

# Набор прикладных программ для анализа контрастов цифрового изображения

Н.Е. Андропова, О.В. Бондарь, А.О. Боровкова, В.И. Боровков, П.Е. Гребенюк, А.С. Грессеров, А.М. Чмутин, М.А. Чмутин

**Abstract** – Рассматриваются цифровые изображения, несущие значимую информацию, локализованную ниже порога контрастного восприятия человеческого глаза и не всегда поддающуюся обработке средствами современного программного обеспечения (ПО). Причина неудач кроется в том, что за весьма редким исключением контрастирование выполняют, управляя непосредственно RGB-координатами пикселей. Альтернатива – авторские системные программы преобразования перцепционных контрастов. В настоящем исследовании дифференцированы понятия о системности функционирования и о систематичности организации структуры контрастирующего инструментария. С позиций контрастирующего воздействия соответствующее штатное ПО было проанализировано на предмет достаточности его функционального наполнения и выявлены существенные пробелы среди потребной номенклатуры контрастирующих функций. Разработанный программный набор, напротив, организован систематически – реализован потенциальный максимум режимов контрастирования. Притом механизмы управления перцепционными контрастами унифицированы и объединены с механизмами управления одноимёнными цветовыми характеристиками. Плюс к такой оптимизации в титульные контрастирующие процедуры интегрированы процедуры сопутствующие, в существующем сегодня ПО выполняемые автономными инструментами. Осуществлён ряд новых контрастирующих функций. Набор программ преобразования контраста (и цвета) обеспечен средствами для анализа и диагностики оригиналов, для визуализации результатов контрастирования. Документирован процесс тестирования созданного набора. Изложена работа тестов Ишихары в терминах и категориях теории контраста. Детализовано реформатирование одного из них в триаду пороговых тестов. Проведена апробация разработки, в процессе которой обоснован метод и даны предварительные оценки порогов чувствительности глаза к контрастам оттенков, насыщенностей и яркостей цвета.

Представлен краткий обзор возможных приложений разработанной совокупности средств анализа изобразительных контрастов. Приоритет отдан сфере экспертной деятельности. С учётом экспертных соображений и очерчена перспектива развития разработки, в рамках которой проставлены информативные реперы по направлениям дальнейших работ.

**Keywords** – цифровые изображения, перцепционное контрастирование, систематическая организация программного обеспечения, тестирование и апробация инструментария, порог контрастной чувствительности, экспертные приложения.

## I. ПРЕАМУЛА

Когда мы начали работать с виртуально-оптическим, или программным, контрастированием фотографических изображений, число аналоговых снимков всё ещё было сравнимо с числом цифровых. В считанные годы – к 2011 – оно уже стало ничтожным (4 versus 376 млрд./год) [1]. Экстраполируя динамику роста цифровой фотографии (с 2000 по 2011 приблизительно  $4,5^x$  [1]) на сегодняшний день, можно прогнозировать  $\approx 1,7$  трлн./год.

Представляя ниже оригинальный набор программ для системного контрастирования цифровых изображений, стоит оценить минимальный размер возможной области их применения. Мы исходили из того что только 0,1% от общего числа цифровых фото окажутся некачественными (потребуется дополнительная обработка). Из них только 0,1% будут нести значимую информацию, а из последних 99 % для извлечения латентной её части можно будет обработать и с использованием существующего сегодня несистемного графического программного обеспечения (ПО). Остаток –  $10^{-8} \times 1,7$  трлн. – составит 17 000 снимков за год (во всём мире), причём здесь никак не учитывались регистрируемые данные видеонаблюдения.

Это нижний предел перспективы. На практике цифры могут и вырасти за счёт вторжения новейшей разработки в области, традиционно применяющие существующее ПО не только в задачах анализа изображения, но и в задачах их синтеза. Поэтому желательно, чтобы разрабатываемый инструментарий превосходил традиционный ещё в плане своей организации (в составе программного пакета).

Статья получена 6 марта 2023.

Н.Е. Андропова, выпускница физико-технического института ВолГУ (email: nadeshda061@yandex.ru).

О.В. Бондарь, выпускница физико-технического института ВолГУ (email: olga.bondar\_vlg@mail.ru).

А.О. Боровкова, выпускница физико-технического института ВолГУ (email: free-comp@yandex.ru).

В.И. Боровков, выпускник физико-технического института ВолГУ (email: fl31k@yandex.ru).

П.Е. Гребенюк, выпускник физико-технического института ВолГУ (email: strat01@yandex.ru).

А.С. Грессеров, выпускник факультета физики и телекоммуникаций ВолГУ (email: asgresserov@gmail.com).

А.М. Чмутин, к.т.н. доц. института математики и информационных технологий ВолГУ (email: amchmutin@yandex.ru).

М.А. Чмутин, студент института математики и информационных технологий ВолГУ (email: cmutinmihail8845@gmail.com).

## II. ВВЕДЕНИЕ

Под упомянутой выше системностью понимается некое принципиальное отличие разработанных инструментов от существующих аналогов. Поясним. Изображение состоит из совокупности элементов – пикселей, а сам пиксель определяется совокупностью его элементов – цветовых характеристик. Поэтому пиксель, как базовая категория компьютерной графики, соответствует всем требованиям, предъявляемым к системе [2]. Обработка изображения системна, когда проводится с учётом всех характеристик всех его пикселей. С этой, структурной, точки зрения все существующие алгоритмы контрастирования системны. Отступления мы связываем с признаком "подчиненность организации всей системы определенной цели" [2]. Т.е. алгоритмы управления контрастом, приводящие к цели – возможности визуального получения исходно латентной изобразительной информации – спорадически, полагаем несистемными. Напротив, алгоритмы, которые приводят к цели закономерно, – системными. Эта системность для разработанного инструментария была показана в работах, впоследствии обобщённых [3], и относится к математике преобразований, положенных в основу соответствующих программных инструментов. Но такая, целевая, ипостась у системности – не единственная.

Исследуем терминологическую дилемму «системность versus систематичность» применительно к проблематике статьи. "Системный анализ предлагает другой подход: есть цель (функция), какая нужна структура, чтобы достичь ее наилучшим образом. Такой подход позволяет вырабатывать оптимальные решения, исключая параллелизм и дублирование функций ..." [4]. В таком случае искомым оптимум – систематичность организации программного набора. И эта систематичность, уже никак не затрагивая вопросы преобразований, ревизует степень единообразия при выполнении потребных функций тем или иным программным инструментом. Систематичность определяет структуру инструментария, как совокупности отдельных инструментов.

Оценим функциональную организацию существующих инструментов контрастирования. Её главный недостаток – урезанная номенклатура инструментария: в структуре отсутствуют практически все средства контрастирования хроматических характеристик цвета [5]. На этом фоне как то теряются параллелизм и дублирование ряда функций, а они также являются весьма существенным признаками несистематичности в организации структуры нынешнего, изрядно несовершенного, инструментария графического ПО.

Таким образом, как системность, требуемая леммой об управлении частными контрастами [6], так и должная систематизация процедур обуславливают оптимальность создаваемых средств контрастного выявления латентной информации. Но если несистемность уже была устранена ранее по результатам [3], то теперь остаётся обеспечить систематичность. Здесь и далее, разграничивая вопросы контрастных преобразований и созданного на их основе программного инструментария, мы будем говорить лишь

о систематичности последнего. Этим мы ещё и избежим путаницы между целевой системностью преобразований и второй ипостасью системности – уровнем организации инструментария.

Обобщая вышеизложенное, имеет смысл цель текущей статьи формулировать в традиционном русле авторских работ [3,5,6], как оптимизацию разрабатываемых средств выявления латентной изобразительной информации. Для достижения обозначенной цели сначала требуется решить задачу систематической организации контрастирующего инструментария. Решению этой задачи, его обоснованию, обсуждению результатов его тестирования и апробации с учётом присущих человеку (стандартному наблюдателю) особенностей зрительного восприятия изобразительной информации и посвящена настоящая статья.

## III. НАКОПЛЕННЫЙ ФУНКЦИОНАЛ

По теории [3,6] контрастирующим действием в разной степени обладают три типа преобразований:

- сдвиг любой из трёх характеристик цвета;
- её пропорциональная (aka линейная [7]) вариация;
- её нелинейная вариация.

Сдвигом обеспечивается слабейший – физиологический механизм контрастирования, а линейной или нелинейной вариацией избранной цветовой характеристики – намного более сильный физический механизм. В теории контраста такая разница объясняется тем, что линейная/нелинейная вариация цветовой характеристики воздействует на сам её физический (материальный) контраст, в то время как сдвиг этой характеристики – только на функции видности её контраста.

NB1. Для специализированного ПО при рассмотрении его сугубо функциональных аспектов следует различать сдвиг; линейность/нелинейность изменения (управления) применительно к той или иной характеристике цвета и к RGB-координатам, которыми характеристика кодируется в подлежащем информативной обработке файле. Здесь и далее в пределах данной статьи аргументами функции преобразования подразумеваются только перцепционные характеристики цвета – его оттенок  $H$ , насыщенность  $S$  и яркость  $Y$ .

Любое, как сдвиговое, так и линейное или нелинейное преобразование всякой цветовой характеристики может быть однозначно определено по двум графикам. Которые отображают рассматриваемую характеристику цвета при её изменении либо по полю изображения, либо по силе воздействия на последнее.

NB2. Отсюда проистекает «полевое» определение типа преобразования, как зависимости его результирующих значений  $H'$ ;  $S'$  и  $Y'$  от исходных  $H$ ;  $S$  и  $Y$ . При некотором фиксированном воздействии программного инструмента. Откладывая весьма протяженную детализацию полевых зависимостей у существующего ПО до соответствующей работы, сфокусируемся на операционных особенностях управления «силой» процесса цветопреобразования при контрастировании.

NB3. Сформируем «динамическое» определение типа преобразования (в таком контексте иногда говорят про

функцию шкалирования), как зависимости  $H'$ ;  $S'$  и  $Y'$  от управляющего воздействия – числовых значений в окне, напр., <Hue>. Для некоторой тройки характеристик цвета фиксированного пикселя. Тогда функция шкалирования сама по себе может быть как линейной, так и нелинейной. Именно такое представление линейности предполагается использовать здесь и далее в пределах данной статьи.

