

# Исследование монохроматических порогов цветового зрения и определение удельных координат цвета трихромата

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

НИУ «МЭИ», Москва

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

## Аннотация

Получены экспериментальные данные по пороговым перепадам яркости объект-фон для 10 трихроматов. Эксперименты заключались в наблюдении монохроматических объектов с угловым размером  $2 \times 2^\circ$  на белом фоне. На основе статистической теории порогового цветового зрения доказано, что в колориметрической системе  $XYZ$  координата  $Y$  основного цвета  $M_{phys}$  положительна и лежит на прямой  $y = 1 - x$ . Этот факт позволил определить все характеристики физиологической системы трихромата  $(LMS)_{phys}$ , необходимые для проведения цветовых расчётов.

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

## Введение

Вопросом определения цветовых характеристик наблюдателей с нормальным цветовым зрением активно занимались со второй половины 18-го века [1, 2] почти до конца 20-го [3–6]. Полученные результаты позволили Международной комиссии по освещению (МКО) разработать и принять для цветовых расчётов колориметрические системы (КС)  $RGB$ ,  $XYZ$  (1931 г.) [7] и  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  (1964 г.) [8]. При этом КС  $XYZ$  и  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  для цветовых расчётов удобны, но их функции сложения получены для основных цветов (ОЦ), не связанных с ОЦ зрительной системы (ЗС) человека с нормальным цветовым зрением (трихромата). Это обстоятельство не позволяет в расчётах учитывать ряд особенностей восприятия цвета, в частности цветовую адаптацию ЗС к излучениям разного спектрального состава. Для учёта этой адаптации необходимо знать удельные координаты цвета (функции сложения) или функции спектральной чувствительности ЗС трихромата. Прямым экспериментом эти функции неопределимы, т.к. при воздействии даже монохроматического видимого излучения на него одновременно реагируют два или три рецептора, входящие в ЗС. Данная особенность вынуждает определять функции сложения ЗС трихромата косвенными методами.

Один из первых таких методов (предложенный создателем теории цветового пространства Д.К. Максвелл [1]) основывался на использовании в качестве наблюдателей дихроматов, т.е. людей, у которых отсутствует чувствительность одного из трёх типов чувствительных к цвету рецепторов –  $K$ ,  $Z$  или  $C$  ( $L$ ,  $M$  или  $S$  в англоязычной литературе). Как известно [2], в любой КС пучок прямых для неразличимых дихроматами цветностей пересекается в точке с координатами того ОЦ, к которому у дихромата отсутствует чувствительность. Основное условие, которое должно при этом выполняться – совпадение функций

спектральной чувствительности оставшихся у дихроматов рецепторов, с соответствующими функциями рецепторов трихроматов. Это предположение используется и в современных подходах к определению чувствительности трихроматов, путём изоляции одного из типов колбочек дихроматов [9]. Как нами было отмечено [10], сомнения по поводу правомерности использования дихроматов вместо трихроматов остаются, даже при их отборе по тестам ДНК. Это связано с тем, что кривые сложения ЗС человека определяются не только чувствительностью колбочек. Ощущение яркости и цветности предметов появляется у человека не на выходе рецепторов, а после обработки их сигналов головным мозгом, а этот, пока неизвестный, алгоритм может быть существенно разным у трихроматов, обрабатывающих сигналы трёх рецепторов, и дихроматов, у которых один рецептор отсутствует, а цветовое восприятие сохраняется. Эти сомнения делают актуальным определение спектральной чувствительности ЗС трихромата без привлечения к исследованиям дихроматов, что служит **основной задачей настоящей работы**.

В статье [10] авторы дали пояснение к понятию физиологической КС  $(K3C)_{phys}$  для англоязычной аудитории. Для того, чтобы однозначно определять, о каких системах идёт речь, в настоящей статье, используются следующие обозначения:

- модель *СИЕРО06* или КС  $LMS$  с функциями  $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$ , называемыми *cone fundamentals*;
- физиологическая КС  $(K3C)_{phys}$  Н.Д. Ньюберга и Е.Н. Юстовой –  $(LMS)_{NY}$ ;
- разрабатываемая авторами КС, обозначенная как  $(LMS)_{phys}$ , с функциями сложения  $\bar{l}_{phys}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{phys}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{phys}(\lambda)$  соответственно.

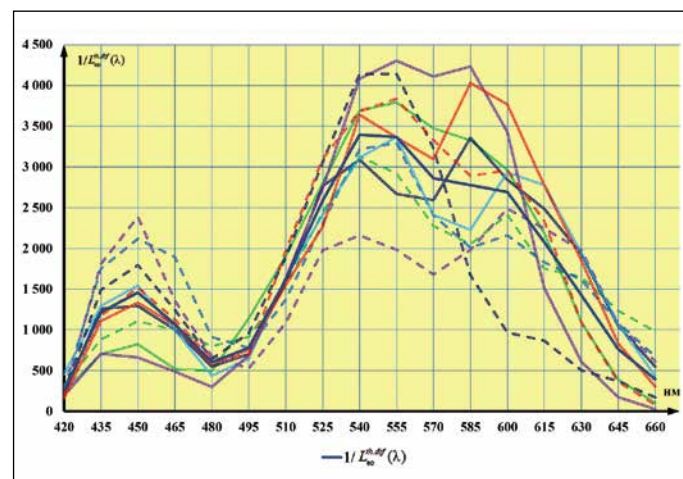


Рис. 1. Экспериментальные зависимости  $(L_{co}^{th.dif}(\lambda))^{-1}$ ,  $ср \cdot м^2 / Вт$ , для 10 трихроматов

## Методика получения результатов первого этапа исследований

Исходя из общего выражения [11], определяющего вероятность обнаружения цветных объектов на цветных фонах, в [10] описана методика определения удельных координат цвета трихромата, основанная на статистической пороговой теории цветового зрения, и установка для экспериментальных исследований согласно данной методике. Суть последней состоит в решении методом «наименьших квадратов» [12] системы нелинейных относительно искомым функций  $\bar{l}_{\text{phys}}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{\text{phys}}(\lambda)$  и  $\bar{s}_{\text{phys}}(\lambda)$  уравнений [10]:

$$L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda) = C_1 \cdot \left( C_2 \left( \frac{\bar{l}_{\text{phys}}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\text{b}}(\lambda) \bar{l}_{\text{phys}}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_3 \left( \frac{\bar{m}_{\text{phys}}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\text{b}}(\lambda) \bar{m}_{\text{phys}}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + \left( \frac{\bar{s}_{\text{phys}}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\text{b}}(\lambda) \bar{s}_{\text{phys}}(\lambda) d\lambda} \right)^2 \right)^{-0.5} \cdot \quad (1)$$

В левой части этой системы стоят экспериментально определяемые перепады яркости объект-фон  $L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda)$  однородных излучений для видимого участка спектра, обеспечивающие пороговое обнаружение объектов наблюдателем. Эксперименты проводились на описанной в [10] установке при постоянной яркости фона в 11 кд/м<sup>2</sup> для монохроматических излучений с 17 разными длинами волн.

