

УДК 612.845.552: 004.932

DOI 10.52928/2070-1624-2025-44-1-25-31

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЯРКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОМОЩИ ЛЮДЯМ С АХРОМАТОПСИЕЙ В ВИЗУАЛЬНОМ ВОСПРИЯТИИ ИНФОРМАЦИИ

В. В. СИНИЦЫНА

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Проанализирована такая редкая и тяжелая аномалия цветового зрения, как ахроматопсия, а также изучены существующие методы, предназначенные для помощи ахроматопам в корректном восприятии визуальной информации. Представлен разработанный метод преобразования яркости изображений, направленный на помощь людям с полной ахроматопсией в различении схожих в их восприятии цветов, где сходство определяется согласно показателю порога цветоразличения. Кроме того, в данном методе учитываются особенности цветовосприятия ахроматопов посредством предоставления возможности использования персонализированного коэффициента преобразования яркости. В результате проверки метода на корректность работы при помощи симуляции ахроматопического зрения отмечено увеличение колориметрического отклонения между ранее неразличимыми ахроматопами цветами и, соответственно, появление возможности отличать такие цвета друг от друга. Уменьшилась потеря контраста между исходным цветным изображением и рекolorизованным изображением в оттенках серого.

Ключевые слова: аномалии цветового зрения, особенности цветовосприятия, цветовая информация, ахроматопсия, колориметрическое отклонение, кластеризация, квантованные цвета, цветовые пространства, рекolorизация, яркость, оттенки серого.

Введение. На сегодняшний день ахроматопсия является наиболее тяжелым, но наименее распространенным видом аномалий цветового зрения, так как встречается лишь у 1 из 30 000 человек на земном шаре. Ахроматопсия бывает полной, при которой наблюдается абсолютное отсутствие восприятия цвета и такие сопутствующие заболевания, как нистагм и светобоязнь, и неполной, которая характеризуется незначительным цветоразличением, а нистагм и светобоязнь либо отсутствуют, либо проявляются в более легкой форме [1]. Наиболее распространенной является полная ахроматопсия. Кроме того, встречается как врожденная ахроматопсия, так и приобретенная. Приобретенная ахроматопсия именуется церебральной (или центральной) и связана с повреждением коры головного мозга [2]. В ICD-11 (International Classification of Diseases 11th Revision) ахроматопсия отнесена к нарушениям цветового зрения (код 9D44) и наследственным дистрофиям сетчатки (код 9B70)¹.

Ахроматопсия представляет собой аномалию цветового зрения, при которой наблюдается дисфункция колбочковой системы. Однако в темное время суток ахроматопы хорошо ориентируются в пространстве вследствие корректно функционирующих палочек, представляющих собой клетки-рецепторы сетчатки, чувствительные к силе света и действующие преимущественно при сумеречном или ночном зрении. Проблема же восприятия объектов людьми с ахроматопсией состоит в невозможности отличать объекты, оригинальные цвета которых различны, а преобразованные в оттенки серого – неразличимы. Кроме того, из-за таких сопутствующих заболеваний, как светобоязнь, нистагм, а также зачастую гиперметропия или, реже, миопия, ахроматопы обычно используют в повседневной жизни солнцезащитные очки, а также очки для коррекции гиперметропии или миопии.

В литературе описаны два основных метода, которые призваны помочь людям с ахроматопсией в корректном восприятии визуальной информации посредством изменения цветовых характеристик изображений. Метод, предложенный Rasche et al. [3], основывается на предположении, что воспринимаемая разница между любыми двумя цветами пропорциональна их соответствующей воспринимаемой разнице в оттенках серого цвета. Это предположение выражается в минимизации функции ошибок для гарантии того, что неразличимые цвета будут иметь различные значения яркости. Rasche et al.'s метод [4] дополняет предыдущий, используя целевую константу пропорциональности K . Идея данного метода состоит в сохранении постоянства яркости и контраста. Контраст не меняет своего значения благодаря сохранению относительного расстояния между каждой парой цветов. В Zhu et al.'s исследовании [5] указано, что для решения проблемы восприятия визуальной информации монохроматами также возможно использование методов преобразования изображений в оттенки серого для черно-белой печати.