У сегодняшнего графического ПО [5] так или иначе (с той либо иной степенью полноты и хотя бы в одном из проанализированных программных пакетов) реализованы следующие – титульные – контрастирующие функции:

- сдвиговое управление оттенками,
- сдвиговое управление насыщенностями,
- линейное и нелинейное управление насыщенностями,
- нелинейное управление яркостями,
- нелинейное контрастирование яркостей

и, отдельно, сопутствующие: инверсия, вирирование [8]\*, бинаризация [9], обесцвечивание, эквализация, быстрая коррекция (Auto Contrast, Auto Color, Auto Tone), ... . Обычно подобные функции, не позволяя в существенном интервале варьировать контрасты, всё же дают больший либо меньший контрастный эффект, подчас способный сработать на повышение информативности изображений, как при визуальном, так и при машинном способе их анализа.

Сегодня верхние четыре титульные контрастирующие функции помимо собственно цветовых характеристик сразу же преобразуют и соответствующие визуальные:

- контраст цветовых оттенков (слабый механизм),
- контраст цветовых насыщенностей (оба механизма),
- контраст цветовых яркостей (сильный механизм).

Последней титульной\*\* функцией преобразуется только визуальный контраст яркостей (сильный механизм).

В то же время востребовано значительно больше. "За бортом" остаются возможности управления физическими контрастами оттенков и функциями видности яркостных контрастов, использование которых не менее актуально в целях анализа контрастов.

Кроме того, удобное сочетание в едином инструменте возможностей управлять и цветовой характеристикой, и её физическим контрастом у сегодняшнего ПО в полной мере реализовано только для яркости. А вот инструменту <Saturation> недостаёт двух режимов (Inverse и Complex Modes [5]), что позволяет управлять контрастами только малых насыщенностей. Т.е. имеет место функциональная неполнота сатурирующего инструментария (тогда как полноформатное управление яркостями и их контрастом

\*чаще всего терминами вирирование, тонирование и колоризация в разных программных пакетах обозначается одна и та же функция, хотя управление может и различаться.

\*\*под титульными подразумеваются инструменты <Hue>, <Saturation> и связанная пара <Brightness>+<Contrast>. В графическом ПО сейчас имеются инструменты, в немалой степени дублирующие не только функции, но и системные погрешности титульных, – это, к примеру, <Curves>, <Levels>, ... . Таковые ipso facto были исключены из рассмотрения.

допускает усиление контраста любых яркостей от тёмных до светлых).

Такая ограниченность существующего функционала не позволяет производить ни контрастирование оттенков с использованием более грубого физического механизма, ни контрастирование яркостей с использованием более тонкого физиологического механизма управления одним или другим из этих частных контрастов. Что резко сужает круг изображений, латентную информацию из которых можно извлечь контрастированием. Да и не подлежащие контрастированию цветовые характеристики как правило свои исходные контрасты (и, как следствие, переносимую оными изобразительную информацию) не сохраняют. Что может приводить к артефактам контрастирования, – они проявляются не только в подавлении, но и в искажении изобразительной информации (очевидно, уже не искомой информации, а фоновой). Хотя по лемме [6] они должны бы сохраняться.

#### IV. СОЗДАННЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ

Новация – математические преобразования контрастов пар оттенков, насыщенностей и яркостей; алгоритмы и программы, их реализующие, – избавлена от упомянутых дефектов – она системна в всех смыслах, рассмотренных во Введении. Эти аспекты отражены в библиографии к [3]. В настоящей работе авторы ставят акцент на вопросы функциональной организации созданных инструментов в плане их оптимального взаимодействия.

С точки зрения функциональности все три титульных программных инструмента в наборе обеспечивают:

- сдвиговое и линейное управление оттенками пикселей и их межпиксельными контрастами,
- сдвиговое и линейное управление насыщенностями пикселей и их межпиксельными контрастами,
- сдвиговое и линейное управление яркостями пикселей и их межпиксельными контрастами.

Программы поименованы Huecon (Hue & Hue Contrast), Satcon (Saturation & Saturation Contrast), Bricon (Brightness & Brightness Contrast) – см. приведённую ниже таблицу.

Отметим отличительные особенности построения этих инструментов. Если неизменность исходного оттенка (в процессе контрастирования насыщенностей и яркостей); если неизменность исходной насыщенности (в процессе контрастирования яркостей) обоснованы аналитически\*\*\*, то приведение яркости к своему исходному значению (в процессе контрастирования оттенков и насыщенностей); то приведение насыщенности к исходной (в процессе контрастирования оттенков) обеспечивается программно. При этом все программные действия с яркостью можно производить в трёх вариантах (Zero; Light; True Modes), различающихся точностью vs скоростью счёта.

Zero Mode – худший по точности режим – использует яркостное уравнение

\*\*\*это легко доказать путём одинакового приращения и приумножения RGB-координат.

$$Y' = MY = K \cdot R' + 3 \cdot G' + C \cdot B',$$

где  $R' = kR$ ,  $G' = kG$  и  $B' = kB - 8/16\text{bitRGB}$ -координаты (штрихом помечены результирующие значения – после яркостно-контрастного преобразования; изначальные – без пометок);  $M$  – коэффициент контрастирования;  $k$  – изменение цветовых координат. Здесь и далее  $K$ ,  $3$  и  $C$  – это яркостные коэффициенты в стандарте IEC 61966-2-1. Уравнение элементарное и решается легко.

Light Mode – промежуточный по точности режим – использует укороченное яркостное уравнение

$$Y' = MY = k^{2,4} (K \cdot R + 3 \cdot G + C \cdot B),$$

где  $R$ ,  $G$  и  $B$  – sRGB-координаты. Теперь коэффициент контрастирования равен  $k^{2,4}$  и решение отыскивается уже не так быстро.

True Mode – лучший по точности режим – использует яркостное уравнение

$$Y' = MY = K \cdot R' + 3 \cdot G' + C \cdot B',$$

где  $R' = [(kR + 0,055)/1,055]^{2,4}$ ,  $G' = [(kG + 0,055)/1,055]^{2,4}$  и  $B' = [(kB + 0,055)/1,055]^{2,4}$  – sRGB-координаты (для малых значений  $R$ ,  $G$  и  $B$  формулы проще). Опять коэффициент контрастирования с изменением цветовых координат  $k$  связан нелинейно, но такое уравнение приходится решать численно со многими итерациями, т.е. достаточно долго. Курсивом в таблице 1 выделены те режимы контрастного преобразования, которые осуществлены впервые.

Таблица 1. ОБНОВЛЕНИЕ ТИТУЛЬНЫХ КОНТРАСТИРУЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Программа	Управляемый контраст	Тип преобразования	Шкала	Механизм управления контрастом	Неуправляемые контрасты
Hueson	материальный	пропорциональное	круговая	редуцированный ( <i>Referent Mode + Opposite Mode</i> ) <sup>1</sup>	процедурное восстановление насыщенности и яркости
	визуальный	сдвиговое			
Satcon	материальный	пропорциональное	линейная	полноформатный ( <i>Real Mode + Complex Mode + Inverse Mode</i> ) <sup>2</sup>	методическое сохранение оттенка и процедурное восстановление яркости
	визуальный	сдвиговое			
Bricon	материальный	пропорциональное	линейная	полноформатный ( <i>Real Mode + Complex Mode + Inverse Mode</i> )	методическое сохранение оттенка и насыщенности
	визуальный	сдвиговое			

<sup>1</sup> Андропова Н.Е., Гребенюк П.Е., Чмутин А.М. Алгоритм и программная реализация управления оттеночным контрастом цифровых изображений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3783> (дата обращения: 01.03.2023).  
<sup>2</sup> Бондарь О.В., Чмутин А.М., Чмутин М.А. Технология контрастирования цветовых насыщенностей цифровых изображений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1109/1097/1109-3576-1-PB.pdf> (дата обращения: 01.03.2023).

Сдвиговой тип преобразования реализован, как опция инструментария пропорционального, поэтому использует всё те же режимы управления контрастами и яркостных преобразований. Математически сдвиг каждой из трёх характеристик цвета описывается предельным переносом опорной точки в  $\pm\infty$  своей шкалы (для круговой – это просто усугубляется добавлением некоторого количества логических операций).

Точно так же, как опция инструментария титульного, в анонсируемом наборе реализованы и сопутствующие. К примеру, вирирование выполняет титульная программа контрастирования оттенков при нулевом коэффициенте контрастирования  $M=0$ ; обесцвечивание (black-and-white conversion) – контрастирования насыщенностей также с нулевым  $M$ ; инверсия, для каждой характеристики цвета выполняется её контрастированием при  $M=-1$ , ... . Но обновлённые титульные инструменты, как интегрируют уже существующие сегодня сопутствующие функции, так и открывают ряд новых возможностей. Эквализация\*, к

примеру, яркостей и насыщенностей цвета – хоть это и не эквализация гистограмм [7] – привлекает, как инструмент для уединения требуемого перцепционного контраста при решении задач анализа.

Вспомогательный инструментарий в комментариях не нуждается. Это программы, обеспечивающие выполнение следующих функций:

- анализ (построение распределений цветовых оттенков, насыщенностей и яркостей);
- диагностика (установление границ режима возможной эволюции контраста для конкретного изображения);
- визуализация.

В последней представляет интерес лишь мультипликация результатов контрастного преобразования. Востребована она при выполнении поиска латентной изобразительной информации в условиях априорной неопределённости по вопросу её наличия/отсутствия на исследуемом снимке

обнуление всех контрастов этой цветовой характеристики. В частности вирирование это эквализация оттенков. Последовательная эквализация двух цветовых характеристик (относительно их усредненных по полю данного изображения значений) формирует портрет третьей цветовой характеристики для данного изображения и, соответственно, портрет её контрастов.

\*Дадим определение. Эквализация некой цветовой характеристики есть приведение всех (в пределах данного изображения) значений этой цветовой характеристики к некоторому наперёд заданному уровню, или

(если искомый фрагмент изображения исходно виден, то и контрастирование теряет смысл). В целом за базовую, (целевую) задачу поиска отвечает визуальный просмотр результирующих изображений при последовательной вариации положения опорной точки контрастирования. Когда искомый фрагмент визуально зафиксирован, для его успешной – достоверной – идентификации базовой становится задача преобразования, за которую в большей мере отвечает вариация коэффициента контрастирования.

