



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-12-18>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 612.845.5:004.421

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕКОЛОРИЗАЦИИ ДЛЯ ПОМОЩИ ЛЮДЯМ С АНОМАЛИЯМИ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

В. В. СИНИЦЫНА, А. М. ПРУДНИК

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

Поступила в редакцию 03.11.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Сегодня проблема восприятия визуальной информации людьми с аномалиями цветового зрения остается достаточно актуальной, что подтверждается наличием интереса к изучению этого вопроса не только в медицине, но и в области технических наук. В частности, исследователи по всему миру занимаются задачами создания алгоритмов и программ, дающих возможность преобразовывать изображения и видео в соответствии с корректным восприятием их людьми с цветовой слепотой. Однако в настоящее время не существует алгоритмов, позволяющих людям с любым видом, формой и степенью аномалии цветового зрения корректно воспринимать окружающую их визуальную информацию. На основании рассмотренных преимуществ и недостатков существующих алгоритмов сделаны выводы о требованиях к проектируемым рекolorизирующим алгоритмам, которые планируется реализовать в программном обеспечении для помощи людям с особенностями цветовосприятия. Такие алгоритмы не просто позволят корректно преобразовывать видео для людей с дихромазией и монохромазией, но и предоставят возможность пользователям с любой степенью аномальной трихромазии наиболее точно воспринимать окружающий мир. Кроме того, данные алгоритмы будут отличаться высокой скоростью выполнения процесса рекolorизации и «натуральностью» получившихся в процессе преобразований цветов.

Ключевые слова: цветная слепота, особенность цветовосприятия, визуальная информация, аномальная трихромазия, дихромазия, монохромазия, цветовое пространство, рекolorизация, «натуральность» цвета, алгоритмы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Синицына, В. В. Проектирование алгоритмов рекolorизации для помощи людям с аномалиями цветового зрения / В. В. Синицына, А. М. Прудник // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 1. С. 12–18. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-12-18>.

DESIGNING RECOLORIZATION ALGORITHMS TO HELP PEOPLE WITH COLOR VISION ANOMALIES

VLADA V. SINITSYNA, ALEKSANDER M. PRUDNIK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 03.11.2022

Abstract. The problem of perception of visual information by people with color vision anomalies remains quite relevant, as evidenced by the interest in studying this problem not only in medicine, but also in the field of medical technology. Researchers around are working on the task to create algorithms and software that can transform images and videos in accordance with their correct perception by people with color blindness. However, today there are no algorithms that allow people with any type, form, and degree of color vision anomaly to correctly perceive the visual information surrounding them. Based on the considered advantages and disadvantages of existing algorithms, conclusions were drawn about the requirements for the designed recoloring algorithms, which

are planned to be implemented in software to help people with color perception issues. Such algorithms will not only allow correct video conversion for people with dichromacy and monochromacy but will also enable users with any degree of anomalous trichromacy to perceive the world around them most accurately. In addition, these algorithms will be distinguished by the high speed of the recolorization process, and the “naturalness” of the colors obtained in the process of transformations.

Keywords: color blindness, color perception feature, visual information, anomalous trichromacy, dichromacy, monochromacy, color space, recolorization, color “naturalness”, algorithms.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Sinitsyna V. V., Prudnik A. M. Designing Recolorization Algorithms to Help People with Color Vision Anomalies. *Doklady BGUIR*. 21 (1), 12–18. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-12-18> (in Russian).

Введение

Зрение представляет собой главный канал восприятия информации, посредством которого человек может овладеть 90 % знаний, представленных в виде текстов, картинок, жестов. Особая значимость обладания визуальной информацией делает необходимой разработку различных методов и средств, помогающих людям с проблемами зрения адаптироваться и комфортно существовать в мире постоянно циркулирующего потока данных.

Аномалии цветового зрения представляют собой такие нарушения зрения, которые мешают людям корректно воспринимать окружающую их визуальную информацию. Чаще всего такие аномалии имеют генетическое происхождение и свойственны 5–8 % мужского и 0,5 % женского населения [1]. Это означает наличие данной врожденной особенности у 200–320 млн мужчин и примерно у 20 млн женщин. Стоит отметить, что аномалии цветового зрения могут быть не только врожденными, но и приобретенными, что увеличивает количество людей с цветовой слепотой. Внушительные цифры статистики заставляют многих исследователей и разработчиков задумываться о том, каким образом можно сделать взаимодействие людей с аномалиями цветового зрения и окружающего мира более комфортным.

