

ДЕФИНИТИВНАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ЦВЕТА В КОЛОРИМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

И. Е. Зуйков,
зав. кафедрой «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (Минск, Беларусь);

Е. Н. Савкова,
доцент кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы» Белорусского национального технического университета (Минск, Беларусь).

Учитывая возрастающие потребности в колориметрии высокого разрешения для протяженных объектов, изменяющих свои свойства во времени, особую актуальность приобретают вопросы метрологической прослеживаемости и достоверности результатов измерений. Методология колориметрии высокого разрешения предполагает использование условных шкал, встроенных в системы передающих устройств, корректное цветовоспроизведение в которых достигается путем обеспечения их технической и информационной совместимости. Так как цифровое изображение объекта имеет множество реализаций, основной задачей является снижение неопределенности цветовоспроизведения. Данная задача может быть решена на основе детального анализа всей последовательности преобразований измеряемой величины в программно-аппаратных средах и установления реперных точек для выполнения условия обеспечения единства измерений. При этом первым шагом является спецификация измеряемой величины, характеристика ее дефинитивной неопределенности.

В статье рассмотрены стандартизованные определения и модели описания цвета, его качественные и количественные показатели, выполнен анализ факторов дефинитивной неопределенности в программно-аппаратных средах.

ВВЕДЕНИЕ

По материалам отчетов консультативных комитетов Международного комитета мер и весов 23-й Генеральной конференции мер и весов, «торговля между развитыми странами иногда также затруднена из-за отсутствия признанной на международном уровне метрологической системы, в частности, в таких областях физических измерений, как цвет, блеск, свойства веществ» [1]. Традиционно определение цвета относят к качественной оценке, а цветовые шкалы – к шкалам наименований, неопределенность которых оценивается размахом [3].

Так, в примечаниях к определению стандартного образца в Международном словаре по метрологии приводится пример качественной характеристики объекта – «цветовая диаграмма по идентификации одного или более установленных цветов...» [3]. Однако развитие компьютерных технологий и цифровой техники обусловило возникновение новых измерительных задач, предполагающих получение количественной информации о фотометрических и колориметрических свойствах объектов на основе обработки их цифровых изображений и,

следовательно, использование более строгих метрологических оценок. Технологии обработки графических данных эффективны при контроле продукции в полиграфии, медицине, химической, фармацевтической, текстильной промышленности и других областях, когда измеряемые свойства (например, яркость в цветовых каналах) являются «хорошо ведущими себя» и распределены в рабочем участке динамического диапазона регистрирующих устройств. Встроенные в системы передающих устройств компьютерные шкалы могут использоваться для измерений цветовых характеристик при условии обеспечения метрологической прослеживаемости результатов, поэтому все сильнее ощущаются потребности в разработке методологии колориметрии высокого разрешения по пространственным и яркостным характеристикам, корректное цветовоспроизведение в которых достигается путем обеспечения их технической и информационной совместимости. Тем не менее, цифровое изображение объекта имеет множество реализаций, поэтому важной метрологической задачей является обеспечение необходимого уровня доверия к результатам измерений, а, следовательно, снижение рисков, возникающих при контроле. Для решения данной задачи следует выполнить детальный анализ процесса преобразования и извлечения информации об измеряемой величине (в данном случае – цвете) в рабочем потоке графических данных программно-аппаратных сред, что позволит выявить и оценить источники изменчивости, влияющие на точность измерения.

Поскольку, согласно принципам GUM, надежная оценка неопределенности измерения требует «точного определения измеряемой величины» [4], на начальном этапе такого анализа необходимо специфицировать саму измеряемую величину, определив факторы ее дефинитивной неопределенности. Проработке данного вопроса посвящена статья.

