

Установка для экспериментальных исследований монохроматических порогов зрительной системы человека

Г.В. БООС, А.А. ГРИГОРЬЕВ*, В.А.РЫБИНА

НИУ «МЭИ», Москва

*E-mail: aag.2010@yandex.ru

Аннотация

На основе статистической теории порогового цветового зрения человека разработана методика определения удельных координат цвета физиологической системы КЗС. Для реализации разработанной методики создана установка для экспериментальных исследований, позволяющая определять пороговые характеристики зрительной системы при наблюдении монохроматических объектов на цветных фонах. Исследованы погрешности экспериментальной установки и алгоритма решения системы нелинейных уравнений, позволяющего по результатам эксперимента определять удельные координаты цвета физиологической системы КЗС.

Ключевые слова: функции сложения, дихроматы, трихроматы, статистическая теория, пороговые характеристики зрения, обнаружение объектов, установка для экспериментальных исследований.

Введение и постановка задачи

Чувствительности К-, З-, С-рецепторов могут использоваться как для традиционных расчётов координат цвета в системе КЗС, так и для учёта цветовой адаптации при расчёте индексов цветопередачи источников света. Соответственно, любая неточность в их определении приводит к погрешностям в цветовых расчётах. Традиционный метод определения этих чувствительностей основан на экспериментах по уравниванию цветностей излучений дихроматами. Методика проведения таких исследований и результаты экспериментов с использованием дихроматов были опубликованы Ньюбергом и Юостовой в 1948 г. [1]. В 2006 г. технический комитет МКО *ТС 1–36* опублико-

вал доклад [2] (далее называемый *СIEP006*, аббревиатура *CIE2006 physiological observer*) о выборе набора функций сложения (*CMFs*, аббревиатура *colour-matching functions*) и оценках фундаментальных параметров колбочек (*cone fundamentals*, под которыми авторы подразумевают функции спектральной чувствительности рецепторов глаза, измеренные в плоскости роговицы) для наблюдателя с нормальным цветовым зрением.

Модель *СIEP006* во многом основана на работах Стокмана и Шарпа [3, 4]. Экспериментальные исследования в работе [5] проводились по методике, приводящей к изоляции одного из типов колбочек, с привлечением в качестве наблюдателей вместо трихроматов дихроматов.

В 2019 г. Стокманом [6] опубликована матрица перехода из системы *CMFs* в *XYZ*. На рис. 1 в относительных единицах представлены функции сложения систем согласно *СIEP006*, полученные с использованием дихроматов, отобранных на основе теста ДНК и по Юостовой, использовавшей обычных дихроматов. Видно, что кривые, полученные разными методами, с разным набором наблюдателей хорошо совпадают, что указывает на надёжность полученных результатов, но **это относится именно к дихроматам**.

Сомнения по поводу правомерности подхода с использованием дихроматов вместо трихроматов по-прежнему остаются, поскольку функции сложения зрительной системы человека (ЗС) определяются не только чувствительностью колбочек, которую можно отследить по тестам ДНК. Ощущения яркости и цветности предметов у человека появляются не на выходе рецепторов, а после обработки их сигналов головным мозгом, алгоритм которой (пока неизвестный) может быть существенно разным у трихроматов, обрабатывающих сигналы трёх приёмников, и дихроматов, у которых один приёмник отсутствует,