Сегодня многие существующие устройства предназначены для людей с достаточно хорошими показателями здоровья (в частности, с хорошими показателями зрительного восприятия информации). Но в современном все более и более развивающемся мире важное значение приобретает возможность управления машинами как можно большим количеством людей. В связи с этим возникает необходимость обеспечить доступность устройств для всех пользователей. Благодаря управлению различными устройствами и вовлечению в производственный процесс, люди с особенностями цветовосприятия смогут социализироваться, беспрепятственно общаясь с большим количеством людей.

В случае наличия у человека каких-либо особенностей цветовосприятия он чаще всего не может рассчитывать на возможность взаимодействия с некоторыми устройствами в определенной профессиональной сфере. Известны случаи, когда, например, во время футбольного матча у комментатора не получилось отличить членов разных команд друг от друга по той простой причине, что формы у них были красного и зеленого цветов, а сам комментатор имел цветовую слепоту [2]. Возникали определенные сложности и у пилотов разнообразных летательных объектов, когда те не могли верно определить цвет моргающей на панели управления лампочки. Схожая проблема имела также у машинистов поездов и электричек [2].

Совершенствование технических возможностей обеспечивает развитие безграничного доступа людей к любому типу информации, а также возможность вовлечения в профессии тех, кто проявляет интерес к ним, но испытывает трудности с подобного рода деятельностью в силу каких-либо проблем со здоровьем. Определенно, есть особенности людей, которые не поправимы не только тем или иным видом лечения, но даже технические устройства пока не в силах исправить существующее положение вещей. Что же касается группы людей с аномалиями цветового зрения, то такие недостатки человеческого организма в определенной мере могут быть компенсированы совершенствованием технических устройств. На данный момент помочь людям с особенностями цветовосприятия выполнять повседневные и профессиональные задачи возможно благодаря наличию специальных приложений с соответствующими алгоритмами реколоризации.

Исследователи по всему миру занимаются вопросами проектирования и разработки алгоритмов, производящих преобразование изображений и видео для их корректного восприятия людьми с цветовой слепотой. Однако каждый из ныне реализованных алгоритмов имеет как достоинства, так и недостатки. Наличие характеристик, которые можно улучшить, сделав алгоритмы

наиболее комфортными для использования людьми с аномалиями цветового зрения, позволяет спроектировать в высшей мере комфортные для лиц с цветовой слепотой любого вида, формы и степени алгоритмы.

Цель исследований авторов – определение особенностей и характеристик проектируемых алгоритмов реколоризации для помощи людям с аномалиями цветового зрения в визуальном восприятии информации. Среди задач выделены следующие:

- изучение существующих видов и форм аномалий цветового зрения;
- определение преимуществ, недостатков и особенностей имеющихся алгоритмов реколоризации для людей с аномалиями цветового зрения;
- формулирование требований к проектируемым алгоритмам.

Виды и особенности аномалий цветового зрения

В настоящее время выделяют такие аномалии цветового зрения, как аномальная трихромазия, дихромазия, монохромазия. Аномальная трихромазия (трианомалия, протаномалия, дейтераномалия) характеризуется недостаточным количеством фотопигмента определенного цвета (синего, красного или зеленого) в колбочках глаз. Дейтераномалия встречается у 5 % мужского населения Земли, что представляет собой более половины всех возможных случаев аномалий цветового зрения (8 %).

На данный момент аномальная трихромазия является наиболее распространенным видом цветовой слепоты, особенно такие формы, как дейтераномалия и протаномалия. Особенность данных болезней состоит в недостаточном количестве фотопигментов зеленого и красного цветов в колбочках глаз соответственно. Кроме того, данная недостаточность может быть выражена в различной степени. Так, по тяжести аномалии можно выявить три степени аномальной трихромазии: А, В и С. Степень А – наиболее тяжелая форма аномальной трихромазии, С – наиболее легкая. Определить, какая именно форма аномальной трихромазии характерна для человека, можно благодаря имеющемуся у него порогу цветоразличения, ведь для каждой степени аномалии данные показатели варьируются.

Дихромазия возникает в случае отсутствия красного, синего или зеленого фотопигментов в колбочках глаз и включает в себя протанопию, трианопию, дейтеранопию. При монохроматии восприятие цвета либо отсутствует полностью, тогда люди видят мир как черно-белую фотографию (палочковая монохроматия), либо в колбочках глаз присутствует фотопигмент какого-то одного вида (колбочковая монохроматия), тогда человек видит мир в одном воспринимаемом им цвете.