Комбинация "второе усиленных" [3] титульных методов контрастного цветообразования позволяет не только инкорпорировать в toolbox практически все типичные для современного графического ПО инструменты линейного контрастирования, но и кратно усилить информативность результата применения контрастирующих процедур. А в разрезе систематической организации контрастирующего инструментария в предлагаемой версии набора программ появляется возможность отказаться и от традиционных <Levels>; <Curves>, к цветопередаче которых имеются претензии, и от некоторых других.

#### V. ТЕСТИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ

Здесь под тестированием следует понимать испытание созданного нами программного продукта на модельных изображениях. У таких моделей практически полностью вырождена формная информация (остался её минимум – прямая между парой равномерно окрашенных полей), но присутствует на изначально зафиксированном уровне информация цветовая. Иначе говоря, для тестирования отобраны исходные изображения при наличии цветового сигнала (изрядного у испытуемой характеристики цвета, а у двух остальных – просто ненулевого).

Исходные цвета полей модели известны, поэтому легко проверить результат приложения каждого инструмента к контрасту материальному. Ибо спутность управляющего воздействия и изменения тестируемой картины очевидна. С визуальными контрастами спутность не гарантируется в силу сложной структуры их видностей – тестирование сдвиговых преобразований стоит отнести к публикации много большего формата. Остаётся отметить, что здесь при тестировании все цветообразования проводились в 48bit-версиях титульных контрастирующих программ.

I. Инструмент преобразования оттенков цвета. В целом контраст полей образован оттенками  $H_B=135^\circ$  и  $H_H=105^\circ$ , а не насыщенностями  $S_B=51\%$  и  $S_H=49\%$  или яркостями  $Y_B=18\%$  и  $Y_H=19\%$  верхнего ( $R=64, G=130, B=80$ ) и нижнего ( $R=84, G=133, B=68$ ) полей модели – см. рис. 1.



Рис. 1. Исходный контраст (оттенков).

Впоследствии изображение на рис. 1 преобразовывалось с малым (0,01) шагом коэффициента контрастирования в интервале  $-1,83 \leq M \leq +1,83$  относительно опорной точки,

оттенком которой  $H_0=120^\circ$  расположен посередине между исходными оттенками верхнего и нижнего полей. При этом погрешность возврата яркости не превышала  $5 \cdot 10^{-6}$ . Рис. 2 демонстрирует результаты преобразования и их анализа.

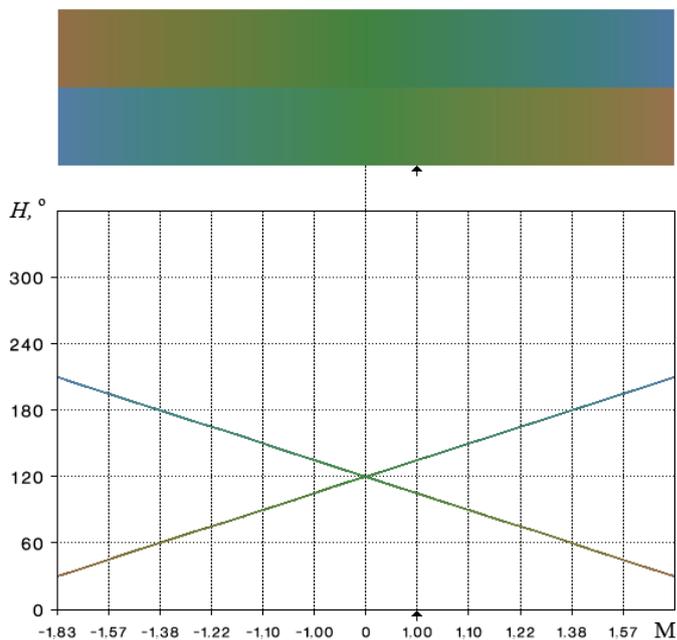


Рис. 2. Развёртка и график зависимости контраста оттенков от коэффициента контрастирования.

Развёртка заканчивается симметрично – по достижении наибольшего возможного в принципе контраста оттенков  $180^\circ$ . Краевые эффекты отсутствуют. Стрелкой помечено начало развёртки, отвечающее исходному контрасту на рис. 1. Момент, когда обнуляется оттеночный контраст в развёртке, совмещён с нулём абсциссы на графике.

Помимо минимизации полного контраста при  $M=0$ , из рис. 2 следует, что в этой точке происходит обращение испытуемого контраста оттенков. Сохранение остальных – контраста насыщенностей и контраста яркостей – на глаз не столь заметно, и поскольку они исходно малы, и поскольку невелики их функции видности. А зоны роста и падения полного контраста можно отчётливо выделить на развёртке благодаря контрасту оттенков.

II. Инструмент преобразования насыщенностей цвета. Контраст модели на рис. 3 в большей степени образуется насыщенностями  $S_B=62\%$  и  $S_H=38\%$ , нежели оттенками  $H_B=102^\circ$  и  $H_H=98^\circ$  либо яркостями  $Y_B=18\%$  и  $Y_H=19\%$  верхнего ( $R=74, G=130, B=49$ ) и нижнего ( $R=99, G=130, B=81$ ) визуально сопоставляемых полей.



Рис. 3. Исходный контраст (насыщенностей).

Картина – рис. 3 – последовательно преобразовывалась с малым (0,01) шагом коэффициента контрастирования в

интервале  $-1,58 \leq M \leq +2,58$  относительно опорной точки с насыщенностью  $S_0=38\%$ , равной исходному значению насыщенности нижнего поля. Здесь погрешность возврата яркости также не превышала  $5 \cdot 10^{-6}$ . Рис. 4 иллюстрирует и результаты преобразования, и результаты их анализа.

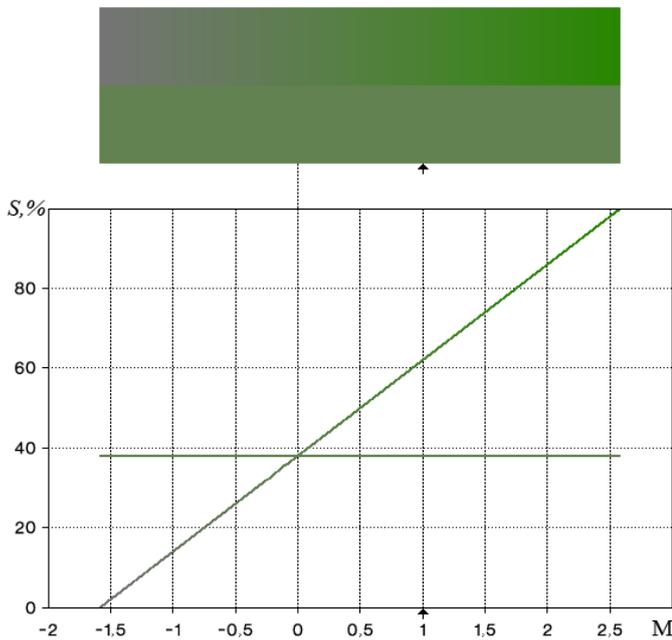


Рис. 4. Развёртка и график зависимости контраста насыщенностей от коэффициента контрастирования.

Слева развёртка закономерно кончается по достижении верхним полем нулевой насыщенности цвета. Справа – наличием краевого ограничения  $B=0$ . Стрелкой помечено начало развёртки, соответствующее исходному контрасту на рис. 3. Момент, когда в развёртке обнуляется контраст насыщенностей, совмещён с нулём абсциссы на графике.

На рис. 4 видно, что в точке  $M=0$  кроме минимизации полного контраста происходит обращение исследуемого частного контраста насыщенностей. Про неизменность иных – контраста оттенков и контраста яркостей – опять же, визуально можно судить с большим трудом в силу малости как их самих, так и их видностей. В итоге зоны роста и падения полного контраста на развёртке удаётся очертить лишь в силу контраста насыщенностей.

III. Инструмент преобразования яркостей цвета. На рис. 5 контраст картины по большому счёту образуют яркости  $Y_B=30\%$  и  $Y_H=10\%$ , – отнюдь не оттенки  $H_B=98^\circ$  и  $H_H=102^\circ$  с насыщенностями  $S_B=49\%$  и  $S_H=51\%$  верхнего ( $R=113, G=163, B=83$ ) и нижнего ( $R=63, G=98, B=48$ ) полей, анализируемых стандартным наблюдателем.

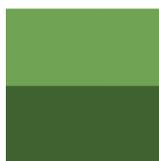


Рис. 5. Исходный контраст (яркостей).

Затем модель (см. рис. 5) преобразовалась аналогично с малым  $-0,01$  – шагом коэффициента контрастирования в интервале  $-2,45 \leq M \leq +1,49$  относительно опорной точки с яркостью  $Y_0=30\%$ , равной исходному значению яркости верхнего поля. Далее на рис. 6 представлены как сами результаты преобразования, так и результаты их анализа.

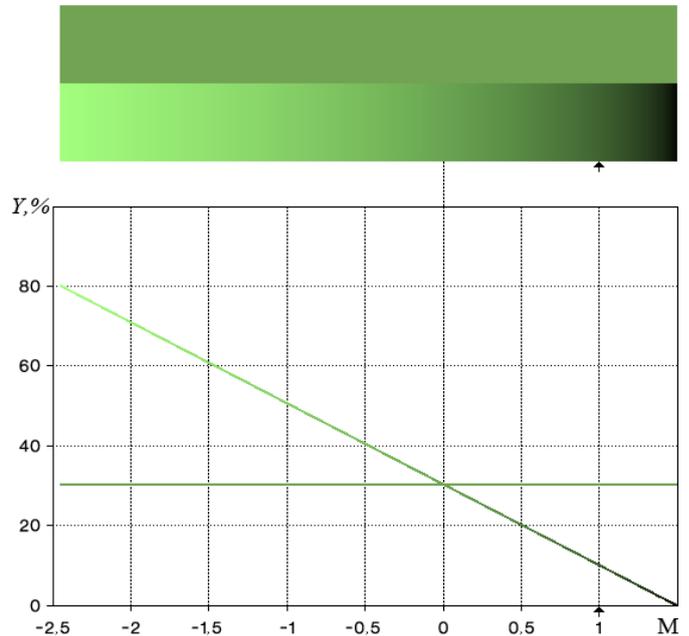


Рис. 6. Развёртка и график зависимости контраста яркостей от коэффициента контрастирования.

