = \begin{cases} \frac{kx+16}{116}, & x \leq \varepsilon \\ \sqrt[3]{x}, & x > \varepsilon \end{cases}$$

$$f_y = \begin{cases} \frac{ky+16}{116}, & y \leq \varepsilon \\ \sqrt[3]{y}, & y > \varepsilon \end{cases}$$

$$f_z = \begin{cases} \frac{kz+16}{116}, & z \leq \varepsilon \\ \sqrt[3]{z}, & z > \varepsilon \end{cases}, \text{ где}$$

$$x = \frac{X}{X_n}, y = \frac{Y}{Y_n}, z = \frac{Z}{Z_n}, \varepsilon = 0.008856, k = 903.3$$

Обратное преобразование  $LAB \Rightarrow XYZ$  осуществлялось следующим образом:

$$X = xX_n, Y = yY_n, Z = zZ_n,$$

$$x = \begin{cases} \frac{116f_x - 16}{k}, & f_x^3 \leq \varepsilon \\ f_x^3, & f_x^3 > \varepsilon \end{cases}$$

$$y = \begin{cases} \frac{L}{k}, & L \leq k\varepsilon \\ \left(\frac{L+16}{116}\right)^3, & L > k\varepsilon \end{cases}$$

$$z = \begin{cases} \frac{116f_z - 16}{k}, & f_z^3 \leq \varepsilon \\ f_z^3, & f_z^3 > \varepsilon \end{cases},$$

где  $(X_n, Y_n, Z_n)$  - также координаты точки белого, а

$$f_x = f_y + \frac{a}{500}, \quad f_z = f_y - \frac{b}{200},$$

$$f_y = \begin{cases} \frac{ky + 16}{116}, & y \leq \varepsilon \\ \frac{L + 16}{116}, & y > \varepsilon \end{cases}$$

Все вычисления выполнялись с использованием чисел с плавающей точкой двойной точности.

Как уже отмечалось во многих публикациях, стандартное расстояние между цветами в CIELAB

$$CIE76 = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

не может быть использовано как действительная метрика для измерения воспринимаемого различия между цветами. После признания данного факта само цветовое пространство CIELAB не было переделано для решения данной проблемы. Вместо этого были предложены более сложные формулы вычисления расстояния между цветами: CMC [2], CIE94 и CIE2000[3].

Принимая все вышеуказанное во внимание, ниже приведены аргументы за и против использования CIE76 для разработанного метода адаптации.

**За:**

- ✓ требует выполнения меньшего количества операций по сравнению с другими формулами вычисления расстояния;
- ✓ обеспечивает устойчивое воспринимаемое различие, если значение больше 20 (едва различие достигается при значении около 5);
- ✓ инвариантно относительно вращения/сдвига облака точек изображения в пространстве LAB, обеспечивая таким однородный контекст улучшения изображений (описанный в разделе 2.3).

**Против:**

- ✓ неточное предсказание воспринимаемого различия цветов.

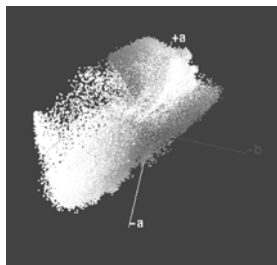
Так как мы рассматриваем не задачу совмещения цветов, а задачу привнесения более заметного цветового контраста в контекст цветного содержимого с усеченной цветовой палитрой, было решено, что

достоинства расстояния CIE76 превосходят его недостатки. Кроме того, исследования по разработке универсального однородного цветового пространства все еще продолжаются, и в случае успеха разработанный авторами метод, возможно, будет давать более лучшие результаты. Однако в настоящий момент использованием неоднородного пространства CIELAB не является критическим моментом.

## 2.2. Материалы

Предполагается, что исходные изображения заданы в RGB, так как большинство цифровых устройств представления цветов хранят изображения в данном формате. Если в каком-либо случае это не так, изображения могут быть переведены в RGB либо напрямую в LAB, так как мы заинтересованы в представлении изображений в LAB.

Каждое отдельное изображение (статичное либо кадр видеопоследовательности) рассматривается как облако точек в трехмерном пространстве, т.е. каждый пиксел представлен как точка в 3D с координатами, соответствующими ее компонентам L, a и b (рисунок 1).



