

Исследование точности контрастного преобразования цветовой насыщенности цифровых изображений

М.В. Белодедов¹, А.М. Чмутин²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

²Волгоградский государственный университет

Аннотация: Проведена ревизия управляющих цветовой насыщенностью средств программного обеспечения современной компьютерной графики. В предположении измерительного характера преобразования насыщенности определена сопутствующая погрешность. В рамках трёхмерной модели систематизирована структура полной погрешности сатурирующего инструментария. Свойства одной из составляющих – оттеночной неравномерности преобразования – изучены на выборке из 24 программных пакетов. Выявлена её особенность, критичная к целостности изобразительной информации в ходе контрастного преобразования насыщенности. Обнаружена антикорреляция оттеночной неравномерности с найденным ранее яркостным сдвигом. Как результат, исследованный программный продукт не гарантирует адекватность управления контрастом цветовой насыщенности в задачах анализа изображений, что не допускает возможности его использования в экспертизе. Представлены результаты анализа программного продукта, лишённого обеих погрешностей. Озвученные ранее системные требования к сохранению оттенка и яркости цвета дополнены требованием к преобразованию насыщенности цвета.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение программ, преобразование насыщенности цвета, контраст насыщенности, погрешности контрастирования, целостность изобразительной информации, экспертные приложения.

Проблема, периодически возникающая при выполнении прикладных оптических разработок [1], – недоступность для визуального анализа той изобразительной информации, которая локализуется ниже порога зрительного восприятия. Решается такого рода проблема контрастированием рассматриваемых изображений. Сегодня особо востребованы цифровые изображения и, естественно, программное контрастирование. Именно оптическим основам соответствующего программного обеспечения (ПО) посвящено данное исследование. Эта статья призвана дополнить работу [2]. Как следствие, и цель, и задачи настоящей работы формулируются аналогично [2]. Цель – изучить применимость современного сатурирующего ПО к визуальному анализу изобразительной информации. Задачи – поиск у виртуальных преобразователей цветовой насыщенности специфической

составляющей погрешности – оттеночной неравномерности преобразования – и её оценка (в [2] подробно исследовался яркостный сдвиг, а эта составляющая только упоминалась). В отличие от яркостного сдвига в структуре трёхмерной погрешности преобразования цветовой насыщенности оттеночная неравномерность преобразования соотносится уже не с сохраняемой, а с преобразуемой величиной и обуславливается зависимостью коэффициента усиления насыщенности цвета от его оттенка. Также, как и яркостный сдвиг, оттеночная неравномерность неприемлема, так как допускает возможность возникновения артефактов в процессе контрастной обработки изображений. Закономерности формирования и проявления этой погрешности рассмотрены ниже. Работа предназначена для специалистов в области информационной обработки изображений и разработки виртуально-оптических методов такой обработки. Актуальность работе придаёт то, что в современном ПО повсеместно представлено контрастирование яркостей цвета, а контрастирование его насыщенностей нигде не отражено, кроме частного случая, когда оно достигается инструментом <Saturation> в режиме реального насыщения [1] (в нём приращения насыщенностей считаются от нуля для всех пикселей изображения).

Материал исследования – а это представительная выборка из 24 графических пакетов – подробно охарактеризован в [2]. Там же изложены соображения в пользу достаточности сделанной выборки, там же обоснованы исключения из неё. В настоящей статье приводится только номенклатура изученного программного продукта (она дана на рис 3).

Метод исследования – типичная для технической оптики испытательная процедура [3]. Она включает приложение изученных ранее в [2] программных инструментов <Saturation> к некоторому тестовому изображению и вычисление получающихся насыщенностей. Здесь тестовое изображение – это двупольный квадрат. Цвета его верхнего ($R=117$, $G=117$,

$B=68$) и нижнего ($R=107, G=107, B=184$) полей имеют насыщенность $\approx 42\%$ и яркость $\approx 0,17$, различаясь лишь оттенками $60^\circ/240^\circ$ (8bitRGB-координаты оттенка у цвета верхнего поля равны 255, 255, 0; у цвета нижнего поля – 0, 0, 255). Цвета полей смоделированы таким образом, чтобы сохранялась возможность значительной вариации исходной насыщенности, поскольку обсуждаемая ниже погрешность преобразования как правило прирастает с изменением насыщенности, но рост может ограничиваться (насыщением наибольшей и/или наименьшей цветových координат). Поэтому насыщенности полей у тестового изображения изменялись последовательно от минимума шкалы $\langle \text{Saturation} \rangle$ до точки, соответствующей достижению $\text{Extr}(8\text{bitRGB}) = 0; 255$ с единичным шагом. Но если приём обнуления исходного контраста яркостей цвета $\Delta_0 Y_S$ всего лишь упрощает обработку данных испытания, то нуль исходного контраста цветových насыщенностей $\Delta_0 S$ позволяет вычислять его приращения без учёта неизвестных функций преобразования инструмента $\langle \text{Saturation} \rangle$, в документацию ни на один программный пакет не внесённых.