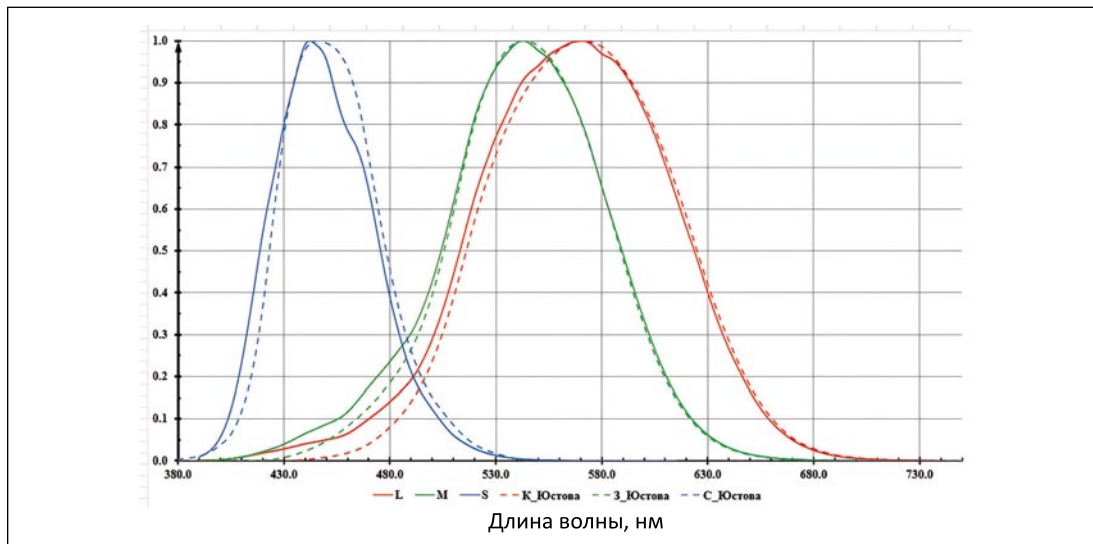
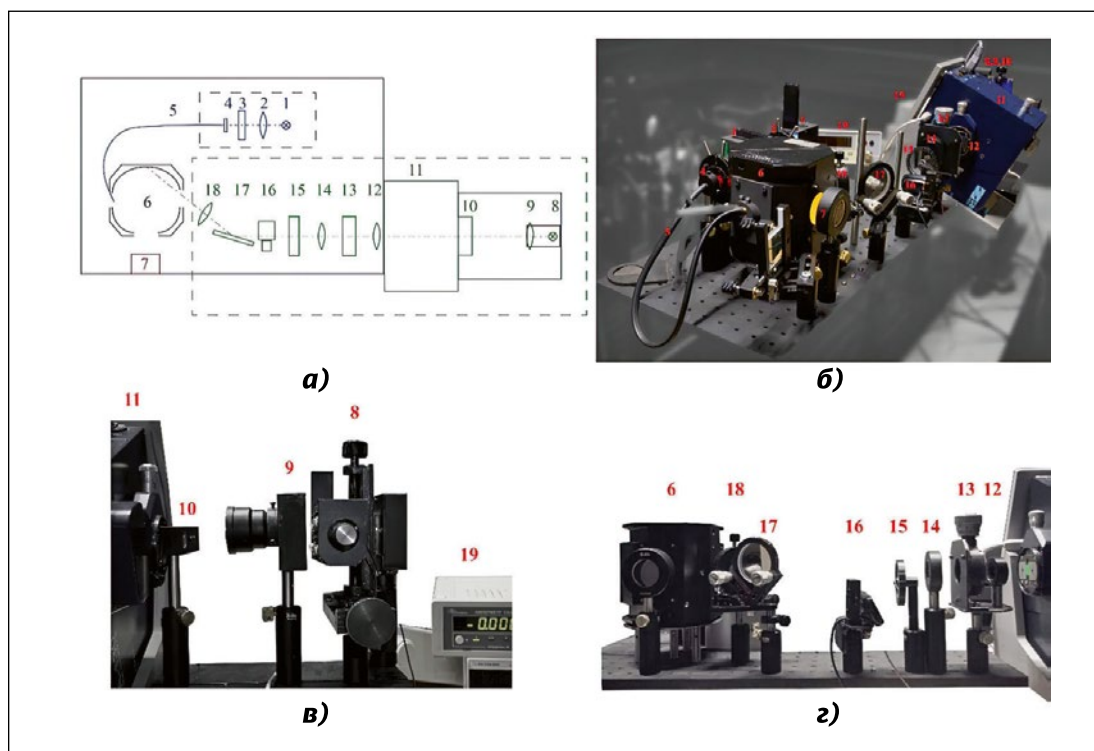


Рис. 1. Функции сложения по Е.Н. Юостовой [1] и Э. Стокману [6] при использовании дихроматов в качестве наблюдателей

Рис. 2. Установка для экспериментальных исследований: а – структурная схема; б – внешний вид основных узлов; в – узел осветителя канала объекта; г – узел формирования и регулировки яркости объекта



а цветовое восприятие сохраняется. Для подтверждения или опровержения высказанных сомнений необходимо было: 1) разработать методику определения удельных координат цвета трихроматов в условиях их естественной световой и цветовой адаптации; 2) разработать, собрать, отградуировать установку для экспериментальных исследований и создать программное обеспечение, реализующее разработанную методику; 3) оценить погрешность получаемых на созданной установке экспериментальных и расчётных результатов определения удельных координат цвета $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$.

Методика определения удельных координат цвета

В статьях [7–9] на основе статистического подхода к обнаружению объектов ЗС сформулированы и частично решены основные задачи по созданию математической теории порогового цветового зрения. Рассмотрение пороговых условий наблюдения обусловлено тем, что это первый, наиболее простой уровень зрительной задачи при описании которого достижимо хорошее совпадение результатов расчёта по статистическим моделям с результатами экспериментальных исследований. При этом важно, что решение удаётся получать при произвольном постоянном алгоритме принятия решений, даже если сам алгоритм неизвестен. На продуктивность такого подхода указывают плохие результаты сочетания статистических моделей с фиксированными алгоритмами обработки сигналов – «максимальной апостериорной вероятности (МАР)», «минимальной оценки среднеквадратической ошибки (ММSE)» и др. [10] – со сложными надпороговыми условиями, где ЗС использует другие, неизвестные пока алгоритмы.

Для малоконтрастных изображений в области Вебера-Фехнера было получено выражение, определяющее вероятность обнаружения равномерного цветного объекта на равномерном цветном фоне $P_{об}$, [8]:

$$P_{об} = \Phi(y), \quad (1)$$

где

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt - \text{интеграл вероятности};$$

$$y = \frac{C_0 m_{\Lambda} - \frac{\ln \Lambda_{п}}{2}}{\sqrt{m_{\Lambda}}};$$

$\Lambda_{п}$ – пороговое отношение правдоподобия, определяющее критерий принятия решения в статистической модели «оптимального приёмника изображения» [7]; с доверительной вероятностью 0,95 было определено [9], что $\ln(\Lambda_{п}) = 4,0$;

$$m_{\Lambda} = C_{1к} \left(\frac{\int_{380}^{780} \Delta L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{k}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L_{e\lambda\phi}(\lambda) \bar{k}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_{1з} \left(\frac{\int_{380}^{780} \Delta L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L_{e\lambda\phi}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_{1с} \left(\frac{\int_{380}^{780} \Delta L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{c}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L_{e\lambda\phi}(\lambda) \bar{c}(\lambda) d\lambda} \right)^2; \quad (1)$$

$\Delta L_{e\lambda o}(\lambda) = L_{e\lambda o}(\lambda) - L_{e\lambda\phi}(\lambda)$ – перепад спектральных плотностей энергетических яркостей объект-фон; $L_{e\lambda o}(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости излучения объекта; $L_{e\lambda\phi}(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости излучения фона; $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ – удельные координаты цвета колориметрической системы КЗС;

$C_0, C_{1к}, C_{1з}, C_{1с}$ – постоянные коэффициенты статистической модели, не зависящие от λ и в области Вебера-Фехнера – от яркости. Они зависят от индивидуальных характеристик ЗС (наблюдателя) и определяются при нормировке статистической модели.

