

Вопросы применения цифровой колориметрии в современных научных исследованиях

В.Л. ЖБАНОВА

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена цифровой колориметрии, носит обзорный характер и касается основных вопросов проведения колориметрических расчётов и преобразований при цифровой регистрации цвета. Изложенные материалы призваны помочь исследователям уже на стадии регистрации исключать цветовые потери, а соответственно и погрешности измерений. При этом: 1) показана связь колориметрических измерений с цифровой схемотехникой, в результате чего и возникает цифровая колориметрия, как инструмент для получения и обработки точной цветовой информации об объекте исследования; 2) раскрыты такие важные вопросы, как критерии выбора параметров матричных фотоприёмников, систем цветоделения, рабочих цветовых пространств, форматов цветных снимков и методов постобработки цветовой информации изображений; 3) описаны системы цветоделения матричных фотоприёмников, их достоинства и недостатки, влияние на результат регистрации и перспективы внедрения новых разработок в этой области; 4) рассмотрены рабочие цветовые пространства регистрирующих цифровых систем, а также цветовые системы, позволяющие максимально сохранять цветовые параметры цифрового оттиска; 5) для понимания восприятия цвета человеком затронута проблема аппаратно-независимого воспроизведения цвета и изображений после регистрации снимка; 6) предложено при анализе цветовых параметров в научных исследованиях применять такие колориметрические системы, которые дают понимание восприятия человеком изображения при анализе качества снимков. Статья даёт широкий обзор основных аспектов цифровой колориметрии и исследований по ней для специалистов, применяющих цифровые регистраторы цвета как инструмент в своих экспериментальных исследованиях.

Приведённый материал может быть полезен и специалистам с глубокими знаниями в области колориметрии, применяющим цифровые регистраторы цвета в рамках выполнения основных задач своего направления науки и техники.

Ключевые слова: цифровое устройство, колориметрия, матричный фотоприёмник, система цветоделения, колориметрическая система, цветовое пространство, цветовая система, обработка изображений.

Введение

В настоящее время продолжается развитие методов измерений характеристик и параметров объектов исследования с применением цифровых фото- и видеокамер для обеспечения метрологической прослеживаемости и реализации принципа сравнения с эталонными значениями [1, 2]. Цифровые регистраторы в современной науке и технике применяются повсеместно [3–7]. Современные цифровые колориметры производят расчёт цвета и цветности в различных колориметрических системах. Сразу отметим, что, в принципе, любое устройство по определению цвета есть колориметр. Поэтому современные цифровые фото- и видеокамеры, сканеры, цифровые минилабы можно также отнести к приборам определения цвета. Чтобы разбираться во всех вопросах проведения колориметрических расчётов и преобразований при цифровой регистрации цвета и успешно вести научную работу, в статье приведены конкретные советы исследователям по подготовке и проведению экспериментов с использованием цифровых устройств.

Цифровая колориметрия, будучи частью компьютерной оптики, всё чаще применяется в таких сферах деятельности, как светотехника [3], медицина [4], химия [5], биология [6], сельскохозяйственное производство [7] и др. Последний пример особо пока-

зателен. Ведётся поиск подхода к обнаружению набора признаков и формированию модели классификатора для повышения способности различать классификацию различных семян по цвету [8]. В других исследованиях показано, что цветовой признак можно использовать в качестве эталона в программах селекции, чтобы в будущем стало возможным предотвращать падение зерна на полях [9]. Также показателен пример использования цифровой колориметрии для исследования сельскохозяйственных полей посредством цифровой фотокамеры (ЦФК) на беспилотном летательном аппарате [10]. (Основной задачей этого исследования была световая коррекция *RGB*-изображений разных участков поля для создания цельной картины местности сельхозугодий.) Указанные примеры показывают достоинства применения цифровой колориметрической диагностики в агропромышленном комплексе для повышения урожайности и выживаемости культур.

Специалисты, применяющие цифровые регистрирующие устройства как инструмент в своих исследованиях, сталкиваются с проблемами выбора цифрового устройства и получения качественного цветового оттиска, максимально приближённого к реальной сцене. Видна тенденция к анализу цифровых изображений получаемых через камеру смартфона [11, 12].

Точные цветовые расчёты необходимы в тех областях знаний, где цель – описание самого цвета: полиграфия, колориметрия, графика и т.д. В промышленности же главная задача применения колориметрических систем – контроль качества продукции. Определение цветового изменения – один из инструментов соблюдения требований ГОСТ и СанПиН.

Перед исследователями стоит задача применения цифровых регистрирующих устройств для успешной работы с минимальными потерями качества цвета. Пытаясь работать с уже готовым изображением, исследователи часто сталкиваются с проблемами ограниченности изображений, представленных в цифровом виде; в частности, ограниченности цветового охвата регистрирующей системы. Цветовая составляющая снимка претерпевает большие изменения на разных стадиях ввода информации: от регистрации до преобразова-

ния в цифровой вид [13]. В результате цветность оригинала уже не соответствует реальной сцене, что вносит погрешности в результаты исследования. Предлагаемые современные цифровые устройства регистрации в основном ориентированы на адекватную передачу яркостной информации, цветовая же составляющая снимка главным образом корректируется лишь специальными алгоритмами обработки. Для успешного научного исследования необходимо знать основы цифровой колориметрии.

Цель настоящей работы – раскрыть важные вопросы колориметрии при цифровой регистрации цвета, необходимые для проведения соответствующих экспериментальных исследований и работ. В соответствии с этим были поставлены следующие задачи: обозначить критерии выбора матричных фотоприёмников (МФП); описать системы цветоделения МФП; охарактеризовать рабочие цветовые пространства цифровых систем; провести анализ форматов цветных снимков; отметить основные методы обработки цветовой информации изображений.

Данная тематика относится к вопросам реализации систем и методов передачи информации, приёма и обработки сигналов, машинному зрению, а также к технологиям обработки, анализа и распознавания изображений и сигналов, – стратегическим направлениям развития науки и техники.

Цифровые матричные фотоприёмники

Цифровая колориметрия начинается с момента преобразования цветовых параметров в цифровой вид. Последнее происходит в МФП, состоящем из массива светочувствительных ячеек. Чёткость и цветопередача регистрируемого изображения зависят от параметров регистрирующих свет элементов матрицы, а потому при проведении научных исследований стоит уделять больше внимания выбору МФП.

Динамический диапазон прибора напрямую зависит от ёмкости светочувствительной ячейки [1, 13]. Чем больше её вместимость заряда, тем корректнее будет деление света на градации при дальнейшей обработке в АЦП. Уровень заряда в светочувствительной ячейке зависит не только от числа попадающих на неё фотонов,

но и от других факторов, прежде всего от изменений температуры матрицы [14]. Поэтому даже в полностью закрытом от света фотоприёмнике через некоторое время возникает некое паразитное «изображение». Принято считать, что темновой заряд удваивается при повышении температуры на каждые 6–8 °С. *При длительных экспозициях, применяемых для повышения чувствительности, фотоприёмник необходимо охлаждать.*

Известны разные виды МФП. В ЦФК в основном используются два из них: фоточувствительные сенсоры на основе КМОП-структур и приборы с зарядовой связью (ПЗС) [13–16]. Принципиальное различие КМОП- и ПЗС-матриц состоит в методе реализации считывания и устройстве сенсора. Вид самой матрицы, КМОП- или ПЗС-, при проведении исследований сегодня не так критичен. Если ранее считалось, что ПЗС-матрицы имеют больший динамический диапазон и, соответственно, лучшую цветопередачу, то современные КМОП-матрицы в этом направлении заметно ушли вперёд. На данный момент производители КМОП-сенсоров позволяют создавать камеры с широким динамическим диапазоном, способные формировать качественное изображение в условиях высококонтрастного освещения. Прежде всего этому послужило малое энергопотребление подобных систем и их востребованность в смартфонах и других системах аккумуляторного типа. *Однако при использовании старых моделей ЦФК рекомендуется всё же выбирать ПЗС-матрицы.*

Из-за частичного рассеивания света поверхностью электрода в схеме ПЗС-элемента, где используются электроды из поликристаллического кремния, светочувствительность ограничена, поэтому стали применять матрицу с обратной засветкой. Такой вид матрицы высокочувствителен в синей и УФ областях спектра, что позволяет применять его в астрономической фотографии [17].