Оценка цветových координат преобразованного тестового изображения в современной компьютерной графике сложности не представляет. По данным R, G и B , используя формулы стандарта МЭК 61966-2-1, искомая яркость цвета вычислялась, как:

$$Y_S = 0,2126 \left(\frac{R+0,055}{1,055} \right)^{2,4} + 0,7152 \left(\frac{G+0,055}{1,055} \right)^{2,4} + 0,0722 \left(\frac{B+0,055}{1,055} \right)^{2,4}.$$

Затем для каждого из полей выявлялись наибольшее $\text{Max}(RGB)$, наименьшее $\text{Min}(RGB)$ и промежуточное $\text{Med}(RGB)$ значения координат. По ним:

1) искомая насыщенность цвета вычислялась, как:

$$S = \frac{\text{Max}(RGB) - \text{Min}(RGB)}{\text{Max}(RGB)};$$

2) RGB-координаты искомого оттенка цвета вычислялись, как:

$$\begin{cases} \text{MinMin}(RGB) \text{ или } \text{MaxMax}(RGB); \\ \text{MaxMax}(RGB) \times \frac{\text{Med}(RGB) - \text{Min}(RGB)}{\text{Max}(RGB) - \text{Min}(RGB)}, \\ \text{MaxMax}(RGB) \text{ или } \text{MinMin}(RGB), \end{cases}$$

где $\text{MinMin}(RGB)$ и $\text{MaxMax}(RGB)$ – экстремально возможные значения цветовых координат. Порядок присвоения наименования координаты её значению, определяемому строкой в п. 2), очевиден: наименьшей RGB-координате цвета соответствует наименьшая RGB-координата оттенка; наибольшей – наибольшая;

Выбор яркости Y_S диктуется ipso facto, а вот выбор оттенка H и насыщенности S из цветовой координатной системы HSV логично обосновать ссылками на [4] (оттенок) и [5-7] (насыщенность). И, следует отметить, что такой набор цветовых характеристик (яркость Y_S + насыщенность S + оттенок H), если не позволяет пока ещё говорить об оригинальной цветовой координатной системе, то весьма практичен, как с точки зрения вычислений, так и с точки зрения упрощения функций видности перцепционных контрастов, в первую очередь яркостного.

Принятые допущения – чтобы оценивать погрешности, надо предположить, что программа, преобразующая контраст насыщенностей, есть виртуальное средство измерений в своей измерительно-преобразовательной ипостаси. Формально такое отождествление надо удостоверить решением Госстандарта по результатам испытаний, чего, однако, ни с одним виртуальным преобразователем пока не случалось (хотя подобная процедура и соотносится напрямую с понятием экспертной поверки по ГОСТ 8.513-84; ПР 50.2.006-94, проводимой по решению суда). Будем опираться на сделанное предположение, отталкиваясь от того, что результат обработки – изображение – вполне может быть использован, в том числе и в экспертной деятельности, то есть, обязан приниматься к рассмотрению судом, назначившим экспертизу. Теперь в сфере новой

парадигмы способы метрологического обеспечения измерительного преобразователя должны регламентироваться стандартами ГСИ – появляются правила оценки метрологических характеристик <Saturation>. Для целей настоящей работы представляют интерес точностные.

Соответствующие погрешности каждого из средств преобразования насыщенности вычислялись в рамках традиционной метрологической методологии. Обобщённый подход к оцениванию погрешностей, присущих инструментальным (инструментально-оптическим) измерительным (информационно-измерительным или информационным) преобразователям не менялся много лет: его основы излагаются в классических руководствах от [8] до [9]. Применительно к виртуальным измерительным преобразователям этот подход – такой же. У виртуально-оптических преобразователей насыщенности цвета в принципе могут проявиться четыре составляющие основной погрешности преобразования. Две из них касаются целевого изменения насыщенности S , две – неизменности яркости Y_S и оттенка H . Это следующие величины:

1. Погрешность оттеночной неравномерности:

$$\Delta_{OH}S = \pm \text{Max} \{ |S_{\text{yellow}}' - S_{\text{blue}}'| / 2 \}, \quad (1)$$

где S_{yellow}' и S_{blue}' – насыщенности у пары полей желтого и синего оттенка, достижимые при их эволюции без ограничения предельно допустимыми значениями RGB-координат; функция $\text{Max} \{ \dots \}$ – отыскивает в изображении пару полей с наибольшим значением модуля. Для изображения из двух полей функция вырождается в единицу. По данным наблюдений во всех из 24 изученных пакетов именно у этих оттенков различие S максимальное. Естественно будет отталкиваться от такого рода максимумов и далее, как при определении погрешности яркостной неравномерности, так и при определении погрешностей яркостного/оттеночного сдвига.

2. Погрешность яркостной неравномерности:

$$\Delta_{\text{ЯН}} S = \pm \text{Max} \{ | S_{\text{max}}' - S_{\text{min}}' | / 2 \},$$

где S_{max}' и S_{min}' – наибольшая и наименьшая результирующие насыщенности у пары полей изображения ненулевой яркости, достижимые при их эволюции без ограничения предельно допустимыми значениями RGB-координат.

3. Погрешность яркостного сдвига:

$$\Delta_{\text{ЯС}} Y_S = \pm \text{Max} \{ | Y_{\text{Syellow}}' - Y_{\text{Sblue}}' | / 2 \}, \quad (2)$$

где Y_{Syellow}' и Y_{Sblue}' – яркости у пары полей желтого и синего оттенка, достижимые при эволюции насыщенностей без ограничения областью допустимых значений RGB-координат.

4. Погрешность оттеночного сдвига:

$$\Delta_{\text{ОС}} H = \pm \text{Max} \{ | H_{\text{max}}' - H_{\text{min}}' | / 2 \},$$

где H_{max}' и H_{min}' – наиболее контрастные результирующие оттенки у пары полей изображения ненулевой яркости, достижимые при эволюции насыщенностей без ограничения областью допустимых значений RGB-координат.

Физический смысл введенных в рассмотрение составляющих основной погрешности преобразования:

- удвоенные оттеночная и яркостная неравномерности – это избыточный (сверх ожидаемого от действия конкретного <Saturation>) контраст насыщенностей цвета в результирующем изображении;
- удвоенный оттеночный сдвиг – это паразитный (не допускаемый по лемме [10]) контраст оттенков цвета в результирующем изображении;
- удвоенный яркостный сдвиг – это паразитный (не допускаемый по лемме [10]) контраст яркостей цвета в результирующем изображении.