Стоит отметить, что в существующих методах не указаны используемые последовательности обработки цветов, а также не уделено внимание помощи людям с ахроматопсией в возможности различать цвета, схожие в восприятии ахроматопов, но совершенно отличные в представлении нормальных трихроматов, не учитывается наличие у людей с ахроматопсией светобоязни.

Таким образом, цель исследования – разработать метод обработки изображений для помощи людям с полной ахроматопсией в восприятии визуальной информации, учитывающий преимущества и недостатки

¹ ICD-11 Coding Tool [website]. URL: https://icd.who.int/ct/icd11_mms/en/2025-01/.

существующих методов и особенности цветовосприятия ахроматопов. Ориентация на людей с полной ахроматопсией связана с большей распространенностью такой формы ахроматопсии, а также с отсутствием в литературе точных сведений, как именно человек с неполной ахроматопсией воспринимает окружающую его визуальную информацию.

Выделены следующие задачи исследования:

- на основании анализа существующих методов и особенностей полной ахроматопсии разработать метод обработки изображений для ахроматопов;
- применить разработанный метод к тестовому изображению и оценить полученные результаты по показателям качества;
- сделать выводы о корректности разработанного метода.

Метод обработки изображений для людей с ахроматопсией. Для преобразования изображений в оттенки серого цвета с целью их наиболее корректного восприятия людьми с ахроматопсией используется следующая последовательность действий.

1. Все преобразования происходят в цветовом пространстве CIE L*a*b*, так как колориметрическая система Lab данного пространства используется для оценки сходств и различий цветовых параметров объектов, что особенно важно для определения сходства цветов с целью их последующей модификации для помощи ахроматопам. Так, исходное изображение конвертируется из цветового пространства RGB в оттенки серого следующим образом: сперва загруженное изображение преобразуется в оттенки серого согласно алгоритму NTSC² вида

$$Y = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B, \quad (1)$$

затем данное изображение в оттенках серого конвертируется в цветовое пространство CIE L*a*b*.

2. Для уменьшения сложности вычислений с одновременным сохранением изображения в виде, наиболее близком к исходному, к полученному изображению в оттенках серого применяется кластеризация k -средних. Стоит отметить, что одним из ключевых параметров в данной кластеризации является так называемый флаг, указывающий, каким образом берутся начальные центры кластеров. Так, экспериментально определено, что наилучшие результаты показывает использование флага KMEANS_PP_CENTERS [6].

Так как при использовании данного вида кластеризации необходимо задать количество кластеров, в качестве решения используется следующее: константой задается выбранное в результате экспериментов значение количества кластеров $K = 100$. Данное значение было определено в процессе кластеризации изображений с количеством уникальных цветов, не превышающим 180 000, а также последующего сравнения детализации объектов на кластеризованном и исходном изображениях.

В случае же обработки изображения, для которого количество имеющихся цветов представлено числом, меньшим чем 100, среди квантованных значений будет довольно много близких друг к другу и даже одинаковых значений. Следовательно, необходимо удалить дубликаты, а также отсортировать квантованные цвета от меньшего значения яркости цвета к большему.

3. Найденные квантованные цвета следует определить в пары «ключ – значение» так, чтобы в одной паре находились цвета, полное отклонение которых друг от друга будет менее или равно 4 в оттенках серого, так как при пороге цветоразличения $\Delta E_{ab}^* \leq 4$ цвета воспринимаются как зрительно неразличимые [7], но больше 4 в исходном изображении. В качестве значения для соответствующего ключа будет взято первое из отсортированного списка квантованных цветов значение, удовлетворяющее данному условию. Кроме того, для сохранения в неизменном виде оттенков серого, имеющихся в исходном изображении, такие цвета не сохраняются в качестве цветов-ключей, а используются лишь как цвета-значения.