В научных исследованиях следует определяться с типом съёмки. Если необходимо запечатлеть быстротекущие процессы, такие как физические или химические реакции, с последующей покадровой обработкой, то стоит использовать видеокамеру с электронным затвором и получать сверхкороткие (до 1/10000 с) выдер-

жки [10, 18, 19]. Если же при проведении эксперимента нет временных ограничений, то лучше выбрать *фотокамеру без функций видеозаписи*, что позволит получать кадры с максимально возможными динамическим диапазоном и цветопередачей, за счёт меньшей обвязки сенсора. Так как значительную часть площади матрицы с функцией видеозаписи занимают буферные регистры сдвига – до 2/3 светочувствительной области, у полнокадровой матрицы может задействоваться около 1/3 последней [13]. Кроме того, следует обратить внимание на наличие микролинз. Это до сих пор ещё спорный показатель, так как подобные системы не только направляют лучи в центр сенсора, но и поглощают часть света.

Следующий важный параметр ЦФК – *светочувствительность* матрицы, обозначаемый так же, как и светочувствительность фотоплёнки *ISO*. Наиболее точно характеризует истинную чувствительность матрицы минимальное из *ISO*-чисел, так как других значений можно добиться обычным усилением сигнала на выходе матрицы. Способ повышения светочувствительности за счёт изменения алгоритма обработки сигнала с матрицы приводит к появлению *шума*. При съёмке объекта, имеющего одинаковые по всей поверхности яркость и цветность, на его изображении будут наблюдаться пиксели других цветов и яркостей [20, 21]. *Последнее критично при проведении научных исследований с анализом групп пикселей изображения.*

В МФП достаточно много шумов, влияющих на цвет цифрового снимка: темновой ток и шумы тепловой, фиксированного распределения, цветовой, яркостной и жёлтый. В современных матрицах системы шумоподавления работают достаточно слаженно [22, 23]. На сегодня итерационные (многoproходные) алгоритмы и алгоритмы на основе нейронных сетей – лучшие, но требуют большой вычислительной мощности. Кроме того, они реализованы только в программных RAW-конверторах. Недостатки этих систем обработки – программное обеспечение ЦФК производит цифровую яркостную фильтрацию пикселей, значительно отличающихся от соседних, что может приводить к потере мелких контрастных деталей изображения, от которых прежде всего зависит чёт-

кость снимка. *Исследователю следует сделать несколько снимков с разными режимами шумоподавления, чтобы решить: необходим ли этот алгоритм в проведении данного исследования или же лучше отказаться от цифровых настроек.*

Системы цветоделения

Система цветоделения ЦФК непосредственно влияет на цветопередачу, и её необходимо знать при выборе ЦФК. Это принципиальный момент, так как при работе с цифровым устройством исследователь может даже не догадываться о наличии, кроме основных цветов (красного, зелёного и синего), ещё и вспомогательных в таких системах, как *RGBT*, *RGBE*, *СМУК* либо *СМУГ*.

Наиболее интересны, с точки зрения цветоделения, ЦФК – *однокладровые с одной или тремя матрицами и трёхккладровые* [13, 18]. В однокладровых ЦФК с тремя матрицами применяются диспергирующие элементы, которые расщепляют проходящий свет на основные цвета, регистрируемые каждой матрицей отдельно. Использовать все три ПЗС-матрицы с высоким разрешением дорого, но эффективно. *Такого рода ЦФК подойдут при колориметрических исследованиях, но стоит учитывать, что диспергирующие элементы могут поглощать до 1/3 светового потока.*

В трёхккладровых ЦФК применяют одну двумерную матрицу. Необходимо сделать три отдельных снимка через три светофильтра основных цветов для получения цветного изображения [24]. Такая технология позволяет отказаться от интерполяции цвета, используемой в однокладровых ЦФК с одной матрицей, но в основном предназначена для регистрации неподвижных объектов.

Однокладровые ЦФК с одной матрицей сегодня самые распространённые. Они обеспечивают высокую скорость оцифровки изображения, что востребовано в смартфонах [5, 11], но имеют более слабые разрешение и цветопередачу, чем у отмеченных выше ЦФК. Данные ЦФК называют *камерами с вычислением цветов*. Именно камеры такого типа применяют в смартфонах и полупрофессиональных ЦФК. Несмотря на принципиальные недостатки по цветопередаче, эти камеры повсеместно применяются в научных

исследованиях за счёт быстродействия [25, 26].

Как и в трёхккладровой, в однокладровой ЦФК с одной матрицей используется плоская матрица, но регистрация данных о цвете производится через нанесённый на поверхность ПЗС-матрицы шаблон плёночных светофильтров, состоящий из основных и, иногда, добавочных цветов. В каждом пикселе изображения сохраняются данные только об одном из основных цветов. Для определения многоцветного изображения программа обработки *интерполирует* данные о цветах соседних пикселей. Ошибки реконструкции на этапах шумоподавления и интерполирования критичны для результата снимка [27, 28], зато за одну экспозицию однокладровые ЦФК обеспечивают качественную съёмку движущихся объектов.

Одноматричные ЦФК с пространственным цветоделением имеют определённый цветовой шаблон, покрывающий всю матрицу [13]. Наиболее распространённый тип – шаблон Байера. Каждая ячейка «покрыта» красным, синим или зелёным светофильтрами, собранными в группы по четыре ячейки, причём на две зелёных приходится по одной красной и одной синей (рис. 1). Данная схема мозаичного светофильтра, имеет обозначение *RGBG (Red–Green–Blue–Green)*. *Аддитивные светофильтры – двуслойные, что понижает коэффициент пропускания.* Человеческое зрение наиболее чувствительно к зелёным оттенкам, поэтому 1/2 исходного кадра – это зелёная составляющая и только по 1/4 приходится на синюю и красную. Для борьбы с регулярной структурой были предложены модифицированные схемы размещения светофильтров: с часто расположенными вертикальными или горизонтальными линиями. В этих модификациях регулярно повторяется узор из 12 или 24 элементов.

В схемах Байера встречаются «посторонние» цвета, что приводит к существенным цветовым искажениям из-за низкой спектральной чувствительности в коротковолновой части спектра. Это также влечёт необходимость тщательной настройки баланса белого и осветления изображений [29].

Для цветокоррекции в сине-зелёной части спектра были предложены дополнительные светофильтры *E* (сине-зелёный) и *T* (изумрудный), отлича-

ющиеся более тёмным оттенком. Матрицы *RGBT* и *RGBE* (рис. 1) устраняют искажения в сине-зелёной области лишь частично [13].

Разработан набор светофильтров *RGBP* с «панхроматическим» пикселем (без светофильтров). Производители предположили, что если плёночные светофильтры поглощают 2/3 светового потока, падающего на ПЗС-матрицу, то отказ от них улучшит динамический диапазон снимка в яркостной составляющей изображения.