В экспериментах участвовало 10 предварительно натренированных наблюдателей с нормальным цветовым зрением, которое контролировалось по полихроматическим таблицам Рабкина. Для определения порогового контраста использовался метод минимальных изменений на появление объекта (как наименее трудоёмкий). Перед началом основных экспериментов проводился ряд предварительных – с целью выработки у наблюдателей устойчивого критерия обнаружения объекта (по стабилизации получаемых ими пороговых контрастов). Результаты экспериментов приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Значения пороговых контрастов измерены в спектральном диапазоне 420–660 нм с шагом в 15 нм при наблюдении на белом фоне. Ширина спектра однородного излучения наблюдаемого объекта составляла 10 нм, а угловой размер объекта был 2×2°. Относительная погрешность определения среднего по 10 наблюдателям значения  $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$  при 200 предъявлениях объектов на каждой длине волны не превышает 13,5 % (включая 7 %-ную погрешность экспериментальной установки). Следует отметить достаточно большой разброс пороговых значений  $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$  у разных наблюдателей по отношению

к их средним (последняя колонка табл. 1). Среднее значение относительного СКО по **всем** длинам волн и 10 наблюдателям равно 30 %, что объясняется естественным разбросом их пороговых характеристик.

При решении системы из 17 уравнений (1) использовались следующие аппроксимации для  $\bar{l}_{\text{phys}}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{\text{phys}}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{\text{phys}}(\lambda)$  [10]:

$$\begin{aligned} \bar{l}_{\text{phys}}(\lambda) &= \frac{f_l(\lambda)}{2} \exp \left\{ - \left[ \frac{(\lambda - \lambda_{lm})}{\sigma_l} \right]^2 \right\} + \\ &+ \frac{1 - f_l(\lambda)}{2} \exp \left\{ - \left[ \frac{(\lambda - \lambda_{lm})}{C_l \sigma_l} \right]^2 \right\}; \\ \bar{m}_{\text{phys}}(\lambda) &= \exp \left\{ - \left[ \frac{(\lambda - \lambda_{mm})}{\sigma_m} \right]^2 \right\}; \\ \bar{s}_{\text{phys}}(\lambda) &= \frac{f_s(\lambda)}{2} \exp \left\{ - \left[ \frac{(\lambda - \lambda_{sm})}{\sigma_s} \right]^2 \right\} + \\ &+ \frac{1 - f_s(\lambda)}{2} \exp \left\{ - \left[ \frac{(\lambda - \lambda_{sm})}{C_s \sigma_s} \right]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

В табл. 2 приведены полученные в результате решения значения коэффициентов аппроксимации для всех 10 наблюдателей и их значения для средней  $L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda)$ .

Средняя погрешность аппроксимации экспериментально полученных значений  $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$  не превышает 6 %, а максимальная погрешность по **всем** наблюдателям и экспериментальным точкам немного выше 14 %. В табл. 3 приведены значения погрешности аппроксимации для всех исследованных наблюдателей.

На рис. 3, для примера, представлены исходные (Н1, Н8, Среднее) и аппроксимированные (Н1\_A, Н8\_A, Среднее\_A) зависимости  $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$  для случаев наилучшей (Н1) и наихудшей (Н8) аппроксимаций, а также

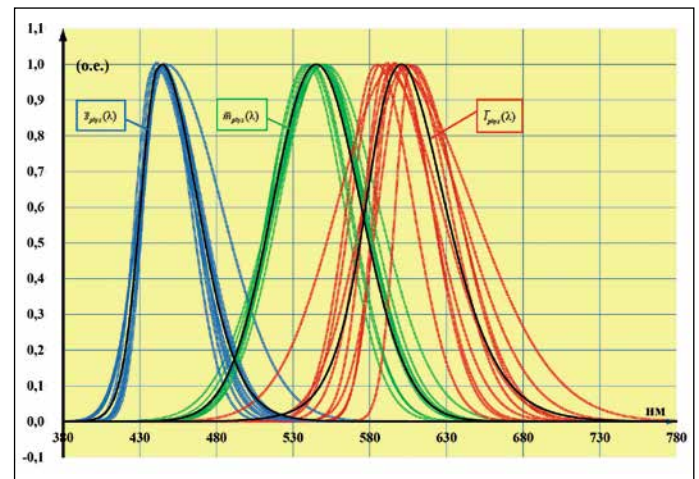


Рис. 2. Спектральные зависимости удельных координат цвета  $(LMS)_{\text{phys}}$  в отн. ед., для 10 трихроматов и средние спектральные зависимости  $\bar{l}_{\text{phys}}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{\text{phys}}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{\text{phys}}(\lambda)$

Экспериментальные зависимости  $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$ ,  $\text{ср} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$ , для 10 трихроматов

$\lambda$ , нм	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	$(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}})^{-1}$	СКО / $L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}$ , %
420	238	318	217	194	272	455	193	220	190	159	246	35,2
435	703	881	1258	1808	1750	1293	707	1489	1171	1108	1217	32,0
450	823	1105	1292	2386	2119	1543	661	1794	1517	1334	1457	37,1
465	519	998	1004	1357	1893	996	487	1244	1126	1058	1068	37,6
480	495	797	548	673	911	438	300	641	635	578	602	29,0
495	1139	912	702	526	778	644	685	960	689	756	779	22,9
510	1900	1551	1582	1084	1368	1637	1628	1887	1964	1549	1615	16,4
525	2799	2442	2765	1975	2303	2415	2739	3056	3100	2265	2586	14,1
540	3691	3126	3088	2159	3218	3114	4084	4141	3683	3640	3394	17,2
555	3792	2920	2669	1983	3293	3367	4303	4143	3836	3361	3367	21,0
570	3473	2275	2591	1679	2405	2411	4110	3232	3328	3094	2860	24,9
585	3328	2051	3357	1982	2009	2227	4232	1672	2889	4029	2777	33,1
600	2961	2413	2842	2487	2160	2934	3428	966	2959	3767	2692	28,5
615	2186	1752	2485	2242	1829	2776	1512	865	2336	2775	2076	28,7
630	1094	1648	1933	1979	1617	1943	609	503	1092	1852	1427	39,3
645	388	1233	1047	1075	1088	1066	174	368	362	832	763	51,8
660	104	981	550	614	672	437	26	171	80	307	394	79,0

Таблица 2

Значения коэффициентов аппроксимации для 10 наблюдателей и для средней  $L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}$ 

№ набл./Параметр	$\lambda_m$	$\lambda_{mm}$	$\lambda_{sm}$	$\sigma_l$	$\sigma_m$	$\sigma_s$	$C_l$	$C_s$
1	595.8	550.7	444.9	28.4	49.5	22.0	1.24	1.19
2	594.1	546.2	446.6	16.6	43.6	23.7	4.50	2.19
3	587.5	538.7	440.2	27.8	35.0	14.7	1.97	2.72
4	604.5	540.4	442.1	40.4	36.9	14.0	1.16	2.37
5	596.8	547.9	443.3	18.3	41.4	15.9	3.27	2.43
6	603.6	546.4	445.2	25.7	40.5	22.6	1.59	1.28
7	584.4	549.0	439.0	27.3	39.9	16.4	1.25	2.30
8	606.8	546.3	442.5	14.2	41.4	15.4	3.07	2.21
9	597.5	542.3	444.0	54.8	36.1	16.5	0.60	2.21
10	590.5	549.5	442.4	20.0	43.3	15.1	2.19	2.51
$L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}$	593.84	548.03	443.11	23.53	43.14	17.11	2.01	2.11

для аппроксимации средней по 10 наблюдателям функции  $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$ . Полученные результаты показывают достаточную чувствительность метода, позволяющего выявлять индивидуальные особенности цветового зрения у разных наблюдателей.