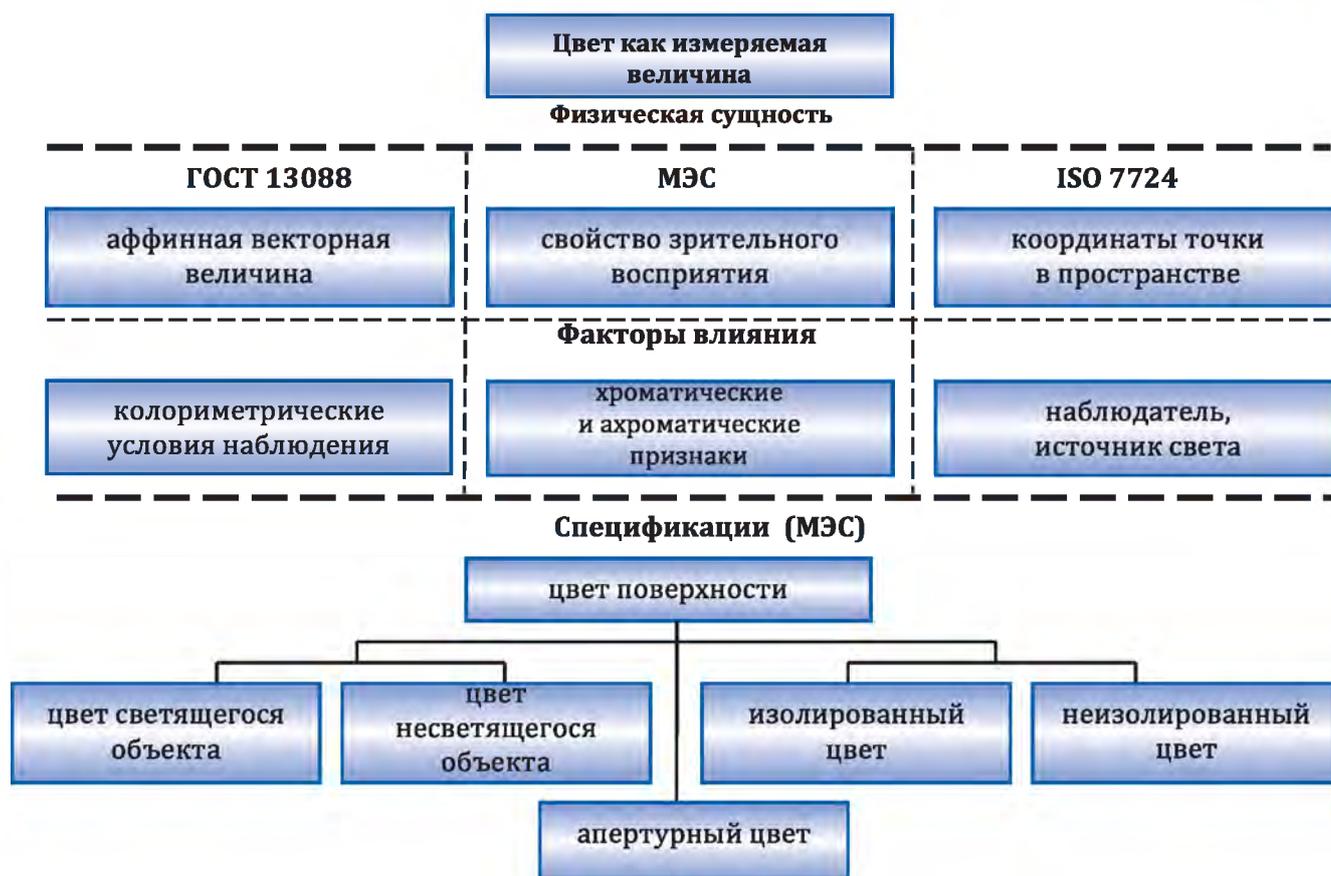


Рис. 1. Определения цвета

ЦВЕТ КАК ИЗМЕРЯЕМАЯ ВЕЛИЧИНА И ЕГО СТАНДАРТИЗОВАННЫЕ МОДЕЛИ

Так как цвет является проявлением феномена зрительного восприятия, его часто называют фотобиологической или физиологической величиной, и, как установлено, он оказывает влияние на нейроповеденческие функции организма. Действующие определения цвета отражают эволюцию подходов к его описанию. Согласно ГОСТ 13088 «цвет есть аффинная векторная величина трех измерений, выражающая свойство, общее всем спектральным составам излучения, визуально неразличимым в колориметрических условиях наблюдения» [5]. Согласно Международному электротехническому словарю (МЭС) цвет (воспринимаемый) – свойство зрительного восприятия, сочетающее хроматические и ахроматические признаки». Далее в словаре говорится, что «данное свойство зрительного восприятия может быть описано при помощи названий хроматических цветов, таких

как: желтый, оранжевый, красный, розовый, зеленый, голубой, фиолетовый и так далее; или названиями ахроматических цветов, таких как: белый, серый, черный, яркий, тусклый, светлый, темный и так далее; или же комбинацией этих названий. Воспринимаемый цвет зависит от состава цветовых стимулов, от размера, формы, структуры и площади фона цветового стимула, от состояния адаптации органа зрения наблюдателя, а также от квалификации и опыта наблюдателя и так далее» [6]. В соответствии с ISO 7724 «цвет однозначно характеризуется для определенного наблюдателя и определенного источника света координатами точки в пространстве, образуемом тремя взаимно перпендикулярными векторами» [7]. В Международном электротехническом словаре приводятся также следующие определения. Цвет (воспринимаемый) светящегося объекта – цвет, воспринимаемый от поверхности, излучающей свет, как первичный источник света, или зеркально отражающей такой

свет. Обычно светящиеся цвета дают первичные излучатели при их наблюдении в нормальных условиях. Цвет (воспринимаемый) несветящегося объекта – цвет, воспринимаемый от поверхности, передающей или диффузно отражающей свет, как вторичный источник света. Обычно вторичные источники света дают несветящиеся цвета при их наблюдении в нормальных условиях. Цвет поверхности – цветовое ощущение, воспринимаемое от поверхности, которая либо диффузно отражает свет, либо диффузно его излучает. Изолированный цвет – цвет (воспринимаемый) от поверхности, видимой изолированно от других цветов. Неизолированный цвет – цвет (воспринимаемый) от поверхности, видимой на фоне других цветов. Апертурный (нелокализованный) цвет – цвет (воспринимаемый), нелокализованный по глубине, например, заполняющий отверстие на экране [6]. Анализ данных определений позволил сформировать их классификационную схему, представленную на рис. 1.

Природа цвета до конца не изучена, что подтверждается многочисленными научными публикациями и дискуссиями в ведущих светотехнических изданиях. Существующие теории для объяснения цветового зрения носят как философский, так и прикладной технический характер. Первые, в свою очередь, можно разделить на объективные и субъективные. Объективные теории (например, Гильберта) утверждают, что цвета как свойства, воспроизводимые на объектах, являясь частью реальности, существуют независимо от нашего сознания или желания, и наблюдатели воспринимают их как данность. Сторонники субъективных теорий (Кант, Понти и др.) считают, что цвет не является «абсолютным» и воспринимается наблюдателем в контексте пространства и времени. Данной точки зрения придерживается большинство современных специалистов в области колориметрии. Прикладные теории (Юнга-Гельмгольца <http://www.psylib.ukrweb.net/books/rubin01/refer.htm> – s85, Геринга и др.) направлены на описание механизмов восприятия цвета зрительным анализатором и развитие возможностей его оценки и измерений с максимальной точностью. Так, установлено, что за цветовое зрение человека и приматов отвечают гены, кодирующие светочувствительные белки опсины, и восприятие цвета обусловлено совокупностью реакций каждого из трех приемников (β , γ , ρ) на падающее излучение, которые имеют свою спектральную чувствительность (см. рисунок 2) [8]. Выражения для трех цветовых составляющих светового потока в общем виде выглядят следующим образом [8]:

$$\begin{aligned} K &= \int_0^\infty \varphi(\lambda) \bar{K}(\lambda) d\lambda; \\ Z &= \int_0^\infty \varphi(\lambda) \bar{Z}(\lambda) d\lambda; \\ C &= \int_0^\infty \varphi(\lambda) \bar{C}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (1)$$

где $K(\lambda)$, $Z(\lambda)$, $C(\lambda)$ – спектральные чувствительности трех приемников,

обычно условно называемых «красным», «зеленым», «синим»; $\varphi(\lambda)$ – функция относительной световой спектральной эффективности; $K(\lambda)$, $Z(\lambda)$, $C(\lambda)$ – единичные количества основных цветов приемников светового потока трех видов.

