

# Метод дальтонизации изображений, манипулирующий исключительно яркостью

Д.С. Сидорчук\*, А.Л. Нурмухаметов\*, П.В. Максимов\*, В.П. Божкова\*,  
А.П. Сарычева\*\*, М.А. Павлова\*, А.А. Казакова\*, М.А. Грачева\*,  
Д.П. Николаев\*\*\*,\*\*\*\*,†,

\* Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия

\*\* Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

\*\*\* Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление», Российская академия наук,  
Москва, Россия

\*\*\*\* ООО «СМАРТ Энджинс Сервис», Москва, Россия

† Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

Поступила в редколлегию 01.09.2024 г. Принята 01.10.2024 г.

**Аннотация**—Дефекты цветового зрения (ДЦЗ), вызванные нарушениями в работе одного из трех типов рецепторов-колбочек, затрагивают примерно 300 миллионов человек по всему миру. Для компенсации недостаточного цветоразличения разрабатываются методы дальтонизации, направленные на то, чтобы субъект мог различать на дисплеях больше пар цветов из тех, что различает человек с нормальным трихроматическим цветовым зрением (НЦЗ). В данной статье представлен новый метод дальтонизации, который ставит во главу угла сохранение натуральности изображения одновременно для людей с НЦЗ, и для людей с ДЦЗ, что необходимо для эффективной визуальной коммуникации и социального взаимодействия. Предлагаемый метод изменяет только ахроматическую компоненту изображения, сохраняя локальные контрасты для улучшения различимости деталей для людей с ДЦЗ. Для этого используется метод симуляции восприятия цветных изображений людьми с ДЦЗ. Для оценки качества используется подход, отдельно оценивающий сохранение натуральности и улучшение различимости деталей изображения. В работе проведено как объективное оценивание на основе симуляции, так и субъективное оценивание на основе опроса реальных людей с ДЦЗ. Результаты экспериментов показывают, что предложенный метод позволяет улучшить различимость деталей изображения для людей с ДЦЗ, а также превосходит современные аналоги в части сохранения натуральности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дихромазия, дальтонизация, контраст, натуральность.

DOI: 10.53921/18195822\_2024\_24\_3\_203

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В основе нормального цветового зрения человека лежит наличие в сетчатке глаза трех типов рецепторов-колбочек с различными максимумами спектральной чувствительности – длинноволновых (L), средневолновых (M) и коротковолновых (S) [1]. Среди основных дефектов цветового зрения различают дихромазию – отсутствие одного из типов приёмников, и аномальную трихромазию – отклонение максимума спектральной чувствительности одного из типов приёмников от его нормального положения на оси длин волн. Дихромазия, в свою очередь, подразделяется на протанопию, дейтеранопию и очень редко встречающуюся тританопию в случае отсутствия L-, M- и S-приёмников соответственно. Дефицит цветового зрения (ДЦЗ), вызванный нарушениями в работе одного из типов рецепторов-колбочек, встречается по всему миру у около 300 миллионов людей, при этом значительно чаще у мужчин, чем у женщин [2].

Субъекты с ДЦЗ воспринимают цвета иначе, чем нормальные трихроматы, что выражается в затруднении различения определенных пар цветов [3] и, соответственно, объектов окружающего мира. Из-за плохой различимости некоторых оттенков зелёного и красного дихроматы и трихроматы-аномалы испытывают трудности при использовании смартфонов, планшетов, телевизоров и других устройств визуального отображения информации [4].

Для помощи людям с ДЦЗ разрабатываются методы дальтонизации. Их цель – трансформация цветных изображений таким образом, чтобы элементы изображения, хорошо различимые трихроматами и плохо различимые дихроматами, становились для дихроматов различимы лучше [5]. Повысить различимость элементов простого изображения для дихромата можно по-разному, в том числе подчеркивая контуры и штрихуя объекты или используя искусственную цветовую палитру [6]. Некоторые устройства визуального отображения информации, в первую очередь смартфоны, стали оснащаться специальным режимом, изменяющим цвета интерфейса в соответствии с типом ДЦЗ. Однако такая техника мало пригодна для обработки сложных изображений, сделанных в неконтролируемых условиях. И хотя уже существует большое многообразие методов дальтонизации и для таких изображений, ни один из них на сегодняшний день не принят как вполне удовлетворительный ни научным сообществом, ни ДЦЗ-наблюдателями [7].

Важным условием успешной дальтонизации, помимо повышения различимости деталей, является сохранение натуральности изображений [5]. Требование сохранения натуральности означает, что цвета всех объектов должны оставаться привычными, то есть должны соответствовать опыту наблюдения объектов в естественном окружении. Это дополнительное требование усложняет задачу дальтонизации. Впервые такой метод был предложен Куном с соавторами [8]. Подобные методы разрабатывались также Хассаном [9] и группой исследователей под руководством Мао [10–12].

Однако, сколько бы внимания ни уделялось сохранению натуральности перекрашенного изображения для людей с ДЦЗ, цветовое различие между дальтонизированным и оригинальным изображением будет заметным для нормальных трихроматов. Между тем сохранение натуральности изображения одновременно и для трихромата, и для дихромата важно с точки зрения концепции визуального общения, например, чтобы вместе смотреть фильмы или передачи. Существует ряд исследований показывающих, что практика такого совместного просмотра способствует общению и социализации [13, 14].

В работе [15] предлагается решение проблемы визуального общения на основе стереодисплея. Дихромат в стереоскопических очках рассматривает дальтонизированное изображение, а трихромат без очков – натуральное. Но эта техника требует специального оборудования и подготовки определенного вида стереограмм, которые, когда они предъясняются монокулярно, неотличимы от исходного изображения. Программных же методов, пригодных для дальтонизации изображений, сделанных в неконтролируемых условиях, и сохраняющих при этом натуральность для людей с ДЦЗ и нормальных трихроматов, разработано немного [12, 16–19].

Один из перспективных подходов к сохранению натуральности одновременно для людей с ДЦЗ и для нормальных трихроматов, основан на человеческой способности разложить своё цветовое восприятие на хроматическую и ахроматическую компоненты [20]. Ахроматическим атрибутом цвета является яркость. Хроматические же атрибуты совокупно определяют цветность объекта. Изменение ахроматической компоненты изображения сказывается на натуральности объектов меньше, чем изменение цветности [19]. Это наблюдение легло в основу нескольких методов [16–19].

Согласно методу Танаки [19], в каждом пикселе к значению ахроматической компоненты прибавляется значение его цветности с некоторым единым коэффициентом, который подбирается в ходе оптимизации для каждого входного изображения. Таким образом, метод Танаки

является координатно-независимым. В таких методах, называемых также попиксельными, к каждому пикселю независимо применяется одно и то же преобразование, хотя параметры обработки могут меняться от изображения к изображению. Попиксельные методы имеют ограничения. Поскольку параметры преобразования определяются для всего изображения сразу и не зависят от локальной окрестности каждого отдельного пикселя, в результате улучшения контраста между первоначально неразличимыми цветами может произойти преобразование ранее различимых цветов в неразличимые комбинации, что и является проблемой метода Танаки, пока непреодоленной [19].

В рамках другого метода за авторством Тенненхольца и Зачевски [18] строится карта усредненных потерь контраста в окрестности каждого пикселя, и на её основе в каждом пикселе изменяется ахроматическая компонента. Отметим, что метод Тенненхольца является координатно-зависимым. Это значит что пиксели обрабатываются не по отдельности, а с учетом их локальной окрестности.

Метод Тенненхольца обладает принципиальным преимуществом перед методом Танаки. Благодаря тому, что он является координатно-зависимым, исходный цвет может преобразовываться по-разному не только для разных изображений, но и в разных местах одного и того же изображения, что дает больше свободы для сохранения исходных контрастов. Но, как справедливо замечают Менг и Танака [19], эта же особенность метода Тенненхольца может приводить к тому, что близкие по цвету пиксели входного изображения могут сильно различаться после обработки. Мы, в свою очередь, заметим, что в восприятии этих ошибок решающую роль играет пространственное расположение таких искаженных пикселей. Ахроматическое искажение пространственно удаленных друг от друга пикселей мало заметно для зрительной системы человека [21]. Для соседних пикселей, наоборот, искажения могут приводить к возникновению паразитных границ, что очень заметно. Таким образом, для реализации своего принципиального преимущества координатно-зависимые методы должны быть нацелены на максимальное сохранение соотношения соседних пикселей, хотя могут допускать и искажение удаленных пикселей.

Такой метод был предложен Симон-Лидтке и Фарупом в работе [17]. Сохранение натуральности обеспечивается за счет обработки только ахроматической компоненты. Сохранение контрастов происходит в русле концепции Соколинского и Вульфа [22]. Недостатком метода, предложенного в работе [17], является сохранение контрастов без учета типа ДЦЗ (яркостный канал модифицируется с помощью метода контраст-сохраняющей деколоризации). Также предложенный метод был ограниченно протестирован с неоднозначными результатами. Дальнейшие исследования группы Фарупа были продолжены в другом направлении [23, 24]. Так, в работе [24] был предложен метод анизотропной дальтонизации с акцентом на сохранение локальных контрастов, теряемых именно при ДЦЗ, но без сохранения натуральности, так как модификация исходного изображения в методе не ограничивается изменением ахроматической компоненты.

Известно, что разработка метода дальтонизации на основе метода Соколинского и Вульфа велась также группой ученых под руководством Финлейсона. Финлейсон и Хейс предложили модификацию метода Соколинского и Вульфа с заменой этапа интегрирования градиентного поля процедурой POP, которая позволяет обойти такие сложные этапы исходного метода, как выбор направлений при построении целевого градиентного поля и последующее интегрирование этого векторного поля [25]. В статье вскользь предлагается использовать эту технику, в том числе для дальтонизации. Три исходных RGB канала предлагается сжать с помощью POP в один и заменить им ахроматическую компоненту изображения, симулирующего восприятие дихромата.