### Обсуждение полученных на первом этапе исследований результатов

После определения средних спектральных зависимостей  $\bar{l}_{\text{phys}}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{\text{phys}}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{\text{phys}}(\lambda)$ , в относительных единицах, (рис. 2) необходимо было установить их корреляцию со

Относительные погрешности аппроксимации зависимостей  $(L_{co}^{th,dif}(\lambda))^{-1}$  при решении системы (1) для 10 наблюдателей

$\lambda$ нм/ $\eta$ %	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	$\eta$ ср %	$\eta$ max %
420	0,052	0,018	0,033	0,128	0,095	0,012	0,034	0,004	0,047	0,132	0,055	0,132
435	0,317	0,092	0,492	1,247	0,722	0,057	0,715	0,052	0,267	1,282	0,524	1,282
450	0,939	0,630	3,179	6,247	6,001	0,116	3,668	0,691	0,823	2,582	2,488	6,247
465	1,017	0,841	4,031	8,145	10,540	0,041	4,372	1,351	0,274	5,426	3,604	10,540
480	3,638	0,445	1,759	2,510	6,613	0,183	2,962	0,994	1,394	2,802	2,330	6,613
495	6,212	0,429	0,761	0,831	4,292	4,078	2,197	4,078	6,766	1,771	3,142	6,766
510	1,550	1,286	1,637	3,927	3,055	9,033	1,728	3,211	10,595	2,286	3,831	10,595
525	3,590	0,022	2,457	5,507	3,978	4,760	5,813	5,511	0,755	11,395	4,379	11,395
540	1,757	3,172	1,787	3,269	2,443	4,908	2,877	0,797	8,247	9,013	3,827	9,013
555	0,081	1,502	0,369	0,189	3,915	4,811	1,483	2,862	1,034	1,922	1,817	4,811
570	0,047	1,280	0,000	0,863	2,453	1,414	3,352	6,153	4,902	0,004	2,047	6,153
585	0,293	0,990	3,152	1,578	0,136	0,630	1,265	5,206	3,592	0,020	1,686	5,206
600	1,777	10,615	8,005	2,175	0,645	1,100	8,215	2,199	0,823	1,710	3,726	10,615
615	2,697	9,812	0,936	4,290	4,210	0,872	11,948	10,151	3,877	3,672	5,247	11,948
630	0,055	0,617	8,628	7,772	5,569	0,503	2,775	14,083	2,265	6,455	4,872	14,083
645	2,611	4,977	2,171	7,827	0,215	0,659	9,500	4,407	1,106	0,460	3,393	9,500
660	1,296	3,749	1,423	2,450	1,350	0,279	4,076	0,039	0,952	1,953	1,756	4,076
$\eta$ ср %	1,643	2,381	2,401	3,468	3,308	1,968	3,940	3,635	2,807	3,111		

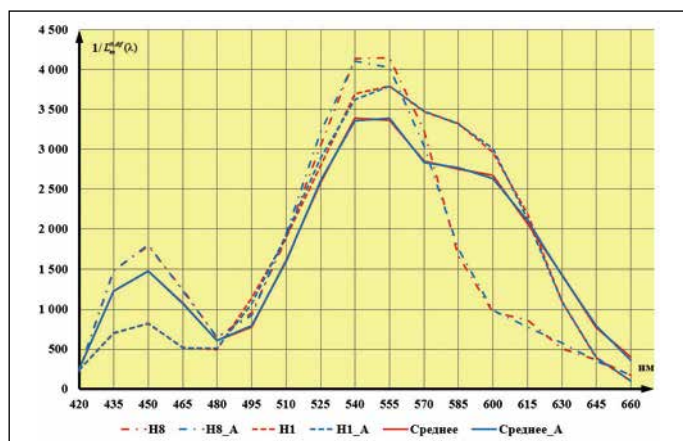


Рис. 3. Исходные (красный цветом) и аппроксимированные (синим цветом) зависимости  $(L_{co}^{th,dif}(\lambda))^{-1}$ . H1 – наименьшая погрешность, H8 – наибольшая погрешность. Сплошные кривые – для средней по 10 наблюдателям функции  $(L_{co}^{th,dif}(\lambda))^{-1}$

стандартом МКО – КС RGB и XYZ (1931 г.). Следует отметить, что авторы не ожидали получить полного совпадения по следующим причинам:

1) средние цветовые характеристики набора наблюдателей, использованных нами и в экспериментах [3, 4], не могут точно совпадать между собой из-за конечного числа наблюдателей, участвовавших в экспериментах;

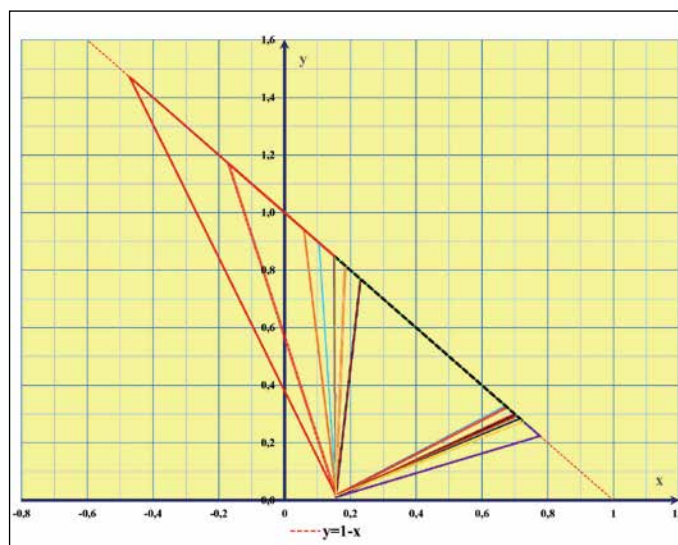


Рис. 4. Треугольники основных цветов исследованных трихроматов

2) аппроксимирующие выражения, которые авторы использовали (выражения (2)) могут не позволять аппроксимировать средние спектральные зависимости для наблюдателей [3, 4] с необходимой точностью, поскольку особенностей этих зависимостей мы не знаем.

