

УДК 006.022

**Е. Н. САВКОВА**, доцент кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы», ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории оптико-электронного приборостроения, Белорусский национальный технический университет, кандидат технических наук  
**А. Г. ДЕМИДОВИЧ**, магистрант кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы», Белорусский национальный технический университет

## СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПОНЯТИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЙ И ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

В статье рассмотрены вопросы стандартизации терминов, характеризующих разрешающую способность цветовосприятий и цветовоспроизведения в колориметрии высокого разрешения. Установлено, что для решения задач визуального и инструментального контроля регламентированы термины, относящиеся к пространственному и временному разрешению. Выявлена необходимость стандартизации терминологии применительно к разрешению по яркости и цвету, поскольку данный параметр влияет на валидационные характеристики методов испытаний – порог обнаружения, чувствительность и робастность.

**Ключевые слова:** колориметрия, цвет, разрешение, цветовосприятие, цветовоспроизведение, порог обнаружения, дискретизация, квантование, кодирование, устройство отображения информации, цифровое изображение.

В настоящее время получает развитие колориметрия высокого разрешения как междисциплинарная область и методология исследований объектов на основе обработки их цифровых изображений, позволяющая повышать эффективность при контроле, анализе и моделировании. В действующих нормативных документах цвет определен как «свойство зрительного восприятия» или «ощущение» [1] и в то же время как «аффинная векторная величина трех измерений» в ГОСТ 13088-67 [2] и, следовательно, может оцениваться качественно и определяться количественно. Поэтому решаемые в колориметрии высокого разрешения задачи качественной и количественной оценки цвета можно разделить на

две группы. К первой группе относятся задачи по исследованию, когда результаты в конечном итоге предназначены и оцениваются непосредственно пользователем (человеком) – многозональный качественный анализ и мониторинг протяженных объектов, текстильная и лакокрасочная промышленность, полиграфия, компьютерный дизайн, моделирование и т. д. Данные ситуации предполагают использование субъективных восприятий, ограничивающихся возможностями зрительного анализатора и шкалами наименований и порядка.

Вторая группа задач основана на количественной оценке и объективном принятии решений посредством автоматизированных экспертных систем, например, в светотехнике, медицине, радиометрии, микро- и нанотехнологиях и объективных восприятиях с применением шкал интервалов, отношений и условных. На рисунке 1 схематически показаны возможные варианты восприятий визуальной информации.



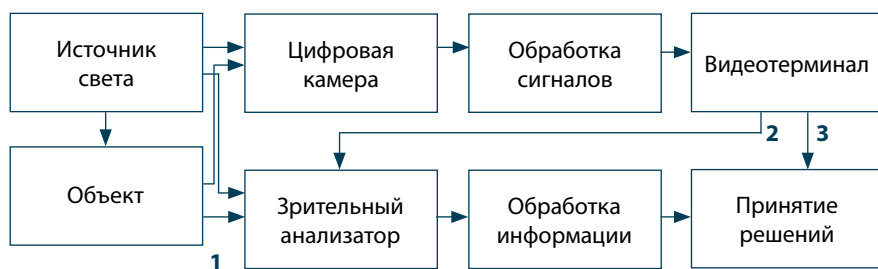


Рисунок 1 – Каналы цветовосприятия

Из рисунка видно, что при визуальном контроле информация воспринимается непосредственно от объекта (канал 1) или его цифрового изображения (канал 2) зрительным анализатором оператора, который в итоге принимает соответствующие решения. Инструментальный контроль (канал 3) предполагает использование автоматизированных систем, позволяющих отстроиться от субъективных восприятий.

При разработке новых методов контроля в колориметрии высокого разрешения необходимо выполнять исследования их валидационных характеристик – порога обнаружения, чувствительности, робастности, линейности, диапазона и др. И в этой связи представляет интерес понятие разрешающей способности при цветовоспроизведении и цветовосприятиях, поскольку данный параметр влияет в конечном итоге на неопределенность идентификации цвета на шкалах цветовых пространств.