Анализ существующих алгоритмов

Функция алгоритмов (коррекция, тестирование или симуляция) и вид обрабатываемой информации. Прежде всего, следует определить назначение проектируемых алгоритмов. Так, предполагается, что алгоритмы предназначены для коррекции видео, поступающего в реальном времени на вход устройства с алгоритмами, для людей с аномалиями цветового зрения.

Стоит отметить, что для тестирования наличия аномалии цветового зрения и симуляции цветовой слепоты применяли уже существующие алгоритмы. В частности, приложения с алгоритмами тестирования использовали для выявления особенностей цветовосприятия у пользователей, а также степеней аномальной трихромазии при наличии соответствующей аномалии. Приложения же с алгоритмами симуляции позволили протестировать спроектированное и реализованное приложение с алгоритмами реколоризации. Например, в качестве приложений с алгоритмами тестирования применяются такие, как Ishihara Test, Farnsworth D-15 Test, Farnsworth-Munsell 100-Hue Test, для симуляции цветовой слепоты используются алгоритмы, разработанные Н. Brettel, F. Vienot, G. M. Machado [3].

Виды аномалий. Следующей важной задачей является определение предназначения алгоритмов: какие виды, формы, степени аномалий цветового зрения проектируемые алгоритмы будут корректировать. Для этого нужно рассмотреть каждый отдельный вид цветовой слепоты, а также возможные пути коррекции видео для всех существующих аномалий цветового зрения.

В зависимости от количества присутствующего фотопигмента аномальная трихроматия может быть выражена в тяжелой форме при отсутствии большого количества фотопигмента, а также в более легких формах при меньшем количестве отсутствующего пигмента. В связи с этим можно сделать вывод о наличии возможности воспринимать объекты того цвета, количество фотопигмента которого не является достаточным; стоит отметить, что такой цвет будет представляться

человеку искаженно. Но фактическая возможность восприятия данного цвета, хотя и в искаженной форме, сохраняется, что несколько облегчает задачу разработки алгоритма реколоризации для людей с данной аномалией. Однако при тяжелой степени аномальной трихромазии, а тяжелая форма будет близка к практически полному отсутствию фотопигмента в колбочках глаз (то есть к дихромазии), задача реколоризации видео будет сводиться к задаче реколоризации для людей с дихромазией.

Поскольку известно, что степень аномальной трихромазии для каждой конкретной формы цветовой слепоты лежит в пределах от 0,1 до 0,9, где 0,1 представляет собой практически полное отсутствие аномалии цветового зрения, а близкое к единице значение сообщает о наличии определенной формы дихромазии, можно сделать вывод о достаточно серьезной необходимости определения степени аномальной трихромазии при использовании того или иного корректирующего алгоритма [4]. В большинстве используемых алгоритмов реколоризации коррекция аномальной трихромазии осуществляется посредством изменения показателей насыщенности, цветового тона, яркости цветов кадров видео, что позволяет улучшить восприятие видео лишь для легких степеней аномальной трихромазии [3–5].

Дихромазия представляет собой аномальную трихромазию, но с тяжелой степенью аномалии, которая равна единице. Так, при дихромазии у человека в колбочках глаз полностью отсутствует фотопигмент синего, красного или зеленого цветов, различение объектов данных цветов представляется невозможным. В этих случаях исследователи обычно ставят перед собой задачу не столько достижения возможности корректного восприятия цвета, сколько получения возможности отличить невидимый человеком с особенностями цветовосприятия цвет от иных цветов, представленных в видео [3, 5].

При наличии палочковой монохромазии человек воспринимает мир как черно-белую фотографию, что можно лишь немного улучшить, изменив контраст той или иной части видео. Колбочковая монохромазия предполагает наличие у человека одного вида фотопигмента в колбочках, тогда мир представлен в каком-то одном цвете. В данном случае единственной возможной помощью людям с колбочковой монохромазией представляется изменение насыщенности отдельных участков видео с целью отличить одни объекты от других [5]. Таким образом, проектируемые алгоритмы предназначены для коррекции видео для людей со всеми аномалиями цветового зрения с учетом особенностей каждой аномалии. При этом для каждого типа цветовой слепоты будет разработан свой алгоритм реколоризации.

Реколоризация наиболее важных деталей видео. При просмотре видео человек в первую очередь обращает внимание на наиболее интересующие его детали: конкретный объект, устройство, сигнал и пр. Кроме того, иногда возникает необходимость не просто в распознавании какого-либо объекта, но и в распознавании данного объекта на определенном фоне, а также возможности прочтения текстовых данных, которые особенно важно рассмотреть в той или иной ситуации. Так, внимание при просмотре видео чаще всего бывает обращено на:

- наиболее важные части видео (конкретный объект);
- сам объект и его фон;
- текстовые данные.