Анализ полученных нами экспериментальных результатов показал, что матрицы перехода из КС исследован-

Матрица перехода координат цвета из системы  $LMS$  в систему  $XYZ$

	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$
$\bar{l}$	1,947354690	-1,414451230	0,364763270
$\bar{m}$	0,689902720	0,348321890	0
$\bar{s}$	0	0	1,934853430
$\Sigma$ координат	2,637257410	-1,066129340	2,299616700

Таблица 5

Матрица преобразования координат цветности из системы  $LMS$  в систему  $XYZ$

	$x$	$y$	$z$
$l$	0,738401448	0,261598552	0
$m$	1,326716353	-0,326716353	0
$s$	0,158619160	0,000000000	0,841380840

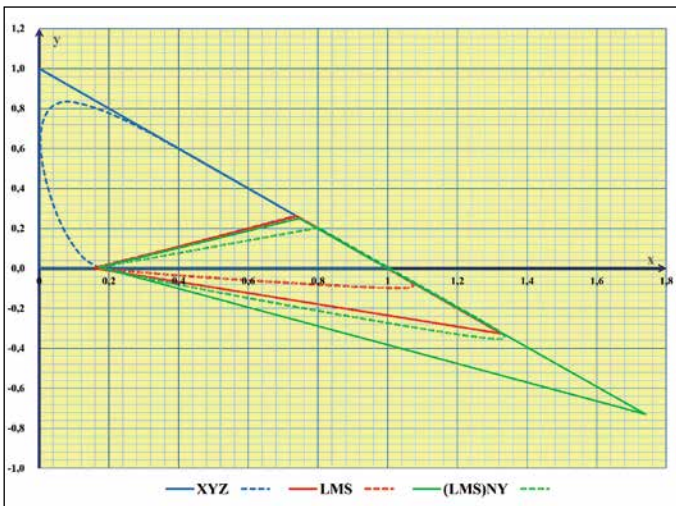


Рис. 5. Треугольники основных цветов и диаграммы цветности  $XYZ$ ,  $LMS$  и Юстовой ( $NY$ ) в системе  $XYZ$

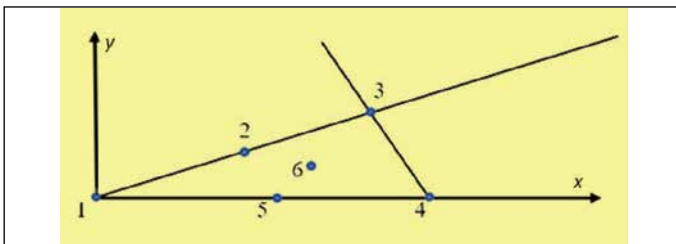


Рис. 6. Область допустимого расположения вершины ( $S_{phys}$ ) координатного треугольника колориметрической системы трихромата

ных наблюдателей в КС  $XYZ$  дают на диаграмме цветности положительное значение координаты  $Y$  для ОЦ  $M_{phys}$  и его координаты лежат, как и координаты цвета  $L_{phys}$ , на прямой  $y = 1 - x$ . Причём этот результат получен для всех исследованных наблюдателей и для характеристик среднего наблюдателя. На рис. 4 приведены треугольники ОЦ всех исследованных трихроматов в КС  $XYZ$ .

Координаты цветности основных цветов физиологической колориметрической системы трихромата ( $LMS$ ) $_{phys}$  в колориметрической системе  $XYZ$

	$x$	$y$	$z$
$l_{phys}$	0,734665727	0,265334273	0
$m_{phys}$	-5,942971132	6,942971132	0
$s_{phys}$	0,169147999	0,001096000	0,829756001

Этот результат, полученный нами при исследовании трихроматов, принципиально отличается от получаемых исследованиями как классических дихроматов [13], так и дихроматов, отбираемых по тестам ДНК [9].

На рис. 5 приведены треугольники ОЦ дихроматов – по Юстовой [13] и полученные на основе матрицы перехода из КС  $LMS$  в КС  $XYZ$ , приведённой в [9]. На этом же рисунке приведены и диаграммы цветности (пунктирные кривые)  $XYZ$ ,  $LMS$  и Юстовой в КС  $XYZ$ .

Отрицательное значение координаты  $M$  для КС, полученных с использованием дихроматов, приводит к тому, что цветности значительной части реальных цветов КС дихроматов в КС  $XYZ$  имеют отрицательное значение координаты  $y$ . На рис. 4 это цветности излучений, лежащие ниже алихны (ось  $x$ ) до пунктирных красного и зелёного графиков, соответствующих диаграммам цветности КС Юстовой и  $LMS$ .

Рассмотрим этот вопрос подробнее на примере  $LMS$ . В табл. 4, приведена матрица перехода из  $LMS$  в  $XYZ$  для поля наблюдения в  $2^\circ$ , заимствованная из [9]. Она позволяет преобразовывать координаты цветов, полученные в КС  $LMS$  в КС  $XYZ$ . При этом функции сложения для всех цветов в КС  $LMS$  имеют положительное значение, а после преобразования вышеприведённой матрицей приемлемо точно совпадают с функциями сложения КС  $XYZ$ .

С точки зрения математических преобразований здесь всё в порядке, поэтому такая КС может описывать цветовые преобразования, но при этом не соответствует физиологической КС трихромата. Возникает вопрос: почему?

Авторы не учли одно важное обстоятельство: для физиологической КС трихроматов полученного соответствия недостаточно. Необходимо, чтобы и сумма положительных координат цветов исходной КС  $LMS$ , после преобразования в КС  $XYZ$ , также имела положительное значение координаты  $Y$ , поскольку только она оценивает суммарный уровень возбуждения рецепторов трихромата. Для КС  $LMS$  это условие не выполняется.

Если поделить элементы матрицы по табл. 4 на сумму координат цвета (последняя строка таблицы) и транспонировать её, то получится матрица преобразования координат цветности из КС  $LMS$  в КС  $XYZ$ , приведённая в табл. 5.

В соответствии с ней построен треугольник основных цветов и диаграмма цветности КС  $LMS$  в КС  $XYZ$ , приведённая на рис. 4.

Как видно из результатов расчёта значительная часть реальных цветов, после преобразования имеют отрицательные значения координат  $Y$ , что соответствует отрицательному ощущению яркости. Это приемлемо для произвольной колориметрической системы, но недопустимо для