### ПОРОГОВЫЕ МОДЕЛИ СУБЪЕКТИВНЫХ ВОСПРИЯТИЙ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ ИХ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ

В процессе наблюдения свет от рассматриваемых объектов попадает на сетчатки глаз и формирует на них изображения, которые представляют собой центральные проекции рассматриваемых объектов. Распределение интенсивностей для

всего спектра видимого излучения по поверхностям сетчаток определяется их характеристиками, положением относительно точки наблюдения, спектральными характеристиками источников освещения, а также положением источников освещения относительно наблюдаемых объектов. Поскольку все

эти параметры могут изменяться в широких пределах, то одному и тому же объекту может соответствовать бесчисленное количество проекций на сетчатках глаз [3]. Так как зрительный анализатор человека часто является окончательным звеном информационного канала при контроле и испытаниях объектов, представляет интерес интерпретация его разрешающей способности с позиций различных нормативных документов. В основу таких определений положены классические модели зрительных восприятий, описывающие закономерности изменения порогов чувствительности от интенсивности стимула, которые были выведены эмпирически путем управления наблюдателем через инструкции экспериментатора. Так, Вебером было установлено, что если увеличивать значение стимула  $I$ , то его приращение  $\Delta I$ , необходимое для достижения порога, пропорционально повышается, что выражается через постоянный коэффициент  $\Delta I/I$  [4].

Согласно ISO 12233-2000 [5] <sup>1</sup> «визуальное разрешение» – пространственная частота, при которой отдельные черные и белые линии контрольного образца, воспроизведенные на дисплее или при печати, не могут быть различимы человеком, или воспроизведенные на пространственной частоте ниже, чем пространственная частота соответствующей области штриховой миры, как результат сглаживания. «Штриховая мира (мира)» –

<sup>1</sup> Принята новая версия ISO 12233:2014 Электронные камеры фотоизображения. Измерение разрешающей способности.

схема расположения контрольных образцов, разработанных для контроля и испытаний определенных элементов системы обработки изображений. Мира содержит вертикальные, горизонтальные и диагональные гиперболические клинья около центра и углов миры, показанные на рисунке 2, которые используются для определения визуального и инструментального разрешения. Чтобы определить визуальное разрешение, изображение штриховой миры воспроизводится на мониторе или печатается бумажная копия, затем визуальное разрешение оценивается субъективно. Значение визуального разрешения не должно превышать предел Найквиста.

Применительно к биометрическим исследованиям глаза человека согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-6-2006 [6] «разрешение» – число элементов изображения (точек) на единицу длины собственной радужной оболочки или ее изображение, определяемое числом точек на миллиметр данного изображения. В соответствии с [5] «пары линий на миллиметр (lp/mm)» – показатель для указания разрешения, исчисляемый количеством пар черных и белых линий одинаковой ширины на миллиметр, которые могут быть разделены в соответствии с некоторым критерием, таким как визуальное разрешение или предельное разрешение.

ТКП 45-2.04-153-2009 [7] устанавливает термин «объект различения» – рассматриваемый предмет, отдельная его часть или дефект, которые требуется различать в процессе работы. Согласно данному документу для протяженных объектов различения, имеющих длину  $a > 2b$ , где  $b$  – ширина объекта, разряд зрительных работ определяется по эквивалентному размеру объекта. В остальных случаях разряд зрительных работ определяется по минимальному размеру объекта