4. Затем значения яркостей цветов в таких парах меняются согласно следующему условию: если яркость цвета-ключа больше яркости цвета-значения, то к яркости цвета-ключа прибавляется разность коэффициента преобразования яркости Δ и разности яркостей ключа и значения, в противном случае от яркости цвета-ключа отнимается разность Δ и разности яркостей значения и ключа. Коэффициент Δ выбирается самим ахроматопом на основании просмотра изображения, причем минимальным значением считается порог цветоразличения, равный 4. Данное преобразование для некоторых яркостей L_{key} и L_{value} в общем виде выражается формулой

$$L'_{key} = L_{key} \pm (\Delta - |L_{key} - L_{value}|), \quad (2)$$

где $| |$ – модуль разности яркостей L_{key} и L_{value} ;

Δ – коэффициент преобразования яркости.

² Алгоритм NTSC (National Television Standards Committee) принят в качестве общего подхода для преобразования RGB в оттенки серого и направлен на обеспечение лучшей корреляции между светлотой и яркостью, воспринимаемой человеческим глазом, а также отражает относительное восприятие среднестатистическим человеком яркости красного, зеленого и синего света.

5. После вышеописанных действий каждой яркости цвета-ключа будет поставлено в соответствие новое значение. Так, при последовательном переборе всех новых значений яркостей цветов-ключей будет определяться, имеет ли разность между яркостями цветов-ключей значение меньше или равно 4, но при этом колориметрическое отклонение этих цветов в исходном изображении должно быть больше 4. Если данное условие соблюдается, то к большему значению яркости прибавляется разность Δ и разности яркостей цветов-ключей, в противном случае или цвета различимы, или в исходном изображении они схожи и нет необходимости в их преобразованиях.

6. Новые значения записываются вместо ранее используемых для изображения в оттенках серого, значения же для неквантованных цветов получаются в результате интерполирования.

7. Для вывода преобразованного изображения на экран устройства осуществляется переход из цветового пространства CIE L*a*b* в пространство RGB.

Блок-схема последовательности действий метода реколоризации представлена на рисунке 1.