**Рисунок 1:** Пример изображения и соответствующего ему облака точек в CIELAB

Основываясь на результатах моделирования цветовосприятия дихроматами [4, 5, 6], каждой точке из RGB можно поставить в соответствие точку из видимой области протанопа, девтеранопа и тританопа. Эти уменьшенные области видимости получаются в результате «схлопывания» трехмерного куба RGB в некоторую поверхность, являющуюся подмножеством куба RGB. Далее по тексту эти области будут обозначаться для удобства как PRO и DEU.

## 2.3. Адаптация

После проецирования облака точек некоторого исходного изображения на поверхности PRO или DEU, также получается множество точек. Обозначим через  $d_{i,j}$  евклидово расстояние CIE76 в цветовом пространстве LAB между некоторыми двумя цветами  $C_i$  и  $C_j$ . Очевидно, что некоторые точки  $i$  и  $j$  (например, соответствующие красному и зеленому цветам), с большим для трихромата расстоянием  $d_{i,j}^N$  между ними в пространстве LAB (другими словами — хорошую различимость для трихромата), после проецирования на

поверхности PRO и DEU будут иметь более низкую различимость, т. е. малые значения  $d_{i,j}^P$  и  $d_{i,j}^D$  соответственно. Это легко заметить на Рисунке 2, так как поверхности PRO и DEU изменяются незначительно вдоль оси  $a$  (ось перехода от красного цвета к зеленому). Примеры подобного уменьшения контраста также приведены в Таблице 1.

Таблица 1: Сравнение расстояний между некоторыми цветами в областях видимости NORM, PRO, DEU.

	1	2	3
$c_i$ , как $[r \ g \ b]$	[238 108 27]	[241 47 5]	[142 88 38]
$c_j$ , как $[r \ g \ b]$	[56 106 10]	[64 119 15]	[79 119 35]
$d_{i,j}^N$	132.44	159.62	74.93
$d_{i,j}^P$	13.47	13.59	15.69
$d_{i,j}^D$	47.74	37.19	1.62

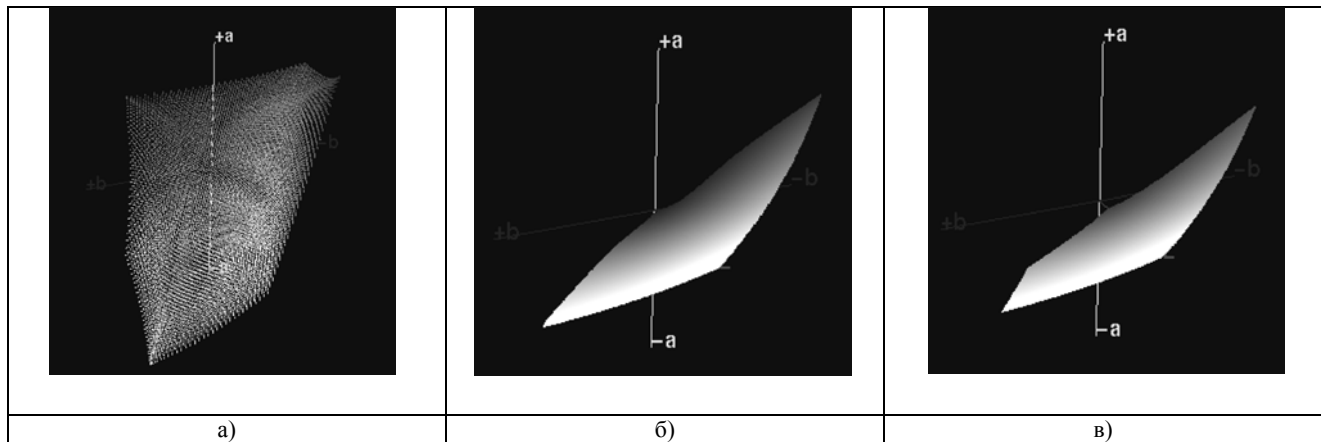


Рисунок 2: Области а) куба RGB в пространстве CIELAB; б) видимости протанопии; в) видимости дегтеранопии.