Для полноты восприятия окружающего мира в проектируемых алгоритмах необходимо иметь возможность корректно воспринимать как все изображенные объекты, фон за объектами, так и текстовые данные.

Зависимость распознавания наиболее важных деталей видео от профессии пользователя. Стоит отметить, что выбор важного распознаваемого объекта или же объектов на видео зависит не только от конкретной ситуации, в которой оказался пользователь, но также и от той профессиональной деятельности, которой он при этом занимается. Так, для врача особенно важно иметь возможность не только различать какие-то крупные органы по цвету, но и мелкие артерии и капилляры во время операции. Ошибка в данном случае будет стоить оперируемому жизни, поэтому необходимо уметь отличить органы друг от друга, даже если они самых малых размеров. Для машиниста поезда, водителя транспорта важно различать сигналы светофора, а также дорожные знаки, текст на дорожных указателях. У дизайнера задача усложняется в связи с необходимостью не просто различать несколько цветов, но и очень много цветов и их оттенков, находить гармонию цветов. Данные особенности в распознавании тех или иных объектов следует учитывать в процессе разработки алгоритмов, стараясь сделать любую информацию максимально корректной.

Восприятие цвета с разных точек зрения. Известно, что восприятие цвета происходит с физической (определение качества света без помощи наблюдателя), психофизической (исследование реакции зрительного механизма в данных конкретных условиях) и психологической (наме-

ренное внимание наблюдателя, реакция наблюдателя изменяется под влиянием его отношения к восприятию) точек зрения [6]. В данном случае важнее всего рассмотреть цвет с психофизической точки зрения, то есть восприятия цвета пользователем с аномалией цветового зрения в конкретных условиях.

Характеристики цвета. Цвет оценивают по разным показателям, но часто используемыми характеристиками являются цветовой тон, яркость и насыщенность. Данные свойства помогут не только однозначно охарактеризовать цвет, но и рассмотреть, улучшение каких из данных параметров способствует повышению качества видео для людей с аномалиями цветового зрения.

Зависимость характеристик цвета от освещения. Цвет и его характеристики зависят не только от наблюдателя, но и того, какое количество света падает на наблюдаемый человеком с аномалией цветового зрения объект. Так, от освещения зависят насыщенность цвета, его яркость. Кроме того, существуют стандартные источники света со своими цветовыми температурами [7]. Но в повседневной жизни далеко не всегда источники света близки к стандартным или желательным для того или иного пользователя, а потому алгоритмы реколоризации должны корректировать видео наилучшим для пользователя с тем или иным видом, формой или степенью аномалии цветового зрения образом при любом освещении.

Зависимость характеристик цвета от времени суток. В ночное время различать цвета становится сложнее. Несмотря на наличие возможности использовать различные источники света, следует при проектировании алгоритмов принимать во внимание тот факт, что даже при использовании для освещения объекта в ночное время, к примеру, фонаря цвет освещаемого объекта может быть искажен, что воспрепятствует его корректному восприятию. Проектируемые алгоритмы должны учитывать данные особенности и корректно представлять реколоризованную информацию вне зависимости от освещения распознаваемого объекта в любое время суток.

Используемые в алгоритмах реколоризации цветовые пространства. Известно, что цветовая информация представлена в устройствах в пространстве RGB. Хотя данное цветовое пространство и является очень наглядным, но все же цветовой охват системы RGB составляет меньше половины площади, изображающей все существующие цветности, почти 70 % площади цветности лежит в области отрицательных значений координаты r , что сильно усложняет колориметрические расчеты [7]. Именно по этой причине преобразования координат выполняют в этом пространстве очень редко, чаще всего происходит конвертация в иные цветовые пространства, к координатам которых применяют тот или иной метод, после чего координаты вновь преобразуют в RGB, чтобы вывести изображение на экран [5, 8]. В качестве так называемых промежуточных цветовых пространств, используемых в процессе реколоризации кадров видео, применяются такие пространства, как LMS, XYZ, $L^*a^*b^*$, HSI, HSL, HSV, YCbCr. Каждое из цветовых пространств имеет свои преимущества и недостатки, в связи с чем необходимо рассмотреть применение промежуточных цветовых пространств для всех конкретных видов аномалий цветового зрения и определить наиболее приемлемое пространство для каждого конкретного вида цветовой слепоты.