тов Х. Грассмана, в соответствии с которыми цвет можно рассматривать как смесь из определенных количеств любых трех независимых цветов или смесь белого цвета и какого-либо монохроматического излучения [5]. При создании цветовых

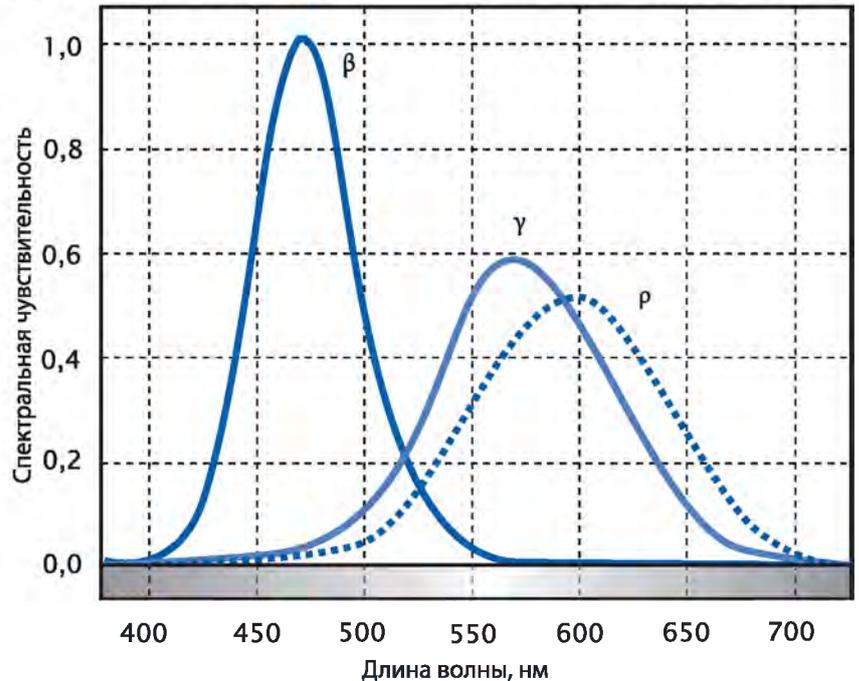
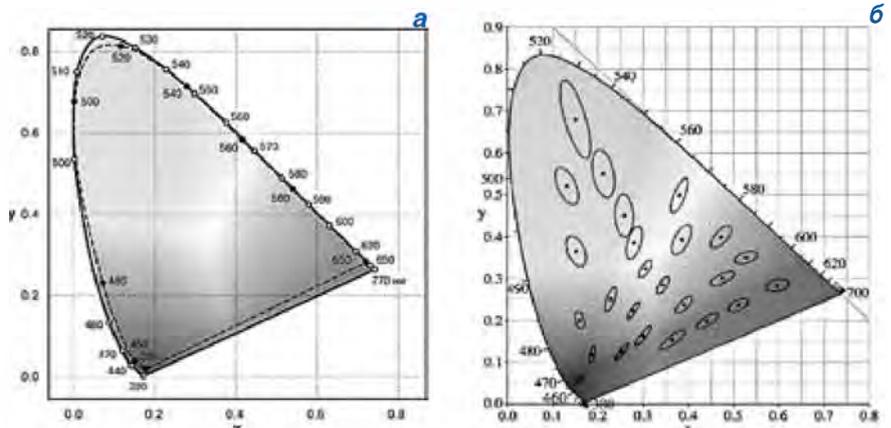


Рис. 2. Кривая относительной световой эффективности фотоприемников зрительного анализатора



а – колориметрического стандартного наблюдателя; б – цветоразличия (эллипсы Мак-Адама)

Рис. 3. Цветовые модели

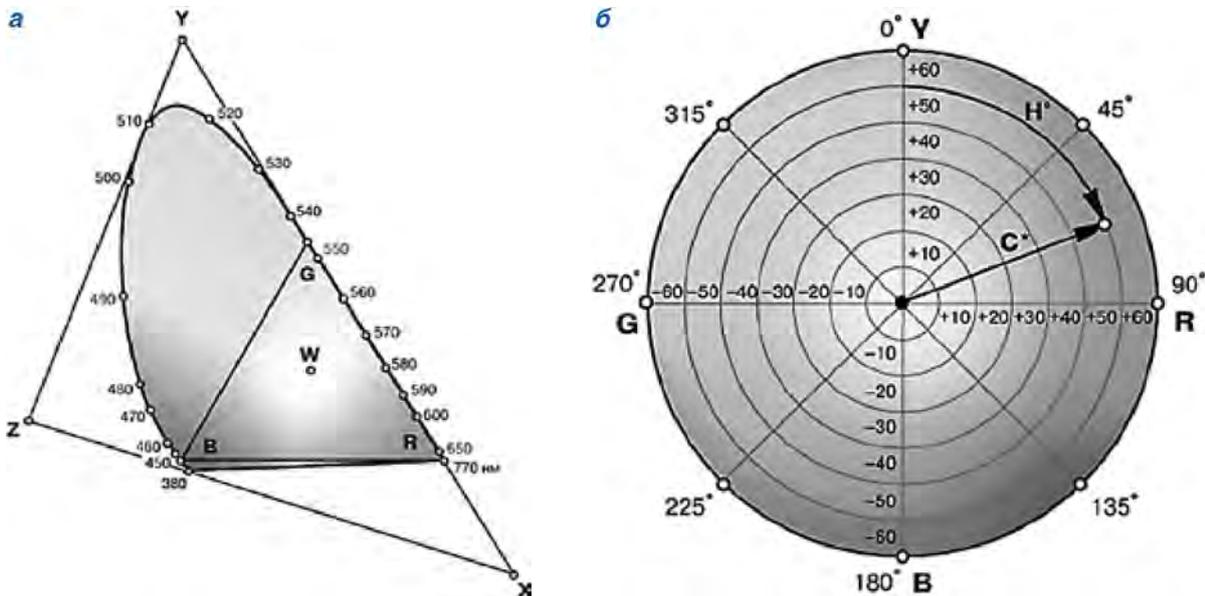
Для количественной оценки цвета используются показатели, определяемые по трехмерным шкалам, воспроизводимым посредством стандартизованных моделей – цветовых пространств. Все стандартизованные цветовые пространства основаны на четырех законах сложения цве-

