

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫЕ ФУНКЦИИ ЦВЕТОВЫХ КАНАЛОВ ОРГАНА ЗРЕНИЯ

© 2008 г. А. А. Васьковский, канд. техн. наук

Московский энергетический институт (технический университет), Москва

E-mail: VaskovskyAA@mpei.ru

Рассмотрена функциональная модель органа зрения, основанная на теории статистических решений и оптимальной фильтрации, предназначенная для описания порогового опознавания цветных объектов в условиях дневной адаптации. Характеристиками трех цветовых каналов модели выбраны энергетические пространственные спектры эквивалентного шума. Исходные данные для расчета его параметров получены в эксперименте по пороговому опознаванию цветных объектов. Величина рассчитанных параметров свидетельствует о преимущественном использовании длинноволнового и средневолнового каналов при опознавании цветных объектов, особенно малого размера. Пространственные параметры модели соответствуют минимально возможным размерам рецептивных полей сетчатки этих каналов. Рассчитанные с помощью модели спектральная эффективность, пороги цветоразличения и пороги по насыщенности имеют хорошее согласие с экспериментальными данными других авторов.

Коды OCIS: 330.1720, 330.1800, 330.3790, 330.4060, 330.6180, 3000.30290, 3000.30820.

*Поступила в редакцию 12.03.2008.*

Многоцветные средства отображения информации получили в настоящее время широкое распространение в самых разнообразных технических системах. Оценка качества представляемых такими системами изображений возможна только трудоемким экспериментальным путем. Это связано с тем, что существующие функциональные модели органа зрения (ОЗ), с помощью которых можно анализировать возможности систем визуализации, предполагают ахроматическое зрение. Малоэффективно применение колориметрических методов. Информация на многоцветных индикаторных приборах представляется различными по форме объектами. Их угловые размеры зачастую существенно меньше принятых при определении стандартных фотометрических и колориметрических характеристик ОЗ, которые разработаны для полей зрения не менее 34,9 мрад (2°). Известна различная реакция ОЗ на некоторые излучения, наблюдаемые в телесных углах разной величины. У стандартных наблюдателей, по рекомендации Международной комиссии по освещению имеющих поля зрения 34,9 и 174 мрад (10°), спектральная чувствительность различна, особенно в синей области спектра [1]. Максимальная спектральная эффективность ОЗ, определенная по остроте различения [2, 3] и при опознавании малоразмерных знаков [4], соответствует длинам волн вблизи 570–580 нм, в то время как максимум спектральной световой эффективности находится на длине волны 555 нм. Восприятие цвета также зависит от размера объекта: при уменьшении

углового размера объекта обесцвечивается синий цвет, а также происходит покраснение смеси зеленого и красного цветов [1].

В настоящей статье предпринята попытка объяснить эти явления разными пространственными характеристиками цветовых каналов ОЗ. Для решения этой задачи выбрана наиболее эффективная функциональная модель зрительной системы, использующая положения теорий статистических решений и оптимальной фильтрации [5]. Она позволит описать результаты порогового опознавания объектов разного цвета при яркостях адаптации, соответствующих дневному зрению.

В этих условиях полагаем ОЗ линейной системой, имеющей три спектральных канала приема и обработки изображений в видимом диапазоне. Сигналом, обрабатываемым в каждом  $q$ -м цветовом канале избранной модели, будем считать пространственно-частотный спектр распределения эффективной яркости объекта наблюдения в смеси с шумом  $L_q(\mu, \nu)$ . Здесь и далее отсчитывается яркость сигнала, в том числе и шумового, от уровня фона. Величина сигнала определяется приемной системой  $q$ -го цветового канала

$$L_q(\mu, \nu) = \eta_V \int_{\lambda_{qк}}^{\lambda_{qд}} l_e(\mu, \nu, \lambda) S_q(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $l_e(\mu, \nu, \lambda)$  – спектральная плотность пространственного спектра энергетической яркости,  $S_q(\lambda)$  – спектральная чувствительность приемников, которая предполагается неизменной в пределах изоб-