Технические требования к проектируемым алгоритмам

Основные критерии оценки реколоризованной информации. В качестве критериев оценки итогового реколоризованного видео чаще всего используют [8]:

- контраст кадров видео;
- «натуральность» цветов кадров, которая является характеристикой изменения цветовой составляющей таким образом, что цвет реколоризованного объекта стал как можно ближе к тому цвету, который видит нормальный трихромат;
- консистентность пикселей кадров после процесса реколоризации.

Во многих источниках указывается необходимость именно различения объектов, при этом «натуральность» преобразованного видео отходит на второй план. Однако лишь при наиболее удовлетворительных показателях всех трех критериев получится наиболее корректное для людей с цветовой слепотой реколоризованное видео.

Возможность сохранить цветовую «натуральность» видео после реколоризации. При аномальной трихромазии сохранение «натуральности» после процесса реколоризации представляется выполнимой задачей, так как некоторое количество фотопигмента все же присутствует в колбочках глаз человека. В случае тяжелой степени аномальной трихромазии фотопигмента в колбочках становится слишком мало, что делает зрение такого человека сравнимым со зрением дихромата, в данном случае сохранить «натуральность» становится не так просто, ведь фотопиг-

мент практически отсутствует, а это значит, что человек практически не способен воспринимать красный, зеленый либо синий цвета (зависит от того, какого фотопигмента не хватает в колбочках глаз человека) хотя бы примерно так же, как нормальный трихромат. При монохроматии «натуральность» сохранить не получится, поскольку человек видит мир либо только в черно-белых тонах, либо в зеленых, красных, синих, желтых.

Оценка алгоритмов реколоризации. Для оценки применяемых реколоризирующих алгоритмов чаще всего используются следующие показатели:

- эффективность, представляющая собой показатель возможности различения объектов, которые нельзя было различить до реколоризации, после данного процесса;
- «натуральность» цветов кадров видео;
- скорость реколоризации кадров видео;
- сложность алгоритмов реколоризации;
- возможность различения как можно большего количества цветов на видео человеком с аномалиями цветового зрения;
- субъективное сравнение видео, реколоризованного данным алгоритмом, с иными видео, которые были перекрашены другими ныне существующими алгоритмами [3, 5, 8].

Проектируемые алгоритмы должны быть оценены по вышеуказанным показателям и представить при этом удовлетворительные результаты.

Проблемы существующих алгоритмов реколоризации. На данный момент у большинства существующих алгоритмов конвертации видео и изображений имеются следующие проблемы:

- 1) различение цветоаномалом после реколоризации информации очень простых комбинаций цветов, например сигналов светофора, но возникновение трудностей при необходимости отличить друг от друга более сложные цвета;
- 2) сильное изменение цветов в процессе преобразования для людей с аномалиями цветового зрения относительно их оригинального представления для нормальных трихроматов;
- 3) очень низкая скорость процесса конвертации цветов, которая напрямую связана с существующей сложностью алгоритмов;
- 4) для аномальных трихроматов также существует проблема отсутствия учета степеней аномалии в процессе реколоризации, в связи с чем кадры видео различимы чаще всего лишь для людей со слабой степенью аномалии [3–5, 8].

Таким образом, в проектируемых алгоритмах необходимо увеличить число различаемых цветов, улучшить показатель «натуральности» реколоризованных цветов, повысить скорость обработки видео, а для аномальных трихроматов учесть степени аномалий в процессе реколоризации.

Заключение

1. Проектируемые алгоритмы должны корректировать видео для людей со всеми видами аномалий цветового зрения. После процесса реколоризации необходимо сохранить контраст кадров видео, «натуральность» цветов и постоянство пикселей, возможность различения объектов на видео. Одинаково хорошо алгоритмы должны преобразовывать как фон и объекты на кадрах видео, так и текстовую информацию. Применять программное обеспечение с данными алгоритмами будет возможно в повседневной и профессиональной деятельности большинства людей. Результат реколоризации не должен зависеть от падающего на рассматриваемые объекты освещения и времени суток, при котором происходит распознавание объектов и их цветов.

2. Оценить проектируемые алгоритмы следует на предмет эффективности, скорости обработки и реколоризации видео, сложности применяемых алгоритмов, количества различаемых цветов. Кроме того, необходимо решить существующие проблемы схожих алгоритмов: сделать возможным различение большего количества цветов, увеличить скорость обработки кадров видео, сохранить «натуральность» используемых в видео цветов, учесть степень аномальной трихроматии при преобразовании кадров видео для людей с соответствующей аномалией.

