

СИНИЦЫНА В.В.

РЕКОЛОРИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ПРОТАНОМАЛИЕЙ И ДЕЙТЕРАНОМАЛИЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СТЕПЕНЕЙ ТЯЖЕСТИ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

В рамках проведенных исследований разработан метод для помощи людям с наиболее распространенными формами аномальной трихромазии – дейтераномалией и протаномалией – и любыми степенями тяжести данных аномалий в визуальном восприятии информации. Для протаномалов осуществляется преобразование цветов с преобладающей красной составляющей, а для дейтераномалов – с преобладающей зеленой составляющей. Рекolorизация для обеих форм аномалии выполняется в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$ с использованием полученных при помощи метода симуляции Machado *et al.* коэффициентов преобразования. Среди преимуществ данного метода стоит отметить возможность для каждого пользователя настроить в соответствии с индивидуальным восприятием визуальной информации такие персонализированные параметры рекolorизации, как коэффициент изменения рекolorизирующей составляющей и коэффициент изменения яркости изображений. Кроме того, в результате выполнения метода каждый цвет изменяется одинаково во всех областях изображения.

Проверка корректности работы метода произведена посредством рассмотрения нормальным трихроматом симулированного рекolorизованного изображения для дейтераномального и протаномального зрения, в результате чего ранее недоступные для зрения аномального трихромата области изображения стали различимыми. Качество рекolorизации также оценено по потерям натуральности цветов, которые для тестовых изображений имели удовлетворительные значения и изменялись в пределах от 1.37 до 10.9 в зависимости от степени тяжести аномалии. Время выполнения метода для обоих случаев аномальной трихромазии указывает на высокую скорость обработки изображений и составляет 0.08 с для изображений размером 750 000 пикселей.

Ключевые слова: аномалии цветового зрения, аномальная трихромазия, протаномалия, дейтераномалия, рекolorизация, потеря натуральности цвета, коэффициенты преобразования, персонализированные параметры рекolorизации, время выполнения метода, цветовое пространство

Введение

Цветовосприятие является одним из важнейших свойств органа зрения человека. Известно, что в сетчатке глаза человека за восприятие цвета отвечают рецепторы фотопической системы – колбочки. Выделяют коротко-, средне- и длинноволновые колбочки (L -, M - и S -колбочки), содержащие пигменты с максимумами поглощения в красной, зеленой и синей частях спектра.

В случае недостаточного количества фотопигмента определенного типа у человека наблюдается наличие аномальной трихромазии той или иной формы. На данный момент аномальная трихромазия является наиболее распространенным видом цветовой слепоты, особенно такие ее формы, как дейтераномалия и протаномалия, которые встречаются примерно у 5 % и 1 % населения Земли. При дейтераномалии у человека наблюдается недостаточное количество фотопигмента зеленого цвета, при протаномалии – красного. Еще одна форма аномальной трихромазии – тританомалия – характеризуется отличным от нормального количеством синего фотопигмента в фоторецепторах колбочек, однако встречается такая аномалия лишь у 0.01 % населения земного

шара, в связи с чем наиболее актуальной является реализация методов рекolorизации именно для случаев протаномалии и дейтераномалии.

В зависимости от количества фотопигмента того или иного цвета аномальная трихромазия может быть выражена в тяжелой, средней или слабой степени. Согласно принятому буквенному обозначению A представляет собой тяжелую, B – среднюю и C – слабую степень тяжести аномальной трихромазии. Однако в большинстве существующих методов рекolorизации и симуляции степень тяжести ранжируется в пределах от 0.1 до 0.9 включительно, так как нулевым значением характеризуется полное отсутствие аномалии, а при 1 наблюдается определенная форма трихромазии, характеризующаяся полным отсутствием фотопигмента в фоторецепторах колбочек.

Аномальная трихромазия считается врожденным заболеванием, которое на данный момент не поддается лечению, хотя исследования в этой области ведутся. Данное утверждение содействует повышенному интересу к разработке методов рекolorизации изображений для помощи аномальным трихроматам.