Разработаны системы цветоделения, базирующиеся на субтрактивной схеме, *СМУ*-синтезе изображения. В ряде моделей ЦФК применяются схемы *СМУГ* либо *СМУВ* с дополнительным, зелёным или синим светофильтрами соответственно (рис. 1). Применение *СМУ* позволяет использовать однослойные светофильтры, что приводит к увеличению коэффициента пропускания и чувствительности всей матрицы. Дополнительное достоинство таких шаблонов – возможность прямой печати. Применение схем *СМУГ* или *СМУВ* задумывалось для согласования регистрирующего устройства с устройством печати без потери качества изображения, но при переходе от системы *СМУ* к системе *RGB* (для визуализации полученного изображения с помощью мониторов и видеопрокторов) происходит сужение тела цветового охвата и потеря качества цветного изображения.

Относительно новая и многообещающая разработка – *матрицы многослойного типа* [30–32]. Суть этой технологии – в применении физического явления в самом полупроводнике: с увеличением длины волны глубина проникновения фотонов в полупроводник растёт. Таким образом, появилась возможность регистрировать информацию всех трёх основных цветов в одном пикселе. Технология включает возможность изменения размера пикселя. Подобное объединение в «суперпиксель» сокращает время получения кадра, может повышать отношение сигнал/шум, обеспечивая качественную съёмку в условиях плохого освещения, и ускоряет процесс автофокусировки [13, 30].

Предложена технология *Thin Film on ASIC (TFA)*, в которой вся приёмная поверхность светочувствительная. Технология *TFA* работает по принципу мультиспектрального фотодиода, с быстрой сменой напряжения, что

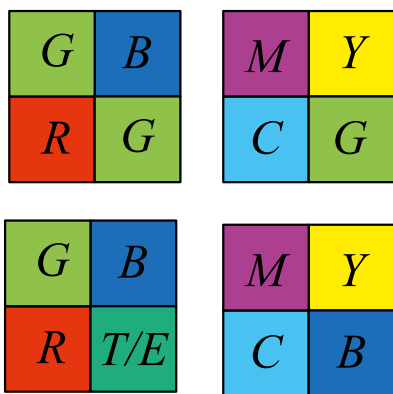


Рис. 1. Шаблоны светофильтров матричных фотоприёмников

позволяет последовательно считывать три цветовые составляющие [13, 32]. Таким образом, TFA-сенсоры должны увеличивать динамический диапазон и цветовое разрешение, но из-за дороговизны производства эта разработка не получила широкого распространения.

При выборе цифрового регистратора для эксперимента следует обращать внимание на МФП и его спектральные характеристики, по которым становятся сразу понятны цветовая модель системы и возможная «чистота» основных цветов. Практически в инструкции к каждой ЦФК указана модель МФП, по которой можно найти спектральные характеристики основных каналов. Современные производители стараются подбирать новые материалы и новые способы создания плёночных светофильтров. Чтобы не усложнять производство МФП, большинство производителей создаёт разные алгоритмы по обработке цветовой информации в спектральной и поляризационной областях [33]. В результате получаются яркие, насыщенные цвета, которые к действительной информации о цвете имеют посредственное отношение. При научных исследованиях с использованием матриц на основе пространственной системы цветопередачи рекомендуется работать в формате RAW [3, 24]. Последний позволяет сохранять первичную информацию о цвете в каждом пикселе без обработки, что позволит в дальнейшем переводить цвета в разные колориметрические системы без потерь информации. А чтобы информация была максимально «чистой», необходимо выбирать МФП с наиболее гладкими, симметричными, куполообразными спектральными кривыми,

работающими в определённой области, без включения в другие.

Автором проведены исследования спектральных характеристик (кривых) МФП разных производителей [34]. МФП-1 имела достаточно ровные кривые без второстепенных пиков, хотя кривые по зелёному и синему каналам немного перекрывали друг друга. При рассмотрении спектральных характеристик МФП-2 были заметны второстепенные равновеликие максимумы кривых по красному и синему каналам, перекрывающие области друг друга, причём меньший коэффициент пропускания был у кривой по синему каналу, самой широкой. По спектральным характеристикам МФП-3 была схожа с МФП-2: максимумы кривых, широкие и неровные, имели «хвосты» в нерабочих областях, что ухудшало рабочие свойства матрицы и передачу «чистых» цветов.

В исследовании [34] были рассчитаны также 14 контрольных цветов из атласа Манселла для каждого МФП. В результате наилучшим оказался МФП-1. Исследование показало: чем ровнее и острее максимумы характеристик, тем «чище» будут цвета.

Рабочие цветовые пространства цифровых систем

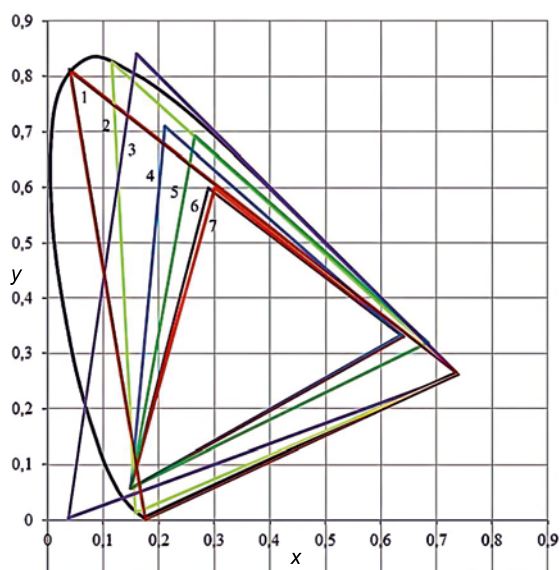
Для стандартного колориметрического наблюдателя разработана цветовая модель CIERGB, с широким телом цветового охвата, что не укладывалось в описание цвета на мониторе. Поэтому были предложены несколь-

ко цветовых пространств для работы с цифровыми снимками на разных мониторах. К ним относятся распространённые рабочие цветовые пространства цифровых систем *standardRGB* и *AdobeRGB* [34, 35]. Система *sRGB* разработана в качестве стандартной для веб- и мультимедиа-приложений. Фактически это цветовое пространство и следующее – основные для всех цифровых устройств регистрации изображений. Пространство *AdobeRGB* имеет увеличенный цветовой охват по сравнению с первой системой и применяется в типографской и цифровой печати.

Современные варианты цветового пространства RGB – *Apple RGB*, *ProPhoto RGB (ROMM RGB)*, *Ekta RGB*, *PAL/SECAM*, *Wide Gamut RGB*, *DCI-P3* (рис. 2) – отличаются разными координатами основных цветов, разным опорным белым светом и разным показателем гамма-коррекции [36]. Последний вариант – относительно новое цветовое пространство, имитирующее цветовую палитру киноплёнки. Пространство *DCI-P3* разработано в качестве стандарта для цифровых кинотеатров Сообществом инженеров кино и телевидения и превосходит *sRGB* по цветовому охвату, относительно же *AdobeRGB* в зелёно-жёлтой области оно меньше, а в жёлто-красной больше. Сейчас *DCI-P3* внедряется в смартфоны и планшеты. *PAL/SECAM* основано на цветностях цветообразующих стимулов, рекомендованных европейским радиовещательным видеостандартом, и служит

Рис. 2. Цветовые системы на графике x, y :

- 1 – $M_1N_1P_1$;
- 2 – *Wide Gamut RGB*;
- 3 – *ProPhotoRGB*;
- 4 – *AdobeRGB*;
- 5 – *DCI-P3 RGB*;
- 6 – *PAL/SECAM*;
- 7 – *sRGB*



стандартом для телевизионных и видео-передающих систем. Пространство *Wide Gamut RGB* образовано чистыми спектральными излучателями с максимально возможным цветовым охватом, а *ProPhoto RGB* практически покрывает диапазон цветов, воспринимаемый человеком, и разработано для возможности хранения фотографических снимков и изображений без потери информации при недостаточности цветового охвата рабочего цветового пространства ЦФК.