Рассмотрим эти погрешности. Оттеночный сдвиг при <Saturation> во всех изученных пакетах получается практически нулевым [2]. Яркостный сдвиг, наоборот, – значителен, но и он тоже был скрупулёзно исследован

ранее [2]. Яркостная же неравномерность экзотична в появлении и несистематична в проявлении, поэтому резонно оставить её для последующей разработки. В этой статье будет исследоваться исключительно оттеночная неравномерность сатурирующего инструментария из той же самой выборки [2] в сопоставлении с яркостным сдвигом.

Последние погрешности можно представлять и своими абсолютными значениями (1); (2), и относительными, – в обеих формах они существенно зависят от установки $\langle \text{Saturation} \rangle$ (то есть от $\langle S' \rangle$ и $\langle Y_S' \rangle$, канонически определяемых полусуммированием результирующих насыщенностей и яркостей). Поэтому, единообразия ради, приведём их доли от наибольших потенциально возможных значений:

$$\delta_{\text{OH}} S = \pm \text{Max} \{ | S_{\text{yellow}}' - S_{\text{blue}}' | / 2 \} / \text{MaxMax}(\Delta_{\text{OH}} S), \quad (3)$$

где $\text{MaxMax}(\Delta_{\text{OH}} S)$ – максимум максимумов полуразности результирующих насыщенностей цвета ($2\text{MaxMax}(\Delta_{\text{OH}} S)=1$).

$$\delta_{\text{яС}} Y_S = \pm \text{Max} \{ | Y_{S_{\text{yellow}}}' - Y_{S_{\text{blue}}}' | / 2 \} / \text{MaxMax}(\Delta_{\text{яС}} Y_S), \quad (4)$$

где $\text{MaxMax}(\Delta_{\text{яС}} Y_S)$ – максимум максимумов полуразности результирующих яркостей цвета ($2\text{MaxMax}(\Delta_{\text{яС}} Y_S)=1$).

В цифровой фотографии $\text{Max} \{ \dots \}$ всегда можно выбрать из всех имеющихся в ней пар (и не обязательно соседствующих, как в тестовом изображении) пикселей. Но пара пикселей, соответствующих $\text{MaxMax}(\dots)$ в конкретном снимке может и отсутствовать (всегда такая пара будет иметь место только в полноцветном изображении) – это однозначно определяемая константа.

Кривые на графиках рис. 1 описывают зависимости результирующих насыщенностей (и их контраста) от $\langle \text{Saturation} \rangle$ для пары оттенков (жёлтый и синий). Как правило, именно эти оттенки и демонстрируют наибольшую оттеночную неравномерность преобразования цветовой насыщенности. Кривые оборваны справа в точках, где наибольшая или наименьшая RGB-координата цвета достигает своего предельно возможного значения.