Так, на сегодняшний день существует большое количество методов, предназначенных для рекolorизации изображений для корректного восприятия представленной на них информации людьми с аномальной трихромазией. Однако такие методы не лишены недостатков. Среди основных недостатков существующих методов выделяются следующие:

- ориентация только на аномальных трихроматов с низкой степенью тяжести аномалии (например, в методах Yang et al. [1], Chen-Liao [2]);
- большая потеря натуральности, представляющей собой разницу в цветности между исходным изображением и рекolorизованным (методы Lee-Santos [3], Poret et al. [4], Zhu et al. [5] и др.);
- представление одного и того же цвета в исходном изображении по-разному в различных областях рекolorизованного изображения (метод Flatla-Gutwin [6]);
- довольно длительное время выполнения (методы Zhu et al. [5], Zhou et al. [7] и др.).

Таким образом, цель исследования – разработать метод рекolorизации изображений для людей с протаномалией и дейтераномалией различных степеней тяжести, который будет как можно лучше сохранять натуральность цветов, представлять один и тот же исходный цвет одинаковым образом в разных областях рекolorизованного изображения, а также иметь удовлетворительное время выполнения.

Среди задач исследования выделены следующие:

- разработка собственного метода;
- проведение экспериментов по рекolorизации изображений для протаномалов и дейтераномалов с аномалиями различных степеней тяжести;
- оценка качества рекolorизации изображений.

Метод рекolorизации изображений для протаномалов и дейтераномалов

Метод рекolorизации изображений для людей с протаномалией и дейтераномалией получен в результате следующей последовательности действий.

1. Так как цветовая информация представлена в устройствах в цветовом пространстве RGB, цветовой охват которого составляет меньше половины площади, изображающей все существующие цветности, преобразования в данном пространстве выполняются крайне редко, чаще всего в методах рекolorизации используются промежуточные цветовые пространства.

В качестве промежуточного цветового пространства в рамках данных исследований используется пространство CIE $L^*a^*b^*$, которое охватывает все цвета, воспринимаемые человеческим глазом. Одним из главных преимуществ данного пространства является Евклидово расстояние между цветами, которое близко к воспринимаемой чело-

веческим глазом разнице между данными цветами, что особенно важно при рекolorизации цветов таким образом, чтобы схожие в восприятии человека с аномальной трихромазией цвета в результате данной рекolorизации стали различимы.

В пространстве CIE $L^*a^*b^*$ каждая точка характеризуется тремя координатами: яркостью L , красно-зеленым значением a и сине-желтым значением b . Так, определяется еще одно преимущество данного цветового пространства: возможность отдельного изменения яркости и показателей цветности.

2. В цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$ большая часть неразличимых протаномалом красных оттенков расположена в области положительных значений координат $a \in [0; 127]$ и $b \in [0; 127]$, а большая часть неразличимых дейтераномалом зеленых оттенков – в области положительных значений $b \in [0; 127]$ и отрицательных значений $a \in [-127; 0]$.

Так, для протаномалии и дейтераномалии составляются матрицы, каждым элементом которых является точка с соответствующими тремя координатами L , a и b , где L изменяется от 0 до 100 с шагом 4, $b \in [0; 127]$ изменяется с шагом 10 для обеих форм аномалии, но $a \in [0; 127]$ для случая протаномалии и $a \in [-127; 0]$ для случая дейтераномалии. Значения L и b взяты с шагами с целью упрощения расчетов.

3. Следует определить, каким именно образом изменяются красно-зеленые значения a , принадлежащие заданным промежуткам, в восприятии данных цветов протаномалами и дейтераномалами. Для этого полученные в предыдущем пункте матричные значения преобразуются из цветового пространства CIE $L^*a^*b^*$ в используемое в симуляционном алгоритме Machado et al. [8] цветовое пространство RGB. Эффективность данного симуляционного алгоритма подтверждается в рамках проверки корректности данного алгоритма на аномальных трихроматах самим автором алгоритма. Кроме того, данный симуляционный метод также используется во многих работах других авторов, например, в методе Zhou et al. [7].

Применяется алгоритм Machado et al. [8] к преобразованным в RGB матрицам следующим образом: к областям красных оттенков применяется алгоритм симуляции протаномалии, а к областям зеленых оттенков применяется алгоритм симуляции дейтераномалии. Важно отметить, что результаты симуляций в данном пункте получены для степеней тяжести, принадлежащих промежутку $[0.1; 0.9]$.