Цветовые пространства вроде *EktarGB*, *ProPhotoRGB (ROMM RGB)* и *Wide Gamut RGB* применяют на стадии постобработки снимка при регистрации в формате *RAW*, что для пользователей может быть весьма затруднительно, а для исследователей просто необходимо для максимального сохранения первичной информации снимка. При этом, как уже говорилось, следует уделять внимание спектральным характеристикам МФП.

Основное различие пространств – в теле цветового охвата. И чем оно больше, тем лучше, но не всегда. При исследовании 7 цветовых пространств для трёх разных МФП известных фирм, была отмечена зависимость между спектральными характеристиками МФП и цветовым охватом выбранного пространства [34]. Так, для МФП с гладкими спектральными характеристиками наилучшими цветовыми пространствами в этом исследовании стали *Wide Gamut RGB* и *ProPhoto RGB*, обладающие самым большим телом цветового охвата. Для МФП с неровными спектральными характеристиками и второстепенными пиками пространство *ProPhoto RGB* стало худшим, а лучшие результаты были получены при пространствах *sRGB* и *PAL/SECAM*, обладающие небольшим телом цветового охвата. Таким образом, было выявлено: *чем более неровны спектральные характеристики у МФП, тем меньше должно быть тело цветового охвата рабочего цветового пространства*. Возможно, наличие отрицательных ветвей этих характеристик у небольших цветовых пространств компенсирует второстепенные максимумы спектральных характеристик МФП.

Форматы цветных снимков

Существует множество графических форматов, используемых при

хранении и редактировании изображений в цифровом виде. Однако в ЦФК наибольшее распространение получили только некоторые из них: *JPEG*, *TIFF* и *RAW*, а, например, формат *GIF* используется крайне редко. Также для хранения изображений широко используют формат графического файла *BMP* [5, 35].

Файлы, сохраняемые в формате *JPEG*, имеют расширение *.jpg*. Разработчики заложили в стандарт несколько особенностей. Алгоритм сжатия позволяет регулировать степень сжатия, чем выше используемая степень, тем меньший объём будет иметь файл, но тем более низкое качество будет у снимка. Полноцветное изображение в файле получается при *интерполяции* основных цветов, после считывания фототоков на каждый пиксель. Методы интерполяции разнообразны: линейная, кубическая, бикубическая, различные авторские методики [28, 37, 38]. Какая из методик выбрана в конкретном цифровом устройстве, понять достаточно сложно: производители не приводят подобной информации, хотя влияние способа интерполяции на цветной снимок колоссально. При интерполяции цвета усредняются значения всех основных цветов в области определённых пикселей, что приводит к размытию тонких деталей и цветовых значений реальной сцены.

При тех научных исследованиях, которые требуют учитывать информацию попиксельно, рекомендуется выбирать формат изображений RAW [35, 39]. Разработкой этого формата все производители ЦФК занимаются самостоятельно. Как правило, цифровые файлы изображения проходят минимальную обработку в ЦФК и представляют последовательность битов данных, получаемых с АЦП фотоматрицы. Формат *RAW* обладает множеством достоинств: минимальная обработка при регистрации снимка и большие возможности по обработке изображения: установка баланса белого после фотосъёмки и обеспечиваемое высокой разрядностью повышенное качество снимка при изменениях яркости, контраста и насыщенности изображения.

Снимки, сохраняемые в формате *TIFF*, имеют высокое качество изображения, но чрезмерный объём – время записи изображения повышенное. Этот формат существует в разных модификациях, последняя из кото-

рых поддерживает разные алгоритмы компрессии и разные цветовые пространства. Формат *TIFF*, используемый в ЦФК, не поддерживает этих возможностей. Файлы сохраняются с расширением *.tif*, имеют цветовое пространство *RGB* и не подвергаются компрессии. Это означает, что снимок, сохраняемый в этом формате, будет иметь высокое качество изображения и достаточно большой размер файла.

Большой объём информации с максимальным качеством позволяют хранить форматы *EPS* и *PSD* [40]. В формате *EPS* сохраняют изображения, предназначенные для печати. Он позволяет хранить дополнительную информацию (калибровочные кривые, обтравочные контуры и т.п.). Формат *PSD* – внутренний формат программы *Adobe Photoshop* – поддерживает все типы изображений – от двугранных до полноцветных *СМУК*, сохраняя всю нужную информацию, включая слои, обтравочные контуры и прочее.

Основы методов обработки цветовой информации

Программное обеспечение. Как отмечено выше, у каждого производителя ЦФП разработан свой формат *RAW* и, соответственно, программа обработки *RAW*-снимка. При выборе формата следует подстраиваться под требования программного обеспечения, в котором будет проводиться анализ снимка. Современные востребованные программы вроде *Adobe Photoshop* и *MathCAD* не поддерживают 16-битные изображения (*TIFF*, *RAW*) [35, 41]. Если даже загрузить такое изображение в подобные программы, оно преобразуется в 8-битное. Тогда нет смысла работать с форматами *RAW* и *TIFF*, способными увеличивать файл изображения и время обработки. Работать над 16-битными изображениями можно в программах *ImageJ* и *MATLAB* [24, 25, 42]. (Последняя позволяет производить и нужные вычисления, при соответствующем программировании.) Также для этих целей могут быть полезны программы *C++* и *Python*. На общем фоне выделяется программа *ImageJ*, широко применяемая в научных исследованиях за счёт своей доступности и дружелюбного интерфейса в плане возможностей при обработке цветных цифровых изображений.

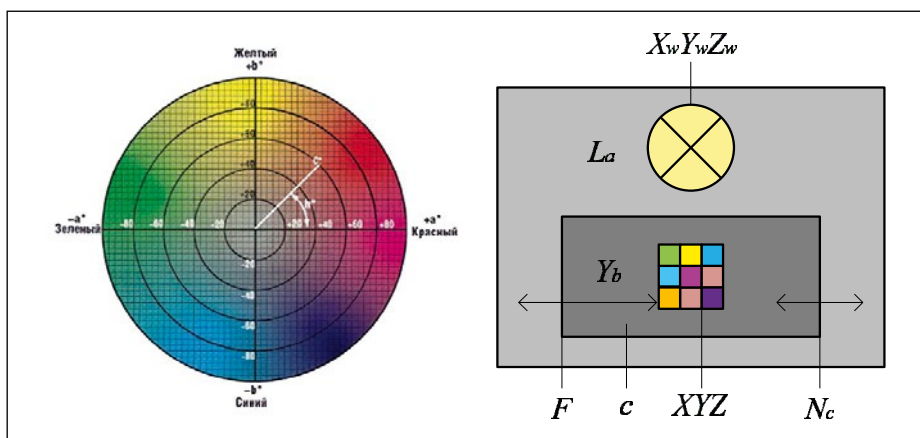


Рис. 3. Необходимые параметры в равноконтрастных системах CIELAB (а) и CIECAM (б)

Опорный белый цвет. Влияние опорного белого цвета исследователями часто недооценивается и цифровые снимки, сделанные при цветовой температуре источника типа А, переводятся в пространства с опорными белыми цветами D65 или D50, что приводит к искажению первичной информации. В основном опорным белым цветом для цветовых пространств служит D65. Исключения – Wide Gamut RGB и ProPhoto RGB с цветом D50, аналогов которым по широкому телу цветового охвата нет [36]. Стоит знать о таких различных методах хроматической адаптации, как CAT02, CMCCAT2000, по фон Крису, по Бредфорду и других, являющихся матричными преобразованиями и способных преобразовывать координаты цвета для разных источников излучения. Но какими бы точными не были преобразования, потери в координатах цвета будут [43]. И если для любителей эти потери могут быть незаметны, то при научном исследовании подобные манипуляции приводят к искажению колориметрического эксперимента. *Рекомендуется проводить исследования с тем источником излучения, который является опорным для цветового пространства, выбранного рабочим в цифровой системе.*

Цветовое различие. К методам оценки цветовой информации можно отнести нахождение цветового различия между экспериментальными и эталонными значениями цвета. Несмотря на многообразие цветовых пространств, все цветовые параметры принято представлять в международной колориметрической системе МКО XYZ 1931 [44, 45]. Система XYZ общепризнана, но не равноконтрастна, поэтому для адекватного сравнения по-

лучаемых значений с теоретическими (эталонными) необходимо координаты переводить в равноконтрастную колориметрическую систему, где цветовой порог различия двух цветов должен быть одинаков по всему цветовому пространству.