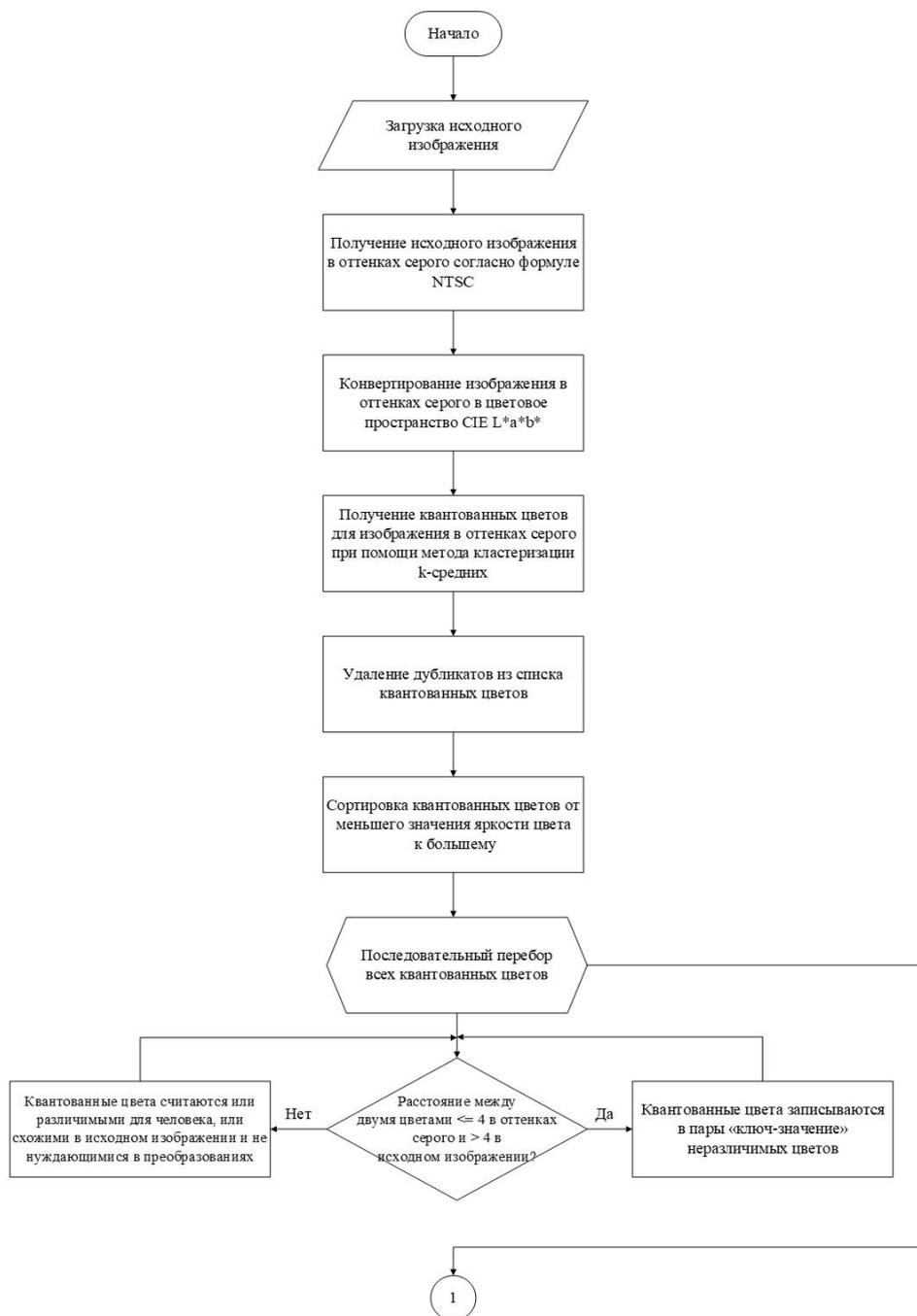


Рисунок 1. – Блок-схема метода преобразования изображения для людей с ахроматопсией (начало)