Неопределёнными функциями математической модели являются $\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$, и получить их на основе выражения (1) не представляется возможным, т.к. одна и та же вероятность обнаружения может получаться при разных значениях этих функций. Задача существенно упрощается рассмотрением порогового обнаружения монохроматических объектов на произвольном цветном (в частности, белом) фоне. В этом случае, поскольку аргумент u в выражении (1) равен нулю, из него следует выражение

$$C_{1к} \left(\frac{L_e^i(\lambda) \bar{k}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{с\lambda\phi}(\lambda) \bar{k}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_{1з} \left(\frac{L_{сo}^i(\lambda) \bar{z}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{с\lambda\phi}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_{1с} \left(\frac{L_{сo}^i(\lambda) \bar{c}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{с\lambda\phi}(\lambda) \bar{c}(\lambda) d\lambda} \right)^2 = \frac{\ln \Lambda_n}{2C_0}. \quad (2)$$

При введении обозначений $C_1 = \sqrt{\frac{\ln \Lambda_n}{2C_0 C_{1с}}}$, $C_2 = \frac{C_{1к}}{C_{1с}}$, $C_3 = \frac{C_{1з}}{C_{1с}}$, из (2) следует выражение для порогового перепада энергетической яркости объект-фон $L_{сo}^n(\lambda)$, (3).

Определение $\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$ из (3) традиционным образом – путём решения системы n уравнений, (4), невозможно, поскольку: 1) для расчёта $L_{сo}^n(\lambda)$ по (3) необходимы три значения $-\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$, т.е. число неизвестных в системе уравнений (4) всегда втрое больше числа уравнений; 2) для вычисления интегралов, входящих в эту систему, необходимо знать искомые функции $\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$ во всей видимой области спектра, а они в начале расчёта неизвестны.

Решение было найдено путём анализа возможных видов функций $\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$. Анализ данных, приведённых в [11, 12], показал, что $\bar{z}(\lambda)$ – чётная функция с одним максимумом, а $\bar{k}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$ – несимметричные функции с одним максимумом. Предварительные расчёты показали, что наилучшие результаты (при минимальных значениях неизвестных коэффициентов) получаются при аппроксимации $\bar{z}(\lambda)$ квадратичной экспонентой с неизвестными положениями максимума и значением полуширины, а $\bar{k}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$ – квадратичными экспонентами с неизвестными

максимумами и с полуширинами, разными в коротковолновой и длинноволновой относительно максимумов частях спектра. Погрешность аппроксимации такими функциями всех известных зависимостей $\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$ [1, 6, 9, 11, 12] не превышает 1 %, что намного меньше естественного разброса характеристик наблюдателей в 15–25 %. Поскольку, как ранее отмечалось [8], отношение правдоподобия не зависит от максимальных значений $\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$, в систему уравнений (4) будет входить (с учётом C_1-C_3) одиннадцать неизвестных, что делает эту систему решаемой при числе экспериментальных значений $L_{сo}^n(\lambda)$, не меньшем 11. Для реализации этой части разработанной методики была создана установка для определения порогов обнаружения наблюдателем монохроматических объектов $L_{сo}^n(\lambda)$ на цветных (в том числе и белых) фонах. Анализ методик получения пороговых характеристик ЗС [11, 12] показал, что наименее трудоёмок метод «минимальных изменений», который и был выбран в базовым в разработанной установке.

Установка для экспериментальных исследований

Описание установки

Установка собрана на двух оптических плитах с максимальным использованием стандартных узлов крепления и перемещения оптических деталей фирм *Cobra-Optics*, «Специальные системы» и др. Установка (рис. 2) содержит следующие узлы: канал формирования излучения фона 1–5; канал формирования изображения объекта 8–18; интегрирующая сфера 6, объединяющая излучения обоих этих каналов, и окуляра 7, служащего для наблюдения изображения объекта на стенке интегрирующей сферы 6.

Излучение в канале фона создаётся белым светодиодом 1 фирмы *Cree* мощностью 5 Вт с коррелированной цветовой температурой $T_{кцп}$ 4800 К, спектральная характеристика которого представлена на рис. 3. Излучение светодиода собирается объективом *YUCON NVMТ 50* мм 2 с относительным отверстием 1:1,4, проходит блок цветных светофильтров 3 и собирается на входном торце осветительного волоконно-оптического жгута типа О-С диаметром 5 мм 4 производства АО «ЛЗОС», а с его выходного торца 5 излучение канала фона передаётся в интегрирующую сферу *UKU120* фирмы *Opsira (CZL)* 6, диаметром 120 мм.