Подчеркнем, что и метод анизотропной дальтонизации Фарупа, и идея Финлейсона не нацелены на сохранение натуральности одновременно и для дихромата, и для нормального трихромата. Для того, чтобы исправить этот недостаток, сохранив при этом преимущества координатно-зависимых методов, нацеленных на сохранение локального контраста, в данной работе предлагается новый метод дальтонизации. Сохранение натуральности в предлагаемом методе обеспечивается за счет того, что модификации подвергается только ахроматическая компонента изображения. Для сохранения локальных контрастов ставится оптимизационная задача, близкая по постановке к задаче из работы Соколинского и Вульфа [22]. Возникает вопрос: возможно ли значимое восстановление локального контраста, теряемого дихроматом, за счет модификации одной лишь ахроматической компоненты? Для ответа на этот вопрос было проведено как объективное, так и субъективное оценивание, в рамках которого предложенный метод сравнивался с методом анизотропной дальтонизации, предложенным Фарупом [24], в котором модификация исходного изображения не ограничивается изменением ахроматической компоненты.

По оценке испытуемых, предлагаемый метод существенно повышает контрастность изображений для людей с ДЦЗ и сохраняет их натуральность не только для людей с ДЦЗ, но и для нормальных трихроматов. Он показал хорошие результаты для разных типов ДЦЗ-наблюдателей (протанов и дейтанов) с разной степенью дефективности (дихроматы и аномальные трихроматы). ДЦЗ типа тританопия является очень редким, наблюдатели с данным типом не были обнаружены.

Поскольку у испытуемых с разным типом ДЦЗ теряются разные цветные детали на наблюдаемых изображениях, алгоритм дальтонизации был подстроен под тип ДЦЗ пользователя. Для диагностики типа ДЦЗ нами был использован САД-метод [26].

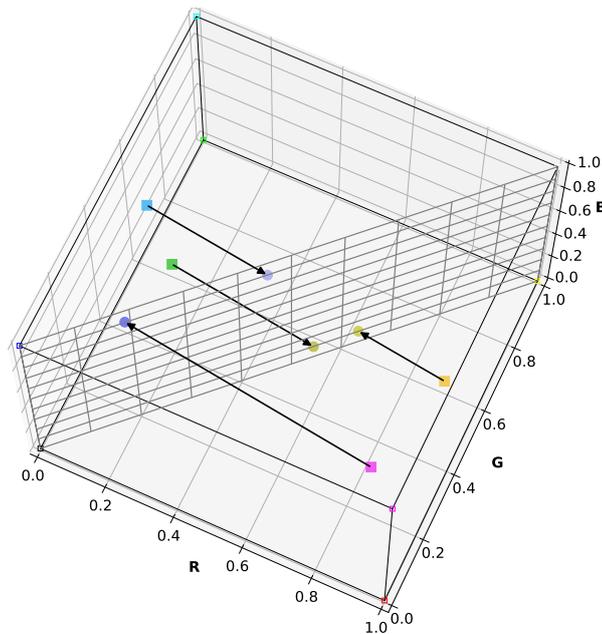
## 2. СИМУЛЯЦИЯ ДИХРОМАТА

Для решения задачи дальтонизации необходимо уметь моделировать цветное изображение в том виде, как его воспринимают испытуемые с ДЦЗ. Для этого используется симуляция цветового восприятия дихроматов.

Основное требование, которое предъявляется к алгоритму симуляции, может быть сформулировано следующим образом: каждое множество неразличимых для дихромата цветов должно отображаться симулятором в один цвет из этого множества, но в какой именно – не регламентируется. Очевидно, что таких алгоритмов можно построить бесконечно много. Отличаться эти алгоритмы будут заполнением «слепого» канала в изображении симуляции – канала, соответствующего типу колбочек, отсутствующему у дихромата. Для протанопии это сигнал канала L, для дейтеранопии – канала M в пространстве координат LMS. Наиболее простыми с математической точки зрения являются симуляторы, осуществляющие линейное преобразование цветовых векторов. В этом случае сигнал «слепого» канала является линейной комбинацией сигналов остальных двух каналов.

В настоящей работе используется алгоритм симуляции, описанный в работе Вьено с соавторами [27]. Этот алгоритм является линейным, что упрощает его включение в состав алгоритма дальтонизации. Симуляция Вьено сохраняет на изображении-симуляции синий, жёлтый и градации серого – те цвета, которые нормально различают протанопии и дейтеранопии. Преобразование цветов в результате симуляции проиллюстрировано на рис. 1. Кроме того, максимально используется цветовой охват дисплея. Всё это важно для визуальной оценки потери контраста для дихромата и восстановления контраста в результате дальтонизации.

Из предложенного Вьено с соавторами алгоритма без изменений была использована матрица пересчёта относительных фотометрических величин (линейные RGB координаты) в отклики колбочек трихромата (LMS), поскольку рассмотренные авторами основные цвета и точка



**Рис. 1.** Симуляция восприятия четырех цветов протанопом в линейном цветовом пространстве RGB с помощью линейного алгоритма Вьено. Квадратиками обозначены исходные цвета, а кружками – результат симуляции.

белого для дисплея стандарта ITU-R BT.709 полностью соответствуют таковым для пространства цветных координат sRGB. При модификации алгоритма для использования с дисплеем с другим цветовым охватом такие матрицы легко пересчитать по предложенной авторами методике. Точно так же без изменений были использованы матрицы симуляции восприятия протанопов и дейтеранопов. Переход от координат sRGB к линейным RGB координатам, сделанный авторами на основе степенной функции с показателем 2.2, был заменен на электронно-оптическую передаточную функцию стандарта sRGB, состоящую из линейного и степенного участков. Этап сжатия цветового охвата изображения был исключен. Этот шаг алгоритма призван сжать цветовой охват исходного изображения, чтобы гарантировать, что все цвета на изображении-симуляции попадают в цветовой охват дисплея. Однако после такой компрессии симуляция соответствовала бы уже не исходному изображению, а изменённому, со сжатым цветовым охватом. Без сжатия цветового охвата на изображении-симуляции возможно появление пикселей с отрицательными значениями линеаризованных RGB и со значениями, превышающими 1. В разработанном алгоритме дальтонизации визуализация изображений-симуляций не требуется, однако она нужна для отладки. В предположении, что доля значений, выходящих за пределы диапазона, невелика, при визуализации все значения меньше нуля приравнивались к нулю, а все значения больше единицы приравнивались к единице.

В результате алгоритм симуляции сводится к применению следующего линейного преобразования:

$$\vec{c}_s = \hat{D} \vec{c}, \tag{1}$$

где  $\vec{c}$  – исходный цветовой вектор,  $\vec{c}_s$  – цветовой вектор на симулированном изображении,  $\hat{D}$  – матрица симуляции. Для симуляции восприятия протанопов и дейтеранопов использовались следующие матрицы:

$$\hat{D}^P = \begin{bmatrix} 0.1124 & 0.8876 & 0 \\ 0.1124 & 0.8876 & 0 \\ 0.0040 & -0.0040 & 1 \end{bmatrix}_{linRGB}, \quad \hat{D}^D = \begin{bmatrix} 0.2928 & 0.7072 & 0 \\ 0.2928 & 0.7072 & 0 \\ -0.0223 & 0.0223 & 1 \end{bmatrix}_{linRGB}.$$

## 3. АХРОМАТИЧЕСКАЯ КОНТРАСТ-СОХРАНЯЮЩАЯ ДАЛЬТОНИЗАЦИЯ

Как было упомянуто во введении, координатно-зависимые методы должны быть нацелены в первую очередь на сохранение локального контраста изображения. Формализацией локального контраста для одноканального изображения является градиент. Для многоканального изображения Соколинский и Вульф в работе [22] предложили использовать модель псевдоградиента. Определим многоканальное изображение как отображение  $u : \Omega \rightarrow P^n$ , где  $\Omega \in \mathbb{R}^2$ ,  $P^n$  – это  $n$ -мерное цветовое пространство значений многоканального изображения. Далее определим структурной тензор  $S$ , предложенный Ди Зензо в работе [28], следующим образом:

$$S(i, j) = \nabla \vec{u}(i, j)^T \nabla \vec{u}(i, j), \quad (2)$$

где  $\nabla \vec{u}(i, j)$  – матрица Якоби для изображения  $\vec{u}$  в точке  $(i, j)$ :

$$\nabla \vec{u}(i, j) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \vec{u}^1(i, j)}{\partial i} & \frac{\partial \vec{u}^1(i, j)}{\partial j} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \vec{u}^n(i, j)}{\partial i} & \frac{\partial \vec{u}^n(i, j)}{\partial j} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Псевдоградиент определяется через  $\lambda_{\max}$  – наибольшее по модулю собственное число тензора  $S$ , а также соответствующий ему собственный вектор  $\vec{e}_{\max}$ :

$$\tilde{\nabla}_{\pm} \vec{u}(i, j) = \pm \sqrt{\lambda_{\max}} \vec{e}_{\max}. \quad (4)$$

Для выбора знака псевдоградиента было предложено несколько методов [22, 29–31], одним из которых является выбор знака в соответствии с направлением градиента опорного изображения, сформированного путем суммирования каналов исходного изображения в каждом пикселе [22]. Псевдоградиент с выбранным знаком обозначим как  $\tilde{\nabla}$ .

На основе модели псевдоградиента Соколинский и Вульф предложили контраст-сохраняющий подход для решения задачи визуализации многоканального изображения. В рамках этой задачи требуется сократить количество каналов входного изображения с двух или более до одного, сохраняя информацию, важную с точки зрения визуального восприятия человеком [22, 32]. Далее этот подход рассматривается подробнее, затем будет описано, как предлагается применять его в задаче дальтонизации.

Ключевой аспект контраст-сохраняющего подхода – воссоздание изображения по его контрастам. А именно, искомое одноканальное изображение подбирается в процессе минимизации отклонения векторного поля градиентов этого изображения  $u^*$  от векторного поля псевдоградиентов  $\tilde{\nabla} \vec{u}_0$ :

$$u^* = \arg \min_u \iint_{\Omega} \|\nabla u - \tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2 d\Omega, \quad (5)$$

где  $\vec{u}_0$  – исходное изображение,  $\|\cdot\|_2$  – евклидова норма. Оптимизационный критерий (5) принято называть линейным [30].