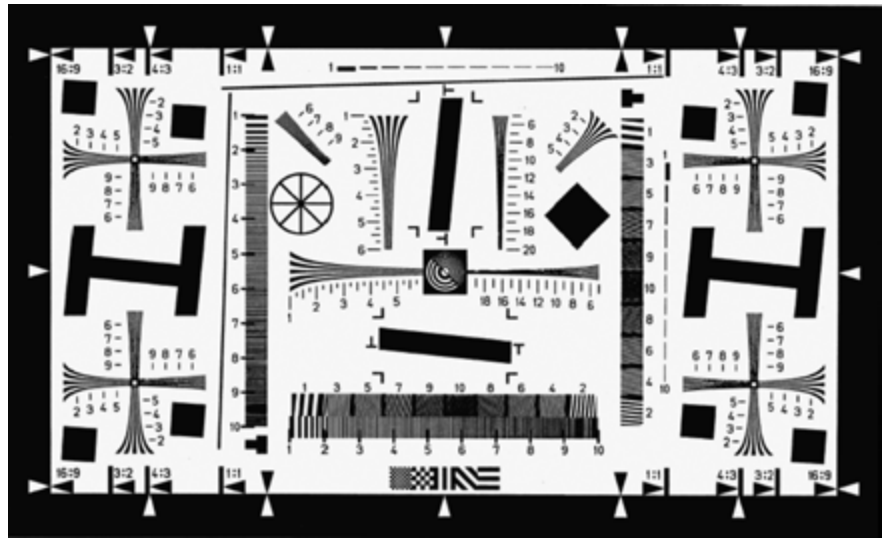


Рисунок 2 – Мира для измерения визуального и инструментального разрешения

различения. При расстояниях от глаза до объекта, меньших 500 мм, эквивалентный размер определяется по номограмме, приведенной на рисунке 3а, при расстояниях, больших 500 мм, по номограмме, представленной на рисунке 3б.

Преобразование полученного по номограмме эквивалентного размера из угловых размеров (угловых минут) в линейные (в миллиметрах) осуществляется по формуле

$$x = t \operatorname{tg}(\alpha/60). \quad (1)$$

ГОСТ 14934-88 [8] регламентирует термины «видимый угловой размер предмета», «угловое разрешение некорригированного глаза» и «угловое разрешение корригированного глаза». «Видимый угловой размер предмета» – угол между прямыми, проведенными из передней угловой точки глаза к крайним точкам предмета. «Угловое разрешение некорригированного глаза» – наименьший угол, под которым некорригированный глаз видит две точки отдельно. «Угловое разрешение корригированного глаза» – наименьший угол, под которым полностью корригированный глаз видит две точки отдельно.

Разрешение глаза зависит от интенсивности стимула – освещения, яркости фона и объекта, положения наблюдателя. Так, закон Вебера – Фехнера устанавливает логарифмическую зависимость