4. Затем полученные симуляционные матрицы вновь конвертируются в CIE $L^*a^*b^*$ пространство.

5. Рассчитывается разность между каждым соответствующим значением a исходной матрицы, сформированной в пункте 2, а также значением a полученной в результате симуляции матрицы, представленной в пункте 4.

6. Затем для каждого исходного значения $a \in [0; 127]$ для протаномалии и $a \in [-127; 0)$ для дейтераномалии находится среднее арифметическое значений полученной в предыдущем пункте разности для каждой степени тяжести в пределах от 0.1 до 0.9.

7. Для упрощения расчетов и в то же время во избежание излишнего искажения результатов полученные пары «исходное значение a – среднее арифметическое разности исходного и симулированного значений a » делятся на интервалы таким образом, чтобы разность между средними арифметическими разностей исходных и симулированных значений для наибольшего значения степени тяжести 0.9 составляла не более 4–5 единиц. Данная разница была подобрана экспериментально в результате использования различных значений и последующего сравнения симуляций реколоризованных изображений по используемым в данной работе показателям качества.

В рамках полученных промежутков находится среднее арифметическое вторых значений сформированных пар «исходное значение a – среднее арифметическое разности исходного и симулированного значений a » для каждой степени тяжести.

8. При помощи метода наименьших квадратов определяются коэффициенты линейной зависимости k_p и b_p для протаномалии, k_d и b_d для дейтераномалии с целью составления формулы изменения симулированного значения от степени 0.1 до степени 0.9 на каждом из промежутков.

9. Так, в случае протаномалии симулированные значения a уменьшаются, в случае же дейтераномалии – увеличиваются. Для реколоризации будет производиться обратное действие: для протаномалии исходные значения a будут увеличиваться, а для дейтераномалии – уменьшаться. Стоит отметить, что в результате изменения некоторых исходных a в процессе реколоризации будут получены величины, выходящие за пределы максимального (127) или минимального (–127) значений a . В таких случаях реколоризованному значению a будет присвоено максимальное (127) или же минимальное (–127) значение.

Кроме того, в связи с наличием на разных изображениях объектов с различными значениями яркости, различного сочетания цветов рядом расположенных объектов, были введены такие персонализированные параметры реколоризации, принимающие любые определенные пользователем значения, как коэффициенты изменения реколоризирующей составляющей m_p и m_d для протаномалии и дейтераномалии, а также коэффициенты изменения яркости изображений l_p и l_d для протаномалии и дейтераномалии. Изменение яркости применимо лишь к пикселям, у которых изменяется значение координаты a .

Для протаномалии определены преобразования координаты a цветового пространства CIE L*a*b* для цветов с $L \in [0; 100]$ и $b \in [0; 127]$, кроме всех оттенков серого, которые наблюдаются при любых значениях яркости, но лишь при нулевых значениях a и b . Значения интервалов для исходного значения a и коэффициентов k_p и b_p для протаномалии представлены в таблице 1.

Для получения реколоризованного значения необходимо подставить данные коэффициенты преобразования в общую формулу для соответствующих интервалов:

$$a_p = a_0 + (k_p \cdot p + b_p) \cdot m_p, \quad (1)$$

где a_0 – исходное значение координаты a , p – степень тяжести протаномалии в пределах от 0.1 до 0.9, k_p и b_p – коэффициенты преобразования для протаномалии, a_p – преобразованное значение координаты a , m_p – коэффициент изменения реколоризирующей составляющей для протаномалии.

Для дейтераномалии же определены преобразования координаты a цветового пространства CIE L*a*b* для цветов с $L \in [0; 100]$ и $b \in [0; 127]$, кроме всех оттенков серого, которые наблюдаются при любых значениях яркости, но лишь при нулевых значениях a и b . Значения интервалов для исходного значения a и коэффициентов k_d и b_d для дейтераномалии представлены в таблице 2.

Для получения реколоризованного значения необходимо подставить данные коэффициенты преобразования в общую формулу для соответствующих интервалов

$$a_d = a_0 - (k_d \cdot d + b_d) \cdot m_d, \quad (2)$$

где a_0 – исходное значение координаты a , d – степень тяжести дейтераномалии в пределах от 0.1 до 0.9, k_d и b_d – коэффициенты преобразования для дейтераномалии, a_d – преобразованное значение координаты a , m_d – коэффициент изменения реколоризирующей составляющей для дейтераномалии.