Справа развёртка кончается, как и запрограммировано, по достижении нижним полем нулевой яркости. Слева – крайним ограничением  $G=255$ . Стрелкой помечено начало развёртки, соответствующее исходному контрасту на рис. 5. Момент, когда контраст яркостей в развёртке обнуляется, совмещён с нулём абсциссы на графике.

На рис. 6 видно, что вдобавок к минимизации полного контраста в той точке, где  $M=0$ , происходит обращение изучаемого частного контраста яркостей. Стабильность прочих – контраста оттенков и контраста насыщенностей – глазом практически не ощущается из за ничтожности и самих контрастов, и их видностей. Как следствие, на развёртке зоны роста и падения полного контраста надо идентифицировать только по контрасту яркостей.

В завершение раздела проведём обзор использованных при тестировании режимов преобразования. Здесь мы рассматривали случай контрастирования насыщенностей, отражающий однозначность приращения насыщенностей и их контраста (Real Mode), и случай контрастирования яркостей, когда знаки приращения яркостей и яркостного контраста разные (Inverse Mode). А для оттенков – третий случай (Complex Mode = Referent Mode + Opposite Mode), поскольку первые два к оттенкам неприменимы: ни один оттенок не может быть больше другого.

В первом случае инструмент <Satcon> функционально замещает инструмент <Saturation> из распространённого программного пакета Adobe Photoshop, во втором случае инструмент <Bricon> – инструмент <Brightness>. Третий случай ранее в графическом ПО не встречался [5].

Возврат яркости инструментами <Huecon> и <Satcon>, как и контрастное преобразование яркости инструментом <Bricon> выполнялись при тестировании с высочайшей точностью (True Mode). Этому немало способствовала простота цветовой организации моделей на рис. 1, рис. 3, рис. 5 и, как следствие, высокая скорость счёта.

В представленном материале рис. 2, рис. 4, рис. 6 зоны роста контраста максимально протяжённые даже в ущерб зонам его падения. Это и понятно: приращение контраста увеличивает объём получаемой в результате наблюдения изобразительной информации, что является важнейшей задачей контрастирования. Но, подчеркнём, прикладной задачей. Реже, но контрастирование можно использовать и при решении фундаментальных задач. В следующем разделе будет освещен именно фундаментальный с точки зрения медицины [10] вопрос о трёх порогах контрастной чувствительности человеческого глаза. Там акцент будет стоять уже на зонах падения контраста.

## VI. АПРОБАЦИЯ

"Humans sense the intensity of light, but they are much more sensitive to contrast". Эту максиму энциклопедия [11] относит, правда только к яркостному контрасту, тогда как [3] требует учитывать ещё и хроматические – контраст оттенков и контраст насыщенностей. Как следствие, есть интерес поэкспериментировать с порогами зрительного восприятия этих контрастов, но теперь уже независимо от формных особенностей у исходного изображения, а не просто соотнести пороговые оценки, как в [3]. Тем более, что разработанный инструментарий позволяет выполнить этот эксперимент в рамках своей апробации (подчеркнём, пороги обнаружения имеют фундаментальный характер не только с точки зрения офтальмологии [10], но также и для колориметрии [12]).

Здесь под апробацией следует понимать испытание созданного нами программного продукта на натуральных изображениях при наличии значимого уровня формной изобразительной информации и фиксированного уровня цветовой. В отличие от тестирования, где его результат, уровень зрительного ощущения контраста, ожидаем (если в программе нет ошибок, то результат заранее известен), при апробации результат прогнозируется хуже (в силу стохастичности исходного изображения нет уверенности, в том как проявит себя видность контраста сравниваемых фрагментов). При апробации результат сильно зависит от формного наполнения картины, то есть в общем случае непредсказуем.

Затрудняясь в количественной оценке уровня формной информации (то есть искажений, которые надо внести в детерминированные модели, использованные в разделе тестирования), просто сделаем его равным вносимому традиционными для медицины (офтальмология) тестами Ишихары [13]. Глазу такая рандомизация сопоставляемых фрагментов изображения позволяет сосредоточиться на контрасте их цветовых характеристик. Иначе говоря, для апробации нужно использовать исходные изображения с

определяемым целями эксперимента уровнем цветового сигнала, но уже в присутствии существенной формной помехи.

Оригинальным цветовым наполнением как у Ишихары воспользоваться не удастся, поскольку цели у его тестов и у пороговых (назовём потребную модификацию оных так) разные. Тесты Ишихары преследуют цель выявления утраты визуальной чувствительности к *цветам* того или иного оттенка. Текущая цель другая – выявление порога чувствительности глаза к некоторому *контрасту*.

Прежде, чем проектировать своё цветовое наполнение для пороговых тестов, изложим принцип действия тестов Ишихары с цветоконтрастных позиций. Работа подобных визуальных тестов основывается либо на эффекте утраты, либо на эффекте искажения восприятия изобразительной информации наблюдателем, имеющим дефект цветового зрения. Формной изобразительной информации, которая переносится тем или иным перцепционным контрастом. В тестах Ишихары именно контрасты и задействованы.

Так в замещающем тесте №7 две части цифры четыре выполнены цветами с малым хроматическим контрастом и среднего уровня – яркостным. Светлые пятна ближе по ощущаемой яркости к фону. Точно так же заполняется и фоновый круг – пятна между собой имеют не сильный хроматический контраст при существенном яркостном. В том числе образующие штрих, отличающий семёрку от двойки.

Человек с нормальным цветовым зрением ощущает визуальное различие числа 74 (зелёный оттенок) с фоном (красный), обусловленное сильным контрастом оттенков. При этом контраст яркостей внутри цифр и на фоновом круге всё ещё далеко не столь велик, чтобы помешать правильному восприятию изобразительной информации наблюдателем. Хотя этот яркостный контраст и создаёт определённый шум, такой уровень шума не критичен для распознавания.

Человек с нарушением восприятия в красных оттенках (protanopia) и/или в зелёных (deutanopia) уже ощущает их контраст, формируемый оттенками цифр и фона, как слабейший. А поскольку яркостный контраст (в пределах каждой цифры и фонового круга), в ощущениях такого наблюдателя не меняется, он становится сильнейшим. И помимо относительного роста шумов дальтоник будет искаженно воспринимать ту же самую изобразительную информацию: вместо нарисованного – число 21.

Так из ответа пациента выявляются искомые сведения об утрате его визуальной чувствительности к некоторым (при использовании теста №7 – красным и/или зелёным) *цветам*. Нам предстоит определять пороги зрительного восприятия трёх перцепционных *контрастов*: оттенков, насыщенностей и яркостей. Для этого потребуется три модификации теста №7 (из 24 тестов Ишихары [13] лишь 5 – замещающего типа, а из последних тест №7 выбран безотносительно к контенту, id est с достаточной мерой произвола) – триада пороговых тестов.

Идентичность формного наполнения всех трёх тестов диктуется требованием единства фигур при проведении визуального опознания в условиях пробных испытаний. Именно поэтому во взятом за основу тесте Ишихары №7 подбирались исключительно

- цвет пятен, образующих фигуры;
- цвет пятен, образующих фон;
- цвет заливки,

но не менялись форма и размер ни одного из пятен. При этом новые цветовые характеристики формообразующих пятен сделаны одинаковыми в пределах:

- фигур, образующих число;
- фонового круга;
- заливки.

Принцип действия пороговых тестов рассмотрим с той же, цвето-контрастной, точки зрения. В отличие от тестов Ишихары, работа всех трёх пороговых тестов базируется на эффекте утраты изобразительной информации. Той же формной информации – числа 74 – прорисованного теми же пятнами на фоне того же пятнистого круга. Несмотря на формальную простоту этого эксперимента (здесь нет конкуренции яркостного и оттеночного контрастов), его подготовка потребует более глубокого вовлечения теории контраста [3], [6].

Цветовое наполнение каждого теста предусматривает единение каждого цветового контраста. Чтобы полный – ощущаемый глазом – контраст был всецело обусловлен одной из перцепционных составляющих, а не их смесью!

Так для исследования чувствительности к оттеночному контрасту цвета семёрки/четвёрки и фона выбраны чтобы обеспечить им заметный контраст оттенков и нулевой – насыщенностей и яркостей. Тогда их полный контраст:

$$\Delta C = \langle S \rangle \cdot \eta \cdot |H_{74} - H_{\text{фон}}|.$$

Здесь  $\langle S \rangle$  – средняя по полю насыщенность цвета;  $\eta$  – видность материального контраста оттенков. Исходные оттенки совпадают с тестом Ишихары №7.

Аналогично для исследования чувствительности глаза к контрастам насыщенностей и яркостей:

$$\Delta C = \sigma \cdot |S_{74} - S_{\text{фон}}|;$$

$$\Delta C = \nu \cdot |Y_{74} - Y_{\text{фон}}|,$$

где  $\nu$ ;  $\sigma$  – видности материальных контрастов яркостей и насыщенностей, соответственно.

В первую очередь испытаем титульные инструменты контрастирования. Потом продолжим сопутствующими.

Апробацию разработки начнём с контраста цветовых оттенков. На рис. 7 показано тестовое изображение для исследования восприятия этого контраста и оценки его порогового значения.

Здесь присутствуют только 3 цвета: число 74 выполнено пятнами с оттенком  $H=90^\circ$ , с насыщенностью  $S=50\%$  и с яркостью  $Y=0,5$ ; фоновый круг – пятнами с оттенком  $H=30^\circ$ , с насыщенностью  $S=50\%$  и с яркостью  $Y=0,5$ ; межэлементная заливка – цветом, который имеет оттенок  $H=60^\circ$ , насыщенность  $S=50\%$  и яркость  $Y=0,5$ . А полный

контраст исходно определён единственной составляющей  $\Delta H=60^\circ$  при  $\Delta S=0$  и  $\Delta Y=0$ .



Рис. 7. Тест на контраст оттенков.

На рис. 8 и далее (рис. 10 и рис. 12) слева – значения соответствующего коэффициента контрастирования  $M$ ; посередине – результирующие изображения (в порядке уменьшения соответствующего цветового контраста) и справа – гистограммы распределений соответствующей цветовой характеристики. На всех гистограммах короткая колонка относится к цветовой характеристике числа 74; длинная – к цветовой характеристике заливки. При  $M=0$  колонки суммируются. Расстояние между левой и правой колонками отражает соответствующий частный контраст.

