

УДК 620.179.680

**Горда Елена Владимировна**

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий проектирования и прикладной математики, ORCID: 0000-0001-73-80-0533

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

**ЦВЕТОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ  
ДЕФЕКТА ТИПА "ТРЕЩИНА"**

*Аннотация.* В последние десятилетия наблюдается быстрое развитие технологий и методов компьютерной обработки цифровых изображений. Актуальность моделирования цветковых пространств изображений определяется необходимостью и возможностью реализации различных подходов в исследовании задач распознавания образов. В работе предложена модель цветковых пространств цифровых изображений на основе функций специального вида, которая позволяет построить адекватную топологию распределения цвета по изображению с учетом специфики распределения цветов на дискретном цифровом изображении. Описаны свойства этих функций.

**Ключевые слова:** цифровое изображение; цветовая модель; замыкание операций; класс; порядок; эквивалентность

**Актуальность**

В последние десятилетия наблюдается быстрое развитие аппаратных средств получения и хранения цифровых изображений, а также технологий и методов их компьютерной обработки. Многие физические явления и характеризующие их параметры являются визуально наблюдаемыми. Объекты различной природы на цветном изображении отображаются с помощью цвета и формы [1]. Это открывает новые возможности использования оптических методов для изучения и распознавания на основе цифровых фото.

Поскольку цифровое изображение представляет собой набор областей различного цвета, то цвет также задается численно. Определение характеристик цвета является важной проблемой для восприятия и представления цвета с помощью технических устройств, а также в задачах сегментации (выделения областей по признакам), цветокоррекции и т.д.

Для измерения и сохранения информации о цвете в первую очередь необходимо иметь представление о его фундаментальных физических свойствах и психологических особенностях восприятия. В современных методах обработки изображений основой является тот факт, что любое изображение может быть представлено дискретным набором точек, которые описываются набором числовых данных, записанных в определенном формате [1; 2].

Дискретно цвет задается цветовой градацией по цветовой и яркостной шкале, что определяет количество оттенков. Принципиально источником

цвета может быть цвет от излучаемого объекта и от отраженного света, а цветовые модели делят на три типа [3; 5]:

- перцепционные (по восприятию);
- аддитивные (складывающиеся или дополняющие);
- субтрактивные (основанные на вычитании).

Наиболее используемой является модель RGB (red, green, blue), которая лежит в основе человеческого восприятия цветов, а также является языком систем для сканеров, мониторов компьютеров и телевизоров, а также для других электронных устройств.

Актуальность моделирования цветковых пространств изображений определяется необходимостью и возможностью реализации различных подходов в исследовании задач распознавания образов на основе цифровых изображений.

**Цель статьи**

Основной целью данной работы является построение математической цветовой модели цифрового изображения, в частности изображения дефекта типа "трещина".

**Изложение основного материала**

При построении цветовой модели необходимо учитывать следующие положения:

- цвет должен определяться стандартным способом, независимо от конкретного устройства;
- первичным является тот факт, что изображение представляет собой совокупность цветковых пятен и их форм;

– вторично – асоціації и кластера, которые строятся на основе первичной информации;  
 – модель должна точно определять гамму или диапазон задаваемых цветов, учитывая особенности восприятия, пропускания или отражения света.

Принципиально, что способ получения цветов базируется на следующих законах [1; 3; 8]:

– все цвета делятся на две группы: хроматические – имеющие цветовой оттенок; ахроматические – не имеющие цветового оттенка ;

– смешение любого хроматического цвета с дополнительным в определенных пропорциях дает ахроматический цвет, а в других пропорциях – хроматический с уменьшением насыщенности;

– смешение не дополнительных цветов дает промежуточные цвета, которые расположены в цветовом круге между смешиванием;

– цветовое моделирование цифровых изображений, как подход, должен обеспечивать адекватность представления наблюдаемого технического состояния реального объекта при фиксации изображения как дискретного.