В случае необходимости изменения яркости соответствующий коэффициент l_p для протаномалии и l_d для дейтераномалии прибавляется к текущему значению яркости каждого реколоризируемого пикселя.

10. В общем же виде процесс преобразования цветов изображений осуществляется по формуле:

$$(R, G, B) \rightarrow (L, a, b) \xrightarrow{\text{recoloring}} (L, a, b)_r \rightarrow (R, G, B)_r \quad (3)$$

где (R, G, B) – исходное значение цвета в цветовом пространстве RGB; (L, a, b) – исходное значение цвета в цветовом пространстве CIE L*a*b; $(L, a, b)_r$ – значение цвета в результате реколоризации в пространстве CIE L*a*b*; $(R, G, B)_r$ – преобразованное значение цвета в пространстве RGB.

Таблица 1. Интервалы исходного значения a и коэффициенты преобразования k_p и b_p для протаномалии

Начальное значение интервала	Конечное значение интервала	Коэффициент k_p	Коэффициент b_p
0	4	6.9	-1.09
5	9	10.93	0.096
10	14	14.71	1.44
15	19	18.56	2.73
20	24	22.27	4.099
25	29	25.94	5.496
30	34	29.44	7.01
35	39	32.68	8.71
40	44	35.87	10.47
45	49	38.83	12.42
50	54	41.69	14.46
55	59	44.43	16.63
60	64	46.997	18.95
65	69	49.49	21.36
70	74	51.87	23.87
75	79	54.18	26.45
80	84	56.39	29.11
85	89	58.54	31.82
90	95	60.83	34.87
96	100	63.02	38.015
101	105	64.89	40.99
106	110	66.62	44.08
111	115	68.24	47.31
116	120	69.63	50.74
121	125	70.85	54.36
126	127	71.56	57.05

Таблица 2. Интервалы исходного значения a и коэффициенты преобразования k_d и b_d для дейтераномалии

Начальное значение интервала	Конечное значение интервала	Коэффициент k_d	Коэффициент b_d
-127	-124	44.08	83.103
-123	-119	43.997	78.72
-118	-114	43.86	73.89
-113	-109	43.68	69.08
-108	-104	43.49	64.28
-103	-99	43.25	59.50
-98	-94	42.998	54.73
-93	-89	42.72	49.997
-88	-84	42.26	45.42
-83	-79	41.63	41.01
-78	-74	40.73	36.76
-73	-69	39.703	32.69
-68	-64	38.45	28.81
-63	-59	36.84	25.21
-58	-54	34.79	21.98
-53	-49	32.42	19.05
-48	-44	29.59	16.49
-43	-39	26.36	14.25
-38	-34	22.87	12.21
-33	-29	19.11	10.44
-28	-24	15.19	8.79
-23	-19	11.15	7.27
-18	-14	7.00	5.82
-13	-9	2.89	4.43
-8	-6	-0.28	3.27
-5	-1	-3.57	2.22

Методика проведения эксперимента

Для выполнения процесса реколоризации используется реализованный на языке программирования Python метод, принимающий на вход изображение, значение степени тяжести аномалии, саму форму аномалии, а также значения персонализированных параметров реколоризации. Выполнялись преобразования на ноутбуке с процессором 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 2.40GHz и 32GB RAM. Так, на выходе будет получено реколоризованное изображение. В качестве исходных изображений взяты картинки из те-ста Ишихары, а также сложные цветные изображения, с восприятием цветов на которых у аномальных трихроматов возникают трудности.

Кроме того, для проверки качества реколоризации использована методика исследований, включающая несколько этапов:

1. Необходимо определить, каким образом цветоаномалы с различными формами аномальной трихроматии воспринимают некоторое исходное изображение. При помощи метода симуляции изображений Machado et al. [8] исходное изображение преобразуется так, что человек с нормальным трихроматическим зрением видит, как исходное изображение воспринимает человек с аномальной трихроматией той или иной степени тяжести. То есть в конце данного этапа получается симулированное в соответствии с восприятием цветоаномала

той или иной формы и степени тяжести исходное изображение. В рамках эксперимента получены симулированные изображения для протаномалов и дейтераномалов со степенями тяжести 0.2, 0.6 и 0.8.