пространств большую роль играют эмпирически полученные модели колориметрического стандартного наблюдателя для углов зрения 2° (1931 г.) и 10° (1964 г.), показанные на рис. 3а соответственно сплошной и пунктирной линиями, а также области цветоразличия в цветовом



соответственно в светящихся, печатающих устройствах и графических

Рис. 4. Цветовые модели RGB и CMYK в пространстве (а) и на плоскости в виде треугольника Максвелла (б), модель HSB (в)



а – цветовой треугольник XYZ; б – пространство $L^*a^*b^*$ в полярных координатах C^*H^*
Рис. 5. Графики аппаратно независимых пространств

локусе – эллипсы Мак-Адама, с увеличением в 10 раз, представленные на рис. 3б [8].

Эллипсы, по сути, представляющие собой зоны дефинитивной неопределенности, различаются в зависимости от месторасположения точек в цветовом пространстве, что создает трудности при обеспечении и оценивании точности измерений. Цветовые тела пространств трансформируются друг в друга и могут иметь различные модификации областей цветоразличения в зависимости от принципов их построения и областей применения. Модели RGB, CMYK, HSB (рисунок 4) [8], используемые

редакторах, являются аппаратно независимыми. Данные модели приводят к аппаратно не зависимым, наилучшим образом отражающим механизмы зрительного восприятия цвета, принадлежащим семейству XYZ ((1931 г.) (рис. 5) [8]: $xyZ 2^\circ$ (1931), Hunter Lab (1958), CIE Yuv (1960), CIE $xyY 10^\circ$ (1964), CIE $Yu'v'$ (1976), CIE Lu^*v^* (1976), CIE La^*b^* (1976) [9]. Данные модели наилучшим образом отражают механизмы зрительного восприятия цвета.

Таким образом, под цветом следует понимать трехмерную величину, численно оценивающую воздействие светового потока от поверхности

на орган зрения стандартного наблюдателя. Установлено, что с точки зрения пространства, цвет воспринимается в своем пространстве и на фоне; с точки зрения времени, цвет – одно из звеньев смены цветов в определенной последовательности. Каждая стандартизованная модель имеет свои области применения, и не существует идеального цветового пространства [9]. Показатели цвета и их характеристики схематически показаны на рисунке 6 [10]. Монохроматическому излучению соответствует ощущение спектрального цвета. Спектральные цвета являются чистыми (насыщенными) цветами,