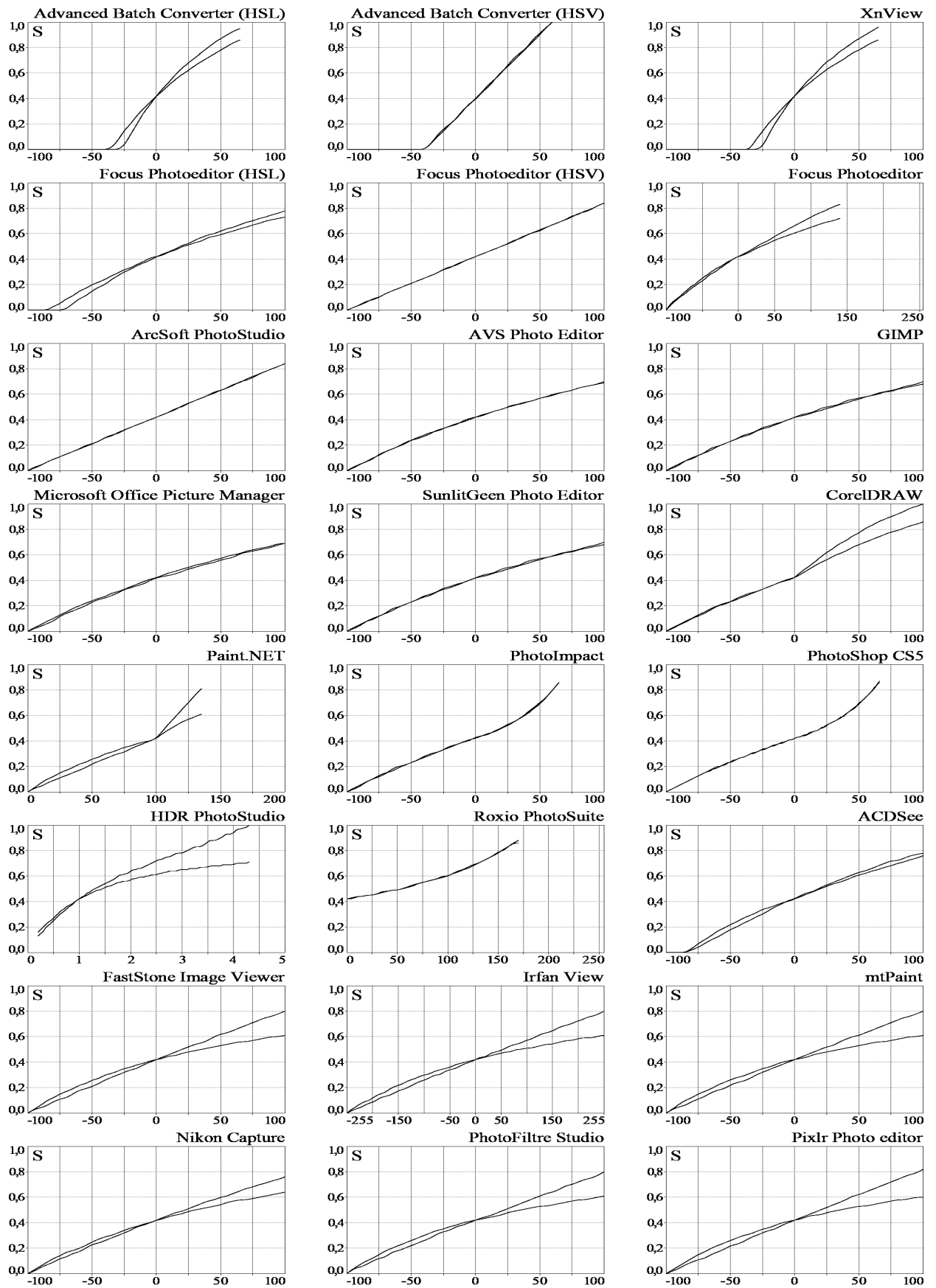


Рис. 1. Насыщенности полей тест-изображения, как функция <Saturation>.

На графиках по осям ординат – цветовые насыщенности в долях от максимально возможного значения, по осям абсцисс – показания в окне <Saturation> соответствующего программного пакета. При фиксированном значении абсциссы разница ординат у любой пары графиков даёт контраст насыщенностей, приобретённый в процессе сатурирования, ибо для исходной точки цвета выбраны так, чтобы контрасты их насыщенностей были нулевыми. Изначальное обнуление более сильного из контрастов – яркостного – будет действительно при исследовании эволюции контраста насыщенностей, видность у которого – наихудшая [11]. Вариация наклона кривых на рис. 1 предопределяет различную сатурирующую способность у аналогичных инструментов разных программных пакетов. Потребный наклон достигается шкалированием оси абсцисс.

У трёх <Saturation> из исследованной выборки (Advanced Batch Converter; Focus Photoeditor; ArcSoft PhotoStudio) графики вырождаются в прямую линию. Вообще говоря, линейность/нелинейность графиков свидетельствует лишь о виде функции преобразования насыщенности, использованной в том или ином пакете, – здесь интерес представляет только несовпадение кривых для разных оттенков тестового изображения. Таких, в той или иной степени ветвящихся, графиков на рис. 1 набирается больше половины. Как видим, в крайней правой точке кривых разница ординат – контраст насыщенностей – может достигать 1/3 диапазона насыщенностей. Типичное для половины исследованных пакетов значение 20% наблюдается у <Saturation> в Pixlr Photo editor. Деструктивное воздействие ветвления (и его более выраженного частного случая – перекрещивания) кривых на целостность восприятия изобразительной информации по сравнению со случаями, характеризуемыми унитарными графиками, может приводить не только к ложным суждениям о цвете объекта, но даже к ошибкам в выводах о его форме.

Графики с совпадающими кривыми представляют инструменты, не отягощённые оттеночной неравномерностью. Степень совпадения не зависит от линейности функции преобразования и шкалы <Saturation>.

Сопоставим погрешности оттеночной неравномерности и яркостного сдвига [2]. На рис. 2 приведены графики двух характерных зависимостей составляющих (3); (4) основной погрешности преобразования от <Saturation> (остальные типы, судя по рис. 1, – экзотичны). Графики слева получены в пакете графических программ GIMP, справа – Pixlr Photo editor. По их левым осям ординат отложены значения насыщенностей, по правым – яркостей цвета.

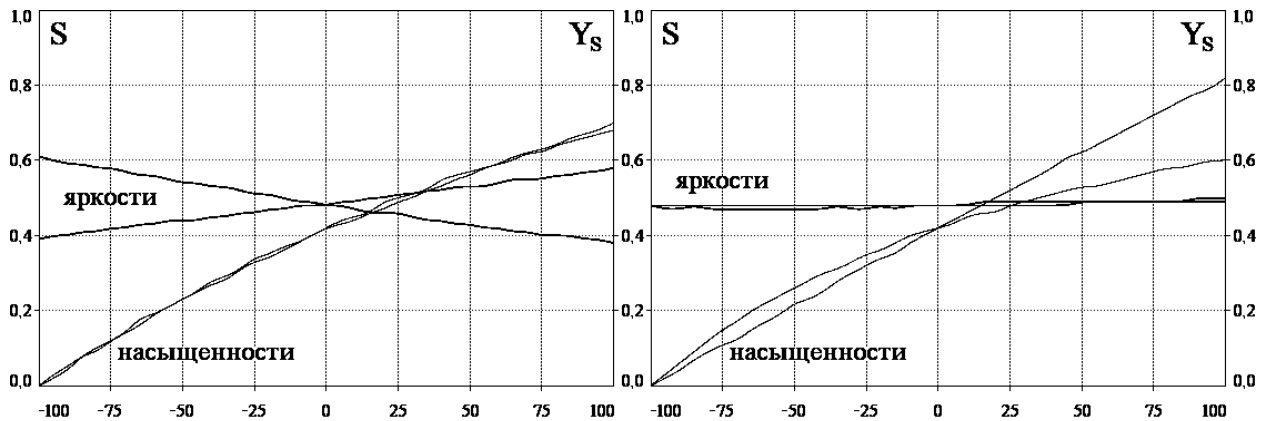


Рис. 2. Типовые преобразования насыщенностей и главные составляющие их основных погрешностей.

Видно, что, будучи исходно порождён одной только разницей в оттенках, полный контраст тестируемой пары полей на графиках:

- либо слева и справа от нулевой точки прирастает изрядным контрастом яркостей (в силу паразитного яркостного сдвига при <Saturation>),
- либо справа – столь же изрядным контрастом насыщенностей (в силу неравномерности преобразования разных оттенков при <Saturation>).

Таким образом, рис. 2 демонстрирует два антикоррелированных механизма, участвующих в формировании полной погрешности <Saturation>.