Расчёт показал, что белый светодиод в канале объекта, даже при мощности 20 Вт, не обеспечивает нужный поток излучения на краях видимого диапазона спектра, и потому в качестве источников излучения выбрано 6 цветных светодиодов фирмы *Cree* мощностью по 5 Вт, спектры излучения которых приведены на рис. 3. Светодиоды расположены в два ряда на вертикальной плате с механизмом перемещения 8, позволяющим устанавливать любой из светодиодов на оптической оси объектива 9 с относительным отверстием 1:1 и фокусным расстоянием 37 мм.

$$L_{сo}^n(\lambda) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{k}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{с\lambda\phi}(\lambda) \bar{k}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{z}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{с\lambda\phi}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\bar{c}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{с\lambda\phi}(\lambda) \bar{c}(\lambda) d\lambda} \right)^2}}. \quad (3)$$

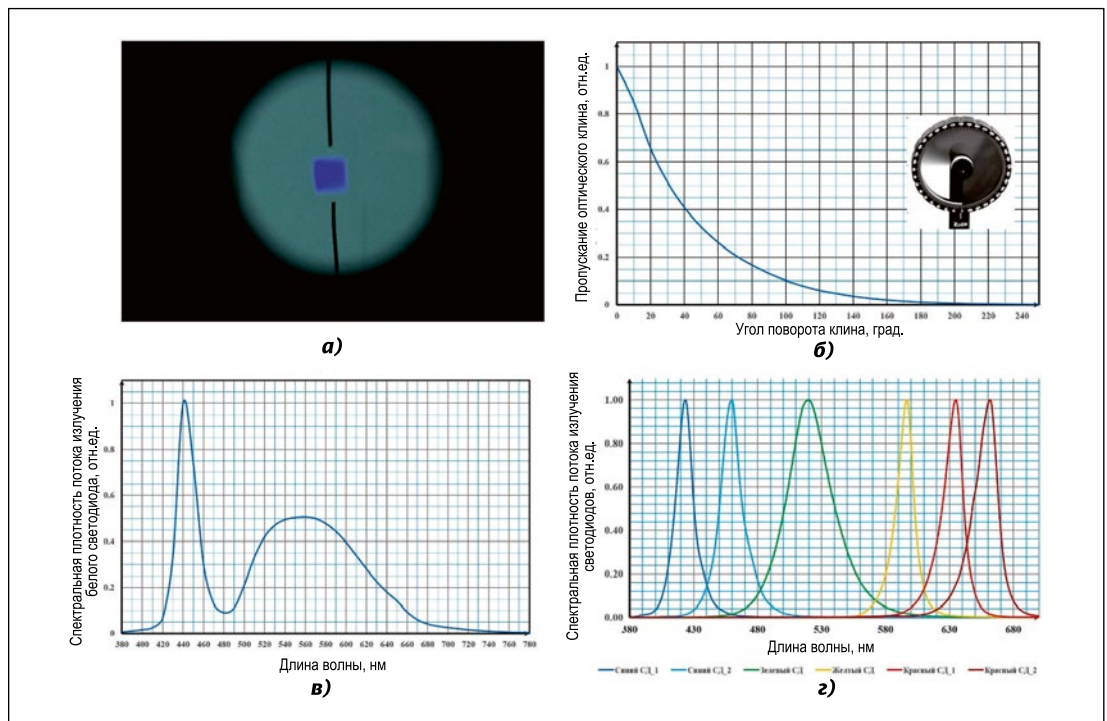
$$L_{\text{co}}^n(\lambda_1) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{K}(\lambda_1)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\phi}(\lambda)\bar{K}(\lambda)d\lambda} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{Z}(\lambda_1)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\phi}(\lambda)\bar{Z}(\lambda)d\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\bar{c}(\lambda_1)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\phi}(\lambda)\bar{c}(\lambda)d\lambda} \right)^2}},$$

$$L_{\text{co}}^n(\lambda_2) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{K}(\lambda_2)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\phi}(\lambda)\bar{K}(\lambda)d\lambda} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{Z}(\lambda_2)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\phi}(\lambda)\bar{Z}(\lambda)d\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\bar{c}(\lambda_2)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\phi}(\lambda)\bar{c}(\lambda)d\lambda} \right)^2}},$$

$$\dots$$

$$L_{\text{co}}^n(\lambda_n) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{K}(\lambda_n)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\phi}(\lambda)\bar{K}(\lambda)d\lambda} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{Z}(\lambda_n)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\phi}(\lambda)\bar{Z}(\lambda)d\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\bar{c}(\lambda_n)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\phi}(\lambda)\bar{c}(\lambda)d\lambda} \right)^2}} \quad (4)$$

Рис. 3. Характеристики элементов установки для экспериментальных исследований: а – вид изображения через окуляр 7; б – зависимость коэффициента пропускания оптического клина от угла поворота относительно оси; в – спектр излучения белого светодиода канала фона; г – спектры излучения цветных светодиодов канала объекта