Удельные координаты цвета  $(LMS)_{phys}$ 

$\lambda$ , нм	$\bar{l}_{phys}(\lambda)$	$\bar{m}_{phys}(\lambda)$	$\bar{s}_{phys}(\lambda)$	$\lambda$ нм	$\bar{l}_{phys}(\lambda)$	$\bar{m}_{phys}(\lambda)$	$\bar{s}_{phys}(\lambda)$
380	0,000047996	0,000015868	0,006450000	585	1,015781000	0,651020700	0,001400000
385	0,000077655	0,000027052	0,010550000	590	1,013966000	0,543377800	0,001100000
390	0,000142824	0,000052401	0,020050000	595	1,000195000	0,440604000	0,001000000
395	0,000250335	0,000101529	0,036210000	600	0,970421700	0,347934600	0,000800000
400	0,000448729	0,000187767	0,067850000	605	0,927106800	0,266067300	0,000600000
405	0,000695741	0,000326856	0,110200000	610	0,868016300	0,198163900	0,000340000
410	0,001230890	0,000691112	0,207400000	615	0,797102100	0,143856000	0,000240000
415	0,002050717	0,001390848	0,371300000	620	0,715048700	0,101833400	0,000190000
420	0,003311139	0,003017479	0,645600000	625	0,621535000	0,069788160	0,000100000
425	0,004864156	0,006833596	1,039050000	630	0,526486300	0,046393590	0,000050000
430	0,005938483	0,013006040	1,385600000	635	0,440730100	0,029934750	0,000030000
435	0,006199199	0,021856640	1,622960000	640	0,362020300	0,018612960	0,000020000
440	0,005965606	0,033090740	1,747060000	645	0,290185900	0,011099100	0,000010000
445	0,004945297	0,046378020	1,782600000	650	0,227190700	0,006482851	0,000000000
450	0,003315498	0,062865540	1,772110000	655	0,174772600	0,003675217	0,000000000
455	0,001378036	0,082967270	1,744100000	660	0,131505700	0,002030792	0,000000000
460	0,000000002	0,106395800	1,669200000	665	0,096523600	0,001134815	0,000000000
465	0,000679064	0,131758100	1,528100000	670	0,069528760	0,000610753	0,000000000
470	0,005627772	0,159636200	1,287640000	675	0,050550690	0,000323447	0,000000000
475	0,015087970	0,192102000	1,041900000	680	0,037142340	0,000152423	0,000000000
480	0,029070920	0,229571200	0,812950000	685	0,026107520	0,000053054	0,000000000
485	0,046369200	0,271288100	0,616200000	690	0,018005910	0,000016303	0,000000000
490	0,069482490	0,323555400	0,465180000	695	0,012561410	0,000003057	0,000000000
495	0,099112340	0,392096700	0,353300000	700	0,009006851	-0,000000638	0,000000000
500	0,136659300	0,479366600	0,272000000	705	0,006431389	-0,000000556	0,000000000
505	0,186263500	0,593108500	0,212300000	710	0,004591094	-0,000000190	0,000000000
510	0,246776300	0,718676500	0,158200000	715	0,003258209	-0,000000028	0,000000000
515	0,319084400	0,851824500	0,111700000	720	0,002298747	-0,000000017	0,000000000
520	0,396713400	0,974220200	0,078250000	725	0,001624736	-0,000000033	0,000000000
525	0,470518600	1,065551000	0,057250000	730	0,001141805	-0,000000106	0,000000000
530	0,541920700	1,132373000	0,042160000	735	0,000792863	-0,000000230	0,000000000
535	0,607344300	1,174839000	0,029840000	740	0,000547029	-0,000000285	0,000000000
540	0,667984800	1,196088000	0,020300000	745	0,000377488	0,000000121	0,000000000
545	0,724451900	1,197174000	0,013400000	750	0,000263307	0,000000132	0,000000000
550	0,777295000	1,179847000	0,008750000	755	0,000186408	0,000000178	0,000000000
555	0,827893600	1,146725000	0,005750000	760	0,000131654	0,000000066	0,000000000
560	0,875470800	1,097633000	0,003900000	765	0,000092642	-0,000000360	0,000000000
565	0,917929000	1,031844000	0,002750000	770	0,000065827	0,000000033	0,000000000
570	0,954915600	0,951865100	0,002100000	775	0,000046624	-0,000000434	0,000000000
575	0,984675400	0,859535600	0,001800000	780	0,000033216	-0,000000237	0,000000000
580	1,005857000	0,758198700	0,001650000	$\Sigma$	21,371419976	21,371248346	21,371540000

Координаты цветности ( $LMS$ )<sub>phys</sub>

$\lambda$ , нм	$l_{phys}(\lambda)$	$m_{phys}(\lambda)$	$S_{phys}(\lambda)$	$\lambda$ , нм	$l_{phys}(\lambda)$	$m_{phys}(\lambda)$	$S_{phys}(\lambda)$
380	0,00736825	0,002436069	0,990195681	585	0,608907784	0,390252989	0,000839227
385	0,007288365	0,002539014	0,990172621	590	0,650627248	0,34866692	0,000705832
390	0,007054711	0,002588293	0,990356996	595	0,693713201	0,305593221	0,000693578
395	0,006846883	0,002776904	0,990376213	600	0,73563815	0,263755402	0,000606448
400	0,00655208	0,002741657	0,990706263	605	0,77661829	0,222879103	0,000502608
405	0,00625539	0,002938757	0,990805853	610	0,813877037	0,185804169	0,000318794
410	0,005880366	0,00330167	0,990817964	615	0,846901518	0,152843487	0,000254994
415	0,00547235	0,003711486	0,990816164	620	0,875135377	0,124632086	0,000232538
420	0,00507899	0,004628542	0,990292468	625	0,898921292	0,100934079	0,000144629
425	0,004629233	0,006503555	0,988867212	630	0,918936696	0,080976034	8,72707E-05
430	0,004228049	0,00925997	0,986511981	635	0,936339329	0,063596935	6,37356E-05
435	0,003754779	0,013238298	0,983006923	640	0,951050045	0,048897414	5,25413E-05
440	0,003339987	0,018526643	0,97813337	645	0,963128827	0,036837983	3,31901E-05
445	0,002696567	0,025288964	0,972014469	650	0,972256805	0,027743195	0
450	0,001803576	0,034197817	0,963998607	655	0,979404528	0,020595472	0
455	0,000753665	0,045375856	0,953870479	660	0,984792232	0,015207768	0
460	1,08054E-09	0,059921182	0,940078816	665	0,988379752	0,011620248	0
465	0,000408942	0,079346673	0,920244384	670	0,991292318	0,008707682	0
470	0,003873465	0,109873882	0,886252653	675	0,993642206	0,006357794	0
475	0,01207917	0,153793565	0,834127265	680	0,995913019	0,004086981	0
480	0,027128718	0,214233752	0,758637531	685	0,997972	0,002028	0
485	0,049653411	0,290502735	0,659843854	690	0,999095382	0,000904618	0
490	0,080961363	0,377008454	0,542030183	695	0,999756704	0,000243296	0
495	0,117360899	0,464289524	0,418349577	700	1,000070813	-7,08127E-05	0
500	0,15389112	0,539811508	0,306297373	705	1,000086426	-8,64262E-05	0
505	0,187827729	0,598089388	0,214082882	710	1,000041445	-4,14445E-05	0
510	0,219619708	0,639589471	0,140790821	715	1,00000857	-8,57042E-06	0
515	0,248777628	0,66413425	0,087088122	720	1,000007528	-7,52828E-06	0
520	0,273749579	0,672254502	0,053995919	725	1,000020366	-2,03662E-05	0
525	0,295307106	0,668761622	0,035931272	730	1,000092501	-9,2501E-05	0
530	0,315721129	0,659716601	0,02456227	735	1,000289646	-0,000289646	0
535	0,335174664	0,648357557	0,016467779	740	1,000521212	-0,000521212	0
540	0,354486543	0,634740642	0,010772815	745	0,999678678	0,000321322	0
545	0,374388736	0,618686293	0,006924972	750	0,999499333	0,000500667	0
550	0,395390489	0,600158605	0,004450906	755	0,999045643	0,000954357	0
555	0,418050256	0,579046244	0,0029035	760	0,999499333	0,000500667	0
560	0,44282707	0,555200248	0,001972682	765	1,003902486	-0,003902486	0
565	0,470124552	0,528467014	0,001408434	770	0,999499333	0,000500667	0
570	0,500248968	0,498650911	0,001100121	775	1,009395936	-0,009395936	0
575	0,533407114	0,465617811	0,000975075	780	1,007199953	-0,007199953	0
580	0,569662883	0,429402646	0,000934471				