Сформируем базовый вывод из этого сопоставления. Для такого типа преобразований всякий раз значима лишь одна составляющая основной погрешности, второй составляющей по сравнению с первой чаще всего можно пренебречь.

В работе [2] было предложено рассматривать погрешность контрастного преобразования цветовой насыщенности, как комплексную, имея в виду совокупность погрешности преобразования собственно насыщенности и двух погрешностей сохранения – оттенков цвета и яркости цвета. Для конкретного тестового изображения эта совокупность отображена диаграммой (рис. 2): чёрным выделена погрешность отеночной неравномерности преобразования насыщенности цвета, белым – погрешность яркостного сдвига. Погрешность отеночного сдвига на рис. 2 не показана – как уже говорилось выше, её ничтожность не угрожает целостности изобразительной информации при контрастном преобразовании насыщенности цвета.

На рис. 3 приведена диаграмма, описывающая точностные характеристики – яркостные сдвиги (4) и отеночные неравномерности (3) – средств программного преобразования насыщенности в современном ПО. Цифры на диаграмме приведены для роста <Saturation>: ветви при его падении <Saturation> не учитываются – они менее информативны, а вопросы чёрно-белого преобразования изображений предполагается рассмотреть в отдельной работе. Для удобства визуального сравнения обе погрешности приведены в одинаковых единицах – в процентах от наибольшего возможного яркостного сдвига и отеночной неравномерности. В целом анализ такой диаграммы позволяет сформулировать следующую закономерность: программные пакеты с незначительным яркостным сдвигом у инструмента <Saturation> обладают наибольшей отеночной неравномерностью преобразования насыщенности цвета, и наоборот. По

этому признаку большинство из исследованных пакетов демонстрируют комплементарность.

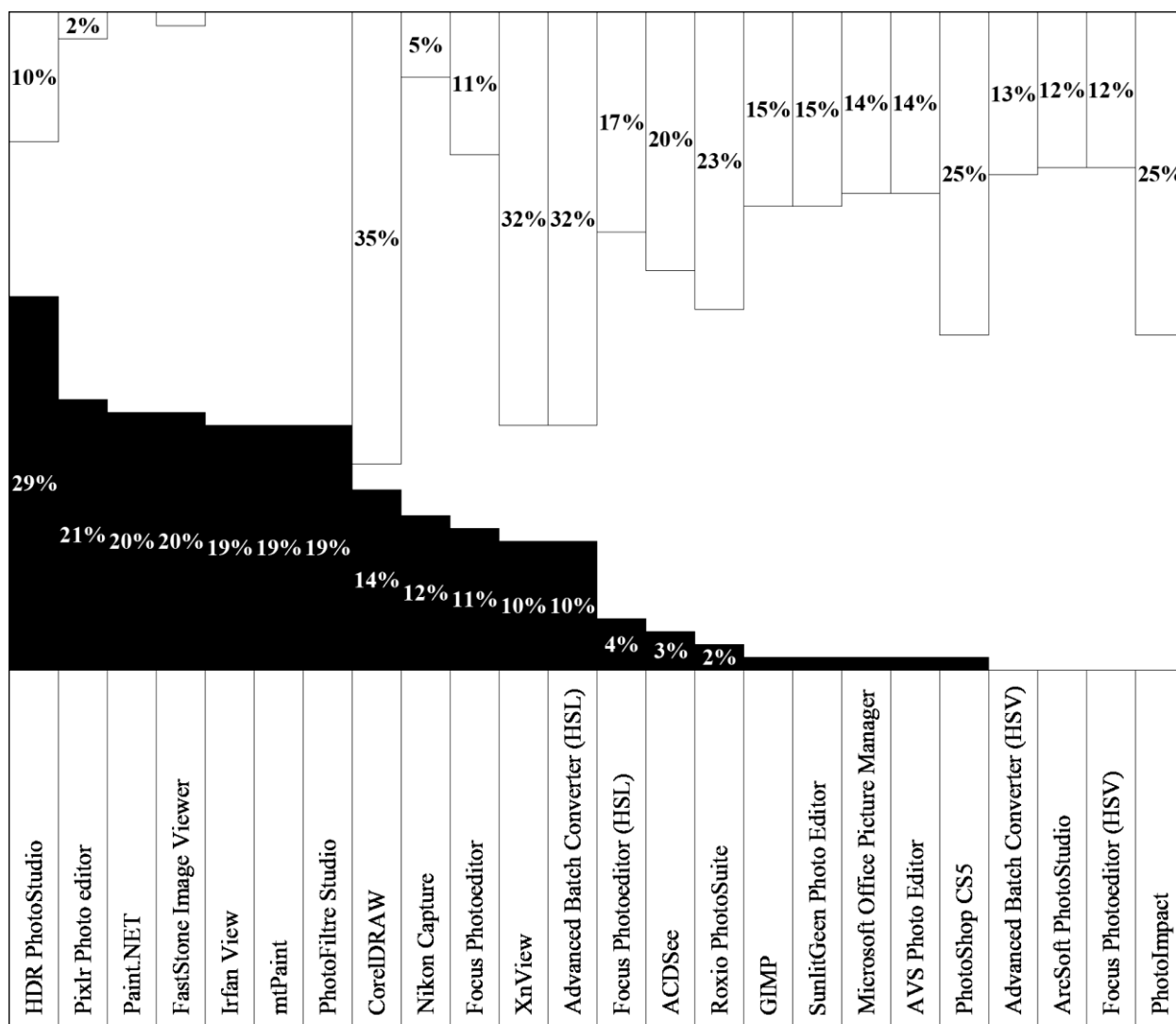


Рис. 3. Соотношение компонент погрешности <Saturation>.

Сверху – яркостные сдвиги, снизу – оттеночные неравномерности.

Это наблюдение тем более усугубляет запрет [2,12,13] на применение перечисленных на рис. 3 графических программных пакетов в экспертной практике.