2. Далее, исходное изображение загружается в метод рекolorизации, который преобразует данное изображение в соответствии с выбранной формой и степенью цветоаномалии, а также с применением параметров преобразования m_p, m_d, l_p, l_d . Как и в пункте выше, в данном случае получают рекolorизованные изображения для протаномалов и дейтераномалов со степенями тяжести 0.2, 0.6 и 0.8.

3. К рекolorизованным изображениям также применяется метод симуляции.

4. На данном этапе происходит сравнение симулированных изображений из первого пункта с соответствующими симуляциями рекolorизованных изображений на основании оценок качества рекolorизации. Так, в данной работе качество рекolorизации оценивается визуально нормальным трихроматом при сравнении симулированного и рекolorизованного симулированного изображений. В качестве объективной оценки качества рекolorизации выступает значение потери натуральности цветов. Эффективность метода также оценивается по времени выполнения.

Потеря натуральности цветов рекolorизованного изображения вычисляется при помощи выражения, представленного в работе Zhu et al. [5], следующим образом:

$$NL(I^t, I^r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(a_i^t - a_i^r)^2 + (b_i^t - b_i^r)^2} \quad (4)$$

где I^t – исходное изображение; I^r – рекolorизованное изображение; a_i^t, b_i^t – координаты пикселя исходного изображения в цветовом пространстве CIE L*a*b*; a_i^r, b_i^r – координаты соответствующего пикселя рекolorизованного изображения в цветовом пространстве CIE L*a*b*; N – размер матрицы изображения.

Результаты и их обсуждение

Для выполнения оценки качества рекolorизации симулированные изображения исходных картинок и симуляции рекolorизованных изображений объединены для протаномалов и дейтераномалов со степенями тяжести 0.2, 0.6, 0.8 в таблицы, представленные на рисунке 1 и рисунке 2. Кроме того, в данных таблицах приведены рекolorизованные изображения, а также используемые значения параметров m_p, m_d, l_p, l_d .

На основании восприятия полученных симулированных рекolorизованных результатов нормальным трихроматом определено, что различие на картинках искомой цифры улучшилось, а также усилилась контрастность между искомой цифрой и фоном, а на сложных цветовых изображениях более насыщенными стали красные оттенки для протаномалов, а также зеленые оттенки для дейтераномалов.

Исходное изображение		Симуляция	Рекolorизованное изображение	Симуляция рекolorизованного изображения	Значение m_p	Значение l_p	
	Протаномалия	0.2				0.25	0
		0.6				0.3	-4
		0.8				0.4	-4
	Протаномалия	0.2				0.1	0
		0.6				0.1	0
		0.8				0.2	0

Рисунок 1. Результаты симуляции исходных и рекolorизованных изображений для случаев протаномалии различных степеней тяжести

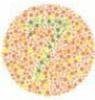
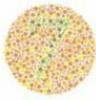
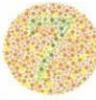
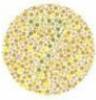
Исходное изображение		Симуляция	Реколоризованное изображение	Симуляция реколоризованного изображения	Значение m_i	Значение l_i	
	Дейтераномалия	0.2				1	0
		0.6				2	0
		0.8				2	-4
	Дейтераномалия	0.2				2	0
		0.6				4	0
		0.8				9	-4

Рисунок 2. Результаты симуляции исходных и реколоризованных изображений для случаев дейтераномалии различных степеней тяжести

Результаты реколоризации оцениваются и по такому объективному показателю качества, как потеря натуральности цветов реколоризованного изображения. В таблице 3 представлены результаты

вычисления потери натуральности цветов для изображений, реколоризованных разработанным методом для людей с протаномалией и дейтераномалией разных степеней тяжести, по формуле (4).

Таблица 3. Потери натуральности цветов реколоризованных изображений для случаев протаномалии и дейтераномалии различных степеней тяжести

Потеря натуральности цветов реколоризованного изображения	Степень тяжести аномальной трихромазии		
	0.2	0.6	0.8
$NL_{Ishihara_protanomaly}$	1.48	7.75	10.9
$NL_{red_flower_protanomaly}$	1.57	3.09	7.73
$NL_{Ishihara_deutanomaly}$	1.37	1.93	2.12
$N_{Lvegetables_deutanomaly}$	3.84	6.94	8.59

Считается, что чем ближе значение потери натуральности цветов к нулю, тем лучше. Данный показатель не является универсальным, а зависит в большей мере от того, какое количество объектов модифицируемого цветового тона расположено на изображении, а также от особенностей самого изображения, однако допустимо использование данного показателя в качестве меры изменения цветности исходного изображения.