### 2.3.1 Общая схема адаптации

Общая формулировка метода адаптации изображений состоит в применении преобразований к облаку точек исходного изображения в цветовом пространстве LAB с целью минимизации некоторой функции стоимости. При помощи функции стоимости возможно сформулировать, как близко должно быть адаптированное изображение относительно исходного, либо насколько должен увеличиться цветовой контраст для пользователей с аномальным цветовосприятием после адаптации и т. д. Таким образом, общая формулировка проблемы может быть формализована следующим образом:

$$C_{optimized} = \arg \min_T (\alpha U^{CB}(C_T) + \beta U^N(C_T)) \quad (1)$$

где:

1.  $RGB_{LAB}$  — область в пространстве LAB, границы которой задаются всем возможными триплетами RGB некоторого взятого рабочего пространства RGB;
2.  $C$  - любое облако точек в LAB;

3.  $C^N$  - облако точек в LAB исходного изображения  $I$ ;
4.  $C^{CB}$  - «схлопнутое» облако точек исходного изображения, где  $CB \in \{PRO, DEU\}$ ;
5.  $T(\cdot)$  - любое преобразование, примененное к облаку точек  $C$  с единственным ограничением -  $C_T = T(C)$  должно оставаться внутри области  $RGB_{LAB}$ ;
6.  $U^{CB}(C_T)$  - функция стоимости, которая определяет, насколько «хорошим» является контраст адаптированного изображения для пользователей с аномальным цветовосприятием;
7.  $U^N(C_T)$  - функция стоимости, которая определяет, насколько цвета облака точек  $C_T$  изменились для пользователей с обычным

цветовосприятием по сравнению с исходным изображением  $C$ .

### 2.3.2 Оптимизация на основе аффинных преобразований.

Предложенный метод оптимизации цветов изображений состоит в применении двух аффинных преобразований (вращение и сдвиг) к облаку точек исходного изображения в цветовом пространстве LAB. Эти преобразования не изменяют евклидово расстояние между любыми двумя цветами в LAB, и в то же время посредством их возможно увеличить воспринимаемое различие между изначально смешивающихся для дихроматов цветов.

Этот процесс может быть представлен как совмещение облака точек с поверхностью видимой области дихромата. На каждой итерации процесса оптимизации производится поиск более лучшего положения и ориентации облака точек изображения по отношению к текущим. Это означает, что каждая точка из  $C$  может быть смещена на вектор  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  и повернута относительно центра облака точек на углы  $(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ . Масштабирование облака точек может применяться для того, чтобы не выйти за пределы области  $RGB_{LAB}$  на каждой итерации, а также для попытки максимального растягивания облака точек.

В таком случае функцию стоимости можно формально записать следующим образом:

$$U_{cost} = \alpha \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{N_C} \frac{|d_{i,j}^N - d_{i,j}^{CB}|}{N_C} + \beta \left( \sum_{i=1}^{N_C} \frac{|c_i - c_i^0|}{N_C} \right)^2 \quad (2)$$

где  $d_{i,j}^N$  - расстояние для пользователей с обычным цветовосприятием,  $d_{i,j}^{CB}$  - расстояние для пользователей с аномальным цветовосприятием,  $N_C$  - количество уникальных цветов, присутствующих на изображении (количество точек в облаке точек), а  $CB$ - либо  $PRO$ , либо  $DEU$ .

В общем случае критерий совмещения может быть сформулирован различными способами. Во-первых, мы можем также учитывать частоту встречаемости цветов и сформулировать взвешенную функцию стоимости. Во-вторых можно учитывать информацию о совместной встречаемости цветов, присутствующих на изображении в пределах некоторой окрестности (например, на расстоянии 3 или 5 пикселей). Это может быть осуществлено посредством специальной матрицы совместной встречаемости  $W$  (Рисунок 3, [7]). Количество столбцов и строк в этой матрице равно размеру цветовой палитры исходного изображения.

Элемент  $W_{i,j}$  матрицы  $W$  равен количеству цветов  $C_i$  и  $C_j$ , встречающихся на исходном изображении на расстоянии менее либо равных  $d$ .

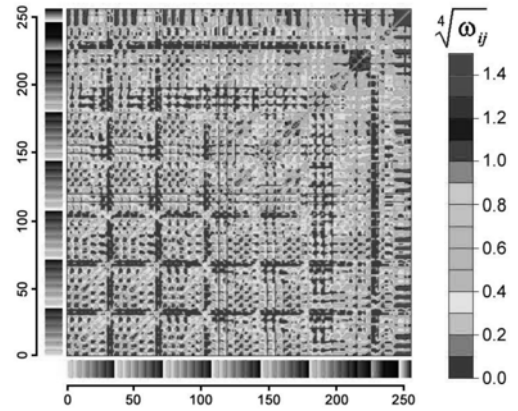
Например, взвешенную функцию стоимости можно определить как

$$U_w^{CB} = \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{N_C} |d_{i,j}^N - d_{i,j}^{CB}| (1+n_i)(1+n_j) \quad (3)$$

где  $n_i$  - относительная частота наиболее часто встречаемого цвета на изображении к частоте цвета  $C_i$ .