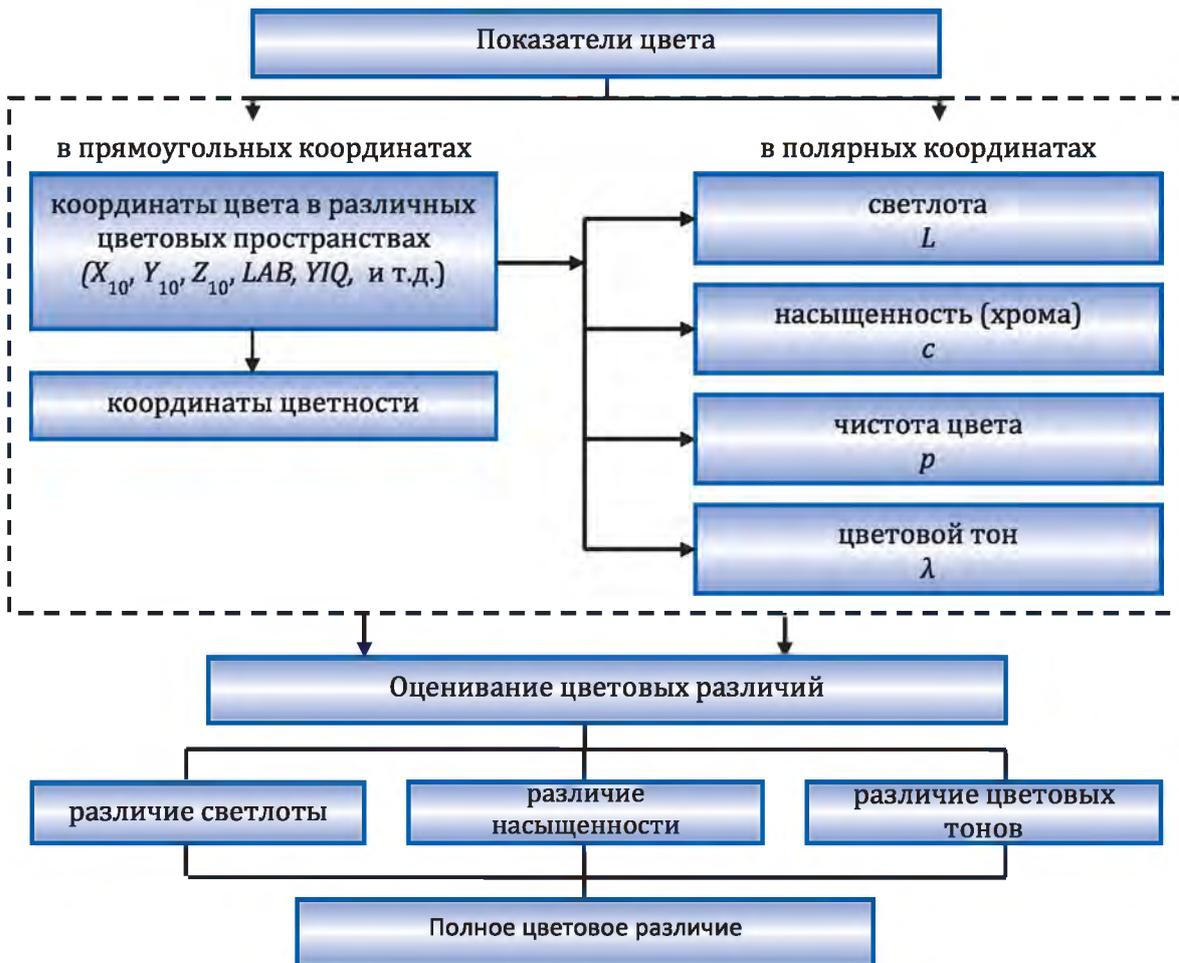


Рис. 6.– Показатели цвета

а расширение излучаемой области длин волн приводит в общем случае к уменьшению насыщенности цвета. Пропорциональное изменение интенсивности всех монохроматических составляющих излучения изменяет лишь количество цвета, характеризуемое его яркостью, не меняя его качества, т.е. цветности, которая определяется координатами цветности, либо совокупностью цветового тона и чистоты цвета» [8].

Цветовой тон h_{ab} или доминирующая длина волны λ_d – длина волны монохроматического излучения, которое в надлежащей смеси со стандартным ахроматическим излучением дает цветовое равенство с рассматриваемым излучением [5]. Чистота цвета P_c определяется отношением яркости (потока) монохроматического излучения к яркости (потоку) смеси монохроматического и белого излучения, создающей

заданную цветность. Чистота цвета характеризует насыщенность цвета:

$$P_c = \frac{L_\lambda}{L_\lambda + L_E} \quad (2)$$

Координата цветности – относительная величина, характеризующая цвет. Для пространства RGB [8]:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r'}{r'+g'+b'}; \\ g &= \frac{g'}{r'+g'+b'}; \\ b &= \frac{b'}{r'+g'+b'}, \end{aligned} \quad (3)$$

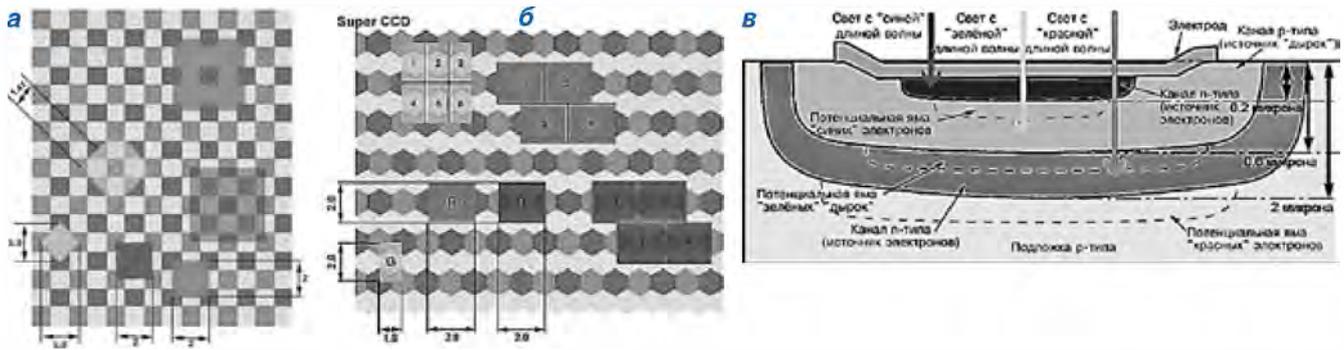
где r, g, b – координаты цветности; r', g', b' – цветовые координаты цвета S .

Таким образом, для измерений цвета используют ряд качественных и количественных показателей, позволяющих идентифицировать его как местоположение точки на шкалах цветовых пространств.

Идентификация цвета в программно-аппаратных средах осуществ-

ляется посредством аппроксимации и интерполяции сигналов, снимаемых с групп пикселей периодических структур цветных (чаще всего – красных, синих и зеленых) светофильтров, наносимых на чувствительные элементы матриц цифровых камер. Широкое распространение по соотношению качество/цена получили технологии «один кадр – одна матрица», реализованные на матричных структурах «решетка» Байера (Bayer pattern) [11] и SuperCCD Fujifilm [10], а также структурах «сэндвичного» типа фирмы Foveon [12] (см. рис. 7).

Так как производители цифровых камер стремятся в максимальной степени адаптировать машинное зрение к модели зрительного анализатора и соблюсти компромисс между пространственным и яркостным разрешением, техническое и программное обеспечение систем технического зрения постоянно совершенствуется,



а – «решетка» Байера; **б** – шестигранные пиксели SuperCCD; **в** – «сэндвичная» структура Foveon
Рис. 7. Схемы нанесения светофильтров

что находит отражение в многообразии реализаций, в том числе, и в различиях цветовых охватов устройств. Коммутация и хранение сигналов, описывающих цвет, осуществляются в специальных форматах, где также происходят потери точности вследствие, например, сжатия. Поэтому для согласования процесса передачи графических данных применяют стандартизованные профилирующие средства – цветовые мишени, представляющие собой наборы однозначных мер – Pantone, Gretag Macbeth ColorChecker, IT8.7/2, IT8.7/1 и др., и референсные цветовые пространства, такие как sRGB и CIE $L^*a^*b^*$.