Кроме того, стоит отметить, что в результате данной реколоризации один и тот же цвет в исходном изображении будет представлен одним соответствующим цветом в различных областях реколоризованного изображения. Выполнение метода для случаев протаномалии и дейтераномалии занимает очень небольшое время: не более 0.08 с для изображений размером 750 000 пикселей.

Заключение

Разработан метод реколоризации изображений для помощи людям с дейтераномалией и протаномалией всех степеней тяжести. Особенности данного метода являются преобразования цветов с превалирующей красной составляющей для протаномалов и преобладающей зеленой составляющей для дейтераномалов в цветовом пространстве CIE L*a*b* с использованием полученных при помощи метода симуляции Machado et al. коэффициентов преобразования.

Среди преимуществ метода выделяются следующие:

– возможность для каждого пользователя настроить в соответствии с индивидуальным восприятием визуальной информации такие персонализированные параметры реколоризации, как коэффициент изменения реколоризирующей составляющей и коэффициент изменения яркости изображений;

– преобразование одного и того же исходного цвета в результате реколоризации одинаково для всех областей изображения;

– очень небольшое время выполнения, которое указывает на высокую скорость обработки изображений и составляет 0.08 с для изображений размером 750 000 пикселей.

Корректность метода подтверждается посредством рассмотрения нормальным трихроматом симулированного реколоризованного изображения для дейтераномального и протаномального зрения, в результате чего ранее недоступные для зрения аномального трихромата области изображения стали различимыми. Кроме того, объективно качество реколоризации оценено по показателям потерь натуральности цветов, которые для тестовых изображений имели удовлетворительные значения в пределах от 1.37 до 10.9 в зависимости от степени тяжести аномалии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yang S., Ro Y., Wong E., Lee J.** Количественная оценка и стандартизированное описание нарушения цветового зрения у аномальных трихроматов. Часть I: Симуляция и Измерение. EURASIP Journal on Image and Video Processing. 2008. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2008/487618
2. **Chen Y.-C., Liao T.-S.** Аппаратное цифровое усовершенствование цвета для людей с нарушениями цветового зрения. Etri Journal. 2011. Vol. 33. № 1. Pp. 71–77. DOI: 10.4218/etrij.11.1510.0009
3. **Lee J., Santos W.** Адаптивная система на основе нечеткой логики для симуляции, количественной оценки и компенсации цветовой слепоты. Integrated Computer-Aided Engineering. 2011. Vol. 18. Pp. 29–40. DOI: 10.3233/ICA-2011-0356
4. **Poret S., Dony R., Gregor S.** Обработка изображений для коррекции цветовой слепоты. In Proceedings of the International Conference on Science and Technology for Humanity. 2009. Pp. 539–544. DOI: 10.1109/TIC-STH.2009.5444442
5. **Zhu Z., Toyoura M., Go K., Kashiwagi K., Fujishiro I., Wong T.-T., Mao X.** Персонализированная реколоризация изображений для компенсации нарушения цветового зрения. IEEE Transactions on Multimedia. 2021. Vol. 24. Pp. 1721–1734. DOI: 10.1109/TMM.2021.3070108
6. **Flatla D., Gutwin C.** SSMRecolor: улучшение инструментов реколоризации с помощью ситуативно-специфических моделей цветовой дифференциации. In Proceedings of the 30th International Conference on Human Factors in Computing Systems. 2012. Pp. 2297–2306. DOI: 10.1145/2207676.2208388
7. **Zhou H., Huang W., Zhu Z., Chen X.-D., Go K., Mao X.** Быстрая реколоризация изображений для красно-зеленой аномальной трихроматии с улучшением контраста и сохранением натуральности. The Visual Computer. 2024. Vol. 40. Pp. 4647–4660. DOI: 10.1007/s00371-024-03454-8
8. **Machado G.M., Oliveira M.M., Fernandes L.A.F.** Основанная на физиологии модель для симуляции нарушения цветового зрения. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2009. Vol. 15. № 6. Pp. 1291–1298. DOI: 10.1109/TVCG.2009.113