ражения на сетчатке,  $\lambda_{qk}$  и  $\lambda_{qd}$  – коротковолновая и длинноволновая границы спектральной чувствительности,  $\mu, \nu$  – пространственные частоты,  $\eta_j$  – максимальное значение спектральной световой эффективности, равное 683 лм/Вт. Интеграл в выражении (1) имеет смысл пространственного спектра распределения  $q$ -ой координаты цвета. Данные различных авторов о спектральной чувствительности цветовоспринимающих рецепторов ОЗ отличаются незначительно [1, 3]. Для расчетов выбрана физиологическая колориметрическая система КЗС (красный–зеленый–синий) со спектральной чувствительностью рецепторов, определенной Н.Д. Ньюбергом и Е.Н. Юстовой [1]. Кривые сложения этой системы приняты в качестве спектральных характеристик цветочных каналов.

Для упрощения задачи было предусмотрено наблюдение на равнорядном фоне, что ограничивает число источников шума и помехи. В условиях дневной адаптации контрастная чувствительность ОЗ ограничена преимущественно внутренним шумом зрительной системы [6], который накладывается на сигнал и имеет большое количество источников [7, 8]. Это дает основание считать шумы аддитивными и распределенными по нормальному закону. Тогда пространственный спектр эффективной яркости сигнала для  $q$ -го цветового канала описывается суммой

$$L_q(\mu, \nu) = L_{qj}(\mu, \nu) + L_{qш}(\mu, \nu), \quad (2)$$

где  $L_{qj}(\mu, \nu)$  – пространственный спектр распределения эффективной яркости для  $j$ -го объекта,  $L_{qш}(\mu, \nu)$  – приведенный к пространству предметов пространственный спектр эффективной яркости шума с энергетическим спектром  $G_q(\mu, \nu)$ . Энергетический спектр шума для каждого цветового канала ОЗ можно представить в виде [9]

$$G_q(\mu, \nu) = G_{qO3}(\mu, \nu) |T_{qO3}(\mu, \nu)|^2 + G_{qфт}(\mu, \nu), \quad (3)$$

где  $G_{qO3}(\mu, \nu)$  – энергетический спектр собственного шума,  $T_{qO3}(\mu, \nu)$  – оптическая передаточная функция,  $G_{qфт}(\mu, \nu)$  – эффективный энергетический спектр фотонного шума.

В ахроматических моделях ОЗ, описывающих опознавание на основе теории статистических решений и оптимальной фильтрации, взаимной корреляцией шумов в оптимальных фильтрах можно пренебречь [10]. Это положение авторами распространено и на цветовые каналы. Положим, что все случаи правильного опознавания имеют одинаковую ценность, равноценны и все ошибки опознавания. Для одинаковой априорной вероятности предъявления объектов решение об опознавании  $i$ -го эквивалентно проверке следующих неравенств:

$$\begin{aligned} & \sum_{q=1}^3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ L_q(\mu, \nu) L_{qi}^*(\mu, \nu) - 0,5 |L_{qi}(\mu, \nu)|^2 \right] [G_q(\mu, \nu)]^{-1} d\mu d\nu > \\ & > \sum_{q=1}^3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ L_q(\mu, \nu) L_{qk}^*(\mu, \nu) - 0,5 |L_{qk}(\mu, \nu)|^2 \right] [G_q(\mu, \nu)]^{-1} d\mu d\nu \end{aligned} \quad (4)$$

для всех  $k \neq i$  из набора в  $I$  объектов, где \* – знак комплексного сопряжения.

Положим, к опознаванию предъявляется  $j$ -й объект. Для определения вероятности выполнения неравенств (4) из каждого числителя подынтегральных выражений в левых и правых частях вычтено  $0,5 |L_{qj}(\mu, \nu)|^2$ . Тогда с учетом (2) система неравенств (4) примет вид

$$\varphi_i + 0,5(\Delta m_{kj} - \Delta m_{ij}) > \varphi_k, \quad (5)$$

где  $\varphi_i$  и  $\varphi_k$  – шумовые составляющие сигналов для  $i$ -го и  $k$ -го оптимальных фильтров с нулевыми математическими ожиданиями и с дисперсиями  $m_i$  и  $m_k$ , имеющими смысл отношения сигнала к шуму,  $\Delta m_{ij}$  и  $\Delta m_{kj}$  – отношения сигнала к шуму для разности спектров объектов. Упомянутые выше величины с точностью до индекса определяются следующими выражениями:

$$\varphi_i = (2\pi)^{-2} \sum_{q=1}^3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_{qш}(\mu, \nu) L_{qi}^*(\mu, \nu) [G_q(\mu, \nu)]^{-1} d\mu d\nu, \quad (6)$$

$$m_i = (2\pi)^{-2} \sum_{q=1}^3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |L_{qi}(\mu, \nu)|^2 [G_q(\mu, \nu)]^{-1} d\mu d\nu, \quad (7)$$

$$\Delta m_{ij} = (2\pi)^{-2} \sum_{q=1}^3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |L_{qi}(\mu, \nu) - L_{qj}(\mu, \nu)|^2 [G_q(\mu, \nu)]^{-1} d\mu d\nu. \quad (8)$$

Вероятность ответа об опознавании  $i$ -го объекта при предъявлении  $j$ -го или вероятность выполнения неравенств (5)  $P_{ij}$  описывается выражением

$$P_{ij} = 1/\sqrt{2\pi m_i} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-\varphi_i^2/(2m_i)] \times \times \prod_{k=1, k \neq i}^I \Phi \left\{ \left[ \varphi_i + 0,5(\Delta m_{kj} - \Delta m_{ij}) \right] / \sqrt{m_k} \right\} d\varphi_i, \quad (9)$$

где  $\Phi(X) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^X \exp(-x^2/2) dx$  – нормальная функция распределения.

Из выражений (4)–(8) следует, что однозначное описание вероятности ответа  $P_{ij}$  возможно лишь при знании  $G_q(\mu, \nu)$  для каждого цветового канала. В ахроматических моделях аналог  $G_q(\mu, \nu)$ , описывающий эквивалентный шум ОЗ при восприятии объектов как одноцветных, так и разноцветных с фоном, имеет вид функции с минимумом в области средних пространственных частот [9, 11, 12]. Подъем этой пространственно-частотной функции в области низких частот может быть объяснен как спадом в этой области оптической передаточной функции, определяемой конфигурацией рецептивного поля сетчатки [13], так и подъемом спектральной интенсивности собственного шума ОЗ [5], входящих в выражение (3). Для описания функций  $G_q(\mu, \nu)$  взято выражение [14]

$$G_q(\mu, \nu) = A_q^2 r_q^{-4} (\mu^2 + \nu^2)^{-2} \exp \left[ r_q^2 (\mu^2 + \nu^2) \right],$$

где  $A_q$  – амплитудный множитель,  $r_q$  – параметр функции рассеяния цветового канала.

Параметры  $A_q$  и  $r_q$  для каждого цветового канала могут быть найдены, если минимизировать неувязку между расчетными значениями вероятности ответов об опознавании для  $n$ -ой комбинации значений цвета и углового размера объекта  $P_{ij, n}$  и экспериментальными  $P_{\Delta ij, n}$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \sum_{n=1}^N (P_{ij, n} - P_{\Delta ij, n})^2 = \min. \quad (10)$$

Решение задачи, обратной (10), возможно при наличии экспериментальных данных порогового восприятия цветных объектов с угловыми размерами, изменяющимися в широких пределах. В связи с тем, что в литературе такие сведения отсутствуют, проведено исследование вероятности опознавания равновеликих, равнорких и одноцветных квадрата и круга на равнорном фоне в зависимости от значений цвета и углового размера. Для демонстрации тест-объектов использовался персональный компь-

**Таблица 1.** Координаты цветности люминофоров дисплея и белого фона

Координаты цветности	Красный люминофор	Зеленый люминофор	Синий люминофор	Белый фон
$x$	0,67	0,28	0,15	0,33
$y$	0,33	0,64	0,04	0,29

ютер с дисплеем на электронно-лучевой трубке. Цвет стимулов задавался в пределах цветового охвата выбранного дисплея, данные о котором приведены в табл. 1, и с минимально возможным шагом для используемой операционной системы. Угловой размер диаметра равновеликого круга менялся от 1,7 до 75 мрад. Фон имел размер около 180 мрад по диагонали. Цвет фона соответствовал белому для данного дисплея (табл. 1). В эксперименте использовались две яркости фона 64,3 и 105 кд/м<sup>2</sup>. Яркость поля окружения близка к нулю.