Обработка тестового изображения велась относительно опорной точки  $H=60^\circ$ . Её оттенок совпадает с оттенком заливки и отображается средней колонкой гистограммы.

Рис. 8 демонстрирует деградацию контраста оттенков у теста, приведённого на рис. 7. Её процесс усиливается от верхнего опыта к нижнему.

Как видно из последовательности опытов на рис. 8, оттеночный контраст падает синхронно с уменьшением коэффициента контрастирования. Уже при  $M_H < 0,2$  глаз перестаёт различать цифры, id est перестаёт чувствовать контраст. Значит по критерию «just noticeable difference» при  $M_H=0,2$  достигается пороговое значение контрастной чувствительности оттенков. При меньших  $M_H$  различие в оттенках ещё может иметь место, но переносимая таким контрастом информация становится латентной. В долях от максимально возможного контраста оттенков – он в принципе равен  $180^\circ$  – обсуждаемый порог для рис. 7 лежит на уровне  $\approx 6...7\%$ .

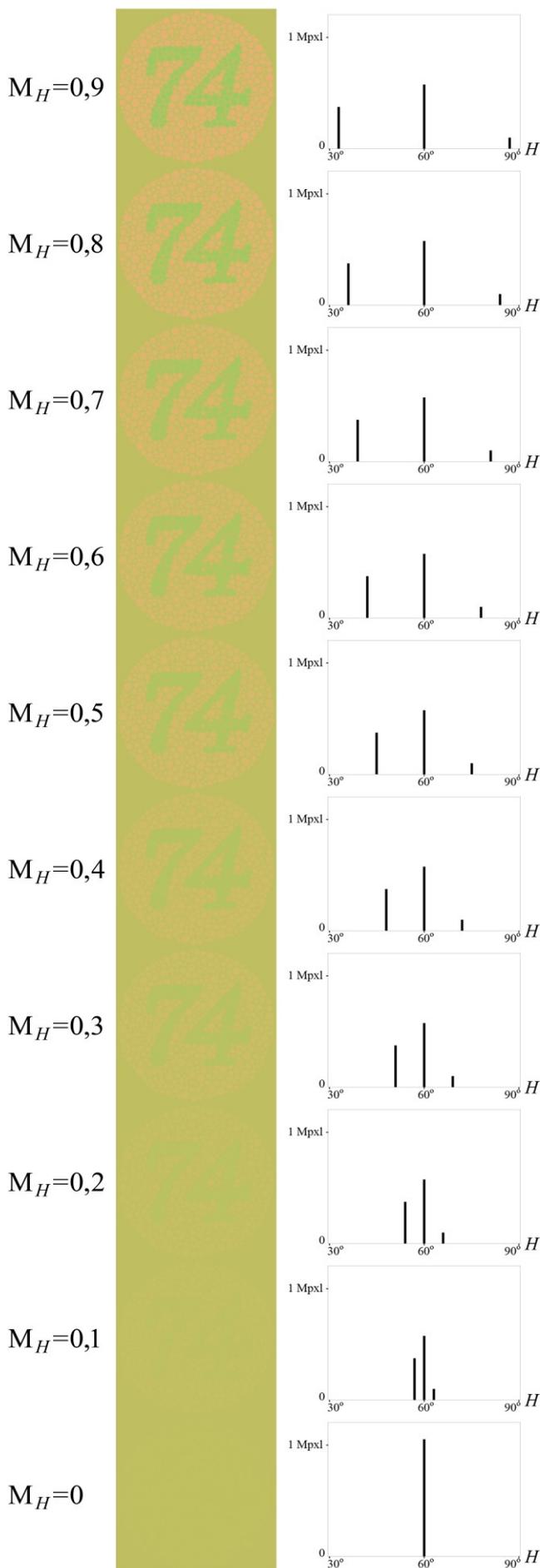


Рис. 8. Динамика деконтрастирования оттенков.

Перейдём к контрасту цветовых насыщенностей. Тест для отыскания порога его восприятия приведён на рис. 9.

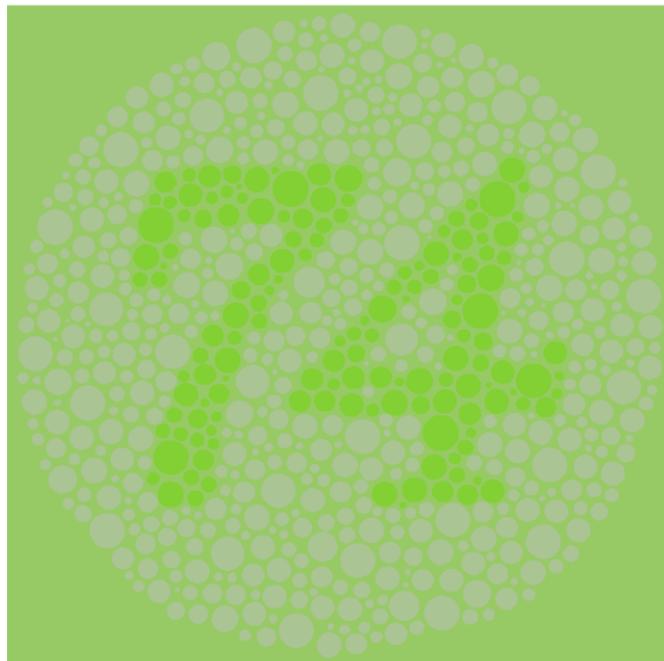


Рис. 9. Тест на контраст насыщенностей.

В наличии здесь также лишь 3 цвета: число 74 выполнено пятнами с оттенком  $H=90^\circ$ , с насыщенностью  $S=75\%$  и с яркостью  $Y=0,5$ ; фонный круг – пятнами с оттенком  $H=90^\circ$ , с насыщенностью  $S=25\%$  и с яркостью  $Y=0,5$ ; межэлементная заливка – цветом, который имеет оттенок  $H=90^\circ$ , насыщенность  $S=50\%$  и яркость  $Y=0,5$ . Исходное значение полного контраста всецело определяется одной компонентой  $\Delta S=50\%$ , поскольку все остальные частные контрасты  $\Delta H=0$  и  $\Delta Y=0$ .

Обработка тестового изображения велась относительно опорной точки  $S=50\%$ . Такая насыщенность совпадает с насыщенностью цвета заливки. На поле гистограммы она отражена абсциссой средней колонки.

Рис. 10 иллюстрирует тест, приведённый на рис. 9, при деградации контраста цветовых насыщенностей. Процесс усиливается от верхнего опыта к нижнему.

Как вытекает из эксперимента, результаты которого на рис. 10 расположены в порядке убывания коэффициента  $M_S$ , актуализированный контраст насыщенностей цвета равномерно падает с коэффициентом контрастирования. Будем считать глаз нечувствительным к контрасту, когда он перестаёт различать на тестируемом поле число 78, то есть при всех коэффициентах контрастирования  $M_S < 0,5$ . Различие в насыщенностях цвета при столь малых  $M_H$  всё ещё может отличаться от нуля, но переносимая такими контрастами изобразительная информация оказывается глазу уже недоступной. А информация эта может быть значима.

Таким образом, для глаза искомое пороговое значение контрастной чувствительности к насыщенностям цвета достигается при  $M_S=0,5$ . Пороговое значение измеряется в тех же единицах, что и сам контраст, но более наглядно будет нормировать его. Абстрагируясь от теста на рис. 9, максимальный контраст насыщенностей может составить

1(100%). Следовательно рассматриваемый порог лежит на уровне  $\approx 25\%$ .

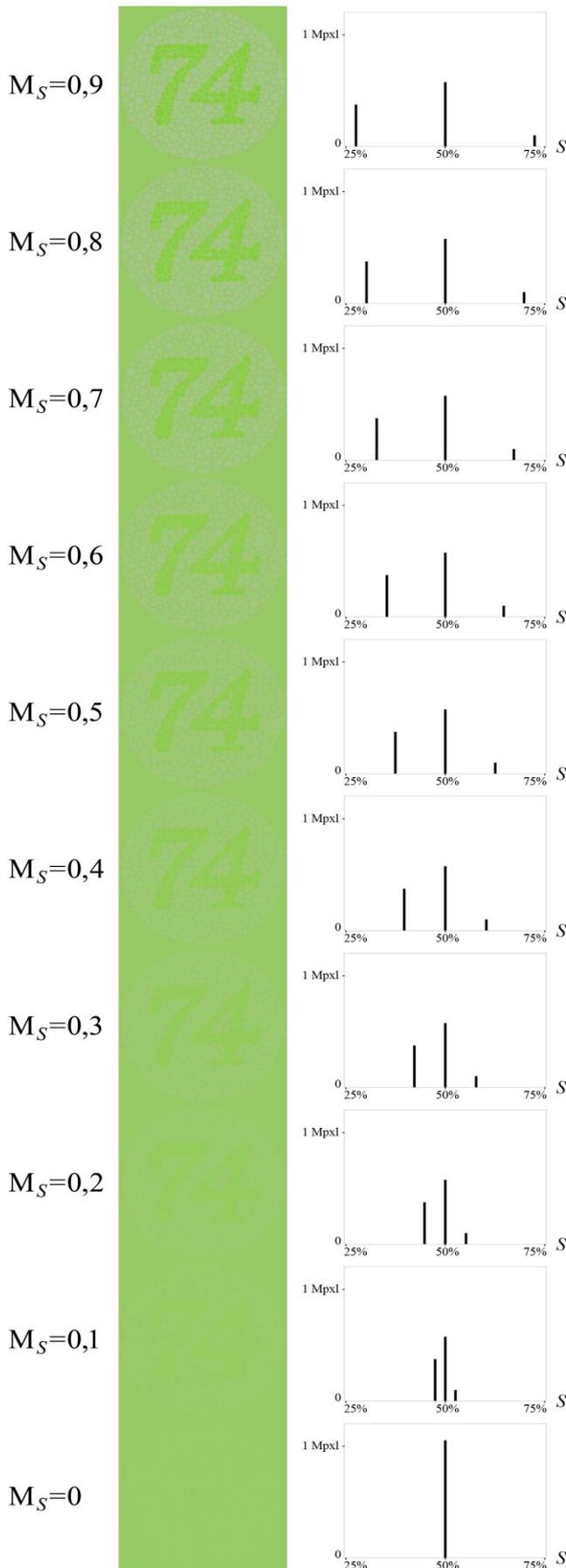


Рис. 10. Динамика деконтрастирования насыщенностей.