**Построение математической модели цвета на цифровом изображении**

Рассмотрим класс функций  $\alpha(x)$ , представимых в виде суммы:

$$\alpha(x) = \beta(x) + \gamma(x),$$

где функции  $\beta(x)$  и  $\gamma(x)$  имеют следующие свойства (рис. 1, 2):

1)  $\forall x$

$$\gamma(x) = \begin{cases} \{\gamma\} - \text{замкнуто по } \oplus \text{ и } \lambda \otimes, \lambda - \text{const}, \lambda \geq 0 \\ E(\gamma): [0, x_{\max}] \\ \gamma_{\max} - \gamma_{\min} < \delta \\ \begin{matrix} x_{\max} \\ \text{Var } \gamma(x) < \infty \\ 0 \end{matrix} \\ \mu(x: \{\gamma(x) = 0\}) \ll \delta - \text{где } \mu(\cdot) - \text{мера Лебега,} \\ \text{очень мала на конечном множестве } \{x_i\} \end{cases}$$

$$\forall x: \gamma_1 + \gamma_2 = \gamma_3.$$

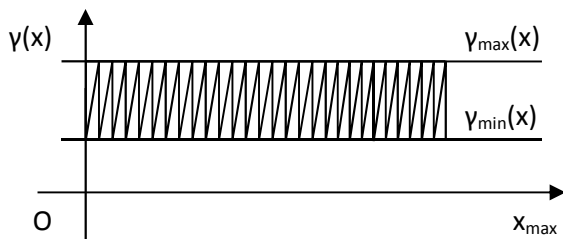


Рисунок 1 – Графическое представление функции  $\gamma(x)$

2)  $\forall x \in [0, x_{\max}]$

$$\beta(x) = \begin{cases} \beta = 0 \quad \forall x [0, x_L^\beta] \cup (x_R^\beta, x_{\max}] \\ \beta = C_\beta - \text{const} \quad \forall x \in [x_L^\beta, x_R^\beta] \\ C_\beta = \max_{x \in [x_L^\beta, x_R^\beta]} \beta(x) \\ \begin{matrix} x_{\max} \\ \text{Var } \gamma(x) \ll \varepsilon \\ 0 \end{matrix} \end{cases}$$

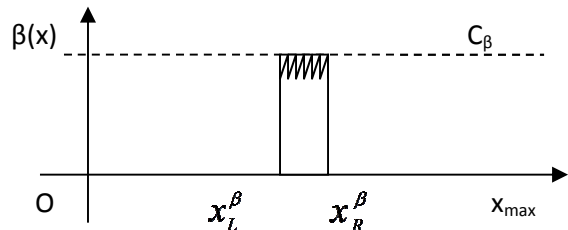


Рисунок 2 - Графическое представление функции  $\beta(x)$

Причем

$$\beta_1(x) + \beta_2(x) = \beta_3(x) \equiv$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_L^{\beta_3} = x_L^{\beta_2} \\ x_R^{\beta_3} = x_R^{\beta_1} \\ C_{\beta_1} \quad \forall x \in [x_L^{\beta_3}, x_R^{\beta_1}] \\ C_{\beta_2} \quad \forall x \in [x_L^{\beta_2}, x_R^{\beta_3}] \\ 0 \text{ для всех остальных } x \end{array} \right\}$$

$$\lambda_1 \beta_1(x) + \lambda_2 \beta_2(x) = \beta_3(x) \equiv [x_L^{\beta_1}, x_R^{\beta_1}] \cap [x_L^{\beta_2}, x_R^{\beta_2}] \neq \emptyset,$$

где  $\lambda_1, \lambda_2 - \text{const}$  (рис. 3).

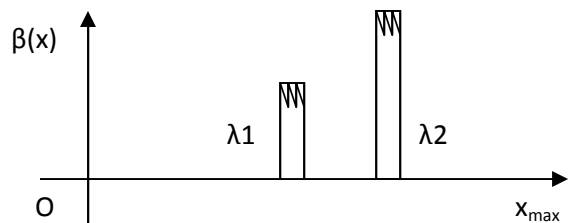


Рисунок 3 - Графическое представление случая наличия двух хроматических цветов

Определим свойства функции  $\alpha(x)$ .

1.1. Функция  $\alpha(x)$  – замкнута по операциям:

1) для отраженного света из законов сохранения энергии следует:

$$\sum_i \beta_i \leq B, \quad \sum_i \gamma_i \leq \Gamma,$$

где  $B, \Gamma - \text{const}$  ;

2) операции "+", "\*" – определены для замкнутых и активно формируемых изображений без люминесценции.

Для отраженного света из законов сохранения энергии следует:

$$\sum_i \beta_i \leq B, \sum_i \gamma_i \leq \Gamma.$$

1.2. Любую непрерывную функцию на отрезке  $[0, x_{\max}]$  можно разложить по функции  $\alpha(x)$  (приблизить рядом  $\{\alpha_i\}$ ).