Согласно закону Вебера-Фехнера, для человеческого восприятия относительные значения интенсивностей стимулов важнее, чем абсолютные. В контексте задачи визуализации изображений этот закон может быть проиллюстрирован тем фактом, что плавные градиенты на изначально монотонных участках изображения будут различимы человеком значительно лучше, чем такие же по амплитуде ошибки, появляющиеся на изначально немонотонных участках. Линейный критерий (5) не учитывает этот эффект, что может приводить к появлению упомянутых градиентных ошибок на результирующем изображении [33]. Для преодоления этого

недостатка в работе [30] Соколов и соавторы предложили использовать другой класс критериев – критерии относительной ошибки, также называемые нелинейными. В работе [30] был описан один из нелинейных критериев, который мы будем называть критерием Соколова:

$$u^* = \arg \min_u \iint_{\Omega} \frac{\|\nabla u - \tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2}{\|\nabla u\|_2^2 + \|\tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2 + \epsilon^2} d\Omega, \quad (6)$$

где  $\epsilon$  – параметр регуляризации. В работе [21] было показано, что контраст-сохраняющая визуализация с критерием Соколова превосходит альтернативные методы [21]. На данный момент авторам данной работы не известны другие нелинейные критерии. Теперь вернемся от задачи визуализации многоканальных изображений к задаче дальтонизации, взяв за точку отсчета функционал (6).

В отличие от задачи визуализации, казалось бы, в случае дальтонизации снижения размерности не происходит: исходное трехканальное изображение необходимо преобразовать в дальтонизированное, но также трехканальное изображение и отобразить на обычном дисплее. Но здесь следует вспомнить, что цель дальтонизации – так преобразовать изображение, чтобы при его просмотре человеком с ДЦЗ, потери информации относительно исходного изображения, наблюдаемого во всей полноте трихроматом, были минимальны. Поэтому любой разумный метод дальтонизации должен учитывать восприятие наблюдателя-дихромата. Как было описано в предыдущем разделе, дихромазия моделируется посредством преобразования, которое уменьшает количество каналов в пространстве LMS. Таким образом, метод дальтонизации обеспечивает уменьшение размерности изображения в пространстве LMS, но на выходе выдает трехканальное изображение. В данной работе предлагается новый метод дальтонизации, основанный на подходе Соколинского и Вульфа, с новым нелинейным критерием.

Заменяем в критерии (6) результирующее одноканальное изображение  $u$  на результирующее трехканальное дальтонизированное изображение  $D\vec{u}$ . Градиент одноканального изображения  $\nabla u$  заменим псевдоградиентом трёхканального изображения  $\tilde{\nabla}[D\vec{u}]$ :

$$u^* = \arg \min_{\vec{u}} \iint_{\Omega} \frac{\|\tilde{\nabla}[D\vec{u}] - \tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2}{\|\tilde{\nabla}[D\vec{u}]\|_2^2 + \|\tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2 + \epsilon^2} d\Omega, \quad (7)$$

где  $\hat{D}$  – матрица симуляции (см. выражение (1)). Отметим, что в знаменателе нелинейного критерия Соколова вклад контраста результирующего изображения  $\|\nabla u\|_2^2$  и контраста исходного изображения  $\|\tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2$  равнозначны. Однако это не соответствует смыслу задачи, причем как задачи дальтонизации, так и задачи визуализации. Дело в том, что исходное изображение содержит целевые контрасты, к которым контрасты результирующего изображения должны быть максимально приближены, а не наоборот. Если  $\|\nabla u\|_2^2 \rightarrow \infty$  и  $\|\tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2 \rightarrow 0$ , то значение критерия должно стремиться к бесконечности, что не выполняется для критерия (6). Для устранения описанного недостатка в данной работе предлагается новый нелинейный критерий для задачи дальтонизации:

$$\vec{u}^* = \arg \min_{\vec{u}} \iint_{\Omega} \frac{\|\tilde{\nabla}[\hat{D}\vec{u}] - \tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2}{\|\tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2 + \epsilon^2} d\Omega. \quad (8)$$

Этот нелинейный критерий, с одной стороны, сохраняет преимущество нелинейного критерия Соколова, то есть предотвращает появление гало, с другой стороны, он асимметричен в пользу контрастов исходного изображения.

Постановка задачи (8) ориентирована на сохранение локальных контрастов, но не учитывает сохранение натуральности как для дихроматов, так и для трихроматов. Чтобы выделить

границы, невидимые для дихроматов, предлагается модифицировать ахроматическую составляющую пикселей, умножая значения  $\vec{u}_0$  на определенный вес  $w$ , свой для каждого пикселя:

$$\vec{u} = w^* \vec{u}_0, \quad w^* = \arg \min_w \iint_{\Omega} \frac{\|\tilde{\nabla}[\hat{D} w \vec{u}_0] - \tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2}{\|\tilde{\nabla} \vec{u}_0\|_2^2 + \epsilon^2} d\Omega, \quad (9)$$

где  $\vec{u}_0$  — исходное изображение,  $w$  — карта весов,  $\vec{u}$  — результирующее дальтонизированное изображение.

Заменим псевдоградиент на евклидову норму разности цветовых координат пикселей с пространственными координатами  $p$  и  $q$ . Для каждого  $p = (x, y)$  вычисляется евклидова разность с двумя смежными соседними пикселями  $q_1 = (x + 1, y)$  и  $q_2 = (x, y + 1)$ . В итоге дискретизированная задача оптимизации (9) принимает следующий вид:

$$w^* = \arg \min_w \sum_{p,q} \frac{(\|\hat{D} w_p \vec{u}_p - \hat{D} w_q \vec{u}_q\|_2 - \|\vec{u}_p - \vec{u}_q\|_2)^2}{\|\vec{u}_p - \vec{u}_q\|_2^2 + \epsilon^2}. \quad (10)$$

Оптимизационная постановка (10) осложнена большой размерностью пространства параметров, а также невыпуклостью целевого функционала. Эти проблемы в свою очередь влекут субоптимальность многих получаемых решений. Далее будет рассмотрена упрощенная оптимизационная постановка.

Во-первых, сосредоточим наше внимание только на числителе исходного функционала (10):

$$w^* = \arg \min_w \sum_{p,q} (\|w_p \hat{D} \vec{u}_p - w_q \hat{D} \vec{u}_q\|_2 - \|\vec{u}_p - \vec{u}_q\|_2)^2. \quad (11)$$

Во-вторых, произведем замену переменных. Заменим величины  $w_p$ ,  $w_q$  и  $\vec{u}_p$ ,  $\vec{u}_q$  на их разности и их средние значения:

$$\begin{cases} \Delta w_{p,q} = w_p - w_q \\ \bar{w}_{p,q} = \frac{1}{2}(w_p + w_q) \end{cases}, \quad \begin{cases} \Delta \vec{u}_{p,q} = \vec{u}_p - \vec{u}_q \\ \bar{\vec{u}}_{p,q} = \frac{1}{2}(\vec{u}_p + \vec{u}_q) \end{cases}. \quad (12)$$

Далее предположим, что среднее значение весов соседних пикселей остается постоянным:  $\bar{w}_{p,q} = const$ . Заменив исходные переменные новыми и подставив их в (11), мы получим квадратное уравнение относительно  $\Delta w_{p,q}$ :

$$\|\Delta w_{p,q} \hat{D} \bar{\vec{u}}_{p,q} + \bar{w} \hat{D} \Delta \vec{u}_{p,q}\|_2^2 - \|\Delta \vec{u}_{p,q}\|_2^2 = 0. \quad (13)$$

Уравнение (13) решается независимо для каждой пары пикселей  $p$  и  $q$ . На основе каждого пикселя изображения создается две пары:  $p_1 = (x, y)$ ,  $q_1 = (x + 1, y)$ ,  $p_2 = (x, y)$ ,  $q_2 = (x, y + 1)$ . Для выбора между решениями уравнения (13) используются опорные разности. Опорные разности вычисляются по интегральному изображению, получаемому суммой каналов исходного изображения в каждом пикселе. Если для данной пары  $p, q$  опорная разность больше нуля, то в качестве  $\Delta w_{p,q}$  используется большее из двух решений уравнения (13). Если опорная разность меньше нуля, то используется меньшее из двух решений.

После замены переменных решением упрощенной задачи (13) являются не значения весов  $w_p, w_q$ , а их разности  $\Delta w_{p,q}$ . Поскольку для дальтонизации требуются сами веса, снова возникает задача реконструкции изображения по известным контрастам (в данном случае разностям  $\Delta w_{p,q}$ ). Для этой цели применим следующий нелинейный критерий с предложенными выше модификациями знаменателя:

$$w^* = \arg \min_w \sum_{p,q} \frac{((w_p - w_q) - \Delta w_{p,q})^2}{\Delta w_{p,q}^2 + \epsilon^2}. \quad (14)$$

Веса, полученные в результате оптимизации (14), могут выходить за пределы диапазона  $[0, 1]$ . В результате умножения на такие веса в некоторых пикселях значения дальтонизированного изображения  $\vec{u}$  могут выйти за пределы диапазона sRGB. Для того, чтобы отобразить такое изображение на дисплее, требуется решить задачу, известную в области обработки изображений с высоким динамическим диапазоном (англ. High Dynamic Range, HDR) как масштабирование значений интенсивности (англ. tone mapping). Масштабирование значений интенсивности применяется для сжатия HDR сигнала для обеспечения возможности его отображения на различных устройствах вывода с низким динамическим диапазоном, таких как обычные компьютерные дисплеи [34,35]. В предлагаемом методе дальтонизации для масштабирования интенсивности значения ниже нуля приравниваются к нулю, после чего применяется нормировка на максимальное значение.