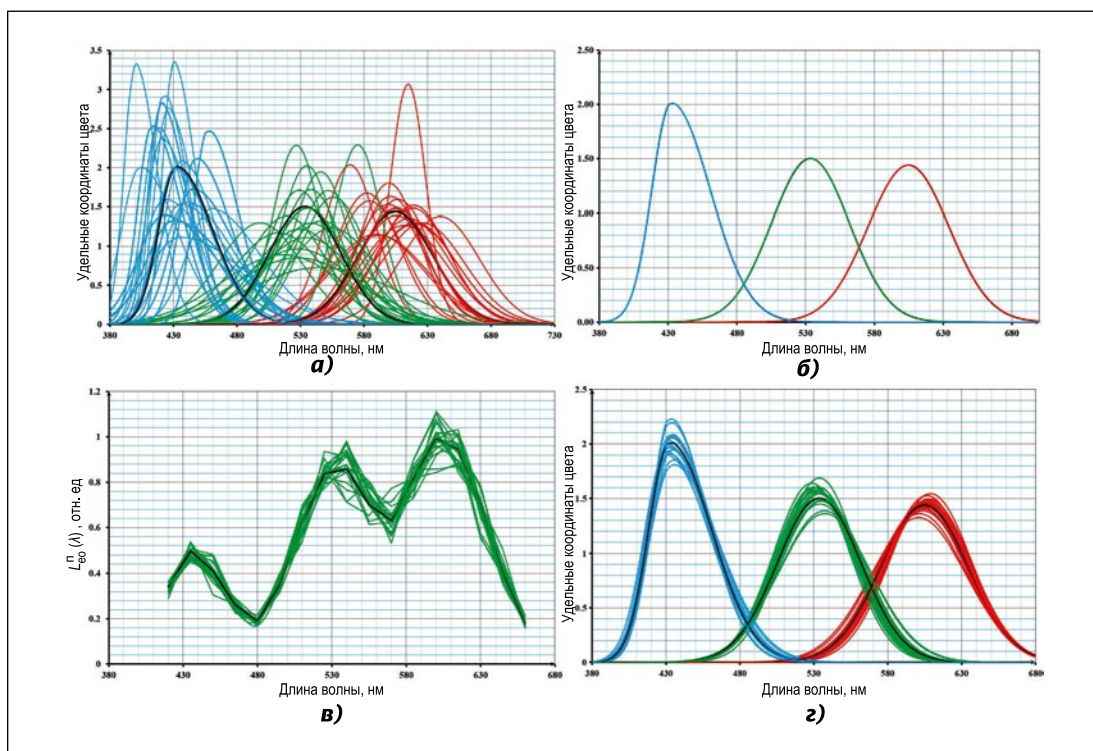
Изображение излучающей площадки светодиода после прохождения электромеханического затвора 10 строится объективом 9 на входной щели двойного монохроматора 11 MSA-130 фирмы TOPAG Lasertechnik GmbH с дифракционными решётками 600 штр./мм, работающим в режиме вычитания дисперсий. Монохроматическое излучение с выходной щели монохроматора посредством конденсора 12 освещает оптическую щель 13 SXM-1 фирмы SOLAR Laser Systems, формирующую размеры наблюдаемого объекта (2° на выходе окуляра 7). Оптика переноса 14 освещает оптический клин OMMB-NDFC50 15 фирмы «Специальные системы» (рис. 3), плавно регулирующий

яркость объекта. Осветитель с телекамерой 16 обеспечивают считывание шкалы оптического клина. Объектив 18 совместно с поворотным зеркалом 17 строит изображение объекта на стенке интегральной сферы 6. Вид сформированного изображения, наблюдаемого через окуляр 7 представлен на рис. 3. Вертикальные ориентирующие маркеры и затвор 10 уменьшают дисперсию ответов наблюдателей, связанную с поиском объекта в поле зрения и во время его наблюдения, что уменьшает погрешность измерений.

Градуировка установки

Для уменьшения погрешности установки относительные измерения всех спектральных характеристик её эле-

Рис. 4. Результаты расчёта с разбросом σ_k , σ_3 , σ_c в 11 нм и разбросом $\lambda_{км}$, $\lambda_{зм}$, $\lambda_{см}$ в 16 нм при $\sigma_L = 0$ (а, б) и 7,5 (в, г)%. Чёрным выделены тестовые графики



ментов проводились на выходе установки (после окуляра (7)) с помощью монохроматора ЛОМО МДР-206 с дифракционной решёткой 1200 штр./мм и приёмным устройством с кремниевым фотодиодом для диапазона 200–1100 нм (с погрешностью $\pm 0,5$ нм). Измеренные спектральные характеристики элементов установки представлены на рис. 3. Абсолютная калибровка установки проводилась посредством PIN-фотодиода *SD444-12-12-171*, откалиброванного во «ВНИИОФИ» по абсолютной токовой чувствительности в диапазоне 300–1100 нм. Для питания светодиодов установки использовались стабилизированные источники питания *QJ3005C*, а контроль за режимами их питания проводился с помощью цифровых амперметров *CA3010/3-000* (класса точности 0,1) 19. Для контроля за яркостью (световой) на выходе окуляра 7 использовался яркомер *Konica Minolta LS-110*.

На основе расчёта и многократных измерений (свыше 20 повторных измерений спектральных и световых характеристик) было установлено, что погрешность воспроизведения $L_{co}^n(\lambda)$, $L_{сф}^n(\lambda)$ и яркости фона на выходе окуляра 7 не превышает 7%.