1.3. Одномодовая функция  $\beta(x)$  представляет собой цвет в терминах монохроматического излучения. В общем случае – это смесь монохроматических цветов, что соответствует ее полимодальности. Как известно, любой цвет может быть представлен как соответствующая сумма трех монохроматических цветов и функции светлости  $\gamma(x)$ .

1.4. Отношение

$$\left| \frac{\beta(x) - \gamma(x)}{P_\beta(x)} \right|$$

соответствует насыщенности цвета  $\beta(x)$ , где  $P_\beta(x)$  – цветовой порог различия для цвета  $\beta(x)$ .

1.5. Пусть  $\Omega$  – некоторая монохромно окрашенная область на цветном цифровом изображении  $ISO(\cdot)$ . Обозначим  $\Omega_{\alpha,k}$  – область, для которой справедливо:

$$\alpha_\Omega(x) = \beta(x) + k\gamma(x)$$

и определим цветовую границу как:

$$C_{\Omega_1\Omega_2\alpha_1k_1k_2} \equiv \{[d_1, d_2, d_3] \in R^3\},$$

где  $\Omega$  – связная область:

$$\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2, \Omega_1 \cap \Omega_2 \neq \emptyset;$$

$$\Omega_1 = \text{supp}(\alpha_{k_1}), \Omega_2 = \text{supp}(\alpha_{k_2}),$$

$\Omega_1, \Omega_2$  – монохромно окрашенные области.

В наблюдаемом объекте данный случай соответствует изменению ориентации плоскости объекта в  $R^3$  при сохранении цветности.

Определение обобщается на связную  $n$ -компонентную область с одной цветностью  $\beta(x)$ .

1.6. Не существует локальных доминантных частот кроме одной доминирующей частоты, соответствующей  $\beta_\Omega(x)$ , где

$$x \in [x_L, x_R] \wedge \|x_R - x_L\| < \varepsilon.$$

1.7. Определим края области по цвету как:

$\{d_1, d_2, d_3\}$  – односвязную область, для которой

$$\Omega_1 \subset \Omega, \Omega_2 \subset \Omega, d_i \in R \text{ – координаты,}$$

если

$$\exists \lim_{k_1 \uparrow} C_{\Omega_1\Omega_2\alpha_1k_1k_2} = \lim_{k_2 \uparrow} C_{\Omega_2\Omega_1\alpha_1k_2}.$$

1.8. Если

$$\neg \exists \lim_{k_1 \uparrow} C_{\Omega_1\Omega_2\alpha_1k_1k_2} \Rightarrow \exists \text{ разделяющая область } \Omega_3,$$

для которой:

$$\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \text{ и } \beta_3 \neq \beta_2 \neq \beta_1.$$

1.9. Выделение изолированной окрестности  $\omega$  по цвету  $\beta_1$  определяется как:

$$\exists \alpha_\omega(x) = \beta_\omega(x) + \gamma_\omega(x);$$

$$\beta_\omega(x) \neq \beta(x), \beta_{\Omega \setminus \omega}(x) = \beta(x), \omega \in \Omega,$$

$\omega$  – связное множество.

Если  $\omega = \{\omega_i\}$  – изолированные по связности и цветности точки  $\Rightarrow \omega$  – шум.

1.10. Используя функцию  $\alpha(x)$ , выполним классификацию структуры цвета в окрестности ( $\omega$ ). Будем считать, что фон имеет цветность 0, тогда можно выделить следующие случаи:

а)  $\beta(x) \equiv 0 \Rightarrow$  окрестность представляет фон изображения;

б)  $\exists! \beta(x) \neq 0 \Rightarrow$  одноцветная окрестность со следующей особенностью:

$$\exists! \beta(x) \text{ – без границ по яркости;}$$

$$\exists \beta_i(x), i > 1 \text{ – с границей по яркости;}$$

в)  $\exists \alpha_{1\omega_1}(x) = \beta_{1\omega_1}(x) + \gamma_{1\omega_1}(x): \omega_1 \in \Omega$

$\omega_1$  – односвязное;

$$\exists \alpha_{2\omega_2}(x) = \beta_{2\omega_2}(x) + \gamma_{2\omega_2}(x): \omega_2 \in \Omega;$$

$\omega_2$  – односвязное

–  $\omega_1 \cap \omega_2 = \emptyset, \omega_1 \cup \omega_2 = \Omega \Rightarrow \Omega$  – простая двухцветная область;

$$- \omega_1 \cap \omega_2 = \emptyset, \omega_1 \cup \omega_2 \subset \Omega \Rightarrow \Omega -$$