По рекомендации МКО для нахождения цветового различия подходят системы CIEUW, CIELUV, CIELAB и CIECAM [46–48]. Все они ориентированы на определение изменения «цвета». В случае подбора цветового пространства под спектральные характеристики МФП нужно больше акцентироваться на адекватности передачи «цветности». На значения цвета в реальной цифровой системе влияет много факторов: динамический диапазон, размер чувствительной поверхности, шумы и др. *Цвет зависит от светлоты, цветность же постоянна.* При математическом моделировании эксперимента достаточно трудно учитывать факторы, влияющие на регистрацию светлоты [49]. Поэтому, чтобы в дальнейшем можно было сравнивать результаты математического исследования с экспериментальными, автор рекомендует проводить анализ цветового различия по цветности в равноконтрастных графиках uv 1960 г. или $u'v'$ 1974 г. (в последнем жёлтые, оранжевые и красные цветности более сбалансированы) [24, 42]. При этом различие по цветности приемлемо, если не превышает 0,005 ед.

Всё чаще для нахождения различия между двумя координатами цвета, применяют равноконтрастную систему CIELAB [48] (рис. 3, а). Рассмотрим разные выражения (формулы) для определения цветовых различий для этой системы. В 1976 г. МКО была рекомендована формула нахождения

цветового различия как евклидова расстояния. Выражение это простое для расчётов, но ограничивает возможности самой системы. Система CIELAB – криволинейное преобразование системы XYZ, и потому такой подход к нахождению изменения цвета в корне неверен.

Учитывая недостатки предложенного метода, МКО предложила модификацию самой системы CIELAB – CIELCH [36]. Были предложены полярные координаты цветового тона H и цветности C . Координата H обозначается как h°_{ab} и определяется углом, а координата C обозначается как C^*_{ab} и обозначается радиусом относительно центра координат (оси L^*). Подобная модификация позволила описывать цвет в этой системе как процесс представления цвета зрительной системой человека. Поэтому для повышения точности МКО в 1994 г. утвердила новую формулу, учитывающую цветовой тон, цветность и взвешивающие коэффициенты K_L, K_C, K_H , принимающие соответствующие значения для графики, полиграфии, текстильной промышленности и т.д.

Позднее формулу доработали, и в 2000 г. МКО приняла выражения, предполагающие более сложные расчёты показателей насыщенности, цветового тона и светлоты. Но анализ получаемого евклидова расстояния производится как и по предыдущим формулам. Различия по цвету рассматриваются в связи с определением допусков, в пределах которых соблюдается цветовое равенство. Так, в цветовом пространстве CIELAB, специально построенном для выравнивания допусков при определении цветового равенства, одинаковыми для визуального восприятия считаются цвета, отстоящие друг от друга не более чем на 1 ед. цветового различия.

Для более полного анализа различных выражений системы CIELAB проведены исследования [46, 50], показавшие, что наиболее точный метод оценки изменения цвета – метод МКО 2000 г., как учитывающий больше нюансов описания цвета. Но он довольно сложен для лиц, не разбирающихся в колориметрии. И потому, например, для контроля качества продукции больше подходит метод МКО 1994 г., схожий с методом МКО 2000 г. по результатам, имеющий расчётное выражение, включающее все необходимые переменные для точного расчёта и не

отягощённое дополнительными параметрами и промежуточными вычислениями. При оценке малонасыщенных и малоразличимых цветов применима формула МКО 1976 г. Но изменение угла и радиуса относительно центра координат следует всё же учитывать и здесь, особенно, скажем, в такой области, как оценка алмазов и бриллиантов. При малых цветовых различиях необходимо тщательно выбирать методику, разработанную для более точных расчётов [51]. Также при научных исследованиях стоит учитывать особенность системы *CIELAB*, которая несколько растянута в области фиолетовых и сжата в области красно-оранжевых цветов [46].

Разработана равноконтрастная система (модель) *CIECAM02* (рис. 3, б), проще и практичнее её предшественницы *CIECAM97s*. Две основные части модели – хроматическое адапционное преобразование *CIECAT02*, и его уравнение для вычисления математических коррелятов для шести технически определённых измерений внешнего вида цвета: яркость, лёгкость, красочность, цветность, насыщенность и оттенок [52].

После выбора относительной яркости окружения выбираются степень нелинейности и значения коэффициентов индукции окружения N_c и F . (В *CIECAM02* допускается применение и промежуточных значений N_c и F .) Колориметрическая информация необходимая для цветовых расчётов в этой системе: трёхцветные значения XYZ для моделируемой цветовой области; трёхцветные значения $X_w Y_w Z_w$ для белого стандарта или источника излучения; адапционная яркость Y_b для окружающего цвет фона. Есть ещё контекстные параметры (факторы контраста, экспонента c) и факторы (фактор адаптации яркости, функция мощности, факторы хроматического контраста, экспоненты z и n).

Так как в *CIECAM02* используется матричное преобразование *CIECAT02*, являющееся хроматической адаптацией, то его нельзя путать с самой *CIECAM02*.

Из сказанного понятно, что *CIECAM02* учитывает все тонкости и нюансы именно восприятия цвета человеком и может нивелировать такие сложности при оценке цвета, как метамерия и эффекты Пуркинье, Ханта и Бартлисон-Бринемана. Это делает систему *CIECAM02* незаменимой в та-

ких областях, как биология, медицина, психология, светотехника. Однако для большинства исследователей расчёты в этой системе могут оказываться сложными, а параметры и факторы избыточны (например, для технологического контроля по изменению цвета). В таких случаях лучшее решение – система *CIELAB*. Кроме того, стоит обратить внимание на новое унифицированное цветовое пространство *SAM16-UCS* [53]. Новая модель *SAM16* проще исходной *SAM02*. Кроме того, если рассматривать только хроматическую адаптацию, предлагается новое преобразование *SAT16* для замены предыдущего преобразования *SAT02*. Теперь может быть предложено новое комплексное решение для прогнозирования цветопередачи и оценки цветового различия.

Несмотря на рекомендации МКО, перечисленные системы можно считать квазиравноконтрастными. Так, если перевести все координаты осей эллипсов МакАдама в систему *CIELAB*, найти их длины и эллиптическую поверхность, то эллиптичность составит 15, тогда как в *CIEXYZ* – 26, а в *CIE1960 (uv)* – 2,5. В настоящее время есть разработки по созданию строго равноконтрастного цветового пространства на основе тензорных расчётов, где эллиптичность цветовой поверхности есть 1, то есть эллипсы МакАдама трансформируются в равновеликие окружности [54]. Подобная система может быть полезна при сверхточных колориметрических измерениях.

Системы управления цветом. Известно широкое применение систем управления цветом (*CMS*). Эти системы необходимы для согласования устройств ввода-вывода параметров цвета. Несмотря на то, что они применяются в основном дизайнерами и фотографами, исследователи также используют их при обработке цифровых снимков [55]. *Применение таких систем обусловлено несогласованностью цветových пространств цифровых устройств ввода и вывода.* Так, современная система *sRGB* подстроена под возможности мониторов, а изображения в других цветовых пространствах адекватно не отображаются. В принципе, любой монитор можно откалибровать так, чтобы он сравнительно корректно отображал и изображения в другом стандарте, но часть цветов всё равно будет теряться.