Схема предлагаемого метода показана на рис. 2. Исходный код предложенного метода до-

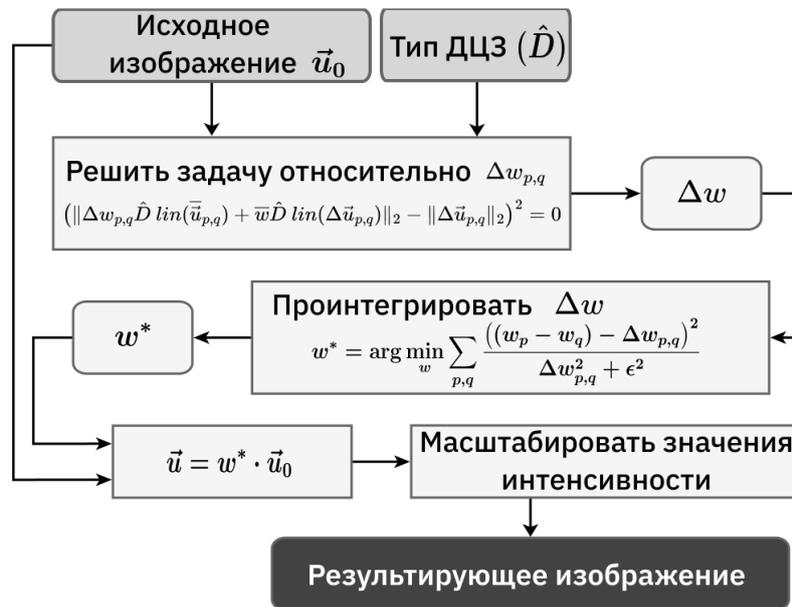


Рис. 2. Схема метода ахроматической контраст-сохраняющей дальтонизации.

ступен для скачивания: <https://github.com/iitpvisionlab/achromatic-daltonization>.

#### 4. ОЦЕНКА СОХРАНЕНИЯ НАТУРАЛЬНОСТИ

Натуральность является сложным феноменом восприятия. Согласно психофизическим экспериментам, многие визуальные факторы оказывают существенное влияние на натуральность изображения: цветность, резкость, контраст, размытость, имитация бликов, воспроизведение деталей в тенях и др. [36, 37]. Данная работа опирается на экспериментальные данные, согласно которым на субъективную оценку натуральности влияет, прежде всего, цветовой тон изображений, а влиянием яркости наблюдатели обычно пренебрегают [38–40]. Для оценки натуральности будет использована формула различия цветности, которая активно применяется в современных исследованиях, посвященных разработке методов дальтонизации [9, 10, 12, 41, 42].

Рассмотрим формулу различия цветности, согласно работе [10]:

$$CD_{Lab}(u_{ref}, u_{test}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(a_i^{test} - a_i^{ref})^2 + (b_i^{test} - b_i^{ref})^2}, \quad (15)$$

где  $N$  – общее количество пикселей,  $u_{ref}$  – эталонное изображение,  $u_{test}$  – тестовое изображение,  $a^{test}, a^{ref}, b^{test}, b^{ref}$  – CIE Lab координаты эталонного и тестового изображений соответственно. Формула (15) основана на предположении, что CIE Lab координаты  $a$  и  $b$  определяют цветность, однако далее будет показано, что это предположение неверно.

Для этого потребуется обратиться к координатам CIE XYZ. Согласно спецификации ICC.2:2019 [43], преобразование координат CIE XYZ в координаты CIE Lab выполняется по следующей формуле:

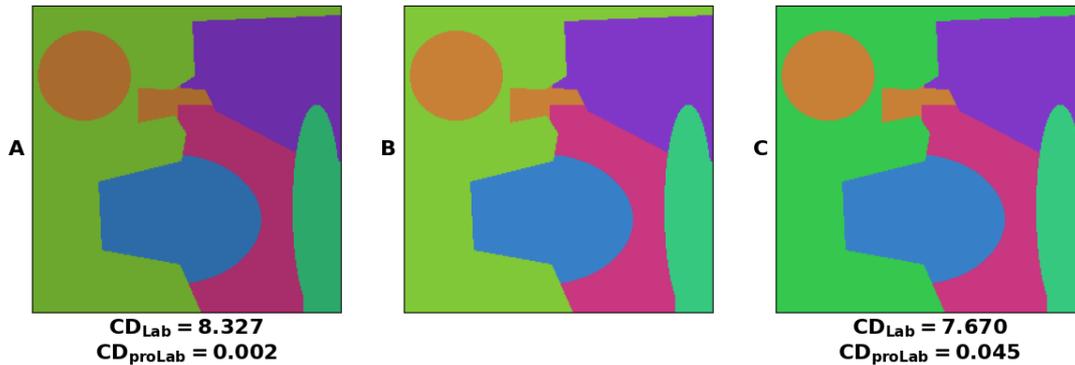
$$\begin{aligned} L &= 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16; & a &= 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right); \\ & & b &= 200\left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right), \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$f(t) = \begin{cases} \sqrt[3]{t} & \text{при } t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{841}{108}t + \frac{4}{29} & \text{при } t \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{cases}, \quad (17)$$

$X_n, Y_n, Z_n$  задают ахроматический источник освещения.

Умножение координат  $X, Y$  и  $Z$  на произвольное значение не должно изменять цветность в смысле плоскости цветности CIE xy [44]. Однако, согласно (16), значения  $a$  и  $b$  изменятся. Этот эффект проиллюстрирован на рис. 3. Значения метрики  $CD_{Lab}$ , рассчитанные в координатах CIE Lab по формуле (15), показывают, что изображение 3С по цветности ближе к исходному изображению 3В, чем 3А. Такое соотношение значений метрики не соответствует визуальному впечатлению: цветность изображения 3С искажена сильнее, что особенно заметно, если посмотреть на большую зеленую область в левой части изображения.



**Рис. 3.** Сравнение метрики  $CD_{Lab}$  и её модификации  $CD_{proLab}$ . На рисунке представлено исходное изображение В и два искаженных изображения А и С. На изображении С цветность искажена явно сильнее, чем на изображении А (обратите внимание на левую зеленую область).

Для корректной оценки различия цветности в данной работе предлагается использовать координаты proLab [45]. Это равноконтрастная система цветовых координат, полученная в результате трехмерного проективного преобразования координат CIE XYZ. Координаты proLab

по определению сохраняют линейность многообразий, а также обладают большей перцептивной равномерностью, чем широко распространённая система CIE LAB. Однако наиболее важная особенность proLab с точки зрения оценки различия цветности состоит в том, что при переходе из XYZ в proLab после проективного преобразования координаты цвета  $a^+$ ,  $b^+$  делятся на  $L^+$ :

$$\tilde{a} = \frac{a^+}{L^+}, \quad \tilde{b} = \frac{b^+}{L^+}. \quad (18)$$

В результате различие цветности, рассчитанное по координатам  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$ , является инвариантным к ахроматическому масштабированию в отличие от различия, рассчитываемого в координатах Lab  $a$  и  $b$ :

$$CD_{proLab}(u_{ref}, u_{test}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(\tilde{a}_i^{test} - \tilde{a}_i^{ref})^2 + (\tilde{b}_i^{test} - \tilde{b}_i^{ref})^2}. \quad (19)$$

Согласно  $CD_{proLab}$  на рис. 3 изображение А по цветности ближе к исходному изображению 3В, чем 3С, что соответствует визуальному впечатлению.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Задача дальтонизации в выбранной постановке включает в себя две подзадачи: улучшение контраста элементов изображения и сохранение натуральности. Чтобы объективно оценить методы дальтонизации, используются метрики и показатели качества, которые оценивают улучшение контраста и сохранение натуральности по отдельности. В дальнейших экспериментах для сравнения с предлагаемым методом был выбран метод анизотропной дальтонизации, предложенный Фарупом [24], для которого автором был опубликован исходный код.

### 5.1. Набор данных

Для испытания предложенного метода был собран набор изображений (рис. 4). Набор данных доступен для скачивания по ссылке <https://zenodo.org/records/13784429>. Набор состоит из 10 изображений. Изображения подбирались по нескольким критериям. Во-первых, на изображении должен присутствовать доминирующий цветовой контраст, как правило, это контраст между некоторым объектом и фоном. Доминирующий цветовой контраст должен быть между оттенками красного, с одной стороны, и оттенками зеленого – с другой, так как именно различение этих цветов затрудняет дейтанов и протанов. Наконец, на основе симуляции отбирались изображения с наиболее выраженным эффектом потери границ для протанов или дейтанов.

Изображения отбирались из двух источников. Первый источник представляет собой набор из нескольких тысяч всевозможных изображений, которые содержат варьирующиеся по площади элементы разных оттенков, трудноразличимые для людей с ДЦЗ [46]. Вторым источником послужил набор изображений, собранный Фарупом и соавторами и фигурирующий в качестве иллюстраций в их статьях [23, 24]. Исходники этих изображений были найдены методом обратного поиска.