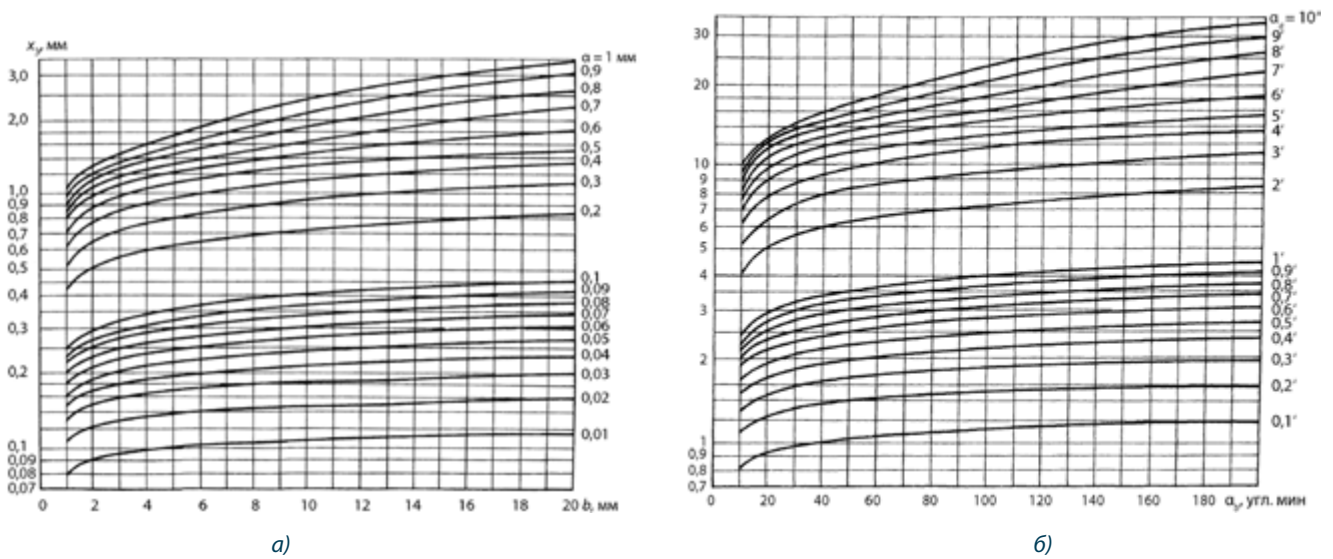


Рисунок 3 – Номограммы для определения эквивалентного размера протяженных объектов различения при расстояниях от глаза до объекта: а) – до 500 мм; б) – более 500 мм

величины восприятия стимула от его физической интенсивности и показывает нелинейную компрессию у верхней границы диапазона (крутой участок кривой на рисунке 3) и объясняет понижение чувствительности при повышении интенсивности стимула [4], [9]:

$$W = k \lg B + c, \quad (2)$$

где  $W$  – светота, выраженная числом порогов  $\Delta L$ ;  
 $k$  и  $c$  – коэффициенты линейного уравнения;  
 $B$  – яркость.

Однако выявленные ограничения и условия несоблюдения закона привели к замене в 1961 г. Стивенсом и в 1964 г. Вышецки его формулой, показывающей степенные зависимости (закон Стивенса) с различными коэффициентами (рисунок 4) [4]:

$$W = 25 B^{1/3} - 17. \quad (3)$$

Высокопороговая модель Блэкуэлла (1953 г.) исходит из классических представлений о пороге как о некоей критической точке в ряду множества значений, в которой стимул вызывает ощущение и описывается «формулой поправки на случайный успех» [10]. В работах Барлоу (1957 г.) утверждается, что зрительный порог  $L_{\text{пор}}$  не является строго фиксированным параметром, он флуктуирует вблизи некоторого среднего значения. Фрископф и Розенблют (1956 г.) показали, что при

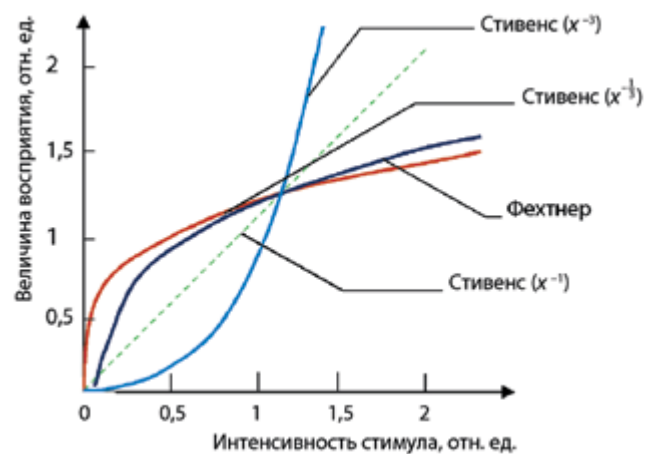


Рисунок 4 – Функции психофизических ответов Фехнера и Стивенса

исследовании зрительных порогов надо также учитывать не только флуктуации поглощаемого потока световых квантов, но и флуктуации в нервных каналах [11]. Для расчета пороговой яркости Мур и Спенсер вывели уравнение [4]

$$L_{\text{пор}} = L_x (0,047 + \sqrt{\Omega}), \quad (4)$$

где  $\Omega$  – телесный угол рассеяния;

$L_x$  – абсолютный световой порог для белого излучения со сплошным спектром.