двухцветная область с разделительным цветом, если не существует простого общего контура [9], иначе:

$$\exists \Omega_1 \subset \Omega: \Omega_1 = \omega_1 \cup \omega_2, \Omega_1 \text{ – односвязная;}$$

г)  $\omega$  – является регулярной структурой на  $\Omega$ , если:

$$\omega = \bigcup_i^n \omega_i,$$

где  $\omega_i$  – разделенные подобласти с заданным шагом  $sh(\omega) \geq 0, \forall i \omega_i$  – простые  $k$ -цветные области, для которых

$$\forall i, j \omega_i \sim \omega_j \text{ [9].}$$

$\Omega$  – трансформируется по цвету в двухцветную область с разделением цвета, заменой цвета  $\omega_i$  на цвет отличный от  $\Omega$ ;

д)  $\omega$  – есть нерегулярная структура на  $\Omega$ , если  $\omega = \{\omega_i\}$  – не разделенные подобласти (\*) с произвольным шагом  $sh(\omega)$ :

$$\forall i \omega_i \text{ – простые } k\text{-цветные области;}$$

$$\forall i, j \omega_i \not\sim \omega_j \text{ (*).}$$

Определим чистоту цвета  $\beta(x)$  на окрестности  $\omega$  как:

$$CC(\beta, \omega) = \frac{\int_{x_L}^{x_R} \beta(x) dx}{\int_0^{x_{\max}} \sum_{i=1}^n \beta_i(x) dx + \gamma_{\beta}(x) \cdot x_{\max}},$$

где

$$\int_{x_L}^{x_R} \beta(x) dx \equiv I(\beta) - \text{яркость цвета.}$$

Такое определение чистоты цвета в случае  $n=1$  совпадает с классическим определением, а в случае  $n>1$  учитывает все множество монохромных составляющих цвета в окрестности  $\omega$ , при этом значение  $CC(\beta, \omega)$  остается инвариантным относительно выбора системы монохромных составляющих, так как значение знаменателя остается постоянным.

Рассмотрим процесс слияния областей  $\Omega_i$  по цвету. Тенденцию деформации  $\alpha_{\Omega_1}(x)$  в направлении  $\alpha_{\Omega_2}(x)$  определяют две деформации:

$$1) \exists x_L^0 \in O(\emptyset):$$

$$CC(\beta_1, \Omega_1) < CC(\beta_2, O(x_L^0)) \sim CC(\beta_2, \Omega_2);$$

$$2) \exists x_R^0 \in O(x_{\max}):$$

$$CC(\beta_1, \Omega_1) < CC(\beta_2, O(x_R^0)) \sim CC(\beta_2, \Omega_2).$$

При этом возможны четыре ситуации относительно яркости цвета на областях  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ :

$$- \forall x \in O(\cdot; x_L^0): I(\beta_1) \uparrow \wedge I(\beta_2) \downarrow$$

$$: I(\beta_1) \downarrow \wedge I(\beta_2) \uparrow$$

$$- \forall x \in O(\cdot; x_R^0): I(\beta_1) \uparrow \wedge I(\beta_2) \downarrow$$

$$: I(\beta_1) \downarrow \wedge I(\beta_2) \uparrow.$$

Однотипные монотонности в пограничных точках  $x_L^0$  и  $x_R^0$  возможны лишь только в том случае, если

$$\exists \Omega_3 : \Omega_1 \subset \Omega_3, \Omega_2 \subset \Omega_3$$

и

$$\exists \alpha_3(x) = \beta_3(x) + \gamma_3(x)$$

с соответствующими тенденциями в этих пограничных точках.

Если  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  содержат кромку "зуба" цветности, то есть для цветности  $\beta(x)$  на  $\Omega_1 \cup \Omega_2$

$$\exists x_0^C : \beta_1(x_0^C) = \beta_2(x_0^C),$$

то

$$\beta(x_0^C - 0) \equiv \beta_1(x)$$

$$\beta(x_0^C + 0) \equiv \beta_2(x).$$

С учетом вышеизложенного существует три вида функции  $\beta(x)$ , представленные на границах:

– рис. 4 – соответствует колебанию светлости  $\gamma(x)$  при отсутствии доминанты цветов  $\beta_1(x)$  или  $\beta_2(x)$ ;

– рис. 5 – соответствует доминированию одного из цветов  $\beta_1(x)$  или  $\beta_2(x)$ ;

– рис. 6 – соответствует смене доминирования в паре цветов  $\beta_1(x)$  и  $\beta_2(x)$ .