И тут встаёт вопрос о проблеме аппаратно-независимого воспроизведения цвета и изображений. Современные дисплеи ограничены набором люминофоров и светодиодов. В наше время появились дисплеи на основе квантовых точек с воспроизведением практически всего видимого диапазона [56]. Эта перспективная разработка создаёт возможности пересмотра цветových стандартов МКО для цифровых устройств ввода и вывода изображений. Теперь становится возможным применение новых цветовых пространств с широким телом цветового охвата не только на стадии постобработки снимка, но и на этапе его регистрации. Примером подобных разработок могут служить предложенные системы, охватывающие более 80 % видимого диапазона [13, 34]. Спектральные кривые этих систем имеют либо минимальные отрицательные участки, либо минимальные второстепенные максимумы, что позволяет реализовать их как спектральные характеристики для МФП. Подобное совмещение характеристик как на программном, так и на аппаратном уровнях может продвинуть решение проблемы согласования устройств ввода и вывода. На основе предложенных систем проведены экспериментальные и математические исследования с перспективными результатами по внедрению этих разработок в цифровые устройства [24, 42].

Цветовая калибровка. Перед проведением научных исследований необходимы профилирование и калибровка цифрового устройства цветowymi эталонами. Для этого применяются тест-объекты: цветových мишени и цветových шкалы, такие как *GretagMacbeth ColorChecker*, которая позволяет визуально устанавливать правильность цветопередачи фотоматериалом по набору контрольных цветов. Для оценки устройств ввода изображения обычно прибегают к использованию профилей табличного типа, основанных на использовании таблиц поиска и замены цвета (*Color Look Up Table, CLUT*) [36]. Могут также использоваться профили матричного типа либо профили, хранящие обе структуры данных, то есть матрицу цветových коэффициентов (тег *MatTRC*) и таблицу *CLUT* (теги *AToB*). В этом случае программное обеспечение, которое будет использовать цветовой профиль, может преобразовывать изображения

из цветового пространства устройства ввода во внутренне цветовое пространство *CMS* как путём пересчёта цветовых координат по матрице пересчёта, так и по таблице *CLUT*. Однако все эти методы направлены на подстройку цифрового устройства под те или иные условия съёмки. Следует также учитывать, что цветовые наборы предназначены не для оценки адекватности цифровых изображений оригиналу, а для коррекции снимков и построения цветового профиля по снятым цветовым мишеням. Таким образом происходит коррекция цветовых искажений возникших на этапе ввода изображения. Оцениваются не столько технические возможности камеры, сколько возможности программного обеспечения устройства. Исследователям для анализа цветовых возможностей цифрового устройства перед проведением исследований могут быть полезны *цветовые атласы – RAL, PANTONE, DIN*, атлас Манселла. Образцы этих атласов необходимы для измерения цветов объектов путём визуального и приборного сравнения. Также при проведении эксперимента могут быть полезны *стандартизированные цветные оптические стёкла (светофильтры) из соответствующего каталога и по ГОСТ 9411–91*, обладающие стабильностью параметров и удобством применения. Пример использования этих образцов как эталонных хорошо описан в источниках [24, 42], где светофильтры выступали в роли эталонных образцов и основы для реализации системы цветоделения трёхкадровой ЦФК.

Цветовые модели. После обработки и анализа цветных цифровых снимков при классификации цветовых параметров объектов исследователям может быть удобно применять такую цветовую модель, как *HSI* [36]. Построение этой модели основано на понятном человеку разделении цветов по насыщенности, светлоте и цветовому тону. Есть другие модели, характеризующиеся этими понятиями: *HSB* и *HSV*, но именно *HSI* в виде перевёрнутого конуса наиболее точно описывает представление человека о цвете. Вершина конуса – точка чёрного цвета, которая начинает расширяться с переходом к основанию (к большей светлоте). При малой яркости человек хуже различает цвета и различает оттенков меньше. Эта модель хорошо впишется в исследования, тре-

бующие классификации получаемых параметров цвета объекта для реализации дальнейшей временной прослеживаемости этих параметров на визуальном уровне [8].

Заключение

Изложенный материал показывает связь колориметрических измерений с цифровой схмотехникой, в результате чего и возникает цифровая колориметрия, как инструмент для получения и обработки точной цветовой информации об объекте исследования.

Работа выполнена, чтобы создать наиболее полный обзор основных аспектов цифровой колориметрии для специалистов, применяющих цветные цифровые регистраторы как инструмент в своих экспериментальных исследованиях. Приведённый материал призван помочь исследователям уже на стадии регистрации исключать цветовые потери, а соответственно и погрешности измерений.

Приведены основные критерии по выбору МФП: динамический диапазон, светочувствительность, тип съёмки. Даны практические советы по работе с цифровыми регистраторами. Рассмотрены системы цветоделения трёхкадровых и однокадровых ЦФК с одной и тремя МФП. Особое внимание уделено однокадровым МФП с пространственной системой цветоделения, наиболее распространённой в ЦФК и смартфонах. Приведены форматы снимка для точного получения цифрового оттиска цветных изображений. Описана взаимосвязь выбора рабочего цветового пространства ЦФК и спектральных характеристик МФП. Отмечены основные методы обработки цветного изображения, которые могут не замечать исследователи без знания основ колориметрии: опорный белый цвет, различные равноконтрастные системы для определения цветового различия и цветовые эталоны. Отмечено, что уже существуют современные технологии, позволяющие пересмотреть цветовые стандарты для цифровых устройств ввода и вывода изображений.

По всем отмеченным проблемам приведены ссылки на источники современных знаний, с примерами по способам регистрации и обработки цветного цифрового снимка, что поможет читателям изучить отдельные вопросы более детально.

Статья может быть полезна не только исследователям, применяющим цифровые регистраторы в рамках выполнения основных задач своего направления деятельности, но и специалистам, обладающим глубокими знаниями в области колориметрии.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-17-50017.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-17-50017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sutkowski M.I., Saukova Y.A.* Research of digital camera dynamic range on the imaging processing basis // *Devices and Methods of Measurements*. – 2017. – Vol. 8, No. 3. – P. 271–278. DOI: 10.21122/2220–9506–2017–8–3–271–278.
2. *Жагорова Н.А., Скумс Д.В.* Прослеживаемость при измерении параметров цвета // *Законодательная и прикладная метрология*. – 2018. – № 3 (154). – С. 37–39.
3. *Budak V.P., Zheltov V.S., Meshkova T.V., Chembaev V.D.* Experimental study of the new criterion of lighting quality based on analysis of luminance distribution at Moscow metro stations // *Light & Engineering*. – 2020. – Vol. 28, No. 3. P. 98–105. DOI: 10.33383/2019–044.
4. *Monogarova O.V., Chaplenko A.A., Oskolok K.V.* Multisensory digital colorimetry to identify and determination of active substances in drugs // *Sensors and Actuators B Chemical*. – 2019. – Vol. 299. – 126909. DOI: 10.1016/j.snb.2019.126909.
5. *Schults E.V., Monogarova O.V., Oskolok K.V.* Digital Colorimetry: Analytical Possibilities and Prospects of Use // *MOSCOW UNIVERSITY CHEMISTRY BULLETIN*. – 2018. – Vol. 74, Is. 2. – P. 55–62. DOI: 10.3103/S002713141902007X.
6. *Zou Z.P., Han R., Lu C., Xiong Z.L.* Detection of long-lived species in plasma-activated water, based on digital colorimetry // *PLASMA PROCESSES AND POLYMERS*. – 2020. – Vol. 18(2). № e2000139. DOI: 10.1002/ppap.202000139.
7. *Kataev M.Y., Dadonova M.M.* Method of vegetation detection using rgb images made by unmanned aerial vehicles on the basis of colour and texture analysis // *Light & Engineering*. – 2019. – Vol. 27(8). P. 55–62. DOI: 10.33383/2018–078.
8. *Jitanan S., Chimlek P.* Quality grading of soy bean seeds using image analysis // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. – 2019. – Vol. 9, Is. 5. – P. 3495–3503. DOI: 10.11591/ijece.v9i5.pp3495–3503.
9. *Laei G. et al.* Relationship between pigments and seed fall rate of iranian castor genotypes and genetic diversity // *Journal of Chemical Health Risks*. – 2019. – Vol. 9, Is. 1. – P. 57–68.