Программное обеспечение и погрешности расчётов

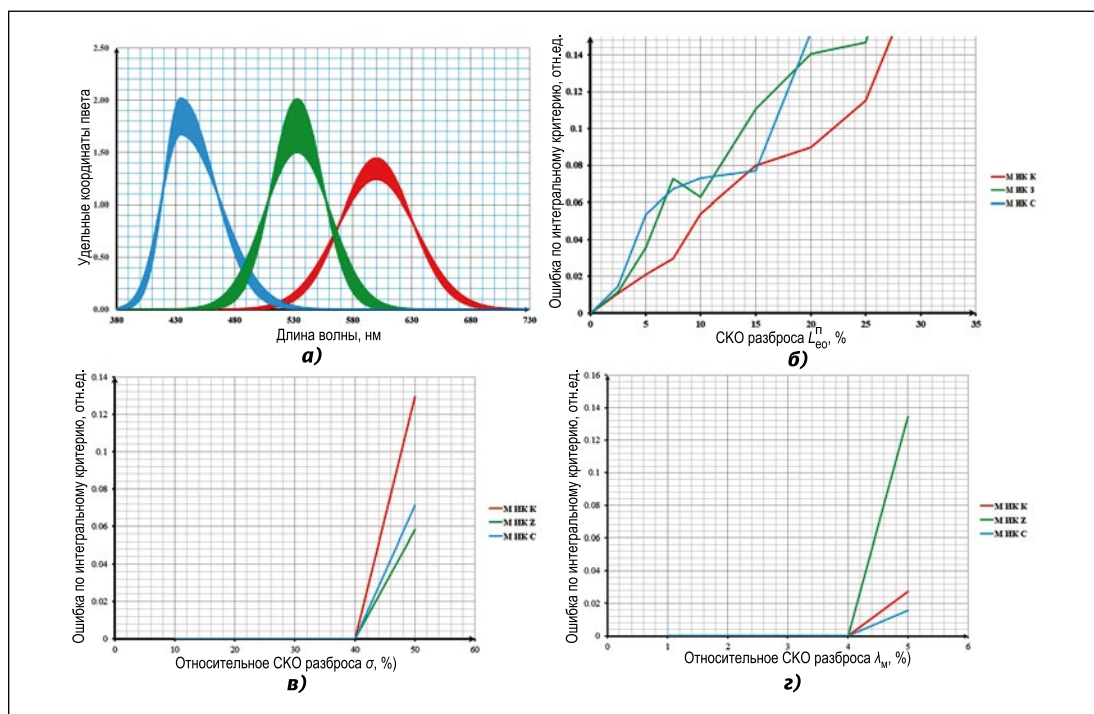
Для реализации второй части методики определения $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$, путём решения системы нелинейных уравнений (4), была создана программа решения этой системы методом «наименьших квадратов» [13]. Учитывая, что левая часть (4) определяется с неизбежной погрешностью, требовалось определить допустимую погрешность измерения $L_{co}^n(\lambda_i)$, в системе (4), и допустимые отклонения начальных оценок $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ от их истинных значений, обеспечивающих сходимость метода «наименьших квадратов» к истинным значениям $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$. В качестве тестовых $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ использовались полученные в [9] и аппроксимированные как

$$\begin{aligned} \bar{k}(\lambda) &= \frac{f_k(\lambda)}{2} \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{км})}{\sigma_k} \right]^2 \right\} + \\ &+ \frac{1 - f_k(\lambda)}{2} \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{км})}{C_k \sigma_k} \right]^2 \right\}, \\ \bar{z}(\lambda) &= \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{зм})}{\sigma_3} \right]^2 \right\}, \\ \bar{c}(\lambda) &= \frac{f_c(\lambda)}{2} \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{см})}{\sigma_c} \right]^2 \right\} + \\ &+ \frac{1 - f_c(\lambda)}{2} \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{см})}{C_c \sigma_c} \right]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\lambda_{км}$, $\lambda_{зм}$, $\lambda_{см}$ – длины волн, на которых функции достигают максимумов; σ_k , σ_3 , σ_c – параметры, определяющие полуширину функций; $f_k(\lambda)$ и $f_c(\lambda)$ – функции, равные единице, соответственно, при $\lambda < \lambda_{км}$ и $\lambda < \lambda_{см}$ и нулю в противоположных случаях.

Проведены исследования влияния погрешности определения $L_{co}^n(\lambda_i)$ на погрешность определения параметров $\lambda_{км}$, $\lambda_{зм}$, $\lambda_{см}$ и σ_k , σ_3 , σ_c при случайном разбросе тестовых оценок $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$. Разброс значений $L_{co}^n(\lambda_i)$ и начальных оценок $\lambda_{км}$, $\lambda_{зм}$, $\lambda_{см}$ и σ_k , σ_3 , σ_c проводился по нормальному закону распределения с разными среднеквадратическими отклонениями (СКО) от их тестовых значений. Затем решалась система уравнений (4) и определялись расчётные (р) функции $\bar{k}_p(\lambda)$, $\bar{z}_p(\lambda)$, $\bar{c}_p(\lambda)$, определяемые выражениями (5), после чего рассчитывались погрешности отклонения $\lambda_{км}$, $\lambda_{зм}$, $\lambda_{см}$ и σ_k , σ_3 , σ_c от их тестовых значений, а также интегральный критерий отличия функций, определяемый (для $\bar{k}(\lambda)$) как

Рис. 5. Подынтегральные функции интегрального критерия при ошибке в определении $\sigma_k, \sigma_3, \sigma_c$ (а). Зависимости интегральной ошибки аппроксимации $f_{\text{инт}}^k(\sigma_L)$ (М И К К), $f_{\text{инт}}^3(\sigma_L)$ (М И К З) и $f_{\text{инт}}^c(\sigma_L)$ (М И К С) от σ_L (б). СКО разброса начальных оценок $\sigma_k, \sigma_3, \sigma_c$ (в). СКО разброса начальных оценок $\lambda_{\text{км}}, \lambda_{\text{зм}}, \lambda_{\text{см}}$ (з).



$$f_{\text{инт}}^k(\sigma_L) = \frac{\int_{380}^{780} |\bar{k}(\lambda) - \bar{k}_p(\lambda)| d\lambda}{\int_{380}^{780} \bar{k}(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

где $\bar{k}_p(\lambda)$ и $\bar{k}(\lambda)$ – расчётная и тестовая функции $\bar{k}(\lambda)$; $\sigma_L = \frac{\sigma_L}{L_{\text{co}}^n(\lambda)}$ – относительное СКО разброса тестовых значений $L_{\text{co}}^n(\lambda)$.