Наконец, уместен вопрос о нормировании обсуждаемой погрешности (оттеночной неравномерности преобразования). Здесь ее цветовая природа проявляет свою неприятную в информационном плане особенность. Если в

иных случаях измерительного преобразования – к примеру, у измерительного усилителя – можно просто ограничить диапазон рабочих частот сигнала по допустимому уровню погрешности усиления, то для оттенков цвета такого рода нормировка неприемлема. У изображения нельзя ограничить диапазон оттенков без потери информации. Значит, нормировать можно лишь погрешность преобразования насыщенности (что, впрочем, касается и погрешности преобразования при контрастировании яркостей). В идеале насыщенности у пикселей всех оттенков должны преобразовываться одинаково, – на практике в задачах анализа (в задачах синтеза эта погрешность не нормируется) допускается некоторая погрешность, размер которой определен требованиями к отсутствию каких-либо утрат и искажений изобразительной информации при визуальной регистрации. Количественным критерием наличия/отсутствия утрат и искажений в подобных требованиях является минимально заметное различие (just noticeable difference) наблюдаемой величины [14].

Обсудим отрицательные последствия, порождаемые оттеночной неравномерностью преобразования цветовых насыщенностей в процессе информативной обработки цифровых изображений. Опуская соображения о неприемлемости для информационно-измерительного преобразования погрешности, как таковой (а 10...20% лишает такие <Saturation> статуса измерительного преобразователя), рассмотрим последствия в двух аспектах – её влияние на цветовую и формную изобразительную информацию.

Нарушение целостности цветовой изобразительной информации.

Если насыщенность у полноцветного изображения усиливать отягощёнными оттеночной неравномерностью инструментами, оно пожелтеет. В частности, если исследуемое изображение - это цифровая копия бумажного фотоснимка, то желтизна сразу же увеличит возраст отпечатка, что для экспертных приложений нежелательно (возраст обусловлен процессом, аналогичным не

по своей сути, а по своему внешнему проявлению, – преимущественным выцветанием синего пигмента).

Нарушение целостности формной изобразительной информации.

Отталкиваясь от тестового изображения, сделаем его исходный контраст насыщенностей ненулевым. Тогда в процессе увеличения <Saturation> от минимума до максимума он сначала упадёт до нуля, потом снова вырастет, а значит, на некотором участке эволюции при прочих (оттенков и яркостей) неизменных контрастах полный контраст упадёт, и не факт, что останется в пределах контрастной чувствительности человеческого глаза. То есть, при росте <Saturation> визуальное ощущение контраста, а с ним и восприятие соответствующей ему формной изобразительной информации, могут пропасть. Это артефакт. Для некоторых (хотя и редко встречающихся) изображений он обязательно отыщется. Следует напомнить, что ПО годится для целей анализа, только когда артефакты заведомо невозможны. И практической реализации такого – гарантирующего отсутствие артефактов обработки любого материала – ПО теоретически ничто не препятствует.

Сопоставим полученные результаты с альтернативными данными. В первую очередь целесообразно проанализировать сегодняшние обновления уже ревизованного программного продукта. С конца прошлого года разработчик online графических редакторов семейства Pixlr, включая Pixlr Photo editor 2013 (провайдер Autodesk, US), использует новую версию пакета – Pixlr-E. В новой версии алгоритм <Saturation>, раскритикованный выше из-за оттеночной неравномерности преобразования, был заменён. Кривые для Pixlr-E представлены на рис. 4. Лучше, правда, не стало. Из графиков следует, что теперь и оттеночная неравномерность в обновлённом программном продукте упала отнюдь не до нуля, и появился весьма заметный яркостный сдвиг. Полная погрешность при этом не уменьшилась. Графики погрешностей (рис. 4) стали похожи на GIMP (рис. 2) со всеми

вытекающими из паразитного яркостного сдвига перспективами получить артефакты обработки, подобные тем, которые демонстрировались в [2,10].

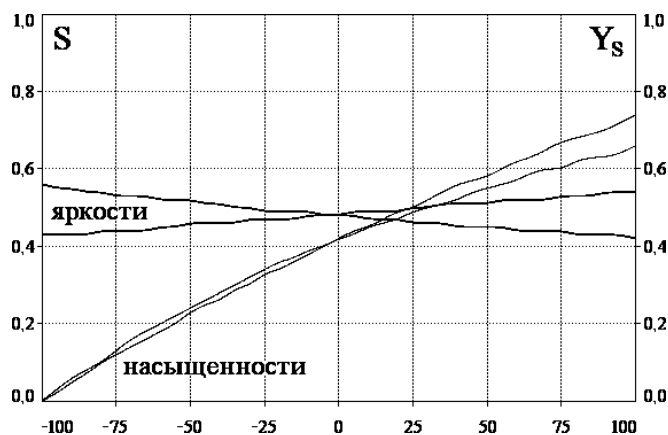


Рис. 4. Преобразование насыщенностей и

главные составляющие его основной погрешности в Pixlr-E.

Во-вторых, следует акцентировать решения, принципиально новые алгоритмически. Где результат ищется не путём той или иной (лишь бы одноразовой) манипуляции RGB-координатами, а в (пусть даже двухэтапной) процедуре решения уравнений.

В работах [12] и [13] был представлен оригинальный алгоритм контрастирования, исключаящий обе (и яркостный сдвиг, и оттеночную неравномерность) погрешности. Алгоритм использует принцип линейного преобразования контраста. Три соответствующих графика зависимостей насыщенностей, яркостей и оттенков пары цветов тестового изображения от коэффициента контрастирования M приведены на рис. 5. В исходном состоянии $M=1$. Точно так же, как и на рис. 1, кривые оборваны на верхней границе диапазона эволюции насыщенностей цвета – справа. Каждая составляющая результирующего цвета считалась с погрешностью $<0,000005$. Очевидно, одноимённые зависимости для обоих полей совпадают. Совпадение на верхнем графике приводит к выводу об идентичности преобразования насыщенностей цвета разных оттенков. Совпадение на

среднем и параллельность линий на нижнем графиках говорит об отсутствии яркостного и оттеночного сдвигов у результирующего цвета при любых коэффициентах преобразования, что отвечает нулевой нормировке сдвиговых погрешностей такого инструмента, диктуемой леммой [10].