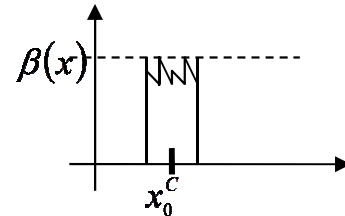


Рисунок 4 - Представление функции  $\beta(x)$  на границах при отсутствии доминанты цветов

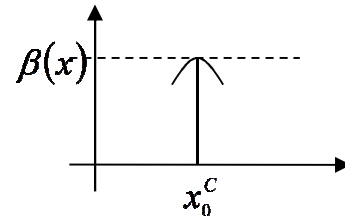


Рисунок 5 - Представление функции  $\beta(x)$  на границах при доминировании одного цвета

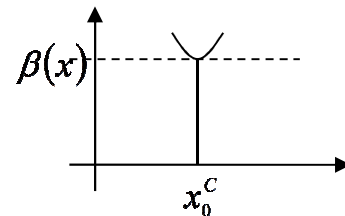


Рисунок 6 - Представление функции  $\beta(x)$  на границах при смене доминирования в паре цветов

**Определение.** Цветовой моделью изображения дефекта типа "трещина" будем называть объединение областей цветности:

$$ISO(S) = \bigcup_{i=1}^n S_i,$$

где

$$S_i : \left\{ \begin{array}{l} \exists \{\omega_{S_i}\} \cup \omega_{S_i} \equiv E(S_i); \forall \omega_i \subset \Omega, \\ \exists \alpha_{S_i, \omega}(x) = \beta_{S_i, \omega}(x) + \gamma_{S_i, \omega}(x), \\ \beta(\omega_{S_i}) \subset [L_{S_i}, R_{S_i}] \quad \gamma_{S_i}^{\min} \leq \gamma_{\omega_{S_i}}(x) \leq \gamma_{S_i}^{\max} \end{array} \right\}$$

$$\bigcup_i E(S_i) = \Omega$$

$$\forall i, j: E(S_i) \cap E(S_j) = \emptyset$$

$$S = \{S_i\}.$$

$$\exists \begin{pmatrix} j_1 \\ \dots \\ j_{I+K} \end{pmatrix}, I+K = J$$

1. Эквивалентность изображений дефекта типа "трещина" можно определить как:

$$ISO_1(S) \sim ISO_2(S) \Leftrightarrow \exists (j_1, \dots, j_n)$$

$$\begin{pmatrix} i_1^1, \dots, i_n^1 \\ \dots \\ j_1 \\ \dots \\ j_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_1^2, \dots, i_n^2 \\ \dots \\ j_1 \\ \dots \\ j_n \end{pmatrix}.$$

2. Определим цветовой атлас изображения дефекта типа "трещина" как:

$$AISO(S_i) = ISO(S_i) \Big|_{\alpha_{S_i}} \omega(x) = \beta_{S_i} \omega(x),$$

т.е. без цвета светлости.

3.  $ISO_1(S) \subset ISO_2(S) \Leftrightarrow \exists ISO_3(S_n)$

$$ISO_2(S_j) = ISO_1(S_i) \cup ISO_3(S_k)$$

$$(j_1^2, \dots, j_j^2) = (i_1^1, \dots, i_l^1, k_1^3, \dots, k_k^3) \begin{pmatrix} j_1 \\ \dots \\ j_{I+K} \end{pmatrix}$$

$$\forall \omega_{S_i} \exists k(\omega_{S_i}^1): \omega_{S_i}^1 \subset \omega_{S_k}^2.$$

Таким образом, на рассматриваемом классе цветowych моделей задан частичный порядок по включению.

### Вывод

Предложенная цветовая модель изображения позволяет построить адекватную топологию распределения цвета по изображениям и учитывать специфику распределения цветов на дискретном цифровом изображении.