10. Катаев М.Ю., Додонова М.М., Ефременко Д.С. Коррекция освещённости многовременных RGB-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата // Светотехника. – 2020. – № 6. – С. 19–25. DOI: 10.30533/0536–101X-2020–64–2–237–242.
11. Lima M.J.A., Sasaki M.K., Marinho O.R., Freitas T.A., Faria R.C., Reis B.F., Rocha F.R.P. Spot test for fast determination of hydrogen peroxide as a milk adulterant by smartphone-based digital image colorimetry // Microchemical Journal. – 2019. – Vol. 157. – 105042. DOI: 10.1016/j.microc.2020.105042.
12. Caleb J., Alshana U., Ertas N. Smartphone digital image colorimetry combined with solidification of floating organic drop-dispersive liquid-liquid microextraction for the determination of iodate in table salt // Food Chemistry. – 2021. – Vol. 336. – 127708. Doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127708.
13. Жбанова В.Л. Системы цветоделиения матричных фотоприёмников: монография. – Смоленск: Универсум, 2018. – 186 с. ISBN978–5–91412–392–2м.
14. Старченко А.Н., Филиппов В.Г., Югай Ю.А. Исследование температурной зависимости чувствительности телевизионных камер на КМОП-матрицах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 628–634. DOI: 10.17586/2226–1494–2017–17–4–628–634.
15. Щагин А.В., Меркурьев С.А. КМОП и ПЗС фотоприёмники. Устройство и отличительные особенности // Естественные и технические науки. – 2018. – № 6 (120). – С. 135–140.
16. Столяревская Р.И. Обзор особенностей использования мини-спектрофотометров с ПЗС-матрицами в прикладной фотометрии // Светотехника. – 2020. – № 6. – С. 12–18.
17. Иванов В.Г., Каменев А.А. Направления развития технологий широкоформатных матричных фотоприёмных устройств информационных оптико-электронных средств наблюдения за космическими объектами // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2017. – Вып. 2. – С. 3–10.
18. Hijazi A., Friedl A., Cierpka C., Kahler C., Madhavan V. High-speed imaging using 3CCD camera and multi-color LED flashes // MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY. – 2017. – Vol. 28, No. 11. – № 115401. DOI: 10.1088/1361–6501/aa892a.
19. Андрианов В.П., Базаров Ю.Б., Губачев А.В., Дулин О.Н., Елгаёнов А.Е., Каменев В.Г., Кузин В.М., Литвинова М.С., Лобастов С.А., Туркин В.Н., Шубин А.С. Цифровой фотохронографический регистратор для исследования быстротекущих процессов // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 5. – С. 117–121. DOI: 10.15372/FGV20180516.
20. Дашкин Э.Р., Епанешников Н.М., Балдычев М.Т. Алгоритм компенсации ошибок, возникающих за счёт считывания информации с матричного фотоприёмника // Научная мысль. – 2019. – Т. 10, № 4–1 (34). – С. 73–75.
21. Жертунова Т.В., Янакова Е.С. Адаптивный алгоритм на основе нелокальных усреднений при обработке изображений // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 8. – С. 79–86.
22. Самаров Е.К. Синтез алгоритма оптимальной линейной модуляции шума в цифровой обработке изображений // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15. – № 2. – С. 77–83.
23. Buades A., Duran J. CFA Video Denoising and Demosaicking Chain via Spatio-Temporal Patch-Based Filtering // IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY. – 2020. – Vol. 11, No. 3. – P. 4143–4157. DOI: 10.1109/TCSVT.2019.2956691.
24. Zhanova V.L., Parvuyusov Y.B. Experimental investigation of the color-separation system of photodetector array // Journal of Optical Technology. – 2019. – Vol. 86, Is. 3. – P. 177–182. DOI:10.1364/JOT.86.000177.
25. Berra E., Gibson-Poole S., MacArthur A., Gaulton R., Hamilton A. Estimation of the spectral sensitivity functions of un-modified and modified commercial off-the-shelf digital cameras to enable their use as a multispectral imaging system for UAVs / International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics Proceedings. – 2015. – Vol. XL-1/W4. – P. 207–214. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-207–2015.
26. Mahato K., Chandra P. Paper-based miniaturized immunosensor for naked eye ALP detection based on digital image colorimetry integrated with smartphone // BIOSENSORS & BIOELECTRONICS. – 2019. – Vol. 128. – P. 9–16. DOI: 10.1016/j.bios.2018.12.006.
27. Chen C., Stamm M.C. Robust camera model identification using demosaicing residual features // MULTIMEDIA TOOLS AND APPLICATIONS. – 2021. – P. 4143–4157. DOI: 10.1007/s11042–020–09011–4.
28. Yamakabe R., Monno Y., Tanaka M., Okutomi M. Tunable color correction for noisy images // JOURNAL OF ELECTRONIC IMAGING. – 2020. – Vol. 3, Is. 3. – 033012. DOI: 10.1117/1.JEI.29.3.033012.
29. Cepeda-Negrete J., Sanchez-Yanez R., Correa-Tome F., et al. Dark image enhancement using perceptual color transfer // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 14935–14945. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2763898.
30. Fent L., Meldrum Al. Foveon vs Bayer: comparison of 3D reconstruction performances // 8th Int. Workshop 3D-Arch: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures: Proceedings. – 2020. – Vol. 2, No. 14.
31. Fent L., Meldrum Al. A Foveon Sensor/Green-Pass Filter Technique for Direct Exposure of Traditional False Color Images // Journal of Imaging. – 2016. – May. DOI: 10.3390/jimaging2020014.
32. Saouli A., Mansour K. Modeling of detector radiations response p-i-n in technology Thin Film on ASIC (TFA) intended for digitalization in medical imagery // LASER AND PLASMA APPLICATIONS IN MATERIALS SCIENCE. – 2011. – Т. 227. – P. 125–128. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.227.125.
33. Courtier G., Lapray P.J., Thomas J.B., Farup I. Correlations in Joint Spectral and Polarization Imaging // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 1. DOI: 10.3390/s21010006.
34. Zhanova V.L. Evaluation and selection of color spaces for digital systems // Light & Engineering. – 2020. – Vol. 28, No. 6. – P. 86–94. DOI: 10.33383/2020–024.
35. Nguyen Rang M.H., Brown M.S. RAW Image Reconstruction Using a Self-contained sRGB-JPEG Image with Small Memory Overhead // INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER VISION. – 2018. – Vol. 126, Is. 6. – P. 637–650. DOI: 10.1007/s11263–017–1056–0.
36. Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчёты и измерения. – СПб.: Питер, 2009. – 224 с. ISBN978–5–388–00341–6.
37. Kim I., Song S., Chang S., Lim S., Guo K. Deep image demosaicing for submicron image sensors // Journal of Imaging Science and Technology. – 2019. – Vol. 63, No. 6. – P. 060410. DOI: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2019.63.6.060410.
38. Магазов С.С. Восстановление изображения на дефектных пикселях КМОП и ПЗС матриц // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2019. – № 3. – С. 25–40.
39. Maurer D., Šamanović S., Gajski D. Creating HDR photo by manipulating dynamic range of a single RAW format photo // 17th INT. MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC GEOCONFERENCE 'SGEM 2017': PROCEEDINGS, 2017. – С. 63–70.
40. Оморкулов А.М. Преимущества графических форматов в компьютерной графике // Вестник Ошского государственного университета. – 2017. – № 3. – С. 135–139.
41. Mikhail M., Jiang S.-J., Hahn P., Orlin A., Rao R.-C., Choudhry N. OCTA: A Practical Method of Image Averaging Using Adobe Photoshop Software // Ophthalmic Surgery Lasers & Imaging Retina. – 2019. – Vol. 50, Is. 12. – P. 802–807. DOI: 10.3928/23258160–20191119–09.
42. Zhanova V.L. Design and investigation of a digital photocolormeter // Journal of Optical Technology. – 2020. – Vol. 87, No. 9. – P. 521–526. DOI:10.1364/JOT.86.000177.
43. Qasim N.H., Pyliavskiy V.V. Color temperature line: forward and inverse transformation // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2020. – Vol. 23, No. 1. – С. 75–80. DOI: 10.15407/spqeo23.01.75.
44. Stockman A. Cone fundamentals and CIE standards // Current Opinion in Behavioral Sciences. – 2019. – Vol. 30, No. 1. – P. 87–93. DOI: 10.1016/j.cobeha.2019.06.005.
45. Prasad D.K. Gamut expansion of consumer camera to the CIE XYZ color gamut using a specifically designed fourth sensor channel // Appl. Opt. – 2016. – Vol. 54, Is. 20. – P. 6146–6154. DOI: 10.1364/AO.54.006146.
46. Иванов В.Е., Широких Т.В. Сравнение равноконтрастных колориметрических систем // Светотехника. – 2014. – № 6. – С. 44–47.