Цвет выделенной группы пикселей цифрового изображения определяют путем сравнения усредненных числовых значений колориметрических показателей (см. рисунок 4) с показателями палитры цветовых мишеней. Идентифицируемому цвету приписываются значения мишени по критерию минимального стандартного отклонения цвета ΔE_{ab} , которое для всех модификаций пространства CIE XYZ находят по формуле [7]:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

где ΔL^* , Δa^* , Δb^* – различия светлоты и координат цвета испытуемого образца и образца сравнения.

Линейную координату светлоты L и полярные координаты насыщенности C_{ab} цвета и цветового тона h_{ab} получают из L^* , a^* , b^* следующим образом [7]:

$$L = L^* \quad (5)$$

$$C_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h_{ab} = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \text{ между } 0^\circ \text{ и } 360^\circ \quad (6)$$

Таким образом, учитывая потребности современной колориметрии в количественной оценке цвета по заданному уровню достоверности, в качестве показателя неопределенности могут быть использованы различия светлоты ΔL^* , координат цвета Δa^* , Δb^* и стандартное отклонение ΔE_{ab} .

ФАКТОРЫ ДЕФИНИТИВНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.

Согласно [3] *дефинитивная неопределенность* – составляющая неопределенности измерения, являющаяся результатом ограниченной детализации в определении измеряемой величины. Дефинитивная неопределенность есть действительная минимальная неопределенность измерения, достижимая в любом измерении данной измеряемой величины. Любое изменение в описательных деталях приводит к другой дефинитивной неопределенности. В Руководстве ISO/IEC 98–3:2008, D.3.4, и IEC 60359 для понятия «дефинитивная неопределенность» используется термин «intrinsic uncertainty» (исходная неопределенность). Как было показано выше, в настоящее время действуют девять не противоречащих друг другу определений цвета, отражающих специфику его зрительных восприятий. Ниже приведены положения, усиливающие «ограниченную детализацию» в этих определениях, дающие вклады в его дефинитивную неопределенность.

1. Мак-Адамом установлено, что до сих пор не существует «идеальной» модели описания цвета, поскольку нет возможности

отображать различия близких цветов в нужных пропорциях, что объясняется объективными особенностями зрительного анализатора, показанными ранее на рисунке 3б. Также установлено: чтобы глаз мог заметить разницу между цветами, необходимо отклонение хотя бы в $\Delta E_{ab} = 1$, однако на практике часто применяют отклонение $\Delta E_{ab} = 5$ [9].

2. Возможно, требует уточнения функция относительной спектральной световой эффективности, которая была выведена в 1931 году по восприятиям, основанным на ограниченном количестве испытуемых, и не учитывающая изменчивость яркостной адаптации глаза в различных географических регионах земного шара, т. е. можно утверждать, что данная модель получена скорее в условиях повторяемости, а ее воспроизводимость не оценена в полной мере.
3. Действующие модели стандартного наблюдателя, созданные в 1931 и 1964 гг. для углов зрения 2° и 10° , пока не уточнялись и не пересматривались с учетом появления более совершенных средств измерений. Не всегда ясны четкие границы перехода между моделями.
4. В настоящее время достаточно хорошо изучено дневное и ночное зрение [13], разрабатываются модели сумеречного зрения с учетом эффекта Пуркинье [14], но проводится мало исследований восприятий на пороге

ослепления, так как продолжительные по времени измерения могут привести к повреждению сетчатки [9].

- Периферическое зрение ограничивается угловыми размерами и положением объекта по отношению к оптической оси глаза (эффект Трокслера) [15], что объясняется отсутствием на краях сетчатки рецепторов колбочек, способных различать цвет. Человеческий глаз также не способен различать цвета удаленных точечных несамосветящихся объектов.

На все перечисленные особенности, увеличивающие дефинитивную неопределенность цвета, накладываются ограничения его воспроизведения в программно-аппаратных средах. Периферийные устройства помимо различий в физической реализации, имеют отличающиеся цветовые охваты, «обрезающие» цветовое тело исходного пространства, что корректируется программными средствами путем интерполяции. Использование искривленных пространств при математическом описании цветовых тел, их преобразования, эффекты квантования, сжатие графических файлов с потерей данных затрудняют процессы корректной цветопередачи. Воспроизведение оттенков каждого цвета ограничивается по яркости количеством градаций в каждом цветовом канале (8, 12 и 24 бит на канал), а по времени – частотой Найквиста, равной половине частоты дискретизации. Обычно для реальных сигналов указывают диапазон частот, в пределах которого сосредоточена основная часть его энергии и которым определяется ширина спектра сигнала. В ряде случаев спектр сознательно сокращают. Это обусловлено тем, что аппаратура и линия связи должны иметь минимальную полосу частот ΔF . Сокращение спектра выполняют, исходя из допустимых искажений сигнала. Увеличение ΔF приводит

к неоправданному усложнению аппаратуры и повышению затрат. Например, для передачи телевизионного изображения при стандарте в 625 строк полоса частот, занимаемая сигналом, составляет около 6 МГц.

Сигнал $s(t)$, можно абсолютно точно представить с помощью последовательности отсчетов $s\left(\frac{k}{2F}\right)$, заданных в дискретных точках $\left(\frac{k}{2F}\right)$ (рис. 8) [16].