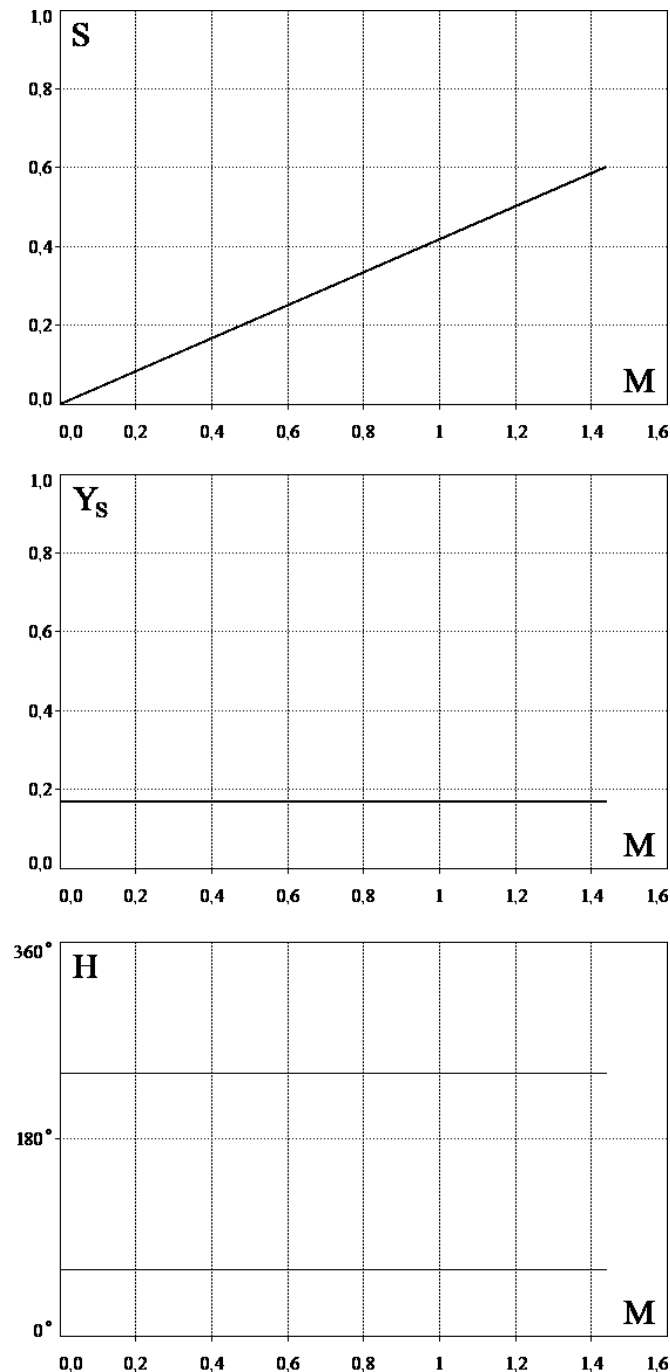


Рис. 5. Преобразование насыщенностей и составляющие его основной погрешности: оттеночная неравномерность (сверху), яркостный (посередине)

и оттеночный (снизу) сдвиг для тестового изображения при использовании оригинального алгоритма.

Такое "безошибочное" поведение зависимостей предопределено целенаправленным выбором функции преобразования цветовой насыщенности – сдвиговой. И это понятно: по доказанным в статье [12] лемме и теореме значения обеих неконтрастируемых характеристик цвета – оттенка и яркости – до и после преобразования не должны различаться, чего нельзя гарантировать для современного графического ПО.

Остаётся заметить, что в свете полученных выше результатов задача исследования двадцати четырёх пакетов на предмет яркостной неравномерности преобразования вряд ли актуальна – этот программный продукт уже и без того непригоден для экспертных задач. Как альтернатива, в экспертных приложениях может использоваться специальное контрастирующее ПО [12,13], у которого заранее, еще на стадии разработки алгоритмов, были исключены как погрешности яркостного/оттеночного сдвига, так и погрешности оттеночной/яркостной неравномерности контрастного преобразования насыщенности цвета.

Резюмируем обсуждение результатов:

- выявленная погрешность оттеночной неравномерности преобразования столь же критична для контрастирования насыщенностей цвета, как и погрешность яркостного сдвига;
 - совокупность разнородных пожеланий к различным цветовым характеристикам логично обобщить единым понятием системных требований к инструментам, предназначенным для контрастирования изображений с целью получения адекватной (без артефактов) латентной графической информации – в частности, и для аналитической обработки цифрового фото-видеоматериала – в целом.
-

Ранее [10] была доказана лемма об управлении частными контрастами. Она гласит: «Если сохранять исходными значения двух любых характеристик цвета, то при вариации физического контраста третьей характеристики её визуальный контраст будет изменяться однозначно». Но для того, чтобы выстроить адекватную систему управления изобразительным контрастом, одной леммы недостаточно, поскольку она ничего не говорит о контрастируемой характеристике цвета. Поэтому, в дополнение к лемме [10], по результатам настоящего исследования формируется следующее требование к работе с контрастируемой характеристикой цвета – отсутствие неравномерностей её контрастного преобразования по двум неконтрастируемым характеристикам цвета: «Результат контрастного преобразования любой характеристики цвета не должен зависеть от значений двух других характеристик цвета». В структуре цифровой оптики [15] этот вывод относится к теоретическим разделам, посвященным преобразованиям оптических сигналов.