В обозначениях уравнения (1) предложенный метод адаптации имеет следующие параметры:

- $\alpha = 1, \beta = 1;$
- $C_T = T(C) = (\text{translate}(\text{rotate}(C)))$ ;
- $U^{CB} = U_{cost}$  из уравнения (1), либо  $U^{CB} = U_{cost}^w$  из уравнения (3).



**Рисунок 3:** Матрица частот совместной встречаемости цветов, вычисленная по базе, содержащей 12 000

изображений. Элементы матрицы  $W_{i,j}$  представлены с использованием нелинейного масштаба, приведенного справа. Высокие значения на диагонали матрицы были опущены для того, чтобы отразить детали остальной части матрицы.

До настоящего времени были протестированы два метода оптимизации для минимизации целевой функции (2). Первый метод называется Дифференциальная эволюция [8], и был разработан для поиска с высокой вероятностью глобального минимума многомерных, нелинейных, многомодальных функций стоимости. Так как данный метод относится к классу стохастических методов оптимизации, результаты оптимизации, вообще говоря, могут несколько отличаться на одних и тех же входных данных.

Второй метод называется методом градиентного спуска и имеет преимущество перед предыдущим в том, что дает один и тот же результат на одних и тех же входных данных. Однако он может привести к нахождению локального минимума, пропустив глобальный. Также он довольно сильно зависит от шагов дискретизации величин  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ .

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Набор тестовых изображений состоял из следующих групп: 1) тесты Рабкина; 2) классические картины; 3)

изображения природы; 4) изображения сцен внутри помещений. Был проведен сбор большой базы таких изображений и осуществлена автоматическая массовая адаптация. В зависимости от содержимого изображений отношение

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый метод адаптации цветного содержимого для пользователей с аномальным цветовосприятием. Сформулирована общая схема адаптации и потенциальные области ее применения. Также описан один из частных подходов адаптации на основе жестких аффинных преобразований. Эффективность метода была протестирована на основе симуляции видения дихроматов, а также самими пользователями с аномальным цветовосприятием.

Дальнейшая работа будет посвящена трем направлениям: 1) повышению вычислительной эффективности реализации метода; 2) осуществление масштабного тестирования разработанного метода с привлечением тестовой группы людей с аномальным цветовосприятием; 3) исследование других способов формулировки целевой функции и, следовательно, возможности задания других целей адаптации; 4) проведение исследований по сохранению эстетической привлекательности изображений после адаптации. Последний аспект является очень важным, так как желательный эмоциональный эффект от восприятия цветного содержимого должен быть сохранен в каждой области применения. Следует отметить, что это сложная задача, так как тесно связана с психологическими процессами, которые на данный момент формализованы достаточно плохо.

$$\frac{U_{\text{cost}}(C) - U_{\text{cost}}(C_T)}{U_{\text{cost}}(C)} * 100\%$$

изменялось приблизительно от 15% до 45%.

#### 5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Hunt, R.W. Measuring Color: 3rd edition / R.W. Hunt. - Fountain Press, 1998.
- [2] Clarke, F. Modification to the JPC79 colour-difference formula / F. Clarke, R. McDonald, B. Rigg // Journal of the Society of Dyers and Colourists. - № 100. - 1984. - P. 128–132 and P. 281–282.
- [3] Luo, M.R. The development of the CIE 2000 colour difference formula / M.R. Luo, G. Cui, B. Rigg // Color Research and Application. - № 26. - 2001. - P. 340–350.
- [4] What do color-blind people see? / F. Viénot [et al.] // Nature. - № 376. - 1995. - P.127–128.
- [5] Brettel, H. Computerized simulation of color appearance for dichromats / H. Brettel, F. Viénot, J. Mollon // Journal Optical Society of America. - № 14. - 1997. - P. 2647–2655.
- [6] Viénot, F. Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats / F. Viénot, H. Brettel, J. Mollon // Color Research and Application. - № 24. - 1999. - P. 243–252.
- [7] Kovalev, V. Optimising the choice of colours of an image database for dichromats / V. Kovalev, M. Petrou // Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition. - 2005. - P. 456–465.
- [8] Storn, R. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces / R. Storn, K. Price // Journal of Global Optimization. - № 11. - 1997. - P. 341–359.