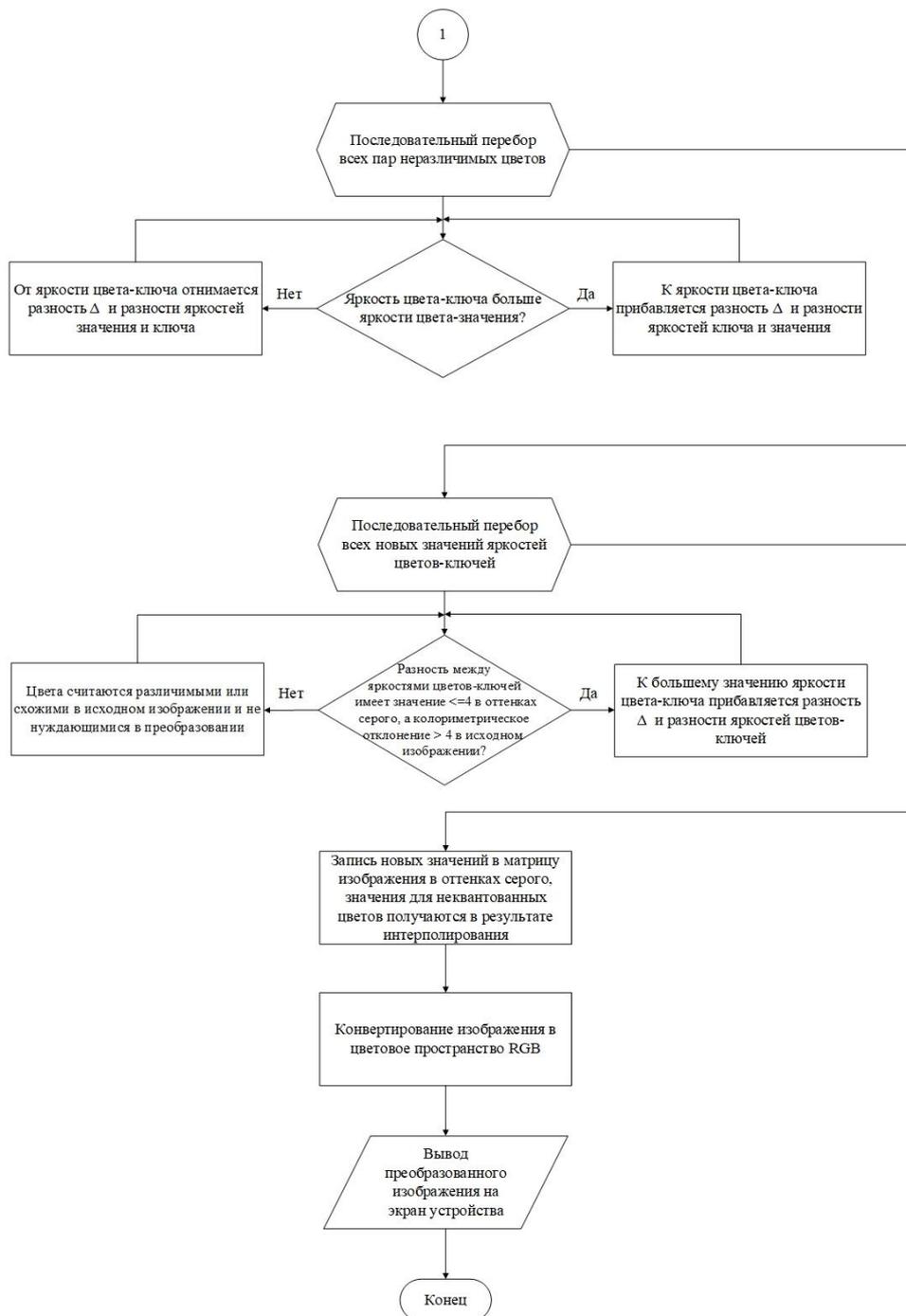


Рисунок 1. – Блок-схема метода преобразования изображения для людей с ахроматопсией (окончание)

Методика проведения эксперимента. Для оценки качества реколоризации необходимо:

1. Получить исходное тестовое изображение в таком виде, в котором оно воспринимается человеком с ахроматопсией, то есть в оттенках серого. Так, стандартным переходом к оттенкам серого является вычисление яркости Y для каждого пикселя, которое потом заменяет значения все трех координат в цветовом пространстве RGB. Данное преобразование осуществляется по формуле (1).
2. Применить к исходному изображению разработанный метод.
3. Получить реколоризованное изображение в таком виде, в котором оно воспринимается человеком с ахроматопсией, что возможно благодаря конвертации реколоризованного изображения в оттенки серого согласно (1).
4. Проверить восприятие реколоризованного изображения, к которому была применена формула (1) для симуляции зрения ахроматопов, через солнцезащитные очки. Линзы солнцезащитных очков имеют

светопропускание от 8 до 18 %, не являются поляризованными, не обладают антибликовым покрытием, не имеют цветных фильтров.

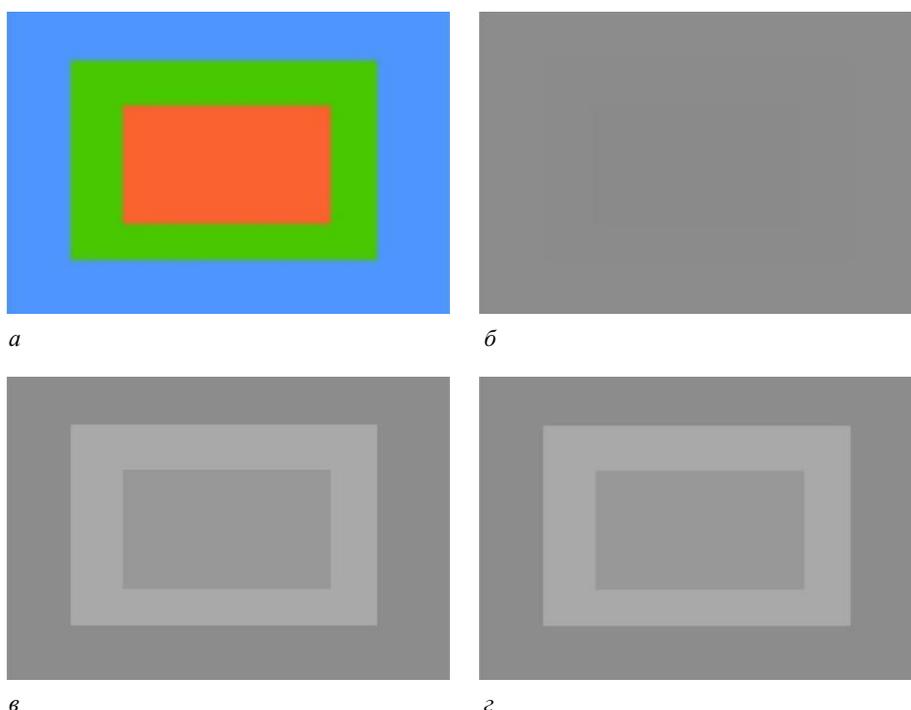
5. Оценить качество рекolorизации: отметить, стали ли лучше различимы ранее неразличимые объекты.