Остаётся изучить контраст цветовых яркостей. Рис. 11 изображает тест, с помощью которого определялся порог восприятия последнего из перцепционных контрастов.

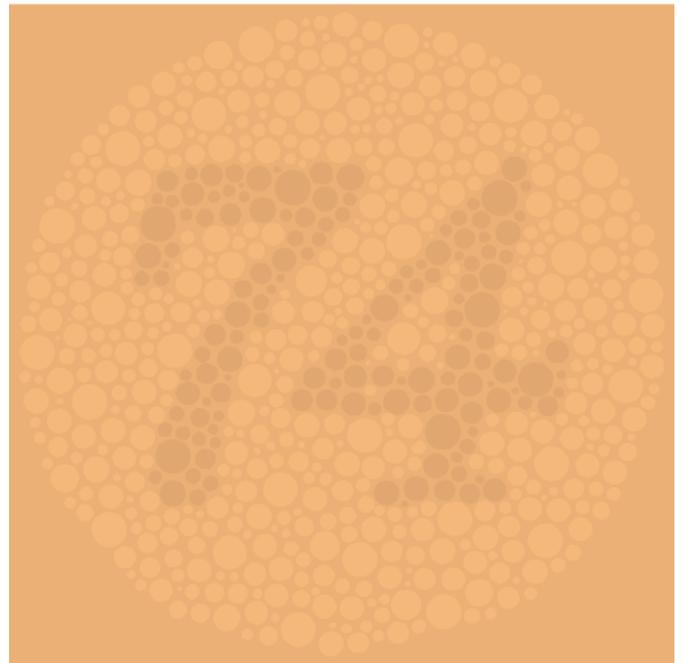


Рис. 11. Тест на контраст яркостей.

И здесь гамма приведена к 3 цветам: число 74 выполнено пятнами с оттенком  $H=30^\circ$ , с насыщенностью  $S=50\%$  и с яркостью  $Y=0,45$ ; фоновый круг – пятнами с оттенком  $H=30^\circ$ , с насыщенностью  $S=50\%$  и с яркостью  $Y=0,55$ ; межэлементная заливка – цветом, который имеет оттенок  $H=30^\circ$ , насыщенность  $S=50\%$  и яркость  $Y=0,5$ . Видимый глазом – полный – контраст с самого начала обусловлен исключительно слагаемым  $\Delta Y=10\%$ , тогда как два прочих  $\Delta H=0$  и  $\Delta S=0$ .

Обработка тестового изображения велась относительно опорной точки  $Y=0,5$ . Яркость эта совпадает с яркостью цвета заливки и соотносится с самой высокой колонкой на гистограмме.

Рис. 12 показывает как деградирует контраст яркостей теста, приведённого на рис. 11. Этот процесс усиливается от верхнего опыта к нижнему.

Как следует из опытов (их результаты на поле рис. 12 приводятся последовательно в порядке уменьшения  $M_Y$ ) яркостный контраст закономерно падает в соответствии с коэффициентом контрастирования. И нуль контрастной чувствительности глаз будет иметь, если для наблюдателя перестанут различаться цифры на фоновом круге.

Такая ситуация реализуется только когда  $M_Y < 0,1$ . Это приводит к оценке порога контрастной чувствительности по яркости значением коэффициента контрастирования  $M_Y=0,1$ . Объективно и много меньшие различия яркости  $M_Y$  на цифровых снимках (особенно с 48bit разрешением цвета) существуют, но переносимая ими изобразительная информация латентна.

Потенциально максимум яркостного контраста может достигать единицы (хотя для палитры рис. 11 его верхний предел на 80% ниже). Как результат нормировки

на этот максимум, искомый порог контрастной чувствительности глаза лежит на уровне  $\approx 5\%$ . Остановимся на этих цифрах.

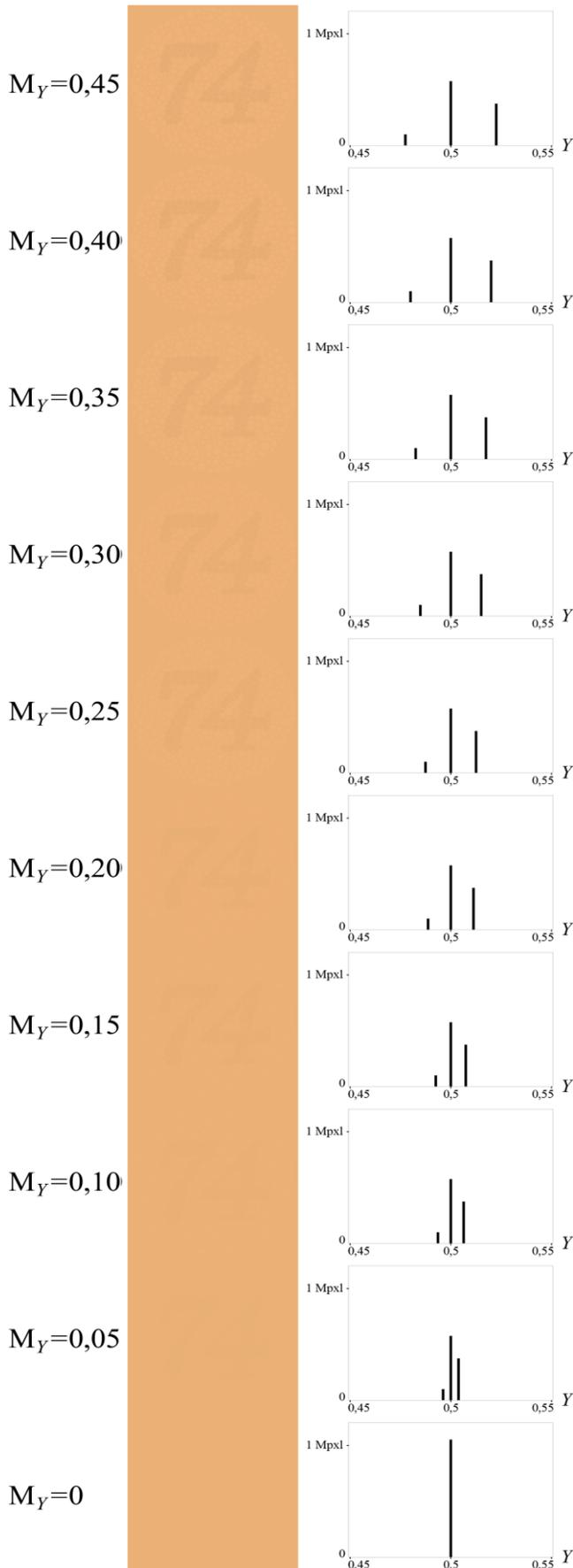


Рис. 12. Динамика деконтрастирования яркостей.

Фактически максимум может быть ниже потенциального, когда своего потолка достигает *одна* из RGB-координат. При этом яркость будет ещё далека от единицы – ни один хроматический цвет не бывает ярче белого. Возможность контрастирования яркостей также уменьшается.

Если нормировать пороги на фактические максимумы  $\Delta^{\max}H=84^\circ$  (для теста на рис. 7);  $\Delta^{\max}S=100\%$  (для теста на рис. 9);  $\Delta^{\max}Y=0,1973$  (для теста на рис. 11), то они будут соответственно  $\approx 14\%$ ;  $\approx 25\%$ ;  $\approx 25\%$ .

Эти результаты были получены с использованием ещё трёх – вспомогательных – программ. Они предназначены для расчёта пределов эволюции каждого перцепционного контраста (т.е. его изменения без искажения двух других) применительно к конкретному изображению.

Естественно, полученные пороговые значения частных контрастных чувствительностей – это единичные точки сложных зависимостей. По [3] каждое правомерно только при фиксированных оттенке, насыщенности и яркости цвета тестового изображения. В данном случае их можно вычислить как:

$$\Delta^{\text{ПОР}} H = M_H^{\text{ПОР}} \times \Delta H \text{ при } \langle H \rangle, \langle S \rangle, \langle Y \rangle \text{ для оттенков;}$$

$$\Delta^{\text{ПОР}} S = M_S^{\text{ПОР}} \times \Delta S \text{ при } \langle H \rangle, \langle S \rangle, \langle Y \rangle \text{ для насыщенностей;}$$

$$\Delta^{\text{ПОР}} Y = M_Y^{\text{ПОР}} \times \Delta Y \text{ при } \langle H \rangle, \langle S \rangle, \langle Y \rangle \text{ для яркостей.}$$

Поэтому, в соответствии со стандартом ISO 80000-2:2009 можно записать результаты апробации нового титульного контрастирующего инструментария (оценивания порогов визуальной чувствительности для трёх перцепционных контрастов) следующим образом:

$$\{\Delta^{\text{ПОР}} H \approx 12^\circ \mid \langle H \rangle = 60^\circ \langle S \rangle = 50\% \langle Y \rangle = 0,5\};$$

$$\{\Delta^{\text{ПОР}} S \approx 25\% \mid \langle H \rangle = 90^\circ \langle S \rangle = 50\% \langle Y \rangle = 0,5\};$$

$$\{\Delta^{\text{ПОР}} Y \approx 0,05 \mid \langle H \rangle = 30^\circ \langle S \rangle = 50\% \langle Y \rangle = 0,5\}.$$

Не стоит принимать эти числа за окончательные. Они получены на ограниченном материале, некалиброванной технике и лимитированным (авторским списком) числом наблюдателей. Они ещё будут уточняться – масштабное исследование для функций видности актуализированных здесь компонент изобразительного контраста потребует времени. Данная статья изначально сориентирована лишь на методические аспекты получения приведённых чисел.

И теперь, успешно завершив апробацию титульного инструментария, будет уместно опробовать инструменты сопутствующие. Здесь становимся только на эквализации цветовых характеристик, действие которой описывается следующими выражениями:

$$H'_{i=1\dots I} = H_0 \text{ для оттенков,}$$

$$S'_{i=1\dots I} = S_0 \text{ для насыщенностей,}$$

$$Y'_{i=1\dots I} = Y_0 \text{ для яркостей,}$$

где  $i$  – номер пикселя;  $I$  – число пикселей в изображении.