Функции $f_{\text{инт}}^3(\sigma_L)$ и $f_{\text{инт}}^c(\sigma_L)$ для $\bar{z}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$ вычисляются аналогично.

На рис. 4, а представлены 20 начальных оценок $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ при разбросе $\sigma_k, \sigma_3, \sigma_c$ в 30 % (в среднем 11 нм) и разбросе $\lambda_{\text{км}}, \lambda_{\text{зм}}, \lambda_{\text{см}}$ в 3 % (в среднем 16 нм), а на рис. 4, б – графики функций $\bar{k}_p(\lambda)$, $\bar{z}_p(\lambda)$, $\bar{c}_p(\lambda)$, полученных по уравнениям (4) при $\sigma_L = 0$.

Поскольку все 20 решений совпадают, то сходимость метода «наименьших квадратов» в этом случае – не ниже 95 %. При появлении погрешности в исходных значениях $L_{\text{co}}^n(\lambda_i)$ функции $\bar{k}_p(\lambda)$, $\bar{z}_p(\lambda)$, $\bar{c}_p(\lambda)$ определяются неточно. На рис. 4, в представлены 20 графиков $L_{\text{co}}^n(\lambda_i)$, полученных при $\sigma_L = 7,5$ %, а на рис. 4, з – 20 графиков $\bar{k}_p(\lambda)$, $\bar{z}_p(\lambda)$, $\bar{c}_p(\lambda)$, соответствующих этим $L_{\text{co}}^n(\lambda_i)$. На рис. 5, а представлены графики подынтегральных функций выражения (6).

Были исследованы зависимости погрешностей определения параметров $\lambda_{\text{км}}, \lambda_{\text{зм}}, \lambda_{\text{см}}$ и $\sigma_k, \sigma_3, \sigma_c$, а также интегральных критериев $f_{\text{инт}}^k(\sigma_L)$, $f_{\text{инт}}^3(\sigma_L)$, $f_{\text{инт}}^c(\sigma_L)$ от СКО разброса параметров начальных оценок и σ_L . Результаты соответствующих расчётов представлены на рис. 5, б–з. Они показали, что погрешности определения параметров $\lambda_{\text{км}}, \lambda_{\text{зм}}, \lambda_{\text{см}}$ и $\sigma_k, \sigma_3, \sigma_c$ монотонно связаны с интегральными критериями $f_{\text{инт}}^k(\sigma_L)$, $f_{\text{инт}}^3(\sigma_L)$, $f_{\text{инт}}^c(\sigma_L)$, и потому приведены только графики интегральных критериев ошибок.

Обсуждение полученных результатов

Наиболее существенно на погрешность определения $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ влияет погрешность измерения $L_{\text{co}}^n(\lambda_i)$. Слабее всего эта погрешность влияет на определение $\bar{k}(\lambda)$. Для $\bar{z}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$, при погрешности определения $L_{\text{co}}^n(\lambda_i)$ в 12 % значения $f_{\text{инт}}^3(\sigma_L)$ и $f_{\text{инт}}^c(\sigma_L)$ превышают 7,5 %.

Неточность в задании начальных оценок $\sigma_k, \sigma_3, \sigma_c$ даже в 40 % (около 15 нм) и $\lambda_{\text{км}}, \lambda_{\text{зм}}, \lambda_{\text{см}}$ в 4 % (около 21 нм) не приводит к срыву сходимости метода «наименьших квадратов» и неточности определения $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$. Значения всех интегральных критериев ошибок в этом случае не превышают ошибок округления.

Для проверки работоспособности созданных методики и установки был проведён пробный эксперимент на трёх тренированных наблюдателях, который показал высокую чувствительность методики, позволяющей определять индивидуальные отличия их удельных координат цвета. Средние значения параметров аппроксимации по выражениям (5) для трёх наблюдателей таковы: $\lambda_{\text{км}} = 601,3$ нм, $\sigma_k = 45,25$ нм, $C_k = 1,037$; $\lambda_{\text{зм}} = 542,2$ нм, $\sigma_3 = 41,2$ нм; $\lambda_{\text{см}} = 441,9$ нм, $\sigma_c = 25,2$ нм, $C_c = 1,19$. Разумеется это только предварительные результаты, для окончательных выводов необходимо исследовать большее число наблюдателей по разработанной методике. Это позволит выяснить возможность согласования полученных результатов с международной системой XYZ.