Было установлено, что  $L_x = L_{\text{пор}/\alpha=50^\circ} = 10^{-6}$  кд/м<sup>2</sup> (где  $\alpha$  – угловой размер тест-объекта). Пороговая яркость  $L_{\text{пор}}$  уменьшается при увеличении угловых

размеров пятна. В области малых телесных углов В. Мешковым выведено эмпирическое уравнение:

$$L_{\text{пор}} \alpha^n = C, \quad (5)$$

где  $n$  и  $C$  – постоянные для определенных областей изменения  $\alpha$ .

Рикко установлено, что при  $n = 2$  пороговый блеск составляет  $(E_{\text{зр}})_{\text{пор}} = 2,06 \cdot 10^{-9}$  лк (закон Рикко), что показывает постоянство порогового блеска точечных источников с угловым размером  $\alpha \leq 15'$  (определяется постоянством площади источника световой точки в пределах кружка рассеяния, возникающего вследствие оптических несовершенств глаза).  $L_{\text{пор}}$  не зависит от размеров светового пятна при  $\Omega \geq 0,5$  ср ( $\alpha \geq 50^\circ$  тест-объекта в виде круга). [7] устанавливает термин «эквивалентный размер объекта различения» – размер равнояркого круга на равноярком фоне, имеющего такой же пороговый контраст, что и объект различения при данной яркости фона.

Исследования же верхнего яркостного зрительного порога затруднены по причине опасностей для наблюдателей, связанных с поражением сетчатки глаза. Однако в работе [12] указаны значения порядка  $L \approx 10^8$  кд/м<sup>2</sup>.

Для обнаружения и опознавания цветности точечного сигнала необходимо повысить блеск огня по сравнению со значением светового порога (исключение – красное излучение с длиной волны, превышающей 0,62 мкм). Бесцветный интервал видимости точечного огня различен для различных участков спектра и имеет максимум для синих излучений с длиной волны 0,46 – 0,48 мкм. На данном участке переход от светового порога к порогу цветоощущения требует увеличения блеска примерно в 500 раз. Установлено, что при рассмотрении непрерывного спектра излучения наиболее заметно изменение цветности в зоне перехода от синего к зеленому цвету с длиной волны примерно 0,49 мкм и в зоне перехода от оранжевого к красному с длиной волны примерно 0,58 мкм, что определяется минимумом порогов цветоразличения по цветовому тону

$\Delta\lambda \approx 1$  нм. Исследования показали, что от 0,42 мкм до 0,66 мкм орган зрения способен различать при благоприятных условиях примерно 100 оттенков по цветовому тону. При яркости объекта более 10 кд/м<sup>2</sup> – около 150 оттенков [4].

Для постоянных яркости и углового размера объекта определен порог различия по чистоте цвета: происходит снижение насыщенности в желтой зоне от 0,55 до 0,58 мкм. Л. Мартином и Ф. Уэбертоном выведено уравнение, показывающее связь цветовой насыщенности  $n$  с пороговой чистотой  $\Delta\rho_{\text{пор}}$  исследуемого цвета на расстоянии одного порога до белого цвета [3]:

$$n = \lg \frac{1}{\Delta\rho_{\text{пор}}}. \quad (6)$$

Значения порогов цветоразличения зависят от уровней яркостей полей сравнения. Уменьшение яркости (в особенности в области сумеречного зрения) до 0,04 кд/м<sup>2</sup> соответствует увеличению порогов различения в 5 – 10 раз. Снижение яркости менее чем до  $3 \cdot 10^{-3}$  кд/м<sup>2</sup> приводит к полному падению цветоразличения.