### 5.2. Качественная и объективная оценка дальтонизации

Характерные примеры обработанных изображений представлены на рисунках 5-8, где проиллюстрированы результаты для случая протанопии (рис. 5-7, в которых использованы изображения 2, 5 и 7), и для случая дейтеранопии (рис. 8, в котором использовано изображение



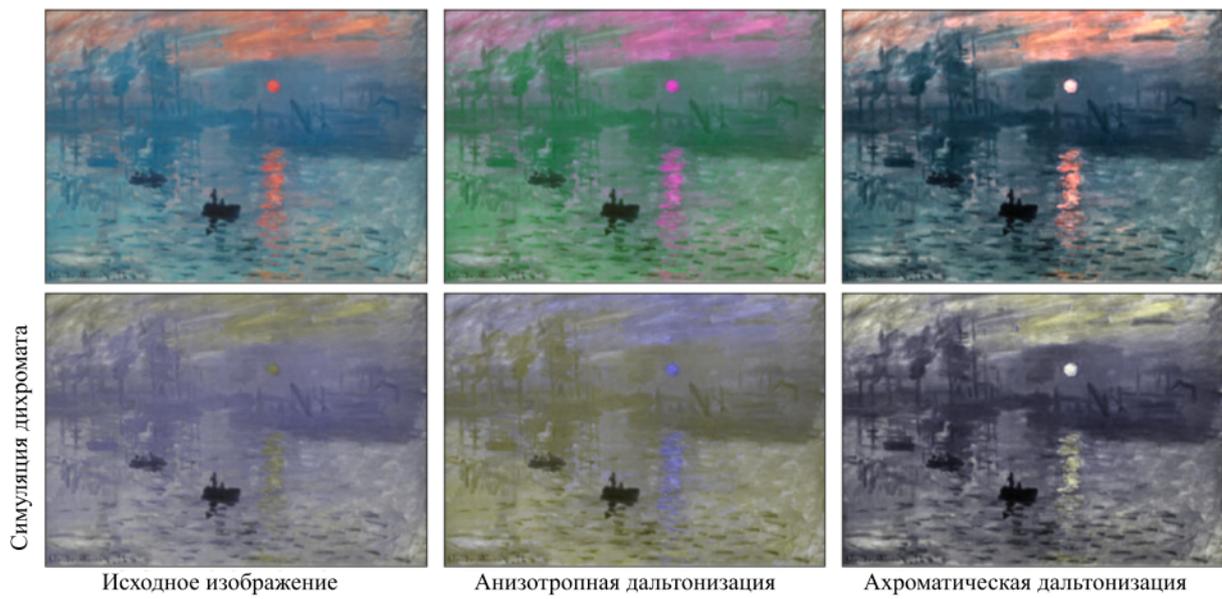
Рис. 4. Набор изображений собранный для тестирования методов дальтонизации.

9 из собранного набора). На рис. 5, 7, 8 видно, что различимость цветов и грибов, изначально плохая для протанов, значительно улучшается обоими методами. Но для изображения 9 (рис. 6), на котором в отсутствие обработки солнце становится практически невидимым, только предложенный метод восстанавливает его различимость в полной мере. Методу анизотропной дальтонизации не удается восстановить контраст в этом месте даже за счет искажения цветности.

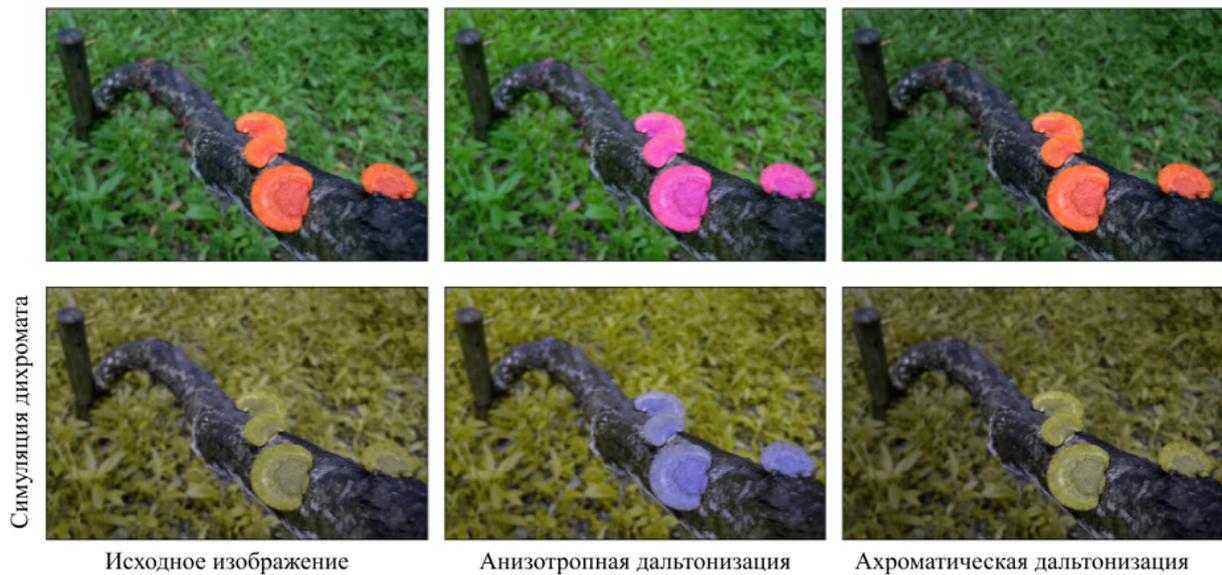


Рис. 5. Обработка изображения 5 для протанов. По столбцам: исходные изображения; изображения, полученные методом анизотропной дальтонизации; и изображения, полученные предложенным методом ахроматической дальтонизации. По строкам: изображение и его симуляция.

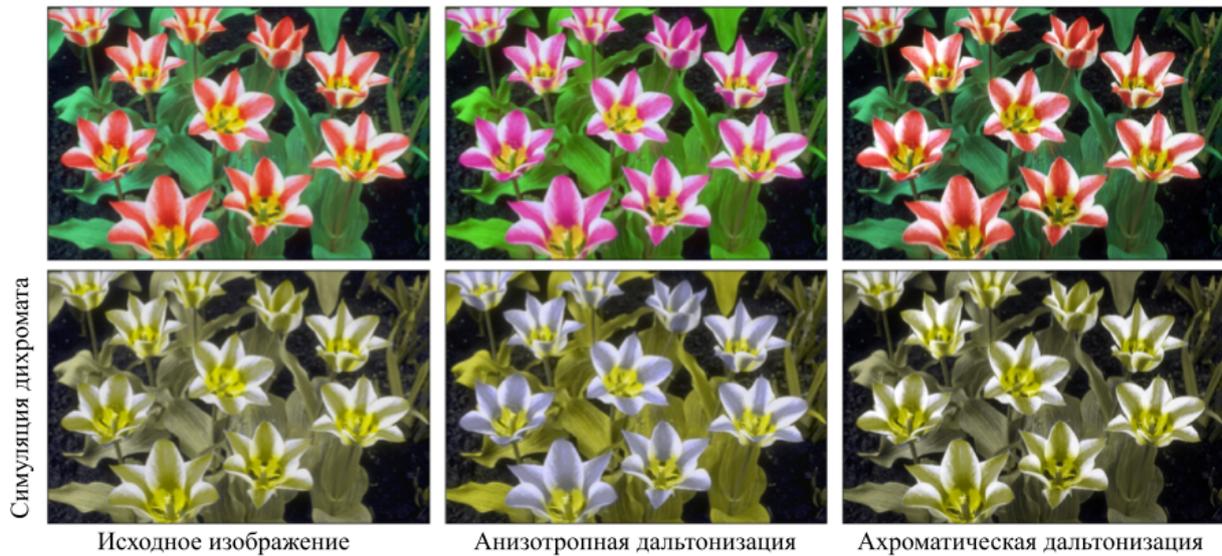
В таблицах 1 и 2 приведены усредненные по десяти изображениям набора (рис. 4) результаты расчета метрик сохранения натуральности:  $CD_{Lab}$  (формула (15)) и  $CD_{proLab}$  (формула (19)). Оценка натуральности проводилась как для случая нормальных трихроматов, так и для случая людей с ДЦЗ. В первом случае в качестве референсного изображения использовалось исходное, а в качестве тестового – дальтонизированное трихроматическое изображение. Во втором случае использовались симуляции исходного и дальтонизированного изображений.



**Рис. 6.** Обработка изображения 7 для протанов. По столбцам: исходные изображения; изображения, полученные методом анизотропной дальтонизации; и изображения, полученные предложенным методом ахроматической дальтонизации. По строкам: изображение и его симуляция.



**Рис. 7.** Обработка изображения 2 для протанов. По столбцам: исходные изображения; изображения, полученные методом анизотропной дальтонизации; и изображения, полученные предложенным методом ахроматической дальтонизации. По строкам: изображение и его симуляция.



**Рис. 8.** Обработка изображения 9 для дейтанов. По столбцам: исходные изображения; изображения, полученные методом анизотропной дальтонизации; и изображения, полученные предложенным методом ахроматической дальтонизации. По строкам: изображение и его симуляция.

Предложенный метод демонстрирует более низкие значения  $CD$ , что указывает на более близкое сходство цветности с исходным изображением. Причем не только в среднем, что приведено в таблице, но и на каждой отдельной картинке. Единственное несоответствие в ответах метрик было обнаружено для изображения 5 (рис. 5). На этом изображении метрика  $CD_{Lab}$  оценивает результаты метода анизотропной дальтонизации как менее отличающиеся по цветности от оригинала по сравнению с результатами предложенного алгоритма (9.42 против 13.68 для дейтанов и 10.13 против 11.57 для протанов), причем как для случая людей с ДЦЗ, так и для случая нормальных трихроматов, что не соответствует зрительному восприятию (рис. 5). При этом  $CD_{proLab}$ , предложенная модификация метрики  $CD_{Lab}$ , демонстрирует противоположную тенденцию (0,0553 против 0,0159 для дейтанов и 0,0599 против 0,0125 для протанов), что соответствует визуальной оценке.

	Среднее по изображениям для трихроматов	Среднее по симуляционным изображениям
	обработка для дейтана	
Анизотропный	14,33	13,98
Ахроматический	<b>6,36</b>	<b>4,31</b>
	обработка для протана	
Анизотропный	15,72	15,54
Ахроматический	<b>5,86</b>	<b>4,40</b>

**Таблица 1.** Результаты расчета метрики  $CD_{Lab}$  для метода анизотропной дальтонизации и предложенного метода ахроматической дальтонизации на собранном наборе данных (см. рис. 4). Жирным шрифтом отмечается, какой вариант симуляции лучше сохраняет натуральность по метрике.