Список литературы

1. Шиффман, Х. Р. Ощущение и восприятие / Х. Р. Шиффман. СПб.: Питер, 2003.
2. Chaparro, A. Applications of Color in Design for Color-deficient Users / A. Chaparro, M. Chaparro // Journal of Ergonomics in Design: the Quarterly of Human Factors Applications. 2017. Vol. 25. P. 23–30. DOI: 10.1177/1064804616635382.
3. Personalized Image Recoloring for Color Vision Deficiency Compensation / Z. Zhu [et al.] // IEEE Transactions on Multimedia. 2021. Vol. 24. P. 1721–1734. DOI: 10.1109/TMM.2021.3070108.

4. Yang, S. Quantification and Standardized Description of Color Vision Deficiency Caused by Anomalous Trichromats. Part II: Modeling and Color Compensation / S. Yang, E. K. Wong // *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2008. Vol. 2008. P. 1–12. DOI: 10.1155/2008/246014.
5. Zhu, Z. Image Recoloring for Color Vision Deficiency Compensation: a Survey / Z. Zhu, X. Mao // *The Visual Computer*. 2021. Vol. 37. P. 2999–3018. DOI: 10.1007/s00371-021-02240-0.
6. Ивенс, Р. М. Введение в теорию цвета / Р. М. Ивенс. М.: Мир, 1964.
7. Батай, Л. Е. Измерения в лазерных и оптоэлектронных системах. В 3 ч. / Л. Е. Батай, А. Л. Гурский, В. В. Мирончик. Минск: БГУИР, 2015. Ч. 1. Фотометрические и колориметрические измерения.
8. Ribeiro, M. Recoloring Algorithms for Colorblind People: a Survey / M. Ribeiro, A. J. P. Gomes // *ACM Comput. Surv.* 2019. Vol. 52. P. 1–37. DOI: 10.1145/3329118.

References

1. Shiffman H. R. (2003) *Sensation and Perception*. Saint Petersburg, Piter Publ. (in Russian).
2. Chaparro A., Chaparro M. (2017) Applications of Color in Design for Color-deficient Users. *Journal of Ergonomics in Design: the Quarterly of Human Factors Applications*. 25, 23–30. DOI: 10.1177/1064804616635382.
3. Zhu Z., Toyoura M., Go K., Kashiwagi K., Fujishiro I., Wong T.-T., Mao X. (2021) Personalized Image Recoloring for Color Vision Deficiency Compensation. *IEEE Transactions on Multimedia*. 24, 1721–1734. DOI: 10.1109/TMM.2021.3070108.
4. Yang S., Wong E. K. (2008) Quantification and Standardized Description of Color Vision Deficiency Caused by Anomalous Trichromats. Part II: Modeling and Color Compensation. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2008, 1–12. DOI: 10.1155/2008/246014.
5. Zhu Z., Mao X. (2021) Image Recoloring for Color Vision Deficiency Compensation: a Survey. *The Visual Computer*. 37, 2999–3018. DOI: 10.1007/s00371-021-02240-0.
6. Evans R. M. (1964) *An Introduction to Color*. Moscow, Mir Publ. (in Russian).
7. Batai L. E., Gursky A. L., Mironchik V. V. (2015) *Measurements in Laser and Optoelectronic Systems. In 3 p. P. 1: Photometric and Colorimetric Measurements*. Minsk, BGUIR Publ. (in Russian).
8. Ribeiro M., Gomes A. J. P. (2019) Recoloring Algorithms for Colorblind People: a Survey. *ACM Comput. Surv.* 52, 1–37. DOI: 10.1145/3329118.

Вклад авторов

Прудник А. М. осуществил постановку задачи для проведения исследования.

Синицына В. В. выполнила анализ существующих алгоритмов, сформулировала технические требования к проектируемым алгоритмам.

Authors' contribution

Prudnik A. M. carried out the formulation of the task for the research.

Sinitsyna V. V. performed an analysis of existing algorithms, formulated technical requirements for the designed algorithms.

Сведения об авторах

Синицына В. В., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Прудник А. М., к. т. н., доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 44 770-85-18
E-mail: vldasinitina1@gmail.com
Синицына Влада Владиславовна

Information about the authors

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

Prudnik A. M., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Engineering Psychology and Ergonomics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 44 770-85-18
E-mail: vldasinitina1@gmail.com
Sinitsyna Vlada Vladislavovna