Дискуссия

Измерением координат цвета в надпороговых условиях занимались многие [12], но описания методики эксперимента и установки для измерения цветовых порогов приведены лишь в работах Мак-Адама и Брауна [14, 15]. Оказалось, что при использовании методики с изменением координат цветности (без изменения яркости адаптации) до порогового значения в их экспериментах возникает боль-

шой разброс в результатах для разных наблюдателей, что не позволяло определить какие-либо закономерности по множеству наблюдателей. Это объяснялось прежде всего сложностью методики, т.к. для получения одного экспериментального значения необходимо было провести установку и регулировку 5 значений: яркости фона, яркости трёх каналов цветности эталона и яркость канала исследуемого монохроматического источника излучения. В результате приемлемые значения получились только у одного наблюдателя (*Perley G. Nutting*), которые и приведены в работе [14]. В дальнейших экспериментах с изменяющейся яркостью фона [15] и других также не удалось выявить обобщающих зависимостей.

Методика, предложенная в данной работе, основана на экспериментах по обнаружению объектов, что даёт существенно меньшую дисперсию и разброс результатов по сравнению с методикой уравнивания цветностей или цветов. Кроме того, в разработанной методике в каждой экспериментальной точке необходимо проводить лишь два измерения (яркости объекта и фона) вместо пяти по методике уравнивания цветностей, что снижает и погрешность получаемых результатов.

Выводы

1. На основе статистической теории порогового цветового зрения разработана методика определения удельных координат цвета зрительной системы человека (ЗС) в условиях естественной цветовой адаптации.

2. Разработанная и собранная установка для исследования пороговых характеристик ЗС позволяет с погрешностью не более 7 % поддерживать в ходе экспериментов выходные параметры наблюдаемых изображений.

3. Разработано программное обеспечение для решения методом «наименьших квадратов» системы нелинейных уравнений статистической модели порогового цветового зрения, исследования которого показали сходимость метода при значительном (около 15 нм) отклонении начальных оценок искомых параметров от их истинных значений.

4. Согласно материалам, приведённым в [11], природный (естественный) разброс характеристик ЗС по множеству наблюдателей составляет 15–25 %. Если задаться суммарной погрешностью определения $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{\tau}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ в 10 %, можно получить, что экспериментально полученное на установке значение σ_L не должно превышать 7 %. Этот результат достижим путём увеличения числа многократных измерений $L_{co}^n(\lambda)$, поскольку эта составляющая погрешности убывает обратно пропорционально квадратному корню из этого числа [13].

5. При решении системы уравнений (4) методом «наименьших квадратов» необходим контроль за результатами расчёта. Если полученные значения параметров σ_k , σ_3 , σ_c отличаются от их начальных оценок больше **чем** на 15 нм, а значения $\lambda_{км}$, $\lambda_{зм}$, $\lambda_{см}$ больше **чем** на 21 нм, необходимо провести повторный расчёт с новыми начальными оценками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юстова Е.Н. Определение координатных осей основной физиологической системы из опытов с цветнослепыми // Доклады АН СССР. – 1948. – Т. 63, № 4. – С. 383–385.

2. CIE170–1:2006 Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1.

3. Stockman A., Lindsay T., Sharpe B. The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype // Vision Research. – 2000. – Vol. 40. – P. 1711–1737.

4. Stockman A., MacLeod D.I.A., Vivien J.A. Isolation of the middle- and long-wavelength sensitive cones in normal trichromats // J. Opt. Soc. Am. A. – 1993. – Vol. 10. – P. 2471–2490.

5. König A., Dieterici C. Die Grundempfindungen und ihre Intensitäts-Vertheilung im Spectrum. / Sitz. Akad. Wiss. Berlin, 1886. – S. 805–829.

6. Stockman A. Cone fundamentals and CIE standards // Current Opinion in Behavioral Sciences. – 2019. – Vol. 30. – P. 87–93.

7. Боос Г.В. Определение вероятности обнаружения цветных объектов на цветных фонах на основе статистической модели порогового цветового зрения человека // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 27–31.

8. Боос Г.В., Григорьев А.А. Новый подход к определению качественных характеристик установок наружного освещения // Светотехника. – 2015. – № 6. – С. 21–26.

9. Григорьев А.А., Гордюхина С.С. Метод определения чувствительности К, З, С рецепторов на основе статистической модели органа зрения // Вестник МЭИ. – 2010. – № 2. – С. 174–178.

10. Brainard D.H., Freeman W.T. Bayesian color constancy // J. Opt. Soc. Am. A. – 1997. – Vol. 14, No.7. – P. 1393–1411.

11. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. – М.: Мир, 1978. – 592 с.

12. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов: В 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.

13. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. – 1962. – 354 с.

14. MacAdam D.L. Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight // J. Opt. Soc. Am. – 1942. – Vol. 32. – P. 247–274.

15. Brown W.R.L., MacAdam D.L. Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences // J. Opt. Soc. Am. – 1949. – Vol. 39, No. 10. – P. 808–834.



Боос Георгий Валентинович, кандидат техн. наук. Окончил в 1986 г. МЭИ. Президент МСК «БЛ ГРУПП». Зав. кафедрой «Светотехника» НИУ «МЭИ». Лауреат Государственной премии РФ за архитектурное освещение Москвы. Председатель НТС «Светотехника» и редколлегии журнала «Светотехника» /»Light & Engineering»



Григорьев Андрей Андреевич, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1972 г. МЭИ. Профессор кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ». Руководитель Группы исследований функций зрения ВНИСИ им. С.И. Вавилова



Рыбина Виктория Андреевна, инженер. Окончила в 2018 г. НИУ «МЭИ» Аспирант и ассистент кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ» (с ведением преподавания). Младший научный сотрудник Группы исследований функций зрения ВНИСИ им. С.И. Вавилова