В таблицах 3 и 4 приведены результаты оценки потери и восстановления контраста по метрике RMS [47]. В отличие от оценивания натуральности, где в зависимости от наличия или отсутствия ДЦЗ референсное изображение разное, при оценке контраста референсным изображением всегда выступает исходное. Поэтому в таблицах присутствует столбец «Без далт.», в котором показан уровень потери контраста для необработанных симуляций протанов и дейтанов. В среднем для обоих типов ДЦЗ по RMS метод анизотропной дальтонизации лучше, чем

	Среднее по изображениям для трихроматов	Среднее по симуляционным изображениям
	обработка для дейтана	
Анизотропный	0,1234	0,1164
Ахроматический	<b>0,0138</b>	<b>0,0090</b>
	обработка для протана	
Анизотропный	0,1346	0,1352
Ахроматический	<b>0,0118</b>	<b>0,0074</b>

**Таблица 2.** Результаты расчета метрики  $CD_{proLab}$  для метода анизотропной дальтонизации и предложенного метода ахроматической дальтонизации на собранном наборе данных (см. рис. 4). Жирным шрифтом отмечается, какой вариант симуляции лучше сохраняет натуральность по метрике.

предложенный метод, восстанавливает исходные контрасты. При этом предложенный ахроматический метод в среднем лучше, чем изображение без какой-либо дальтонизации.

	Без далт.	Анизотропный	Ахроматический
1	0,118	<b>0,075</b>	0,117
2	0,074	<b>0,070</b>	0,084
3	0,122	<b>0,096</b>	0,114
4	0,136	<b>0,129</b>	0,137
5	0,111	0,107	<b>0,091</b>
6	0,032	0,045	<b>0,031</b>
7	<b>0,018</b>	0,056	0,043
8	0,093	0,112	<b>0,063</b>
9	0,117	<b>0,099</b>	0,120
10	0,095	<b>0,082</b>	0,100
mean	0,092	<b>0,087</b>	0,090

**Таблица 3.** Результаты расчета RMS на дейтан-симуляциях изображений, полученных методом анизотропной дальтонизации и предложенным ахроматическим методом. Жирным шрифтом отмечается вариант, который лучше сохраняет исходные контрасты согласно оценке по RMS.

	Без далт.	Анизотропный	Ахроматический
1	0,124	<b>0,035</b>	0,145
2	0,096	<b>0,048</b>	0,097
3	0,192	<b>0,044</b>	0,182
4	0,149	<b>0,097</b>	0,162
5	0,144	<b>0,051</b>	0,136
6	<b>0,027</b>	0,039	0,029
7	<b>0,039</b>	0,041	0,040
8	0,139	<b>0,085</b>	0,096
9	0,142	<b>0,089</b>	0,146
10	0,103	<b>0,045</b>	0,112
mean	0,116	<b>0,057</b>	0,114

**Таблица 4.** Результаты расчета RMS на протан-симуляциях изображений, полученных методом анизотропной дальтонизации и предложенным ахроматическим методом. Жирным шрифтом отмечается вариант, который лучше сохраняет исходные контрасты согласно оценке по RMS.

### 5.3. Субъективная оценка дальтонизации

Несмотря на то, что объективные методы оценивания призваны заменить трудоемкий процесс тестирования с участием людей, на данный момент метрики качества дальтонизации не обладают достаточной точностью [7]. Поэтому предложенный метод был также протестиро-

ван в эксперименте с участием реальных испытуемых с ДЦЗ. Для субъективных оценок был использован тот же набор данных, что и для объективных оценок.

Перед началом тестирования у всех испытуемых было проверено цветовое зрение с помощью программно-аппаратного комплекса Colour Assessment and Diagnosis (CAD) [26]. В состав комплекса входит программное обеспечение и монитор Eizo CS2420, откалиброванный и поставленный компанией City Occupational LTD (Лондон, Великобритания). Детали калибровки описаны в [48]. CAD позволяет надежно и точно идентифицировать протанов и дейтанов.

Дополнительное разделение испытуемых на дихроматов и аномальных трихроматов (например, разделение протанов на протанопов и протааномалов) требует дополнительного анализа, не входящего в стандартный функционал САД. Для выявления чистых протанопов и дейтеранопов были проанализированы пороговые диаграммы, полученные с помощью САД. Было проверено достигают ли крайние точки порогов краев гамута монитора. Испытуемые, крайние точки которых достигали границ гамута, классифицировались как дихроматы. Описанный метод основан на наблюдениях, приведенных в работе [26].

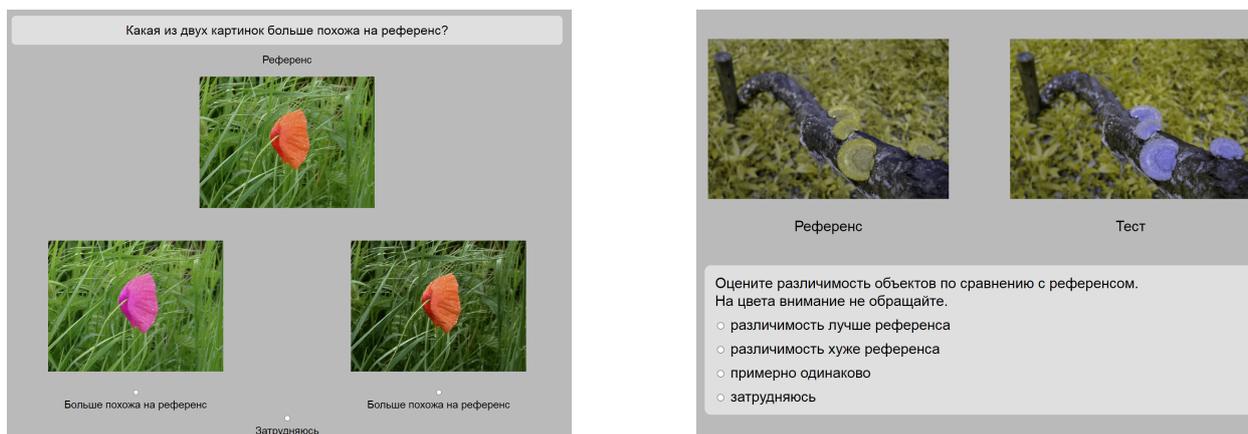
В исследовании методов дальтонизации приняло участие 17 человек, из них три были идентифицированы как нормальные трихроматы, шесть – как протаны и восемь человек получили диагноз «дейтан». Относительно небольшое количество испытуемых характерно для исследований дальтонизации и объясняется сложностью поиска и диагностики людей с ДЦЗ. Так, например, в экспериментальной части работы [23] описано участие 30 человек, в [12] – 12 участников, в [49] – 10 участников, в [11] – 10 участников.

Возраст испытуемых с ДЦЗ – от 21 до 63 лет, составляя в среднем 35 лет, при этом 50 % наблюдателей были в возрасте от 21 до 26 лет. Испытуемые с ДЦЗ были набраны из добровольцев, откликнувшихся на объявление с призывом к людям, подозревающим у себя нарушения цветовосприятия, поучаствовать в диагностике и экспериментах. Все откликнувшиеся были мужчинами.

Испытуемым задавались два типа вопросов – про контраст и про натуральность – для каждого из 10 изображений тестового набора. Термины «контраст» и «натуральность» заменялись более простыми формулировками.

1. Вопрос про натуральность: «Какая из двух картинок больше похожа на референс?» На экране три картинки: референсная картинка и две тестовых (обработка предложенным методом ахроматической дальтонизации и методом анизотропной дальтонизации). Варианты ответа: первая, вторая, либо «затрудняюсь ответить», см рис. 9.
2. Вопрос про контраст: «Оцените различимость объектов по сравнению с референсом. На цвета внимание не обращайтесь». На экране две картинки: референсная и одна тестовая. Тестовое изображение обработано одним из двух сравниваемых методов дальтонизации. Тестовую картинку нужно оценить, выбрав один из вариантов: «различимость лучше референса», «различимость хуже референса», «примерно одинаково», «затрудняюсь ответить», см рис. 9.

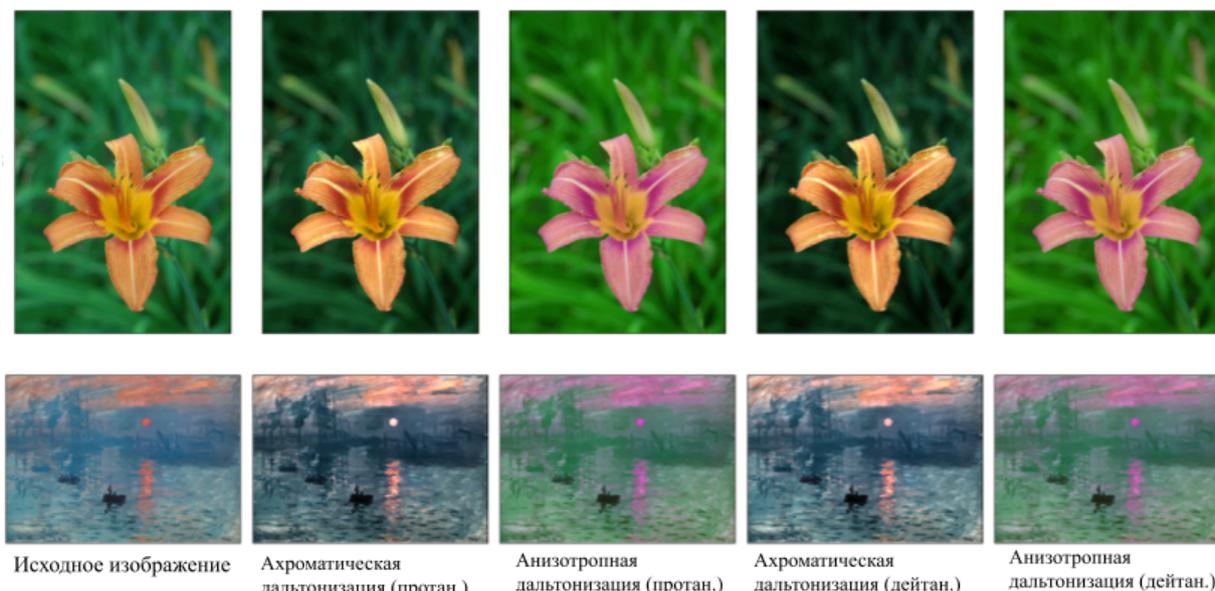
Никаких дополнительных инструкций не давалось. Время на ответ не ограничивалось. Выбор ответа осуществлялся с помощью компьютерной мыши. Изображения выводились на компьютерный монитор с разрешением 1920 на 1080 пикселей и диагональю 27 дюймов. Расстояние между монитором и наблюдателем составляло около 60 см. Таким образом, средний угловой размер изображений составлял 8 градусов по вертикали и 12 градусов по горизонтали. Во время оценки обоих методов дальтонизации участники с ДЦЗ просматривали тестовые изображения, обработанные в соответствии с их типом ДЦЗ, то есть с использованием одной из двух матриц симуляции:  $\hat{D}^P$  или  $\hat{D}^D$ . Участникам с нормальным цветовым зрением в



**Рис. 9.** Снимки экрана во время проведения эксперимента по субъективному оцениванию методов дальтонизации. Слева вопрос про контраст, справа – вопрос про натуральность.