Эквализацию оттенков, известную в фототехнике, как вирирование, иллюстрирует рис. 13. Исходная картина –

цифровое изображение образца акварельной живописи\*, а обработка снимка – контрастное преобразование с  $M=0$ .



Рис. 13. Слева исходная картина, справа результирующая. Оттенки цвета приведены к зелени  $R_0=0, G_0=255, B_0=0$ .

Если подобрать оттенок, результирующая картина станет идентична получаемой от действия инструмента <Seria>.

В сравнении с оттенками эквализация насыщенностей и яркостей оригинальна. Первая проиллюстрирована на рис. 14, вторая на рис. 15. Так обнуление всех контрастов насыщенности проявляет оттенки, изначально латентные.



Рис. 14. Слева исходная картина, справа результирующая. Насыщенности цвета приведены к  $S_0=75\%$ .

Сопоставляя левое изображение на каждом из рисунков с правым, можно судить какие контрасты (какая формная информация) были утрачены в результате эквализации оттенков цвета, какие – в результате эквализации его насыщенностей, какие – в результате эквализации его яркостей. У наблюдателя возникает ясность, понимание

того, которым из контрастов выражен (преимущественно выражен) интересный фрагмент картины.

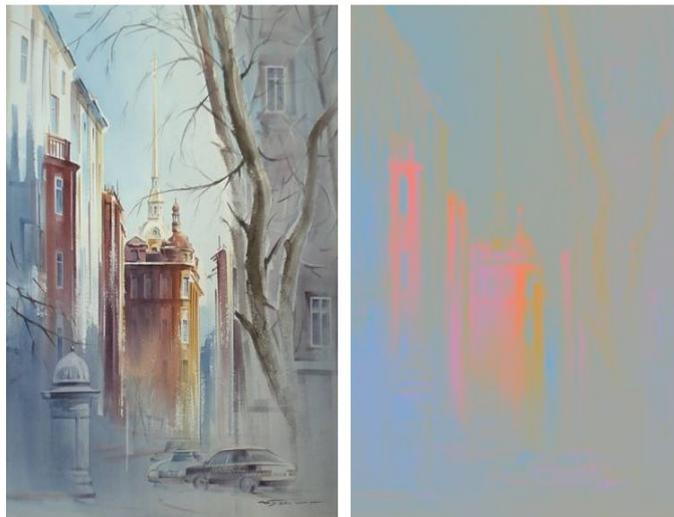


Рис. 15. Слева исходная картина, справа результирующая. Яркости цвета приведены к  $Y_0=0,36625$ .

В частности, эквализация яркостей, судя по рис. 15, может наглядно подчеркнуть сугубо хроматические различия фрагментов, подавляя светотени, возникшие, например, из за разной засветки.

Резюмируем опыт: апробация титульного функционала обосновывает, а сопутствующего – демонстрирует ответ на вопрос, которая информация обнуляется (переносимая оттенками цвета, переносимая его насыщенностями или переносимая его яркостями). Теоретически оптика может описать механизм цветообразования, что часто даёт ответ на вопрос о природе утрачиваемого контраста, поскольку случаи корреляции информации о происхождении цвета – окраска, засветка либо загрязнение – объекта съёмки с перцепционными характеристиками цвета изображения  $H, S, Y$  (и, как следствие, с их контрастами  $\Delta H, \Delta S, \Delta Y$ ) в практике экспертизы достаточно изучены.

## VII. ОБЗОР ПРИЛОЖЕНИЙ (В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ/ДИСКУССИИ)

Абстрагируясь от рекламы созданного программного продукта ("Наука не содержит внутри себя критериев социальной значимости своих результатов" [14]), имеет смысл очертить возможные сферы его применения. При этом правомерно будет учитывать не только приложение контрастирующего инструментария по своему прямому назначению (image conditioning), но также в составе более сложных процедур (pattern recognition).

Контрастирование актуально не только в медицинских приложениях [15] – это проиллюстрировано апробацией разработки; не только там, где применяется визуальный анализ изобразительной информации. В качестве основы для процедуры бинаризации контрастирование очевидно представляет интерес в computer-aided металлографии и

\*Кузема К.С. Улица Зверинская. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.liveinternet.ru/community/1726655/post176739833/> (дата обращения: 01.03.2023).

фрактографии [16]; в биологических исследованиях [17]; – там, где анализ производится средствами машинного зрения.

Обособленный пункт – это обработка аэрокосмических снимков [18], где скрывающую негативными факторами – например погодными условиями – долю изобразительной информации выявляют контрастированием, а её анализ может быть и визуальным (в исследовательских задачах), и компьютерным (в задачах навигации). Таким образом, в иерархии процессов цифровой обработки изображений [19] без контрастирования, как примитивной операции низшего уровня (на входе и на выходе – изображения), могут не обойтись ни средний (на входе – изображение, на выходе – распознанные признаки, или атрибуты, его элементов), ни высший (на входе – атрибуты, на выходе – их «осмысление»; анализ и, возможно, принятие тех или иных, к примеру, уже технологических решений) уровень обработки.

Но основное приложение – экспертиза во всех своих ипостасях, включая криминалистическую [20]. Так, одна только техническая экспертиза документов использует преобразование контраста для извлечения информации с носителей залитых, вытравленных, выцветших, смытых, обожженных, ветхих и т.д., и т.п., выполненной методами тайнописи. Кроме смысловой, криминалистика выделяет следовую информацию – это уже прерогатива судебной фотографии, в которой контрастирование сохраняет свою актуальность ещё с аналоговых времён.

Чуть в стороне – новейшие экспертные приложения, получившие развитие только в XXI веке: автотехническая экспертиза в части видеорегистрации [5]; исследование материалов видеонаблюдения; ... – область применения контрастирующих процедур можно было бы расширять и расширять. Мы ограничимся следующим методически ориентированным обобщением экспертных приложений: компьютерное исследование цифровых изображений.

Под цифровыми следует понимать ещё и категорию оцифрованных изображений. Это приводит к отдельной сфере приложений, массово применяющих контрастную обработку изображений на электронных носителях, как, например, историко-архивное дело [21] с его задачами восстановления информации; множительная техника с её задачами воспроизведения информации и проч., и проч. Завершая обзор аналитических приложений, сошлёмся опять же на мнение экспертов "... a digital image can be compared to an iceberg, with most of its data remaining unseen in the spatial display" [20].

Как правило, исследовательские, в т.ч. экспертные, – это задачи сугубо аналитические. Хотя с использованием контрастирования традиционно решаются и отдельные задачи синтеза изображений, например в компьютерной графике. Остаётся добавить, с новым контрастирующим инструментарием отнюдь не исключены новации также и в "синтетических" приложениях.

Итак, мы развернули качественную оценку – спектр возможных направлений использования разработанных средств управления контрастом цифровых изображений.

Количественная оценка (вне какой либо зависимости от сферы приложения разработки – интеграл по спектру) дана в преамбуле к статье.

## VIII. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главный вывод – констатация решения поставленной выше задачи: в результате систематической организации структуры оригинального программного продукта создан компактный набор контрастирующих инструментов. Его базовая номенклатура ограничена триадой автономных программ Huecon, Satcon и Bricon, объединяющих задачи управления цветом и управления контрастом цифрового изображения. При этом одновременно прирастает число выполняемых триадой функций. Такая функциональная гибкость разрешает существенным образом редуцировать объём инструментария вкупе с появлением возможности выбирать «точность vs скорость вычислений», используя Zero, Light и True Modes.

Степень оптимизации программных средств выявления латентной изобразительной информации удалось довести до уровня унификации систем управления, несмотря на принципиальное различие в шкалировании управляемых перцепционных цветовых характеристик. Оптимизация сопровождалась предельным расширением возможностей каждого из контрастирующих инструментов, используя Real, Complex и Inverse; Referent и Opposite Modes. Таким образом, итоги тестирования подтверждают, а апробации – демонстрируют кардинальное приближение разработки к цели, обозначенной во введении (поскольку выполнена оптимизация структуры средств контрастирования). Но для достижения этой цели, полагаем, потребуется решить ещё как минимум две задачи оптимизационного плана – попытаемся хотя бы и вскользь коснуться направлений будущих работ.

Разработка имеет перспективы дальнейшего развития. На сегодня элементарные сдвиги цветовых характеристик

$$H'_i S'_i Y'_i = H_i S_i Y_i \pm dH dS dY$$

так или иначе уже реализованы; более сложное линейное контрастирование

$$H'_i S'_i Y'_i = H_0 S_0 Y_0 - (H_0 S_0 Y_0 - H_i S_i Y_i) \times M$$

протестировано и прошло апробацию. Для нелинейного же контрастирования достаточно заменить в последней формуле умножение на коэффициент контрастирования  $M$  наиболее приемлемой к данному случаю функцией  $f$ :

$$H'_i S'_i Y'_i = H_0 S_0 Y_0 \pm f(|H_0 S_0 Y_0 - H_i S_i Y_i|).$$

Здесь  $H_i$ ,  $S_i$  или  $Y_i$  – исходные и  $H'_i$ ,  $S'_i$  или  $Y'_i$  – результирующие значения контрастируемого оттенка, насыщенности или яркости  $i$ -го пикселя;  $dH$ ,  $dS$  или  $dY$  и  $H_0$ ,  $S_0$  или  $Y_0$  – сдвиговые и опорные значения оттенка, насыщенности или яркости, одинаковые у всех пикселей изображения. Подобная процедура, реализуя нелинейное (I рода) контрастирование перцепционных характеристик цвета, способна заместить существующий программный инструмент <Curves>, выполнение требований леммы [6] обеспечивающий не всегда, то есть не гарантирующий

системности преобразования контрастов. Перспективная нелинейность будет вводиться как опция при сохранении базовой – пропорциональной – вариации контрастов и их сдвигов.

Сформированный набор программ – не самоцель. Его можно рассматривать как предтечу специализированного программного продукта. Поэтому в данной статье нигде и

не упоминается ни количество программ (в наборе), ни их конфигурации для реализации той или иной функции контрастирования. А вектор наших последующих усилий нацелен на задачу разработки графического интерфейса и оформление пакета программ для анализа изображений с созданием в перспективе некой открытой структуры под условным названием «Photo-Expert-Shop».