47. Brill M.H. Is CIELAB one space or many? // Coloration Technology, 2020. DOI: 10.1111/cote.12486.

48. Gomez-Polo C., Montero J., Gomez-Polo M., Casado A.M. Comparison of the CIELab and CIEDE2000 Color Difference Formulas on Gingival Color Space // Journal of Prosthodontics-Implant Esthetic and Reconstructive Dentistry. – 2020. – Vol. 29, Is. 5. – P. 401–408.

49. Kanaeva I.A., Bolotova Y.A. Color and luminance corrections for panoramic image stitching // Computer Optics. – 2018. – Vol. 42, Is. 5. – P. 885–897. DOI: 10.18287/2412–6179–2018–42–5–885–897.

50. Zhanova V.L. Research into methods for determining colour differences in the CIE-LAB uniform colour space // Light & Engineering. – 2020. – Vol. 28, No. 3. – P. 53–59. DOI: 10.33383/2019–005.

51. Palchikova I.G., Smirnov E.S., Barinova O.A., Latyshov I.V., Vasiliev VA, Kondakov A.V. About quantifying small color differences in digital images // Computer Op-

tics. – 2020. – Vol. 44, Vol. 4. – P. 606–617. DOI: 10.18287/2412–6179-CO-631.

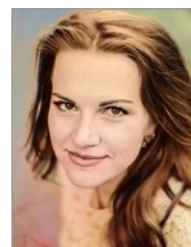
52. Karimipour H., Gorji Kandi S. Performance of advanced color difference and CAM02-based formulas in prediction of the crispening effect for reflective samples // Color Research and Application. – 2017. – Vol. 42, Is. 5. – P. 542–551. DOI: 10.1002/col.22110.

53. Li Changjun, Li Zhiqiang, Wang Zhifeng et al. Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS // Color Research and Application. – 2017. – Vol. 42, Is. 6. – P. 703–718. DOI: 10.1002/col.22131.

54. Ложкин Л.Д., Вороной А.А., Солдатов А.А. Преобразование цветового пространства МКО в строго равноконтрастное на основе тензорного исчисления // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 50–59.

55. Черноусова О.В., Рудаков О.Б. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа // Химия, физика и механика материалов. – 2019. – № 2 (21). – С. 55–125.

56. Huraibat K., Perales E., Viqueira V., Martinez-Verdu F.M. A multi-primary empirical model based on a quantum dots display technology // Color Research and Application. – 2020. – Vol. 45, Is. 3. – P. 393–400. DOI: 10.1002/col.22481.



Жбанова Вера Леонидовна, кандидат техн. наук. Окончила в 2011 г. МЭИ (ТУ) по специальности «Опτικο-электронные приборы и системы». Доцент кафедры оптикоэлектронных систем филиала НИУ

«МЭИ» в Смоленске. Область научных интересов: колориметрия, обработка цифровых изображений, приёмники излучения, 3D-проектирование

Михаилу Евгеньевичу Клыкову – 80 лет!

6 марта исполнилось 80 лет Михаилу Евгеньевичу Клыкову – выдающемуся специалисту-светотехнику, кандидату технических наук, главному специалисту ВНИСИ, главному конструктору ООО «ЭЛКОМС» и члену Редколлегии нашего журнала.

57 лет своей жизни М.Е. Клыков посвятил светотехнике и работе во Всесоюзном научно-исследовательском светотехническом институте ВНИСИ. Поступив во ВНИСИ сразу после окончания в 1964 году Московского энергетического института, Михаил Евгеньевич прошёл трудовой путь от инженера до заведующего лабораторией и главного специалиста по созданию пускорегулирующей аппаратуры для источников света.

Уже не одно десятилетие М.Е. Клыков совмещает научно-исследовательскую работу во ВНИСИ с работой в техническом комитете по стандартизации ТК332 «Светотехнические изделия, освещение искусственное», активно участвуя в разработке национальных и межгосударственных стандартов. Под его руководством и при непосредственном участии разработано более 30 стандартов на пускорегулирующую аппаратуру, в том числе – востребованные производителями стандарты на устройства управления светодиодами.



Михаилу Евгеньевичу всегда были свойственны исключительное трудолюбие, чувство ответственности, а присущий ему дар исследователя в сочетании с глубокими и обширными познаниями в области электротехники позволяет М.Е. Клыкову по праву считаться признанным – и не только в нашей стране – профессионалом в области разработки, конструирования и применения различных устройств управления как для традиционных ламп, так и для современных светодиодных источников света.

На счету Михаила Евгеньевича – целый ряд уникальных светотехнических проектов и трудов, в числе которых – участие в светотехническом обеспечении «Олимпиады-80», более 116 авторских свидетельств и пу-

бликаций. М.Е. Клыков активно участвует в жизни светотехнической отрасли, образовании и печати, являясь членом научно-технических Советов отрасли и ВНИСИ, работая в составе Государственной комиссии по приёму дипломных работ на кафедре «Светотехника» МЭИ, и в качестве внештатного редактора реферативного журнала «Светотехника». Нельзя не отметить и большой вклад Михайила Евгеньевича в создание Справочной книги по светотехнике, и только вышедшую из печати книгу его авторства – учебное пособие «Управляющая аппаратура для светодиодов и разрядных ламп» – которая станет прочным фундаментом для подготовки новых поколений светотехников.

Коллеги, друзья и все, кому посчастливилось знать Михаила Евгеньевича, высоко ценят его исключительные вежливость, скромность и доброжелательность, природную интеллигентность.

Коллектив ВНИСИ, ООО «ЭЛКОМС», Реакция и редколлегия журнала, все друзья и коллеги Михаила Евгеньевича сердечно поздравляют его с 80-летием и желают крепкого здоровья, сил и творческой энергии на новые свершения!