Для объективной оценки качества рекolorизации используются вычисленные для каждого пикселя изображения функции ошибок, определяющие потери контраста [8]. Данные функции позволяют количественно определить, насколько сопоставима разница между любыми парами цветов в исходном цветном изображении с соответствующей целевой разницей в изображении в оттенках серого. Определена каждая функция ошибок с использованием среднеквадратичного взвешенного значения RWMS (root weighted mean square):

$$rwms_q(i) = \sqrt{\frac{1}{\|K\|} \sum_{j \in Q} \frac{\|K_j\|}{\delta_{ij}^{q^2}} \left(\delta_{ij}^q - |lum(c_i) - lum(q_j)| \right)^2}, \quad (3)$$

- где $rwms(i)$ – ошибка, вычисленная для i -го пикселя исходного цветного изображения I ;
 K – набор всех пикселей в цветном изображении I ;
 $\|K\|$ – число пикселей в цветном изображении I ;
 c_i – цвет i -го пикселя цветного изображения I ;
 $K_j \subset K$ – кластер пикселей, представленных квантованным цветом q_j ;
 $\delta_{ij}^q = (G_{range} / Q_{range}) \|c_i - q_j\|$ – целевая разница в уровнях серого для пар цветов c_i и q_j ;
 lum – функция, которая возвращает компонент L^* рекolorизованного цвета в оттенках серого;
 G_{range} – постоянное значение, равное 100;
 Q – многообразие всех квантованных цветов;
 Q_{range} – максимальное расстояние между любыми двумя квантованными цветами в Q .

Результаты и их обсуждение. Для выполнения субъективной оценки качества рекolorизации были произведены преобразования тестового изображения в оттенки серого согласно (1), рекolorизация данного изображения согласно разработанному методу, а также конвертация рекolorизованного изображения в оттенки серого по формуле (1). Исходное тестовое изображение, а также все вышеупомянутые преобразования представлены на рисунке 2.

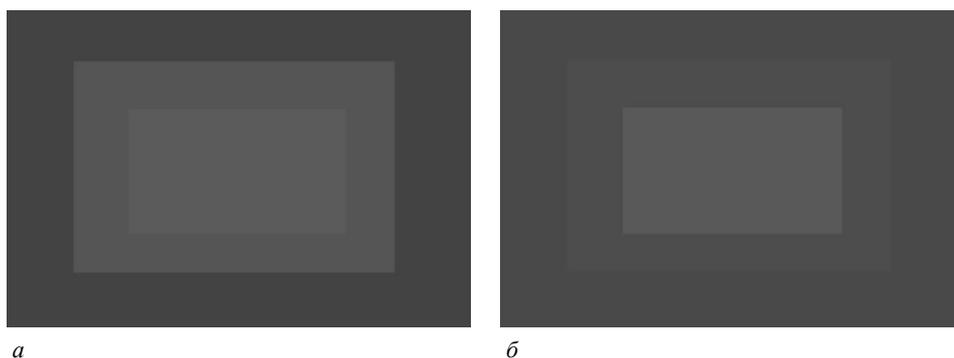


a – исходное изображение; b – исходное изображение в оттенках серого;
 v – рекolorизованное изображение; z – рекolorизованное изображение в оттенках серого