Визуальный эксперимент проводился методом постоянных стимулов [15]. В нем участвовали трое предварительно тренированных наблюдателей, имеющих нормальное зрение. На протяжении всего эксперимента испытуемым были известны: светотехнические и геометрические параметры тест-объектов и фона, априорная вероятность предъявления знаков, равная 0,5. Им предлагалось использовать симметричную функцию потерь. Тест-объекты высвечивались в случайном порядке. Для получения одной экспериментальной точки проводилось 30 предъявлений. Испытуемым надлежало дать ответ, какому объекту из набора (квадрату или кругу) соответствует наблюдаемое изображение. Время наблюдения не ограничивалось. Можно предположить, что в данном эксперименте наблюдатели пользовались байесовской стратегией минимума среднего риска, которая в созданных условиях позволяла минимизировать вероятность ошибки опознавания [15]. Это дает возможность использовать алгоритм (4) для описания результатов эксперимента.

Полученные в эксперименте вероятности опознавания объектов разного цвета и углового размера, пример которых приведен в табл. 2, были использованы для расчета параметров эквивалентного шума цветовых каналов. Для проведенного эксперимента выражение (10) примет вид

$$\sum_{n=1}^N (P_{ii, n} - P_{\Delta ii, n})^2 + (P_{jj, n} - P_{\Delta jj, n})^2 = \min. \quad (11)$$

Здесь индекс  $i$  соответствует квадрату, а  $j$  – кругу, а значения вероятностей опознавания вычисляются по формуле

$$P_{ii} = P_{jj} = \Phi \left( 0,5 \Delta m_{ij} / \sqrt{m_i + m_j} \right). \quad (12)$$

**Таблица 2.** Результаты экспериментального и расчетного определения вероятностей опознавания равновеликих круга и квадрата для яркости фона 105 кд/м<sup>2</sup>

Угловой размер диаметра равновеликого круга, мрад	Яркость объектов, кд/м <sup>2</sup>	Координаты цветности объектов		Вероятность опознавания		
		x	y	кругов	квадратов	расчетная
1,7	1,43	0,15	0,04	0,60	0,60	0,53
3,5	1,81	0,67	0,33	0,67	0,60	0,64
6,5	2,94	0,25	0,32	0,80	0,73	0,81
10,0	1,32	0,21	0,32	0,53	0,53	0,68
13,0	2,47	0,28	0,64	0,87	1,00	0,84
19,0	1,52	0,40	0,54	0,87	0,73	0,76
25,5	3,54	0,32	0,32	1,00	0,93	0,97
28,0	0,47	0,23	0,09	0,53	0,47	0,56
37,5	1,32	0,21	0,32	1,00	0,97	0,82
47,5	0,68	0,38	0,17	0,60	0,73	0,66
56,0	1,52	0,40	0,54	0,53	0,53	0,87
75,0	0,09	0,15	0,04	0,53	0,53	0,54

**Таблица 3.** Результаты расчета параметров эквивалентных пространственно-частотных функций

Яркость фона, кд/м <sup>2</sup>	64,3	105	64,3	105
	Амплитудный множитель, кд/м <sup>2</sup> , мрад		Параметр функции рассеяния цветового канала, мрад	
Цветовой канал				
Длинноволновый	0,71	1,52	0,058	0,056
Средневолновый	0,86	2,12	0,113	0,127
Коротковолновый	15,5	78,6	6,20	6,82

Полученные при решении (11) значения параметров эквивалентного шума цветовых каналов приведены в табл. 3. Представление эквивалентного шума цветовых каналов ОЗ, используемое в настоящей работе, дает хорошее согласие с экспериментом (табл. 2). Среднее квадратичное отклонение рассчитанных с помощью выражения (12) и полученных опытным путем значений вероятностей ответов наблюдателей составляет 0,18.

Из результатов расчета параметров эквивалентного шума (табл. 3) следует, что для зрительного восприятия мелких объектов, деталей изображений предназначены длинноволновый и средневолновый цветовые каналы, так как наибольшее размытие исходного изображения будет происходить в коротковолновом канале. Наибольшая амплитуда эквивалентного шума получена для коротковолнового канала, что также подтверждает его малый вклад в опознавание. При зрительном восприятии малоразмерных объектов этот вклад становится ничтожным.