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Lindner A.J. Semantic Awareness for Automatic Image Interpretation. Thesis 5635. – Lausanne: EPFL, 2013. 137 p.
- [2] Антонов А.В. Системный анализ. – М.: Высшая школа, 2004. 454 с.
- [3] Chmutin A.M. Contrast and Contrast Enhancement (in Logic of Visual Perception of Graphic Information). // International Journal of Open Information Technologies. 2022. V. 10. № 5. P. 44-52. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.injoit.org/index.php/j1/article/view/1283/1225/1283-4156-1-PB.pdf> (дата обращения: 01.03.2023).
- [4] Романов В.Н. Системный анализ для инженеров. – СПб.: СЗТУ, 2006. 186 с.
- [5] Чмутин А.М. Экспертное исследование изображений на транспорте. // Технические экспертизы на транспорте. / Под общ. ред. Ю.Я. Комарова. – М.: Горячая линия - Телеком, 2020. С. 195.
- [6] Чмутин А.М. Контраст насыщенностей и яркостный сдвиг: парадоксы Photoshop. // International Journal of Open Information Technologies. 2019. V. 7. № 1. P. 12-24. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.injoit.org/index.php/j1/article/view/632/645/632-2038-1-PB.pdf> (дата обращения: 01.03.2023).
- [7] Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Получение и обработка изображений на ЭВМ. – Мн.: БНТУ, 2018. 204 с.
- [8] Безрядин С.Н., Буров П.А. Вирирование изображений в программном обеспечении. v. 1.0. – San Francisco: KWE Int. Inc., 2006. 6 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kweii.com/site/color\\_theory/color\\_theory\\_content\\_ru.html](http://www.kweii.com/site/color_theory/color_theory_content_ru.html) (дата обращения: 14.05.2010).
- [9] Distantе A., Distantе C. Handbook of Image Processing and Computer Vision. Vol. 2 – Cham: Springer Nature, 2020. 431 p.
- [10] Ophthalmology. / Ed. by M. Yanoff and J.S. Duker. – Edinburgh: Elsevier, 2019. 1371 p.
- [11] Encyclopedia of Perception. / Ed. E.B. Goldstein. – Los Angeles: SAGE Publ., 2010. 1180 p.
- [12] Hunt R.W.G., Pointer M.R. Measuring Colour. – Chichester: Wiley, 2011. 469 p.
- [13] Ishihara S. Tests for Colour-Blindness. – Tokyo: Kanehara, 1993. 6 p. 30 pl.
- [14] Парфёнов П.С. История и методология информатики и вычислительной техники. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 141 с.
- [15] Абрамэйко С.В., Недзьведзь А.М. Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине. – Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. 156 с.
- [16] Журавель І.М. Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень: Дис. ... докт. техн. наук. – Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2019. 321 с.
- [17] Наркевич А.Н. Автоматизированная бактериоскопическая диагностика туберкулёза: Автореф. дисс. ... докт. мед. наук. – Красноярск: КГМУ им. В.Ф. Войно-Ясенецкого, 2019. 47 с.
- [18] Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. – Burlington: Elsevier, 2007. 515 p.
- [19] Краснящих А.В. Обработка оптических изображений. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 129 с.
- [20] Dalrymple B., Smith J. Forensic digital image processing optimization of impression evidence. – Boca Raton: CRC Press, 2018. 227 p.
- [21] Pach J.L., Krupa A., Antoniuk I. Text Area Detection in Handwritten Documents Scanned for Further Processing. // Machine Graphics & Vision. 2020. V. 29. № 1/4. P. 21-31. DOI: 10.22630/MGV.2020.29.1.2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://mgv.sggw.edu.pl/article/view/17/MGV\\_2020\\_T29\\_n1\\_s21.pdf](http://mgv.sggw.edu.pl/article/view/17/MGV_2020_T29_n1_s21.pdf) (дата обращения: 01.03.2023).

# Applied program toolbox for contrasts' analysis of digital image

N.E. Andronova, O.V. Bondar', A.O. Borovkova, V.I. Borovkov, P.E. Grebenyuk, A.S. Gresserov, A.M. Chmutin, M.A. Chmutin

**Abstract** – Consideration is given to digital images carrying significant information, localized below the threshold of human eye contrast perception and not always amenable to processing by means of modern software. The reason for such failures lies in the fact that, with rare exceptions, contrast enhancement is performed by controlling directly RGB coordinates of pixels. An alternative is the authorized systemic software for transforming perceptual contrasts. In the present paper two concepts – systemic operation and systematic organization of contrast enhancement toolbox structure – are differentiated. From the standpoint of contrast effect, the appropriate regular software was analyzed on the sufficiency of its functional content and considerable gaps among the required nomenclature of contrast enhancing functions were revealed. The advanced software set, on the contrary, is organized systematically – the potential maximum of contrast enhancing modes being achieved. Besides, mechanisms for perceptual contrasts' control are unified and combined with mechanisms for same-name color characteristics' control. In addition to such optimization, the titular contrast enhancing procedures are integrated with the accompanying procedures, which are carried out by stand-alone tools in the existing today software. A number of new contrast enhancement functions have been implemented. A set of contrast (and color) transformation programs is provided with tools for originals' analysis and diagnostics, for processed results' visualization. The process of the created set testing is documented. The operation of Ishihara's tests is presented in terms and categories of contrast theory. The reformatting of one of them into a triad of threshold tests is detailed. The created toolbox passed probation, during which method was founded and preliminary estimates were given for the thresholds of eye sensitivity to hue-contrast, to saturation-contrast and to brightness-contrast. An overview of possible applications of program tools' set for graphic contrasts' analysis is presented. Priority is given to the field of expert activities. In view of expert considerations, the perspective for toolbox development is outlined. Within such a framework the informative anchors are affixed to indicate directions of further work.

**Keywords** – digital images, perceptual contrast enhancement, software toolbox systematic organization, instrumentation testing and approbation, contrast sensitivity threshold, expert applications.

## REFERENCES

- [1] Lindner A.J. Semantic Awareness for Automatic Image Interpretation. Thesis 5635. – Lausanne: ÉPFL, 2013. 137 p.
- [2] Antonov A.V. Sistemnyj analiz. – M.: Vysshaja shkola, 2004. 454 s.
- [3] Chmutin A.M. Contrast and Contrast Enhancement (in Logic of Visual Perception of Graphic Information). // International Journal of Open Information Technologies. 2022. V. 10. № 5. P. 44-52. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.injoit.org/index.php/j1/article/view/1283/1225/1283-4156-1-PB.pdf> (data obrashhenija: 01.03.2023).
- [4] Romanov V.N. Sistemnyj analiz dlja inzhenerov. – SPb.: SZTU, 2006. 186 s.
- [5] Chmutin A.M. Jekspertnoe issledovanie izobrazhenij na transporte. // Tehnicheskie jekspertizy na transporte. / Pod obshh. red. Ju.Ja. Komarova. – M.: Gorjachaja linija - Telekom, 2020. S. 195.
- [6] Chmutin A.M. Kontrast nasyshhennostej i jarkostnyj sdvig: paradoksy Photoshop. // International Journal of Open Information Technologies. 2019. V. 7. № 1. P. 12-24. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.injoit.org/index.php/j1/article/view/632/645/632-2038-1-RV.pdf> (data obrashhenija: 01.03.2023).
- [7] Starovoitov V.V., Golub Ju.I. Poluchenie i obrabotka izobrazhenij na JeVM. – Mn.: BNTU, 2018. 204 s.
- [8] Bezradin S.N., Burov P.A. Virirovanie izobrazhenij v programmnom obespechenii. v. 1.0. – San Francisco: KWE Int. Inc., 2006. 6 p. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http://www.kweii.com/site/color\\_theory/color\\_theory\\_content\\_ru.html](http://www.kweii.com/site/color_theory/color_theory_content_ru.html) (data obrashhenija: 14.05.2010).
- [9] Distant A., Distant C. Handbook of Image Processing and Computer Vision. Vol. 2 – Cham: Springer Nature, 2020. 431 p.
- [10] Ophthalmology. / Ed. by M. Yanoff and J.S. Duker. – Edinburgh: Elsevier, 2019. 1371 p.
- [11] Encyclopedia of Perception. / Ed. E.B. Goldstein. – Los Angeles: SAGE Publ., 2010. 1180 p.
- [12] Hunt R.W.G., Pointer M.R. Measuring Colour. – Chichester: Wiley, 2011. 469 p.
- [13] Ishihara S. Tests for Colour-Blindness. – Tokyo: Kanehara, 1993. 6 p. 30 pl.
- [14] Parfjonov P.S. Istorija i metodologija informatiki i vychislitel'noj tehniki – SPb.: SPbGU ITMO, 2010. 141 s.
- [15] Ablamejko S.V., Nedz'ved' A.M. Obrabotka opticheskikh izobrazhenij kletochnyh struktur v medicine. – Mn.: OIPI NAN Belarusi, 2005. 156 s.
- [16] Zhuravel' I.M. Informacijna tehnologija avtomatizovanogo analizu metalografichnih ta fraktografichnih zobrazhen': Dis. ... dokt. tehn. nauk. – L'viv, FMI im. G.V. Karpenka NAN Ukraïni, 2019. 321 s.
- [17] Narkevich A.N. Avtomatizirovannaja bakterioskopicheskaja diagnostika tuberkuljoza: Avtoref. diss. ... doct. med. nauk. – Krasnojarsk: KGMU im. Vojno-Yaseneckogo, 2019. 47 s.
- [18] Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. – Burlington: Elsevier, 2007. 515 p.
- [19] Krasnjashchih A.V. Obrabotka opticheskikh izobrazhenij. – SPb.: NIU ITMO, 2012. 129 s.
- [20] Dalrymple B., Smith J. Forensic digital image processing optimization of impression evidence. – Boca Raton: CRC Press, 2018. 227 p.
- [21] Pach J.L., Krupa A., Antoniuk I. Text Area Detection in Handwritten Documents Scanned for Further Processing. // Machine Graphics & Vision. 2020. V. 29. № 1/4. P. 21-31. DOI: 10.22630/MGV.2020.29.1.2. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http://mgv.sggw.edu.pl/article/view/17/MGV\\_2020\\_T29\\_n1\\_s21.pdf](http://mgv.sggw.edu.pl/article/view/17/MGV_2020_T29_n1_s21.pdf) (data obrashhenija: 01.03.2023).