Рисунок 2. – Различные представления тестового изображения

В рамках данных преобразований тестового изображения использовано значение коэффициента преобразования яркости, равное 15. На основании оценки восприятия полученных результатов нормальным трихроматом посредством рассмотрения реколоризованного изображения, а также реколоризованного изображения, конвертированного в оттенки серого с использованием (1), что симулирует восприятие изображения человеком с ахроматопсией, определено, что возможность отличать друг от друга объекты, имеющие схожее представление в оттенках серого, но различное в исходном изображении, улучшилась, а также не произошло осветление темных участков изображения и затемнение светлых. Кроме того, восприятие реколоризованного изображения не ухудшилось при рассмотрении данного изображения через солнцезащитные очки.

Результаты преобразования оценивались по функциям ошибок, расчет которых для каждого пикселя исходного тестового изображения в оттенках серого и реколоризованного изображения в оттенках серого произведен по формуле (3). Полученные значения для каждого изображения были записаны в соответствующие матрицы и выведены в качестве изображений в оттенках серого, представленных на рисунке 3.



a – функции ошибок для исходного изображения в оттенках серого;
б – функции ошибок для реколоризованного изображения в оттенках серого

Рисунок 3. – Функции ошибок в виде изображений в оттенках серого для тестового изображения

Так как значения функций ошибок не превышают 1, что позволяет получить лишь изображение с практически черными пикселями, значение каждой функции умножается на 100 для сравнения данных значений визуально. В реколоризованном изображении функции ошибок для большинства пикселей уменьшили свои значения, что видно по более затемненным областям изображения.

Заключение. Разработан метод преобразования яркости изображений для помощи людям с полной ахроматопсией, учитывающий особенности цветовосприятия ахроматопов посредством использования персонализированного коэффициента преобразования яркости, а также направленный на помощь людям с ахроматопсией в различении цветов, схожих в восприятии ахроматопов, но отличных в представлении нормальных трихроматов, где сходство определяется согласно показателю порога цветоразличения. Кроме того, использование данного метода применимо для помощи в восприятии визуальной информации ахроматопами, носящими солнцезащитные очки ввиду имеющейся у них светобоязни. Разработанный метод позволяет улучшить восприятие информации ахроматопами посредством увеличения колориметрического отклонения между ранее неразличимыми ими цветами, что подтверждается результатами проверки метода на корректность работы при помощи симуляции ахроматопического зрения. Также стоит отметить уменьшение потери контраста между исходным цветным изображением и его реколоризованной версией в оттенках серого по сравнению с соответствующей потерей контраста между исходным цветным изображением и его версией, преобразованной в оттенки серого.

ЛИТЕРАТУРА

1. Achromatopsia: clinical features, molecular genetics, animal models and therapeutic options / N. Hirji, J Aboshiha., M. Georgiou et al. // *Ophthalmic Genetics*, 2018. – Vol. 39, iss. 2. – P. 149–157. – DOI: [10.1080/13816810.2017.1418389](https://doi.org/10.1080/13816810.2017.1418389).
2. Bartolomeo P., Bachoud-Levi A.-C., Schotten M. T. The anatomy of cerebral achromatopsia: a reappraisal and comparison of two case reports // *Cortex*, 2014. – Vol. 56. – P. 138–144. – DOI: [10.1016/j.cortex.2013.01.013](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.01.013).
3. Rasche K., Geist R., Westall J. Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats // *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2005. – Vol. 25, iss. 3. – P. 22–30. – DOI: [10.1109/MCG.2005.54](https://doi.org/10.1109/MCG.2005.54).
4. Rasche K., Geist R., Westall J. Re-coloring images for gamuts of lower dimension // *Computer Graphics Forum*, 2005. – Vol. 24, iss. 3. – P. 423–432. – DOI: [10.1111/j.1467-8659.2005.00867.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2005.00867.x).
5. Zhu Z., Mao X. Image Recoloring for Color Vision Deficiency Compensation: a Survey // *The Visual Computer*, 2021. – Vol. 37. – P. 2999–3018. – DOI: [10.1007/s00371-021-02240-0](https://doi.org/10.1007/s00371-021-02240-0).