случайном порядке предъявлялись тестовые изображения, обработанные для протанопов или дейтеранопов. От всех участников исследования было получено информированное согласие.

В таблице 5 приведена статистика ответов на вопрос про натуральность. На некоторых изображениях часть испытуемых затруднилась с ответом. У шести участников эксперимента возникли проблемы с выбором на изображении 8 – это три дейтана, два протана и один трихромат, на изображении 7 трудности возникли также у шести испытуемых: трех протанов, двух дейтанов, одного трихромата. Два этих трудных изображения приведены на рис. 10. Также отметим, что на изображении 5 (рис. 5), где метрика  $CD_{Lab}$  показала большую натуральность для метода анизотропной дальтонизации, все восемь дейтанов и все шесть протанов в соответствии с  $CD_{Lab}$  единогласно выбрали результат нашего метода как более похожего на оригинал. В целом согласно таблице 5 предложенный ахроматический метод значительно превосходит метод анизотропной дальтонизации в части сохранения натуральности.

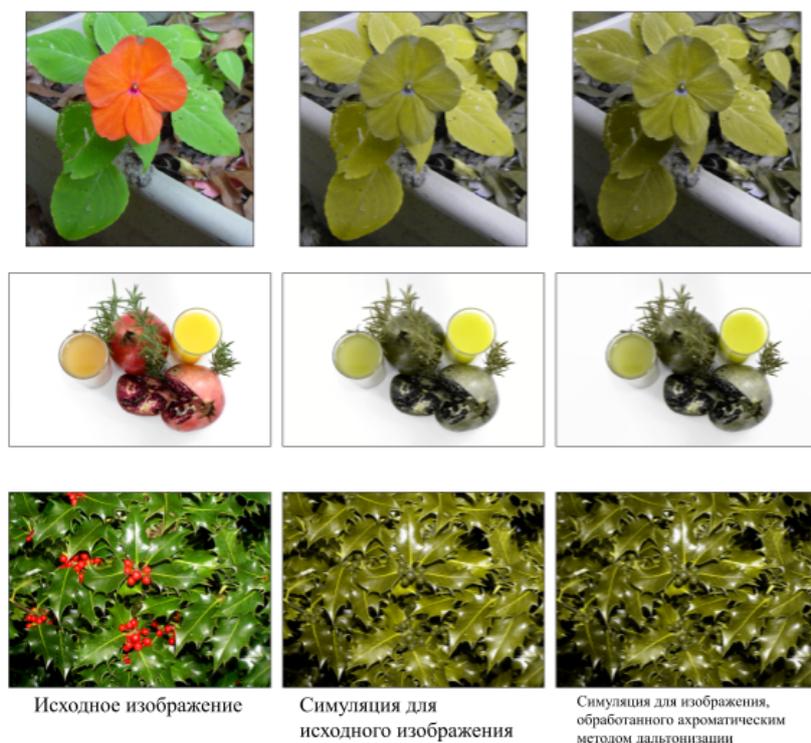


**Рис. 10.** результаты работы методов дальтонизации на изображениях 7 и 8, где испытуемые затруднились в выборе изображения более похожего на референсное.

Перейдем к результатам по вопросу контраста, которые представлены в таб. 6. Для дейтанов метод анизотропной дальтонизации, по мнению испытуемых, ухудшает даже чуть больше изображений, чем улучшает (11 раз был получен ответ об улучшении и 12 раз об ухудшении). В 56 случаях результат анизотропного метода был описан дейтанами как примерно одинаковый по сравнению с исходным изображением. Ахроматический алгоритм для дейтанов показывает более высокий результат: 34 раза были заметны улучшения, 5 раз изображения показались дейтанам хуже, чем без обработки, и в 41 случае испытуемые не заметили изменения исходного контраста.

Для протанов метод анизотропной дальтонизации сработал сильно лучше, чем для дейтанов: 38 раз обработанные изображения были предпочтительнее необработанных, и только 4 раза алгоритм ухудшил восприятие относительно исходного изображения. Предложенный алгоритм в 28 случаях для испытуемых протанов улучшил контраст, однако 11 раз они отметили, что после обработки контраст стал хуже. На рис. 11 приведены наиболее неудачные обработки предложенного алгоритма для протанов, на которых часть участников эксперимента отметила ухудшение различимости исходных объектов.

Люди с нормальным цветовым зрением в большинстве случаев не смогли сравнить контраст обработанных и исходных изображений. Причем как для метода анизотропной дальтонизации, так и для предложенного ахроматического метода.



**Рис. 11.** Примеры обработок для протанов, на которых, по мнению некоторых испытуемых, исходный контраст ахроматического метода становится хуже. По столбцам: исходные изображения, симуляции исходного и обработанного предлагаемым методом.

Подводя итог результатов опроса о контрасте, ахроматический метод в ответах дейтанов превосходит метод анизотропной дальтонизации на нашем наборе данных с точки зрения сохранения контрастов исходного изображения. Тем не менее для протанов метод анизотропной дальтонизации улучшает контраст в большем числе ответов, чем предложенный ахроматический метод. Однако даже и для протанов предложенный метод проявляет себя не хуже, чем

отсутствие какой-либо обработки в 82% ответов, превосходя при этом метод анизотропной дальтонизации по натуральности в 88% ответов.

	Анизотропная дальтонизация больше похожа на референс	Ахроматическая дальтонизация больше похожа на референс	затрудняюсь ответить	общее число ответов
дейтаны	1 (1.25%)	74 (92.5%)	5 (6.25%)	80
протаны	2 (3.3%)	53 (88.3%)	5 (8.3%)	60
трихроматы	0	29 (96.6%)	1 (3.3%)	30

**Таблица 5.** Результаты опроса про натуральность (какая из двух картинок больше похожа на референс?). В каждой ячейке приводится число ответов, просуммированное по всем изображениям и по всем испытуемым каждого типа.

	различимость лучше	различимость хуже	затрудняюсь ответить	примерно одинаково	общее число ответов
Анизотропная дальтонизация					
дейтаны	11 (13.75%)	12 (15%)	1 (1.25%)	56 (70%)	80
протаны	38 (63.3%)	4 (6.6%)	3 (5%)	15 (25%)	60
трихроматы	2 (6.6%)	5 (16.6%)	23 (76.6%)	0	30
Ахроматическая дальтонизация					
дейтаны	34 (42.5%)	5 (6.25%)	0	41 (51.25%)	80
протаны	28 (46.6%)	11 (18.3%)	5 (8.3%)	16 (26.6%)	60
трихроматы	9 (30%)	2 (6.6%)	19 (63.3%)	0	30

**Таблица 6.** Результаты опроса про контраст (оцените различимость объектов по сравнению с референсом, не обращая внимания на цвета). В каждой ячейке приводится число ответов, просуммированное по всем изображениям и по всем испытуемым каждого типа ДЦЗ.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен предложен новый координатно-зависимый метод дальтонизации, сохраняющий натуральность изображений как для людей с ДЦЗ, так и для нормальных трихроматов. Сохранение натуральности достигается за счет того, что модификации подвергается только яркостная компонента изображения. Повышение различимости элементов изображения для дихроматов достигается за счет умножения входного изображения на карту коэффициентов, получаемую в ходе решения оптимизационной задачи сохранения локальных контрастов индивидуально для каждого входного изображения.

На материале эксперимента с участием реальных людей с ДЦЗ показано, что в части сохранения натуральности предложенный метод значительно лучше анизотропной дальтонизации как для людей с ДЦЗ, так и для нормальных трихроматов. Показано, что предложенный метод дальтонизации превосходит метод анизотропной дальтонизации в части объективной оценки натуральности. На результатах субъективной оценки продемонстрировано, что в части восстановления контрастов, несмотря на ограничения, ахроматический метод превосходит метод анизотропной дальтонизации для дейтанов. Для протанов предложенный метод в целом предпочтительнее, чем изображения без дальтонизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stockman, A., Sharpe, L. The spectral sensitivities of the middle-and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*. **40**, 1711-1737 (2000)
2. Birch, J. Worldwide prevalence of red-green color deficiency. *JOSA A*. **29**, 313-320 (2012)