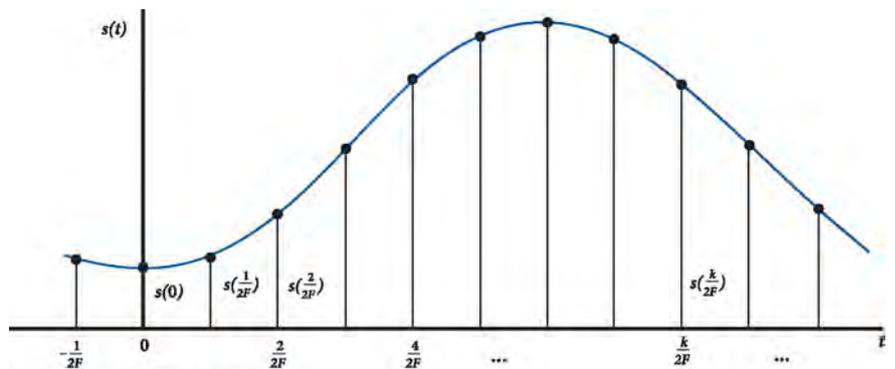


Рис. 8. Спектр сигнала

В пространстве сигналов, характеризующихся ограниченным спектром $\Phi(f) = 0$ при $|f| \geq F$, функции $\psi(t)$ образуют ортогональный базис. При этом функция $\psi(t)$ имеет вид:

$$\psi(t) = \frac{\sin 2\pi F \left[t - \frac{k}{2F} \right]}{2\pi F \left[t - \frac{k}{2F} \right]} \quad (7)$$

В соответствии с теоремой Котельникова непрерывный сигнал $s(t)$ с ограниченным спектром можно восстановить (интерполировать) по его отсчетам $s(k\Delta t)$, взятым через интервалы $\Delta t = 1/2F$ (где F – верхняя частота спектра сигнала), можно представить рядом [17]:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s\left(\frac{k}{2F}\right) \frac{\sin 2\pi \left[t - \frac{k}{2F} \right]}{2\pi \left[t - \frac{k}{2F} \right]} \quad (8)$$

В предельном случае значение дефинитивной неопределенности вытекает из соотношения Гейзенберга (Шредингера), устанавливающего нижний предел точности одновременного определения пары характеризующих квантовую си-

стему физических наблюдаемых, описываемых некоммутирующими операторами. Фундаментальное неравенство для неопределенностей координаты Δx микрочастицы и ее импульса Δp запишется в виде [18, 19]:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2, \quad (9)$$

где \hbar – постоянная Планка.

Интерпретации данного соотношения применительно к колориметрии высокого разрешения – про-

должительность и ширина полосы сигнала, компактность и гладкость. Так, произведение дисперсии продолжительности $(\Delta x)^2$ и ширины распределения энергии сигнала $(\Delta k)^2$ не может быть меньше, чем $\Delta x \Delta k$.

При этом используется выражение [19]:

$$(\Delta x)^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 |g(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |g(x)|^2 dx} - \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} x |g(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |g(x)|^2 dx} \right]^2 \quad (10)$$

Это дисперсия от $|g(x)|^2$, мера ширины распределения «энергии» сигнала.

На основе анализа рассмотренных факторов, используя для их группирования классификацию, приведенную в [21, с. 89], предложена модель дефинитивной неопределенности, показанная на рис. 9.

Данная модель показывает взаимосвязи факторов дефинитивной неопределенности для человеческого и машинного зрения и отчасти объясняет проблему невысокого воспроизведения цвета в программно-аппаратных средах.