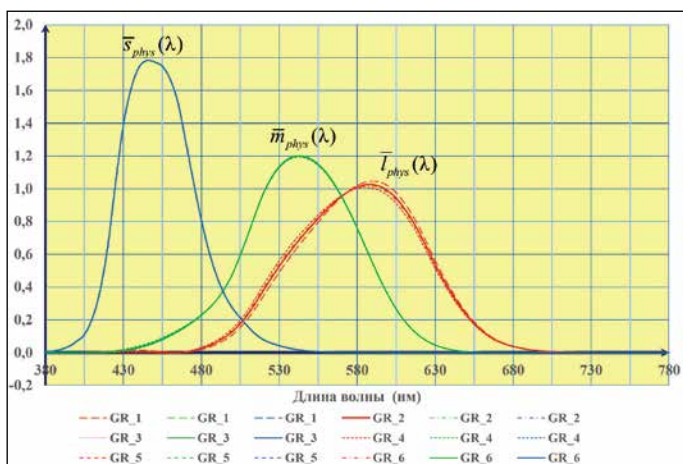


Рис. 7. Удельные координаты цвета физиологической колориметрической системы трихромата, полученные по данным Гилда и Райта [3, 4] для 6 возможных положений основного цвета  $S_{phys}$

физиологической, в которой уровень реакции рецепторов, как и ощущение яркости не может быть отрицательным.

На наш взгляд, **вероятная ошибка в рассуждениях** авторов работ [9, 13] может быть в следующем: т.к. получена матрица перехода для функций сложения новой КС в КС XYZ, то используя эти преобразованные функции, можно получить и диаграмму цветности новой КС в КС XYZ. При таком алгоритме получается, что преобразованная диаграмма цветности новой КС совпадает с диаграммой цветности КС XYZ. **Но это в корне неверно, т.к. матрицы преобразований для координат цвета и цветности, хоть и взаимосвязанные, – это разные матрицы, и их применение даёт результаты, приведённые на рис. 4.**

Сказанное выше показывает необходимость продолжения исследований по определению координат цветности трихромата, с использованием результатов данной и предшествующей, [14], работ авторов.

### Определение характеристик колориметрической системы трихромата $(LMS)_{phys}$

Представленные выше результаты позволяют сформулировать следующие выводы, необходимые для дальнейших исследований:

- 1) координата основного цвета  $M_{phys}$  трихромата в пространстве XYZ имеет положительное значение;
- 2) координаты ОЦ  $L_{phys}$  и  $M_{phys}$  трихромата в КС XYZ лежат на прямой  $y = 1 - x$ ;
- 3) на основании статьи авторов [14], ОЦ  $M_{phys}$  КС трихромата – цвет реальный, совпадающий с основным цветом R КС RGB МКО 1931 г., т.е. имеющий в КС XYZ координаты цветности (0,7346657271, 0,2653342729, 0).

Методика определения характеристик КС трихромата  $(LMS)_{phys}$  основана на определении координат цветности её основных цветов в цветовом пространстве XYZ. При этом в координатном треугольнике известны координаты вершины основного цвета  $L_{phys}$  и участок прямой  $y = 1 - x$ , на которой расположена вершина с координатой ОЦ  $M_{phys}$ . Энергетические ограничения установки на краях спектральных диапазонов позволили исследовать пороговые перепады яркости лишь в диапазоне 420–660 нм, что дало значительный разброс координат ОЦ  $S_{phys}$  при

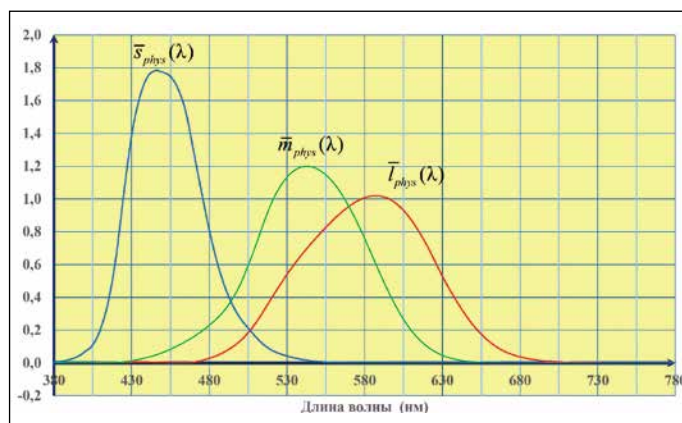


Рис. 8. Удельные координаты цвета  $(LMS)_{phys}$

решении системы уравнений (1), и потому для их определения авторы воспользовались методикой, описанной Н.Д. Ньюбергом [15]. Суть её заключается в том, что если воспользоваться тем свойством физиологической системы, что реакции её рецепторов не могут принимать отрицательных значений, то область возможного положения вершины,  $S_{phys}$ , треугольника ОЦ в КС XYZ оказывается очень ограниченной.

Во-первых, при положительном значении координаты у ОЦ  $M_{phys}$  координатный треугольник КС трихромата должен охватывать диаграмму цветности КС XYZ, не пересекая её, а во-вторых, значение координаты у самого ОЦ  $S_{phys}$  не может быть меньшим нуля, т.к. иначе реакция на него станет отрицательной. Область возможного положения ОЦ  $S_{phys}$  имеет вид треугольника (рис. 6).

Прямая 1–5–4 на рис. 6 – алихна, т.е. в КС XYZ – координатная ось x, ниже которой координата у становится отрицательной. Прямая 1–2–3 есть продолжение линии пурпурных цветов диаграммы цветности КС XYZ, совпадающая с направлением на вершину треугольника с ОЦ  $L_{phys}$ . Прямая 4–3 – это линия, параллельная прямой  $y = 1 - x$  и левая касательная к диаграмме цветности КС XYZ. Было рассмотрено 6 вариантов положения ОЦ  $S_{phys}$  (точки 1–6 на рис. 6). Точки 1, 3 и 4 расположены в вершинах треугольника, точки 2 и 5 – на серединах его сторон, а точка 6 – в его геометрическом центре. Результаты расчётов удельных координат цвета для всех шести точек представлены на рис. 7. Относительные погрешности расчётов координат цветности равноэнергетического источника типа «Е» при использовании любых кривых для шести рассмотренных положений ОЦ  $S_{phys}$  не превышают седьмого знака после запятой.

Наиболее близкое к среднему спектральных зависимостей удельных координат цвета даёт расположение ОЦ  $S_{phys}$  в центр треугольника на рис. 6, т.е. в точке 6. Это позволяет рассчитать координаты цветности ОЦ физиологической КС  $(LMS)_{phys}$  (табл. 6).