3. Álvaro, L., Moreira, H., Lillo, J., Franklin, A. Color preference in red–green dichromats. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*. **112**, 9316-9321 (2015)
4. Samigulina, G., Samigulin, T. Development of a cognitive mnemonic scheme for an optical Smart-technology of remote learning based of Artificial Immune Systems. *Computer Optics*. **45**, 286-295 (2021)
5. Ribeiro, M., Gomes, A. Recoloring algorithms for colorblind people: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. **52**, 1-37 (2019)
6. Hung, P., Hiramatsu, N. A colour conversion method which allows colourblind and normal-vision people share documents with colour content. *Konica Minolta Tech. Report*. **10** (2013)
7. Geddes, C., Flatla, D., Connelly, C. 30 Years of Solving the Wrong Problem: How Recolouring Tool Design Fails those with Colour Vision Deficiency. *Proceedings Of The 25th International ACM SIGACCESS Conference On Computers And Accessibility*. pp. 1-13 (2023)
8. Kuhn, G., Oliveira, M., Fernandes, L. An efficient naturalness-preserving image-recoloring method for dichromats. *IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics*. **14**, 1747-1754 (2008)
9. Hassan, M., Paramesran, R. Naturalness preserving image recoloring method for people with red–green deficiency. *Signal Processing: Image Communication*. **57** pp. 126-133 (2017)
10. Wang, X., Zhu, Z., Chen, X., Go, K., Toyoura, M., Mao, X. Fast contrast and naturalness preserving image recoloring for dichromats. *Computers & Graphics*. **98** pp. 19-28 (2021)
11. Huang, W., Zhu, Z., Chen, L., Go, K., Chen, X., Mao, X. Image recoloring for Red-Green dichromats with compensation range-based naturalness preservation and refined dichromacy gamut. *The Visual Computer*. **38**, 3405-3418 (2022)
12. Zhu, Z., Toyoura, M., Go, K., Fujishiro, I., Kashiwagi, K., Mao, X. Processing images for red–green dichromats compensation via naturalness and information-preservation considered recoloring. *The Visual Computer*. **35** pp. 1053-1066 (2019)
13. Tu, P., Chen, M., Yang, C., Wang, H. Co-viewing room: Mobile TV content sharing in social chat. *Proceedings Of The 2016 CHI Conference Extended Abstracts On Human Factors In Computing Systems*. pp. 1615-1621 (2016)
14. Ducheneaut, N., Moore, R., Oehlberg, L., Thornton, J., Nickell, E. Social TV: Designing for distributed, sociable television viewing. *Intl. Journal Of Human–Computer Interaction*. **24**, 136-154 (2008)
15. Shen, W., Mao, X., Hu, X., Wong, T. Seamless visual sharing with color vision deficiencies. *ACM Transactions On Graphics (TOG)*. **35**, 1-12 (2016)
16. Tanaka, G., Suetake, N., Uchino, E. Lightness modification of color image for protanopia and deuteranopia. *Optical Review*. **17** pp. 14-23 (2010)
17. Simon-Liedtke, J., Farup, I. Spatial intensity channel replacement daltonization (sicharda). *Color Imaging XX: Displaying, Processing, Hardcopy, And Applications*. **9395** pp. 307-320 (2015)
18. Tennenholtz, G., Zachevsky, I. Natural contrast enhancement for dichromats using similarity maps. *2016 IEEE International Conference On The Science Of Electrical Engineering (ICSEE)*. pp. 1-5 (2016)
19. Meng, M., Tanaka, G. Lightness modification method considering visual characteristics of protanopia and deuteranopia. *Optical Review*. **27**, 548-560 (2020)
20. Fairchild, M. Color appearance models. (John Wiley & Sons, 2013)
21. Сидорчук, Д., Волков, В., Никоноров, А. Сравнение метода нелинейной контраст-сохраняющей визуализации мультиспектральных изображений с известными алгоритмами деколоризации. *Информационные Процессы*. **20**, 41-54 (2020)
22. Socolinsky, D., Wolff, L. A new visualization paradigm for multispectral imagery and data fusion. *Proceedings. 1999 IEEE Computer Society Conference On Computer Vision And Pattern Recognition (Cat. No PR00149)*. **1** pp. 319-324 (1999)

23. Simon-Liedtke, J., Farup, I. Multiscale daltonization in the gradient domain. *Journal Of Perceptual Imaging*. **1**, 10503-1 (2018)
24. Farup, I. Individualised Halo-Free Gradient-Domain Colour Image Daltonisation. *Journal Of Imaging*. **6**, 116 (2020)
25. Finlayson, G., Hayes, A. Pop image fusion-derivative domain image fusion without reintegration. *Proceedings Of The IEEE International Conference On Computer Vision*. pp. 334-342 (2015)
26. Barbur, J., Rodriguez-Carmona, M. Colour vision requirements in visually demanding occupations. *British Medical Bulletin*. **122**, 51-77 (2017)
27. Viénot, F., Brettel, H., Mollon, J. Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats. *Color Research & Application*. **24**, 243-252 (1999)
28. Di Zenzo, S. A note on the gradient of a multi-image. *Computer Vision, Graphics, And Image Processing*. **33**, 116-125 (1986)
29. Drew, M., Connah, D., Finlayson, G., Bloj, M. Improved colour to greyscale via integrability correction. *Human Vision And Electronic Imaging XIV*. **7240** pp. 72401B (2009)
30. Sokolov, V., Nikolaev, D., Karpenko, S., Schaefer, G. On contrast-preserving visualisation of multispectral datasets. *International Symposium On Visual Computing*. pp. 173-180 (2010)
31. Montagna, R., Finlayson, G. Reducing integrability error of color tensor gradients for image fusion. *IEEE Transactions On Image Processing*. **22**, 4072-4085 (2013)
32. Sarycheva, A., Grigoryev, A., Sidorchuk, D., Vladimirov, G., Khaitovich, P., Efimova, O., Gavrilenko, O., Stekolshchikova, E., Nikolaev, E., Kostyukevich, Y. Structure-preserving and perceptually consistent approach for visualization of mass spectrometry imaging datasets. *Analytical Chemistry*. **93**, 1677-1685 (2020)
33. Nikolaev, D. & Karpenko, S. Color-to-grayscale image transformation preserving the gradient structure. *Proceedings Of The 20th European Conference On Modelling And Simulation.(Bonn, Germany)*. pp. 427-430 (2006)
34. Rana, A., Singh, P., Valenzise, G., Dufaux, F., Komodakis, N., Smolic, A. Deep tone mapping operator for high dynamic range images. *IEEE Transactions On Image Processing*. **29** pp. 1285-1298 (2019)
35. Kwon, H., Lee, S. Multi-Layer Decomposition and Synthesis of HDR Images to Improve High-Saturation Boundaries. *Mathematics*. **11**, 785 (2023)
36. Choi, S., Luo, M., Pointer, M., Rhodes, P. Investigation of large display color image appearance—III: Modeling image naturalness. *Journal Of Imaging Science And Technology*. **53**, 31104-1 (2009)
37. Le, Q., Ladret, P., Nguyen, H., Caplier, A. Study of naturalness in tone-mapped images. *Computer Vision And Image Understanding*. **196** pp. 102971 (2020)
38. Ridder, H., Blommaert, F., Fedorovskaya, E. Naturalness and image quality: chroma and hue variation in color images of natural scenes. *Human Vision, Visual Processing, And Digital Display VI*. **2411** pp. 51-61 (1995)
39. Ridder, H., Endrikhovski, S. 33.1: Invited paper: image quality is FUN: reflections on fidelity, usefulness and naturalness. *SID Symposium Digest Of Technical Papers*. **33**, 986-989 (2002)
40. Yoshida, A., Blanz, V., Myszkowski, K., Seidel, H. Perceptual evaluation of tone mapping operators with real-world scenes. *Human Vision And Electronic Imaging X*. **5666** pp. 192-203 (2005)
41. Zhu, Z., Toyoura, M., Go, K., Fujishiro, I., K., K., Mao, X. Naturalness- and information-preserving image recoloring for red-green dichromats. *Signal Processing: Image Communication*. **76** pp. 68-80 (2019)
42. Zhu, Z., Mao, X. Image recoloring for color vision deficiency compensation: a survey. *The Visual Computer*. **37**, 2999-3018 (2021)
43. Image technology colour management - Extensions to architecture, profile format, and data structure. *International Color Consortium Specification ICC.2:2019 (Profile version 5.0.0 - iccMAX)*. (2019)

44. B Judd, D., Wyszecki, G. Color in Business, Science and Industry. (John Wiley & Sons,1975)
45. Konovalenko, I., Smagina, A., Nikolaev, D., Nikolaev, P. ProLab: a perceptually uniform projective color coordinate system. *IEEE Access*. **9** pp. 133023-133042 (2021)
46. Li, H., Zhang, L., Zhang, X., Zhang, M., Zhu, G., Shen, P., Li, P., Bennamoun, M., Shah, S. Color vision deficiency datasets & recoloring evaluation using GANs. *Multimedia Tools And Applications*. **79**, 27583-27614 (2020)
47. Machado, G. & Oliveira, M. Real-time temporal-coherent color contrast enhancement for dichromats. *Computer Graphics Forum*. **29** pp. 933-942 (2010)
48. Barbur, J., Connolly, D. Effects of hypoxia on color vision with emphasis on the mesopic range. *Expert Review Of Ophthalmology*. **6**, 409-420 (2011)
49. Shen, X., Feng, J., Zhang, X. A content-dependent Daltonization algorithm for colour vision deficiencies based on lightness and chroma information. *IET Image Processing*. **15**, 983-996 (2021)

## A method for image daltonization that manipulates only achromatic component

**D.S. Sidorchuk, A.L. Nurmukhametov, P.V. Maximov, V.P. Bozhkova, A.P. Sarycheva, M.A. Pavlova, A.A. Kazakova, M.A. Gracheva, D.P. Nikolaev**

Color Vision Deficiency (CVD) caused by problems with one of the three types of cone receptors affect approximately 300 million people worldwide. To compensate for the insufficient color discrimination, daltonization methods are being developed to enable a subject to distinguish more pairs of colors on displays than those distinguishable by a person with normal trichromatic color vision (NCV). This paper presents a new daltonization method that prioritizes preserving the naturalness of an image for both people with CVD and people with NCV, which is necessary for effective visual communication and social interaction. The proposed method modifies only the achromatic component of an image, preserving local contrasts to improve the distinguishability of details for people with CVD. For this purpose, a method is used to simulate the perception of color images by people with CVD. An approach is used to evaluate the quality, separately assessing the preservation of naturalness and the improvement in the distinguishability of image details. The work includes both an objective assessment based on simulation and a subjective assessment based on a survey of real people with CVD. The results of the experiments show that the proposed method improves the distinguishability of image details for CVD observers and outperforms modern analogues in terms of preserving naturalness.

**KEYWORDS:** Achromatic component, color vision deficiency, contrast, daltonization, naturalness, subjective evaluation.