СТБ ISO 7724-3-2008 [13] и ISO 10545-16:2010 [14] используют понятие цветового различия. Согласно данным стандартам определяют полное цветовое различие, различие насыщенности цвета (хромы) и различие цветовых тонов лакокрасочных покрытий для испытуемого образца и образца сравнения, исходя из координат цветового пространства ( $L^*a^*b^*$ ). Например, полное цветовое различие двух цветов представляет собой геометрическое расстояние между положениями точек, соответствующих этим цветам на диаграмме цветности в цветовом пространстве ( $L^*a^*b^*$ ), и его рассчитывают по формуле

$$\Delta E_{ab}^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\Delta L^* = L_T^* - L_R^*$ ;  $\Delta a^* = a_T^* - a_R^*$ ;  $\Delta b^* = b_T^* - b_R^*$ ;

$L_T^*, a_T^*, b_T^*$  – координаты цвета испытуемого образца;

$L_R^*, a_R^*, b_R^*$  – координаты цвета образца сравнения.



Цветовые различия определяют аппаратурно (с помощью средств измерений), тем не менее в работе [15] установлено: «чтобы глаз мог заметить разницу между цветами, необходимо отклонение  $\Delta E_{*}^{*} = 1$ , однако на практике  $\Delta E_{*}^{*} = 5$ ». На базе приведенных лишь некоторых классических моделей разрабатываются современные модели восприятий, систематизированно рассмотренные в [16]. Таким образом, анализ действующих нормативных документов

показал, что применительно к разрешающей способности субъективных восприятий в настоящее время определены термины, характеризующие лишь пространственное разрешение, а термины, относящиеся к порогам различения яркости, освещенности и цвета, широко используемые в литературе, не стандартизованы.

*Продолжение статьи в следующем номере журнала*

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Международный электротехнический словарь. Глава 845. Освещение.
- [2] ГОСТ 13088-67 «Колориметрия. Термины, буквенные обозначения».
- [3] Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений // Учеб. пособие. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 608 с.
- [4] Мешков В. В., Матвеев А. Б. Основы светотехники. // Учеб. пособие для вузов: В 2-х частях. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.
- [5] ISO 12233:2000 «Фотография. Электронные камеры фотоизображения. Измерение разрешающей способности».
- [6] ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-6-2006 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 6. Данные изображения радужной оболочки глаза».
- [7] ТКП 45-2.04-153-2009 «Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования».
- [8] ГОСТ 14934-88 «Офтальмологическая оптика. Термины и определения».
- [9] Светс Дж., Таннер В., Бердсолл Т. Статистическая теория решений и восприятия // Инженерная психология. – М. : Прогресс, 1964. – С. 269 – 335.
- [10] Blackwell H. Contrasts thresholds of the human eye // JOSA. 1946. Vol.36 № 10. P 624.
- [11] Rosenblueth A., Wiener N. // Вопросы философии, 1963, No 10; The role of models in science, «Philos».
- [12] Л. Р. Ронки. Сопоставление некоторых представлений светотехники и науки о зрении. Светотехника, 2012. № 4. – С. 26 – 31.
- [13] СТБ ISO 7724-3-2008 «Краски и лаки. Колориметрия. Часть 3. Расчет цветовых различий».
- [14] ISO 10545-16: 2010 «Плитка керамическая. Часть 16. Определение небольших различий по цвету».
- [15] Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 752 с.
- [16] Фершильд М. Д. Модели цветового восприятия. 2-я редакция. // Рочестерский технологический институт Манселловская научная лаборатория по цвету, 2006. – 439 с.

### SUMMARY

**E. N. Savkova, A. G. Demidovich**

The terms standardization questions describing the colour resolution of reproduction in high-resolution colorimetry are showed in article. Installed, that to solve problems of visual and instrumental monitoring regulated terms related to spatial and temporal resolution. The need for standardization of terminology in relation to the resolution of brightness and colour, as this parameter affects the validation characteristics test methods – detection threshold, sensitivity and robustness due to the need.

Поступила в редакцию 23.11.2014