Используя данную матрицу, можно получить **все** необходимые параметры КС  $(LMS)_{phys}$ , а именно: удельные координаты цвета  $\bar{l}_{phys}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{phys}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{phys}(\lambda)$ ; диаграмму и координаты цветности  $l_{phys}(\lambda)$ ,  $m_{phys}(\lambda)$ ; яркостные коэффициенты КС; матрицы перехода из КС  $(LMS)_{phys}$  в стандартные КС XYZ и RGB1931 г. [7] и наоборот, а также координаты её ОЦ в этих системах. **Ниже приводятся эти параметры.**

Координаты цветности основных цветов при переходах между стандартными колориметрическими системами МКО и  $(LMS)_{phys}$

XYZ в $(LMS)_{phys}$				RGB в $(LMS)_{phys}$					
	$l_{phys}$	$m_{phys}$	$s_{phys}$	$\Sigma$		$l_{phys}$	$m_{phys}$	$s_{phys}$	$\Sigma$
x	6,191124241	-5,191124241	0,000000000	1,000000000	r	0,388544098	0,607721490	0,003734412	1,000000000
y	0,269378249	0,730621751	0,000000000	1,000000000	g	0,000000000	0,985969641	0,014030359	1,000000000
z	-0,127014130	0,104011073	1,023003057	1,000000000	b	0,000000000	0,010000002	0,989999998	1,000000000
$\Sigma$	6,333488360	-4,356491417	1,023003057		$\Sigma$	0,388544098	1,603691133	1,007764769	
$(LMS)_{phys}$ в XYZ				$(LMS)_{phys}$ в RGB					
	x	y	z	$\Sigma$		r	g	b	$\Sigma$
$l_{phys}$	0,734665727	0,265334273	0	1,000000000	$l_{phys}$	1,000000000	0,000000000	0,000000000	1,000000000
$m_{phys}$	-5,942971132	6,942971132	0	1,000000000	$m_{phys}$	2,724253101	-1,741847521	0,017594420	1,000000000
$s_{phys}$	0,169147999	0,001096000	0,829756001	1,000000000	$s_{phys}$	0,012665918	-0,014252592	1,001586674	1,000000000
$\Sigma$	-5,039157405	7,209401405	0,829756001		$\Sigma$	3,736919019	-1,756100113	1,019181094	

На рис. 7 и 8 и в табл. 7 приведены удельные координаты цвета КС  $(LMS)_{phys}$ , а на рис. 9 и в табл. 8 – диаграмма и координаты цветности КС  $(LMS)_{phys}$ .

Выражения (3)–(6) и координаты цветности основных цветов (табл. 9) описывают взаимосвязь  $(LMS)_{phys}$  со стандартными КС МКО:

$$\begin{pmatrix} \bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda) \\ \bar{x}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \\ \bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,605698611 & -0,507865231 & 0,000000000 \\ 0,518459503 & 1,406192931 & 0,000000000 \\ -0,124158114 & 0,101672300 & 1,000000000 \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \\ \bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda) \\ \bar{x}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1,261118115 & 0,455469536 & 0,000000000 \\ -0,464970813 & 0,543209593 & 0,000000000 \\ 0,203852698 & 0,001320870 & 1,000000000 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda) \\ \bar{r}(\lambda) \bar{g}(\lambda) \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \bar{g}(\lambda) \bar{b}(\lambda) \\ \bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2,195536519 & 0,000000000 & 0,000000000 \\ 3,434036778 & 5,571394241 & 0,056506753 \\ 0,021101958 & 0,079281015 & 5,594168503 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \bar{g}(\lambda) \bar{b}(\lambda) \\ \bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda) \\ \bar{r}(\lambda) \bar{g}(\lambda) \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,455469536 & 0,000000000 & 0,000000000 \\ -0,280760403 & 0,179514088 & -0,001813274 \\ 0,002260867 & -0,002544088 & 0,178783274 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

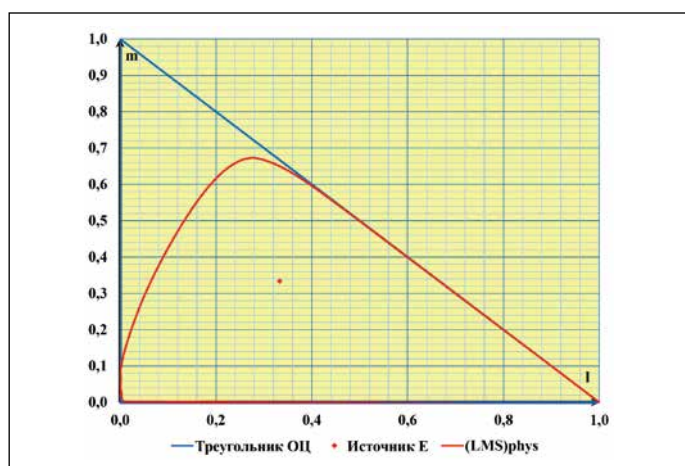


Рис. 9. Треугольник основных цветов и диаграмма цветности  $(LMS)_{phys}$

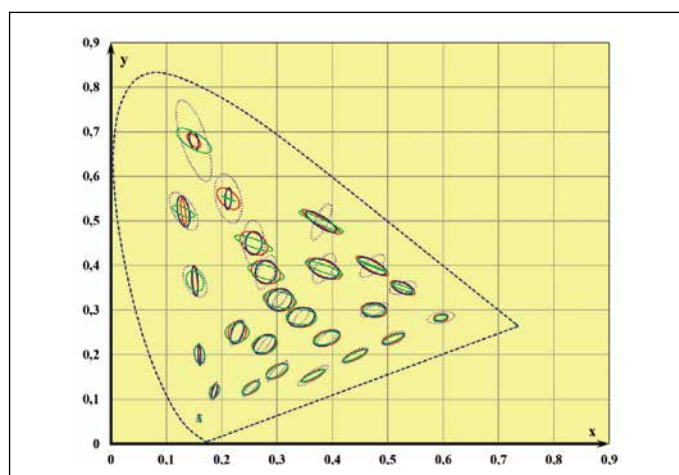
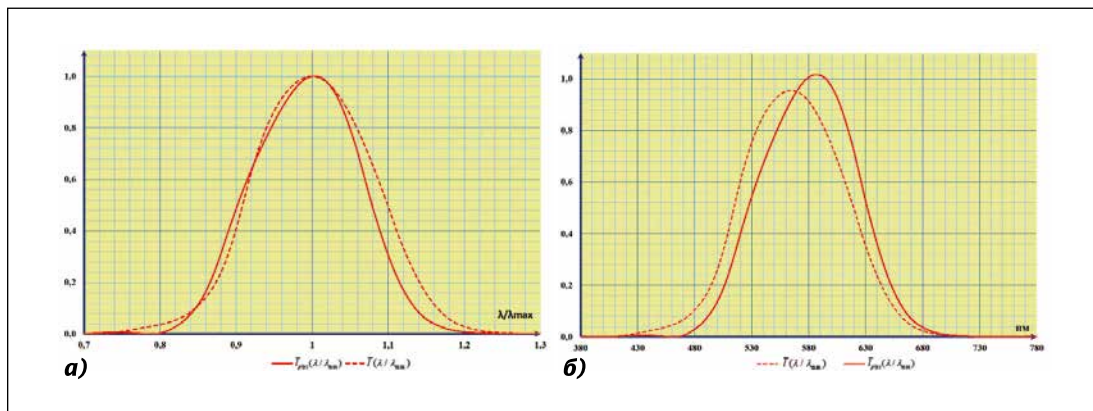


Рис. 10. Результаты расчётов порогов цветоразличения и экспериментальные эллипсы МакАдама, увеличенные в 10 раз.