Литература

1. Чмутин А.М. Экспертное исследование изображений на транспорте. // Технические экспертизы на транспорте. / Под общ. ред. Комарова Ю.Я. – М.: Горячая линия - Телеком, 2020. С. 195-222.
2. Белодедов М.В., Зотов Н.М., Хоперсков А.В., Чмутин А.М., Чуйко В.А. Анализ точности преобразования насыщенности цвета в современном программном обеспечении. // Известия вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 11. С. 1005-1014. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-1005-1014. URL: pribor.ifmo.ru/file/article/19245.pdf.
3. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Части 1...7. – СПб. Изд-во ИТМО, 2003...2009. 47 с., 60 с., 67 с., 107 с., 131 с., 118 с.

4. Абламейко С.В., Недзведь А.М. Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине. – Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. 156 с.

5. Сидорчук Д., Жижина Е. Выделение нечетких объектов на цветных изображениях с помощью стохастических алгоритмов. // Информационные процессы. 2013. Т. 13. № 3. С. 171-184. URL: jip.ru/2013/171-184-2013.pdf.

6. Наркевич А.Н., Виноградов К.А., Сысоев С.А., Плотников Д.В. Выбор оптимальных параметров метода сегментации. // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5140.

7. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.

8. Маликов М.Ф. Основы метрологии. – М.: Комитет по делам мер и измерительных приборов, 1949. 480 с.

9. Rabinovich S.G. Evaluating Measurement Accuracy. – New York: Springer, 2013. 313 p.

10. Чмутин А.М. Контраст насыщенностей и яркостный сдвиг: парадоксы Photoshop. // International Journal of Open Information Technologies. 2019. V. 7. №1. PP. 12-24. URL: injoit.org/index.php/j1/article/view/632/645/632-2038-1-PB.pdf.

11. Ложкин Л.Д. Цвет в телевидении. – Самара: ПГУТИ, 2016. 421 с.

12. Бондарь О.В., Чмутин А.М., Чмутин М.А. Алгоритм управления контрастом насыщенностей цифровых изображений и его программная реализация. // Инженерный вестник Дона. 2020. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2020/6458.

13. Бондарь О.В., Чмутин А.М., Чмутин М.А. Технология контрастирования цветовых насыщенностей цифровых изображений. // International Journal of Open Information Technologies. 2021. V. 9. № 7. PP. 93-106. URL: injoit.org/index.php/j1/article/view/1109/1097/1109-3576-1-PB.pdf.

14. Keelan B.W. Handbook of Image Quality. Characterization and Prediction. – New York: Marcel Dekker, 2002. 516 p.

15. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. Введение в цифровую оптику. – М.: Радио и связь. 1987. 296 с.

References

1. Chmutin A.M. Tehnicheskie ekspertizy na transporte [Technical Expertise in Transport]. Pod obshch. red. Ju.Ja. Komarova. M.: Goryachaja linija -Telekom, 2020. PP. 195-222.

2. Belodedov M.V., Zotov N.M., Hoperskov A.V., Chmutin A.M., Chujko V.A. Izvestija vuzov. Priborostroenie. 2019. T. 62. № 11. PP. 1005-1014. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-1005-1014.URL: pribor.ifmo.ru/file/article/19245.pdf.

3. Kirillovskij V.K. Opticheskie izmerenija. Chasti 1...7 [Optical Measurements. Parts 1...7]. SPB.: Izd-vo ITMO, 2003...2009. 47 p., 60 p., 67 p., 107 p., 131 p., 118 p.

4. Ablamejko S.V., Nedz'ved' A.M. Obrabotka opticheskikh izobrazhenij kletochnyh struktur v medicine [Proccession of Cell Structures' Optical Images in Medicine]. Mn.: OIPI NAN Belarusi, 2005. 156 p.

5. Sidorchuk D., Zhizhina E. Informacionnye processy. 2013. V. 13. № 3. PP. 171-184. URL: jip.ru/2013/171-184-2013.pdf.

6. Narkevich A.N., Vinogradov K.A., Sysoev S.A., Plotnikov D.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5140.

7. Krasil'nikov N.N. Cifrovaja obrabotka 2D- i 3D-izobrazhenij [Digital Proccession of 2D- and 3D-Images]. SPB.: BHV-Peterburg, 2011. 608 p.

8. Malikov M.F. Osnovy metrologii [The Principles of Metrology]. M.: Komitet po delam mer i izmeritel'nyh priborov, 1949. 480 p.



9. Rabinovich S.G. Evaluating Measurement Accuracy. New York: Springer, 2013. 313 p.
10. Chmutin A.M. International Journal of Open Information Technologies. 2019. V. 7. № 1. PP. 12-24. URL: injoit.org/index.php/j1/article/view/632/645/632-2038-1-PB.pdf.
11. Lozhkin L.D. Cvet v televidenii [Color in Television]. Samara: PGUTI, 2016. 421 p.
12. Bondar' O.V., Chmutin A.M., Chmutin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2020/6458.
13. Bondar' O.V., Chmutin A.M., Chmutin M.A. International Journal of Open Information Technologies. 2021. V. 9. № 7. PP. 93-106. URL: injoit.org/index.php/j1/article/view/1109/1097/1109-3576-1-PB.pdf.
14. Keelan B.W. Handbook of Image Quality. Characterization and Prediction. New York: Marcel Dekker, 2002. 516 p.
15. Jaroslavskij L.P. Cifrovaja obrabotka signalov v optike i golografii. Vvedeniye v cifrovuyu optiku [Digital Signal Procession in Optics and Holography. Introduction to Digital Optics]. M.: Radio i svyaz', 1987. 296 p.