Следовательно, ОЗ плохо приспособлен для восприятия небольших деталей изображений, излучающих в коротковолновой области видимого спектра. Это приводит к смещению в желтую область максимума спектральной эффективности ОЗ при восприятии мелких объектов, а также объясняет тританию малого поля зрения.

Рассмотрим, насколько характеристики эквивалентного шума соответствуют параметрам ОЗ. Соотношение параметров функций рассеяния длинноволнового и средневолнового каналов качественно согласуется с данными о соотношении плотностей колбочек этих типов в центральной ямке ОЗ [16]. Диаметр центральной части рецептивного поля сетчатки можно оценить по величине  $2\sqrt{2}r_q$  [13]. Из результатов расчета (табл. 3) следует: для длинноволнового канала такая величина – наименьшая и в линейной мере (приведенная к сетчатке) равна почти 4 мкм. Это меньше, чем размер дифракционного пятна рассеяния, но несколько больше, чем диаметр наружного членика колбочки в центральной ямке, составляющей 2,5–3 мкм [1]. Полученные результаты согласуются с имеющимися данными о плотности расположения колбочек в сетчатке [17]. В этом случае находит свое подтверждение предположение о том, что центральная часть рецептивного поля может состоять лишь из одной колбочки [13]. Следовательно, расчетные пространственные параметры соответствуют минимально допустимым размерам рецептивных полей сетчатки длинноволнового и средневолнового каналов для дневной адаптации.

Для исследования возможностей рассматриваемой функциональной модели ОЗ проведены расче-

ты некоторых характеристик порогового опознавания цветных объектов, которые можно сравнить с известными экспериментальными данными. Параметры цвета входят в выражения для отношений сигнала к шуму (7) и (8). Они могут быть найдены как корни нелинейного уравнения (12), если задать значение пороговой вероятности  $P_{ii}$  и  $P_{jj}$ . Для решения нелинейного уравнения (12) выбран операционный порог на уровне вероятности правильного опознавания 0,98.

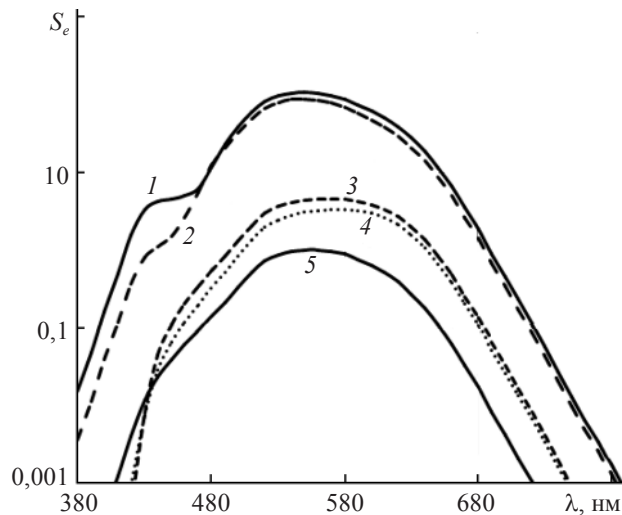
Спектральная эффективность опознавания оценивалась по зависимости энергетической контрастной чувствительности от длины волны излучения объектов  $S_e(\lambda)$ . Данная величина обратно пропорциональна пороговому энергетическому контрасту опознавания равновеликих квадрата и круга  $K_{\text{пор}}(\lambda)$

$$S_e(\lambda) = 1/K_{\text{пор}}(\lambda) = L_{\text{эф}}/L_{\text{ео}}(\lambda),$$