Объект и фон разной цветности и постоянной яркости создавались тремя монохроматическими источниками света:  
 – для источников с  $\lambda$  380, 520, 700 нм; – для источников с  $\lambda$  440, 505, 640 нм;  
 – для источников с  $\lambda$  440, 535, 640 нм; – эллипсы МакАдама

Рис. 11. Зависимости удельных координат цвета:

$a - \bar{m}_{phys}(\lambda/\lambda_{max})$  и  $\bar{l}(\lambda/\lambda_{max})$ , в отн. ед.;  $b - \bar{m}_{phys}(\lambda)$  и  $\bar{l}(\lambda)$ , в абс. ед.



В табл. 10 приведены яркостные коэффициенты ( $\beta$ ) физиологической КС  $(LMS)_{phys}$ . Отличие функции относительной спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$ , полученной с этими коэффициентами и функциями сложения, от полученной со стандартным фотометрическим наблюдателем МКО не превышает седьмого знака после запятой.

Тем самым определены все параметры физиологической КС трихромата,  $(LMS)_{phys}$ , необходимые для её использования в колориметрических расчётах.

### Применение полученных результатов для определения цветовых порогов

Расчётное выражение (1) приводят к результатам, аналогичным экспериментальным данным МакАдама [16], которые используются для оценки порогов цветоразличения. (рис. 10).

При расчёте порогов цветоразличения в КС  $(LMS)_{phys}$  и последующем перерасчёте их в КС  $XYZ$  было получено, что равноконтрастные кривые (по форме близкие к эллипсам) зависят не только от координат цветности, но и от спектрального состава тех излучений, которые обеспечивают эти цветности. При этом с изменением спектра излучения меняется не только размер эллипсов, но и их ориентация в цветовом пространстве.

### Обсуждение полученных результатов

- Сравнение результатов настоящей работы с опубликованными в статье [9] и с материалами МКО [17] показывает, что удельные координаты цвета  $\bar{m}$  и  $\bar{s}$  практически совпадают с  $\bar{m}_{phys}$  и  $\bar{s}_{phys}$  как по форме, так и по положению максимумов. Заметно различаются лишь удельные координаты цвета  $\bar{l}$  и  $\bar{l}_{phys}$ , причём не только по форме кривых (рис. 11, а), но и по положению их максимумов (рис. 11, б). Максимум удельных координат цвета  $\bar{l}$  лежит на  $\lambda$  565 нм, тогда как максимум удельных координат цвета  $\bar{m}_{phys}$  в КС  $(LMS)_{phys}$ , – на  $\lambda$  585 нм, т.е. смещён на 20 нм вправо. Это ведёт к существенным различиям результатов расчётов в КС  $CIE2006$  и  $(LMS)_{phys}$  для источников, преимущественно излучающих в красной части спектра.

- Косвенно подтверждает корректность представленных результатов тот факт, что во всех экспериментах по удельным координатам цвета трихроматов, проведённых с реальными ОЦ [3–6], координаты цветности ОЦ  $R$  (в красной области) и  $B$  (в синей области), в КС  $XYZ$ , имели зна-

Таблица 10

### Яркостные коэффициенты системы $(LMS)_{phys}$

$\beta_l$	$\beta_m$	$\beta_s$	$\Sigma$
0,455469525	0,543209604	0,001320871	1,000000000

чения, хоть и не совпадающие с координатами цветности  $M_{phys}$  и  $S_{phys}$  в КС  $(LMS)_{phys}$ , но достаточно близкие к ним. Координата ОЦ  $G$  (зелёная область) всегда была положительной (т.к. использовались реальные цвета). При этом положение максимумов удельных координат ОЦ  $R$  во всех экспериментах получалось в районе 600 нм, что существенно ближе к полученному нами (585 нм), чем к положениям максимумов удельных координат ОЦ  $M$ , получаемых с использованием дихроматов (555, 565 и 570 нм) [9, 13].

- Отрицательность значений координат цветности у реальных цветов, получаемых в КС  $CIE2006$  после их перевода в КС  $XYZ$ , показывает, что  $CIE2006$ , не является физиологической системой трихромата, для которой построена КС  $XYZ$ .

- Расчёт порогов цветоразличения показал, что в КС  $(LMS)_{phys}$  и  $XYZ$  они зависят не только от цветности излучений и направления изменения цветности в цветовом пространстве (т.е. эти КС не равноконтрастны), но и от спектра излучений, обуславливающих эти цветности. Данный фактор не учитывался в экспериментах МакАдама, что, возможно, и привело к тому, что воспроизводимые результаты в виде эллипсов им были получены лишь для одного из исследованных наблюдателей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Maxwell J.C. On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1860. – Vol. 150, Part 1. – P. 57–84.
- König A., Dieterici C. Die Gmündempfindungen und ihre Intensitäts-Vertheilung im Spectrum / Sitz. Akad. Wiss. Berlin 1886. – S. 1.: S.n., 1886. – S. 805–829.
- Guild J. The colorimetric properties of the spectrum // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. – 1932. – Vol. 230. – P. 149–187.
- Wright W.D. A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours // Transactions of the Optical Society. – 1928. – Vol. 30. – P. 141–164.
- Сперанская Н.И. Определение координат цветов спектра для 27 нормальных наблюдателей // Оптика и спектроскопия. – 1959. – Т. 7, Вып. 5. – С. 710–720.

6. *Stiles W.S.* Increment thresholds and the mechanisms of colour vision // *Doc. Ophthalmol.* – 1949. – Vol. 3. – P. 138–152.

7. CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Proc. 8th Session, Cambridge, England, September 1931. – P. 19–29.

8. CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Proc. 15th Session, Paris, France, 1964. – Vol. A. – P. 113–120.

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

10. *Боос Г.В., Григорьев А.А., Рыбина В.А.* Установка для экспериментальных исследований монохроматических порогов зрительной системы человека. // *Светотехника.* – 2021. – № 4. – С. 5–11.

11. *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.

12. *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.

13. *Юстова Е.Н.* Определение координатных осей основной физиологической системы из опытов с цветослепыми // *ДАН СССР.* – 1948. – Т. 63, № 4. – С. 383–385.

14. *Боос Г.В., Григорьев А.А.* О координатах цветности основных цветов колориметрической системы КЗС // *Светотехника.* – 2016. – № 3. – С. 30–34.

15. *Нюберг Н.Д.* Определение положения в цветовом треугольнике основного синего цвета // *ДАН СССР.* – 1949. – Т. 65, № 2. – С. 159–162.

16. *MacAdam D.L.* Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight // *J. Opt. Soc. Am.* // 1942. – Vol. 32, No. 5. – P. 247–274.

17. CIE170–1:2006 Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1. – Vienna, CIE.



**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