REFERENCES

1. **Yang S., Ro Y., Wong E., Lee J.** Quantification and Standardized Description of Color Vision Deficiency Caused by Anomalous Trichromats. Part I: Simulation and Measurement. EURASIP Journal on Image and Video Processing. 2008. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2008/487618
2. **Chen Y.-C., Liao T.-S.** Hardware Digital Color Enhancement for Color Vision Deficiencies. Etri Journal. 2011. Vol. 33. № 1. Pp. 71–77. DOI: 10.4218/etrij.11.1510.0009
3. **Lee J., Santos W.** An Adaptive Fuzzy-Based System to Simulate, Quantify and Compensate Color Blindness. Integrated Computer-Aided Engineering. 2011. Vol. 18. Pp. 29–40. DOI: 10.3233/ICA-2011-0356
4. **Poret S., Dony R., Gregor S.** Image Processing for Colour Blindness Correction. In Proceedings of the International Conference on Science and Technology for Humanity. 2009. Pp. 539–544. DOI: 10.1109/TIC-STH.2009.5444442

5. **Zhu Z., Toyoura M., Go K., Kashiwagi K., Fujishiro I., Wong T.-T., Mao X.** Personalized Image Recoloring for Color Vision Deficiency Compensation. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2021. Vol. 24. Pp. 1721–1734. DOI: 10.1109/TMM.2021.3070108

6. **Flatla D., Gutwin C.** SSMRecolor: Improving Recoloring Tools with Situation-Specific Models of Color Differentiation. In *Proceedings of the 30th International Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2012. Pp. 2297–2306. DOI: 10.1145/2207676.2208388

7. **Zhou H., Huang W., Zhu Z., Chen X.-D., Go K., Mao X.** Fast Image Recolor-ing for Red-Green Anomalous Trichromacy with Contrast Enhancement and Naturalness Preservation. *The Visual Computer*. 2024. Vol. 40. Pp. 4647–4660. DOI: 10.1007/s00371-024-03454-8

8. **Machado G.M., Oliveira M.M., Fernandes L.A.F.** A Physiologically-based Model for Simulation of Color Vision Deficiency. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2009. Vol. 15. № 6. Pp. 1291–1298. DOI: 10.1109/TVCG.2009.113

SINITSYNA V.V.

IMAGE RECOLORING FOR PEOPLE WITH PROTANOMALY AND DEUTERANOMALY OF VARIOUS SEVERITY

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

*As part of the conducted research, a method was developed to help people with the most common forms of anomalous trichromacy - deuteranomaly and protanomaly - and any severity of these anomalies in visual perception of information. For protanomalies, colors with a predominant red component are transformed, and for deuteranomalies - with a predominant green component. Recoloring for both forms of the anomaly is performed in the CIE $L^*a^*b^*$ color space using the conversion coefficients obtained using the simulation method of Machado et al. Among the advantages of this method, it is worth noting the ability for each user to customize such personalized recoloring parameters as the coefficient of changing the recoloring component and the coefficient of changing the brightness of images in accordance with their individual perception of visual information. In addition, as a result of the method, each color changes equally in all areas of the image.*

The correctness of the method operation was verified by examining a simulated image for deuteranomalous and protanomalous vision with a normal trichromat, as a result of which the image areas previously inaccessible to the vision of the anomalous trichromat became distinguishable. The quality of recoloring was also assessed by the loss of color naturalness, which for the test images had satisfactory values and varied within the range from 1.37 to 10.9 depending on the severity of the anomaly. The execution time of the method for both cases of anomalous trichromacy indicates a high speed of image processing and is 0.08 s for images of 750 000 pixels.

Keywords: color vision anomalies, anomalous trichromacy, protanomaly, deuteranomaly, recoloring, loss of color naturalness, conversion coefficients, personalized recoloring parameters, method execution time, color space



Синицына Влада Владиславовна, магистр, аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Vlada V. Sinitsyna, Master, Postgraduate at the Engineering Psychology and Ergonomics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

E-mail: vldasinitsina1@gmail.com