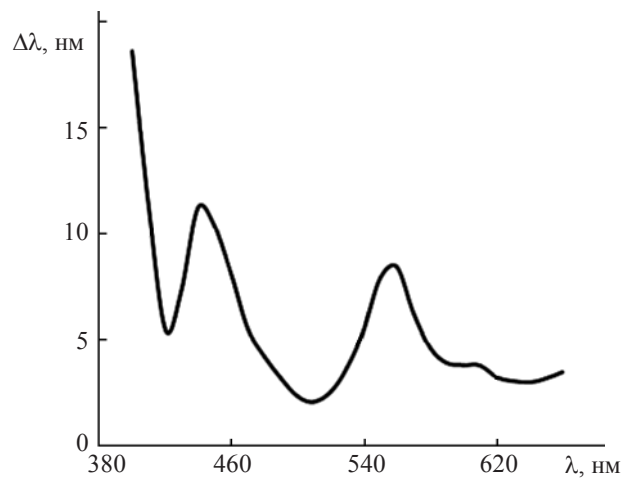
где  $L_{\text{эф}}$  – энергетическая яркость фона,  $L_{\text{ео}}(\lambda)$  – пороговая монохроматическая энергетическая яркость объектов. На рис. 1 приведены расчетные кривые  $S_e(\lambda)$  для объектов с угловыми размерами, соответствующими диаметрам кругов 34,9 мрад и 0,87 мрад. Они представляют результат моделируемого эксперимента, в котором наблюдатели принимают решение об опознании равновеликих круга или квадрата одинакового спектрально чистого цвета. Сравнение рассчитанной спектральной эффективности опознавания для объектов большего углового размера и относительной спектральной световой эффективности показывает (рис. 1), что форма кривых подобна, а положение максимумов практически совпадает. Для малоразмерных объектов максимум спектральной эффективности опознавания находится вблизи 570 нм, что соответствует результатам, полученным в [2–4].

Для исследования порогового восприятия цветовых различий с помощью предложенной модели проведен расчет пороговой разности длин волн при опознавании двух кругов угловым диаметром 34,9 мрад, отличавшихся друг от друга спектрально чистым цветом. Расчетная зависимость, приведенная на рис. 2, имеет схожую форму с экспериментальными данными порогов цветоразличения, приведенными в [1]. Экстремумы расчетной зависимости лежат примерно в тех же участках спектра, что и экспериментальные данные. Отличие заключается в большем размахе экстремумов расчетной кривой.

Для исследования влияния на опознавание чистоты цвета объектов выбраны равнояркие круги с разным цветом в центральной части и на периферии. Диаметр центральной части равен половине диаметра всего круга. Центральная часть одного

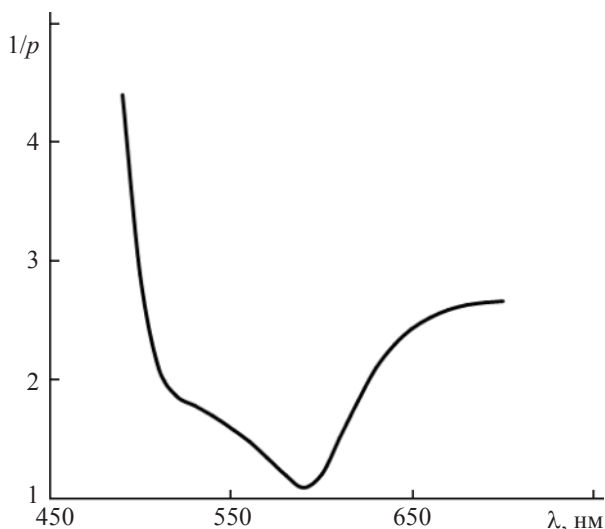


**Рис. 1.** Спектральные зависимости энергетической контрастной чувствительности опознавания равноярких и равновеликих круга и квадрата. Кривые 1 и 2 рассчитаны для яркостей фона 64,3 и 105 кд/м<sup>2</sup> и угловых размеров объектов, соответствующих диаметру круга – 34,9 мрад. Кривые 3 и 4 рассчитаны для яркостей фона 64,3 и 105 кд/м<sup>2</sup> и угловых размеров объектов, соответствующих диаметру круга – 0,87 мрад. Кривая 5 – относительная спектральная световая эффективность.



**Рис. 2.** Расчетная пороговая разность длин волн для опознавания двух равноярких кругов угловым диаметром 34,9 мрад, имеющих монохроматическое излучение.