6. Arthur D., Vassilvitskii S. K-Means++: The Advantages of Careful Seeding // Proc. of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, SODA 2007 / New Orleans, Louisiana, USA (7–9 January 2007). – P. 1027–1035.
7. Лютов В. П., Четверкин П. А., Головастик Г. Ю. Цветоведение и основы колориметрии. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2023. – 224 с.
8. Kuhn G. R., Oliveira M. M., Fernandes L. A. F. An improved contrast enhancing approach for color-to-grayscale mappings // The Visual Computer, 2008. – Vol. 24, iss. 7–9. – P. 505–514. – DOI: [10.1007/s00371-008-0231-2](https://doi.org/10.1007/s00371-008-0231-2).

REFERENCES

1. Hirji, N., Aboshiha, J., Georgiou, M., Bainbridge, J., & Michaelides, M. (2018). Achromatopsia: clinical features, molecular genetics, animal models and therapeutic options. *Ophthalmic Genetics*, 39(2), 149–157. DOI: [10.1080/13816810.2017.1418389](https://doi.org/10.1080/13816810.2017.1418389).
2. Bartolomeo, P., Bachoud-Levi, A.-C., & Schotten, M. T. (2014). The anatomy of cerebral achromatopsia: a reappraisal and comparison of two case reports. *Cortex*, (56), 138–144. DOI: [10.1016/j.cortex.2013.01.013](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.01.013).
3. Rasche, K., Geist, R., & Westall, J. (2005). Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25(3), 22–30. DOI: [10.1109/MCG.2005.54](https://doi.org/10.1109/MCG.2005.54).
4. Rasche, K., Geist, R., & Westall, J. (2005). Re-coloring images for gamuts of lower dimension. *Computer Graphics Forum*, 24(3), 423–432. DOI: [10.1111/j.1467-8659.2005.00867.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2005.00867.x).
5. Zhu, Z., & Mao, X. (2021). Image Recoloring for Color Vision Deficiency Compensation: a Survey. *The Visual Computer*, (37), 2999–3018. DOI: [10.1007/s00371-021-02240-0](https://doi.org/10.1007/s00371-021-02240-0).
6. Arthur, D., & Vassilvitskii, S. (2007). K-Means++: The Advantages of Careful Seeding. In *Proc. of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, SODA 2007* (1027–1035). New Orleans, Louisiana, USA.
7. Lyutov, V. P., Четверкин, П. А., & Головастик, Г. Ю. (2023). *Tsvetovedenie i osnovy kolorimetrii* (3rd ed.). Moscow: Yurait. (In Russ.).
8. Kuhn, G. R., Oliveira, M. M., & Fernandes, L. A. F. (2008). An improved contrast enhancing approach for color-to-grayscale mappings. *The Visual Computer*, 24(7–9), 505–514. DOI: [10.1007/s00371-008-0231-2](https://doi.org/10.1007/s00371-008-0231-2).

Поступила 27.10.2024

METHOD OF IMAGE BRIGHTNESS CONVERSION TO HELP PEOPLE WITH ACHROMATOPSIA IN VISUAL PERCEPTION OF INFORMATION

V. SINITSYNA

(Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

The article considers such a rare and severe anomaly of color vision as achromatopsia, and analyzes existing methods designed to help achromatopes in the correct perception of visual information. The developed method of image brightness transformation is presented, aimed at helping people with complete achromatopsia in distinguishing similar colors in their perception, where the similarity is determined according to the color discrimination threshold indicator. In addition, this method takes into account the features of color perception of achromatopes by providing the ability to use a personalized brightness transformation coefficient. As a result of checking the method for correctness of operation using the simulation of achromatopic vision, an increase in the colorimetric deviation between colors previously indistinguishable by achromatopes was noted and, accordingly, the ability to distinguish such colors from each other appeared. The loss of contrast between the original color image and the recolored grayscale image is reduced.

Keywords: *color vision anomalies, color perception features, color information, achromatopsia, colorimetric deviation, clustering, quantized colors, color spaces, recoloring, brightness, grayscale.*