### Список літератури

1. Ивэнс, Р. М. Введение в теорию цвета. – М.: Мир, 1964. – 442 с.
2. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – 790 с.
3. Шашлов, Б. А. Цвет и цветовоспроизведение. – М.: Книга, 1995. – 280 с.
4. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Изд-во Техносфера, 2006. – 1072 с.
5. Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений. / В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 195 с.
6. Артюшин, Л. Ф. Цветоведение. – М.: Книга, 1982. – 200 с.
7. Статьи по теории цвета [Электронный ресурс] / Безрядин С. Н. и др. Режим доступа – [http://kveii.com/site/color\\_theory/color\\_theory\\_content\\_ru.html](http://kveii.com/site/color_theory/color_theory_content_ru.html) Дата: март, 2015.
8. Горда, О. В. Дослідження функції присутності дефекту типу «тріщина» на цифрових зображеннях об'єктів будівництва // Управління розвитком складних систем. – 2012. Вип. 10. – С. 75 – 80.
9. Горда, О. В. Моделювання метрик в просторі цифрового зображення дефекту типу "тріщина" // Управління розвитком складних систем. – 2014. – Вип. 17. – С. 112-120.
10. Попов, С.А. Исследование ошибок цветовоспроизведения и построение моделей коррекции цвета цифровых фотографий // Вести. Новг. гос. ун-та. Сер. : Естеств. и техн. науки. – 2003. – № 23. – С. 100 -108.

Статья поступила в редколлегию 18.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Михайленко, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев.

#### Горда Олена Володимирівна

Кандидат технічних наук, доцент, викладач кафедри інформаційних технологій проектування і прикладної математики Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

#### КОЛІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ ДЕФЕКТУ ТИПУ "ТРИЩИНА"

**Анотація.** За останні десятиліття спостерігається швидкий розвиток технологій та методів комп'ютерної обробки цифрових зображень. Актуальність моделювання кольорних просторів зображення визначається необхідністю та можливістю реалізації різноманітних підходів у дослідженні задач розпізнання образів. В роботі визначено модель кольорних просторів цифрових зображень на основі функцій спеціального вигляду, яка дозволяє побудувати адекватний розподіл кольору на зображенні з урахуванням специфіки розподілу кольору на дискретному цифровому зображенні. Описано властивості цих функцій.

**Ключові слова:** цифрове зображення; кольорна модель; замикання операцій; клас; порядок; еквівалентність

**Gorda Elena**

PhD, lecturer in software systems

*Cherkasy State Technological University, Cherkasy*

### COLOR SIMULATION OF DIGITAL IMAGE DEFECTS SUCH AS "CRACK"

**Abstract.** *There is growth of technologies and methods of the computer processing of digital images in the last decades. Actuality of design of color spaces of images is determined by a necessity and market ability of different approaches for research of tasks of recognition of patterns. The model of color spaces of digital representations is in-process offered on the basis of functions of the special kind, that allows to build the adequate topology of distribution of color on an image taking into account the specific of distribution of colors on discrete digital representation. There were described the properties of this functions.*

**Key words:** *digital representation; color model; shorting of operation; class; order; equivalence*

#### References

1. Evans, R. M. (1964). *Introduction to color*. Moscow, Russia: Mir, 442.
2. Pratt, W. (1982). *Digital Image Processing*. Moscow, Russia: Mir, 790.
3. Shashlov, B.A. (1995). *Color and color reproduction*. Moscow, Russia: Book, 280.
4. Gonzalez, R. Woods, R. (2006). *Digital Image Processing*. Moscow, Russia: Technosphere, 1072.
5. Fissenko, V.T. & Fissenko, T. Y. (2008). *Computer image processing and recognition*. SPb., ussia: ITMO, 195.
6. Artiushin, L.F. (1982). *Chromatics*. Moscow, Russia: Book, 200.
7. *Articles on color theory [Electronic resource]/ Bezryadin S. N. et al.*  
Access mode – [http://kveii.com/site/color\\_theory/color\\_theory\\_content\\_ru.html](http://kveii.com/site/color_theory/color_theory_content_ru.html). Data: March, 2015.
8. Gorda, O. V. (2012). *Study of the presence function of defects such as "crack" on digital images of construction objects*. *Management of Development of Complex Systems*, 10, 75 – 80.
9. Gorda, O.V. (2014). *Modeling of metrics in the space of the digital image defects such as "crack"*. *Management of Development of Complex System*. Kyiv, Ukraine: KNUBA, 17, 112-120.
10. Popov, C.A. (2003). *The study of color reproduction errors and construction of models of color correction of digital photos*. *News. NovSU. state. Univ. Ser. : Nature. and tehn. Science*, № 23, 100 -108.

---

#### Ссылка на публикацию

- APA Gorda Elena (2015). *Color simulation of digital image defects such as "crack"*. *Management of Development of Complex Systems*, 23 (1), 127-132.
- ГОСТ Горда Е.В. Цветовое моделирование цифрового изображения дефекта типа "трещина" [Текст] / Е.В. Горда // *Управление развитием сложных систем*. – 2015. – № 23 (1). – С. 127-132.