круга и внешнее кольцо другого имеют белый цвет. Внешнее кольцо первого круга и центральная часть второго имеют цвет смеси белого со спектрально чистым цветом. Чистота смеси  $p$ , для которой происходит пороговое опознавание кругов, определяется выражением [1]



**Рис. 3.** Расчетное число порогов по насыщенности при опознавании двух разноцветных кругов угловым диаметром 34,9 мрад и яркостью 105 кд/м<sup>2</sup>. Цветность белого соответствует стандартному излучению *B*.

$$p = L_{V\lambda} / (L_{V\lambda} + L_{V\text{б}}),$$

где  $L_{V\lambda}$  – яркость спектрально чистого цвета с длиной волны  $\lambda$ ,  $L_{V\text{б}}$  – яркость белого. Величина  $1/p$ , называемая числом порогов по насыщенности [1], рассчитана для опознавания двух описанных кругов. Вид расчетной зависимости, приведенной на рис. 3, похож на экспериментальные кривые для числа порогов по насыщенности разных авторов [18]. Совпадает положение минимума вблизи 570 нм. Отличие расчетной кривой заключается в плавном ее изменении вблизи экстремума.

Сравниваемые характеристики были получены в экспериментах, которые имеют существенное отличие в методах и объектах наблюдения от эксперимента, проведенного в настоящей работе. Особенно это касается порогов цветоразличения и числа порогов по насыщенности. Несмотря на это расчетные результаты имеют хорошее согласие с данными других авторов. Таким образом, представление ОЗ в виде системы, осуществляющей согласованную фильтрацию в трех цветовых каналах, позволяет получить для них расчетные пространственно-частотные функции и анализировать закономерности порогового восприятия цветных объектов различного углового размера и формы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Ч. 2. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
2. Хазанов В.С. К вопросу о возможности использования метода остроты различения в качестве фундаменталь-

ного метода определения зрительной эффективности излучений // Светотехника. 1979. № 9. С 13–15.

3. Зак П.П., Егорова Т.С., Розенблюм Ю.З., Островский М.А. Спектральная коррекция зрения: научные основы и практические приложения. М.: Научный мир, 2005. 192 с.
4. Васьковский А.А. Спектральная эффективность зрительного восприятия малоразмерных объектов // Светотехника. 2003. № 5. С. 10–11.
5. Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е., Красильникова О.И. Применение принципов оптимального наблюдателя при моделировании зрительной системы человека // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 9. С. 17–24.
6. Levi L. Types of noise in visual system // Opt. Eng. 1981. V. 20. № 1. P. 98–102.
7. Говардовский В.И. Собственный шум, пороговая чувствительность и адаптация сетчатки / Сенсорные системы. Нейрофизиологические и биологические исследования. Л.: Наука, 1978. С. 61–81.
8. Пинегин Н.И. Влияние яркости и размеров поля зрения на диаметр зрачка // Тр. 1-ой конф. по физиологической оптике. М., Л., 1936. С. 396–428.
9. Мартынов В.Н., Шкурский Б.И. Модель зрительного анализатора как оптимальной системы обнаружения // ОМП. 1980. № 8. С. 1–4.
10. Васьковский А.А., Латышев В.А., Романов С.С. К вопросу о статистических связях в модели зрительного восприятия // Сб. тез. докл. Всесоюз. конф. “Оптическое изображение и регистрирующие среды”. Л., 1990. Ч. 1. С. 113–114.
11. Васьковский А.А., Романов С.С. Расчет пространственно-частотных функций органа зрения при обнаружении и опознавании объектов наблюдения // ОМП. 1987. № 9. С. 13–16.
12. Васьковский А.А., Латышев В.А., Романов С.С. Расчет вероятности опознавания знаков на знаковосинтезирующих индикаторах // Светотехника. 1990. № 11. С. 5–8.
13. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.
14. Васьковский А.А., Латышев В.А., Романов С.С. Оценка параметров пространственно-частотной функции органа зрения // Сб. тез. докл. Всесоюз. конф. “Оптическое изображение и регистрирующие среды”. Л., 1990. Ч. 1. С. 133–134.
15. Бардин К.В. Проблема порогов чувствительности и психофизические методы. М., 1976. 395 с.
16. Psychophysical estimates of the relative numbers of L- and M-cones. <http://www.cvrl.org/database/text/density/lmcones.htm>.
17. Peak foveal cone densities. [http://www.cvrl.org/database/text/density/fovea\\_c.htm](http://www.cvrl.org/database/text/density/fovea_c.htm).
18. Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Черноризов А.М. Психофизиология цветового зрения. М., 1989. 206 с.