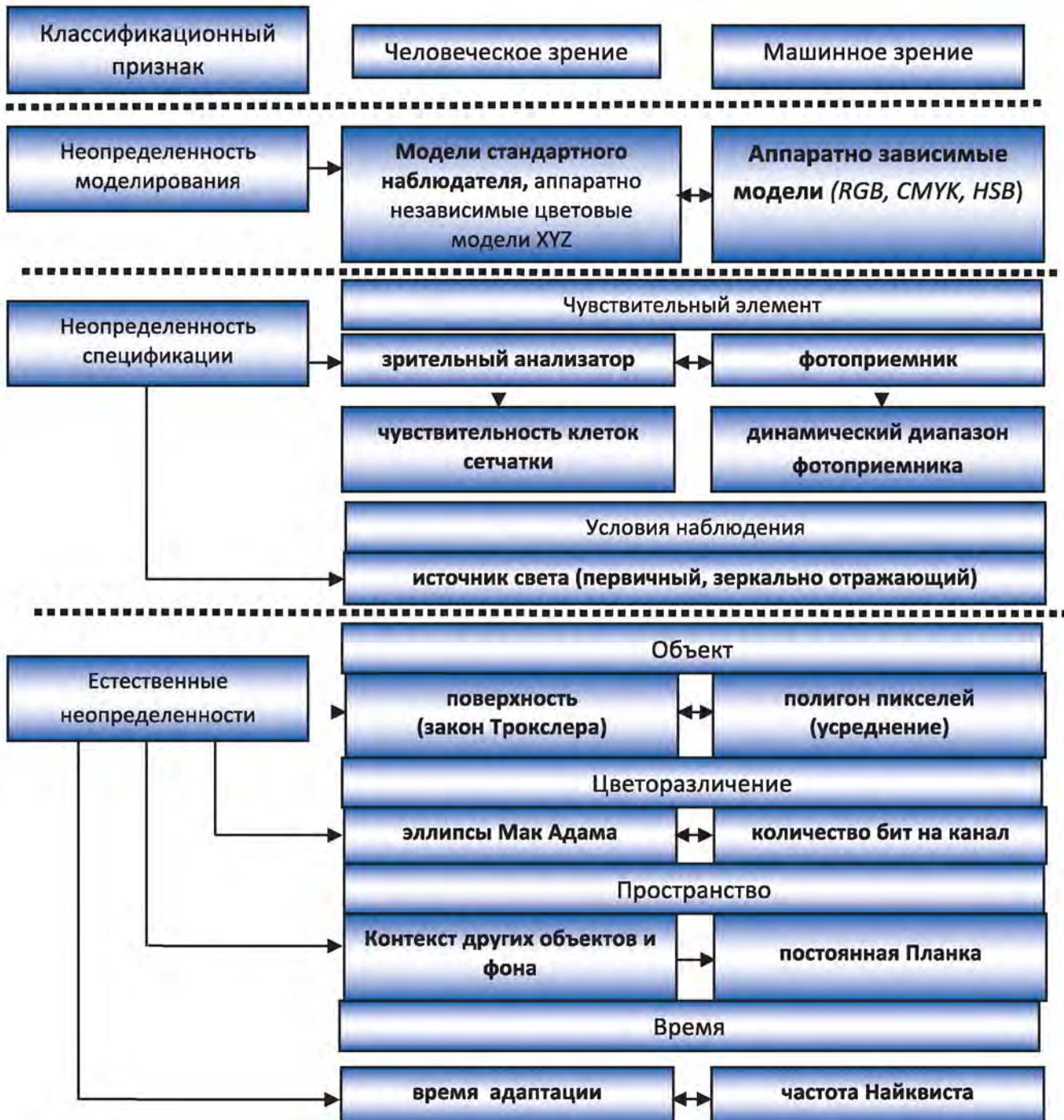


Рисунок 9 – Колориметрическая модель дефинитивной неопределенности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цвет как величина, описываемая многомерными шкалами цветовых стандартизованных пространств, представляет собой пример величины, характеризующейся большой дефинитивной неопределенностью, обусловленной фотобиологической природой учитываемых факторов, их взаимодействием и недостаточностью знаний о ней.

Проблемы, возникающие при передаче цвета в программно-аппаратных средах, частично могут быть устранены путем оптимизации выбора всех «звеньев» информационного канала, участвующих в передаче информации:

1) технических устройств (для решения задач отображения яркости в широком динамическом диапазоне предпочтительны матрицы

с меньшим количеством пикселей, но с большей емкостью);
 2) цветовых моделей (выбор цветовой модели определяется спецификой решаемой задачи: для колориметрии высокого разрешения важна возможность проработки изменений яркости, поэтому эффективной будет модель *Luv*, позволяющая

- сохранять линейность функции яркости на диаграмме цветностей; однако данная модель предполагает введение дополнительного параметра – эталонной точки белого, по которой будет осуществляться нормирование яркости в цветовых каналах);
- 3) форматов передачи видеоданных (для измерительных целей

- оптимальным решением будут форматы *TIFF, RAW, MXF* др.);
- 4) профилирования («независимые» цветовые атласы, представляющие собой референтные пространства, в виде виртуальных мер используемые в передающих устройствах, позволяют выполнять их калибровку, точность которой зависит от корректности алгоритмов).

Довольно часто встречаются ситуации, когда в рекламных целях производители цифровой техники заявляют о возможности воспроизведения нескольких миллионов цветов. Как следует из вышесказанного, эти данные являются неоправданно завышенными, поскольку существует нижний порог, ограниченный дефинитивной неопределенностью цвета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчеты консультативных комитетов Международного комитета мер и весов. Документы 23-й Генеральной конференции мер и весов. – Минск, Белорусский государственный институт метрологии, 2003. – с. 93.
2. Дойников А. С. Презентация РМГ 83–2007 «ГСИ. Шкалы измерений. Термины и определения». Системы обработки информации. Выпуск 4 (71). Харьков: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 2008. С. 6–9.
3. ISO/IEC Руководство 99:2007. Международный словарь по метрологии – Основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM).
4. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.* – ISO, Geneva, First Edition, 1995. – 101 p.: Пер. с англ. – СПб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. – 126 с.: ил.
5. ГОСТ 13088–67. Колориметрия. Термины, буквенные обозначения. – М.: Издательство стандартов. 1967. 12 с.
6. Международный электротехнический словарь. Глава 845. Освещение.
7. ISO 7724-1-2008. Краски и лаки.
8. М. Домасев, С. Гнатюк. Цвет. Управление цветом. Цветовые расчеты и измерения 2009. С. 219. Режим доступа: <http://book.tr200.net/v.php?id=39890>.
9. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. – М. Техносфера, 2008. – 328 с.
10. Зуйков И. Е., Савкова Е. Н. Физическая и математическая модели измерения при автоматизированном контроле колориметрических характеристик объектов. Контроль, диагностика. – Москва: Изд-во «Спектр», № 1, 2010. с. 39–45.
11. Влияние структуры ПЗС-матрицы и расположения цветных фильтров на разрешающую способность изображения Режим доступа: <http://www.fototest.ru/articles/otherarticles/633>.
12. Милчев М. ПЗС-матрицы цифровых фотокамер. Режим доступа: <http://www.wizardfox.net/fototehnika-535/pzs-matricy-cifrovyyh-fotokamer-832>.
13. ISO 11664–1:2007. Колориметрия. Часть 1. Стандартные колориметрические наблюдатели CIE.
14. CIE Processings «Light and Health – non-visual effects» CIE x027:2004.
15. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. – М.: «Мир», 1990. – 239 с.
16. Научная библиотека избранных естественно-научных изданий научная-библиотека РФ. Теорема Котельникова. Режим доступа: http://www.sernam.ru/book_tec.php?id=14.
17. Теория электрической связи: учебное пособие / К. К. Васильев, В. А. Глушков, А. В. Дормидонтов, А. Г. Нестеренко; под общ. ред. К. К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с.
18. Суханов А. Д. Соотношения неопределенностей Шредингера и физические особенности коррелированно-когерентных состояний. Теор. Мат. Физ. Том 132. № 3. (2002). С. 449–468.
19. Суханов А. Д. Соотношения неопределенностей Шредингера для квантового осциллятора в термостате. Теор. Мат. Физ. Том 148. № 2. (2006). С. 295–308.
20. Яне Б. Цифровая обработка изображений. – М: Техносфера, 2007. – 584 с.
21. Захаров И. П., Кукуш В. Д. Теория неопределенности в измерениях. Учеб. пособие: – Харьков: Консум, 2002. – 256 с.