

## Исследование цветовых пространств МКО на различия в порогах цветоразличения в разных областях цветового локуса

Л.Д. Ложкин, А.А. Кузьменко

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
443010, Россия, г. Самара,  
ул. Л. Толстого, 23

**Аннотация** – Равноконтрастность цветового пространства играет значительную роль при определении цветового различия в системах передачи цвета. Строго равноконтрастными цветовыми пространствами можно считать только те цветовые пространства в которых обеспечиваются равные изменения визуального восприятия цвета при равном изменении координат цвета в данном цветовом пространстве. В настоящее время Международной комиссией по освещению (CIE) принят ряд цветовых пространств называемых равноконтрастными. В статье приведены результаты исследования цветовых пространств, принятых CIE, на равноконтрастность, т. е. на различия в порогах цветоразличения в разных областях цветового локуса. В рамках статьи исследовались такие цветовые пространства, как МКО 1931 (RGB), МКО 1931 (x, y), МКО 1960 (u, v), МКО 1976 (u\*, v\*), CIE LAB (a\*, b\*).

**Ключевые слова** – цветовые пространства; равноконтрастность; МКО 1931 (RGB); МКО 1931 (x, y); МКО 1960 (u, v); МКО 1976 (u\*, v\*); CIE LAB (a\*, b\*).

### Введение

Равноконтрастностью цветового пространства называется свойство цветового пространства, которое обеспечивает равные изменения визуального восприятия цвета при равном изменении координат цвета в данном цветовом пространстве. Согласно литературным данным [1; 2], в настоящее время широко используемые цветовые пространства не могут претендовать на строгую равноконтрастность, что говорит о том, что пороги цветоразличения по Мак-Адаму, приведенные в [3], в колориметрической системе будут отображаться не в виде окружностей, а в виде эллипсов различных размеров (рис. 1). Этот факт указывает на различие величины самого порога цветоразличения в разных областях цветового локуса, т. е. не существует единой величины порога цветоразличения на поверхности цветового локуса.

### 1. Цветовое пространство МКО 1931 (RGB) и МКО 1931 (x, y)

Первыми исследуемыми цветовыми пространствами, которые стали широко использоваться в телевидении, являются цветовые пространства МКО 1931 (RGB) и МКО 1931 (x, y). Первое цветовое пространство использует реально существующие цвета RGB и основано на особенностях цветосприятия человеческого глаза. Основателями данного цветового пространства можно считать

двух независимых ученых – Райта и Гилда [4], чьи исследования были усреднены и интерпретированы как кривые сложения цветов для стандартного наблюдателя (рис. 2).

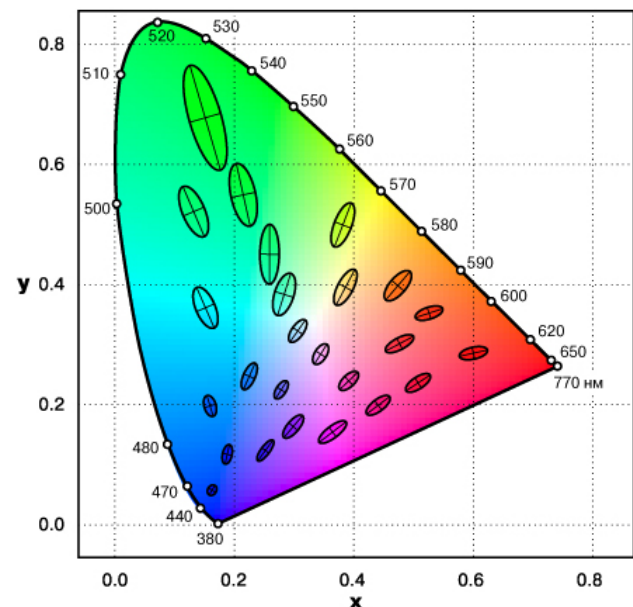


Рис. 1. Эллипсы Мак-Адама, нанесенные на график МКО 1931 г. (для наглядности представления эллипсы увеличены в 10 раз). Эти эллипсы приблизительно соответствуют пределам, границы которых для стандартного наблюдателя соответствуют области визуально одинаковой цветности

Fig. 1. McAdam ellipses plotted on the CIE 1931 graph (for clarity, the ellipses are enlarged 10 times). These ellipses correspond approximately to the limits, the boundaries of which, for a standard observer, correspond to an area of visually identical chromaticity

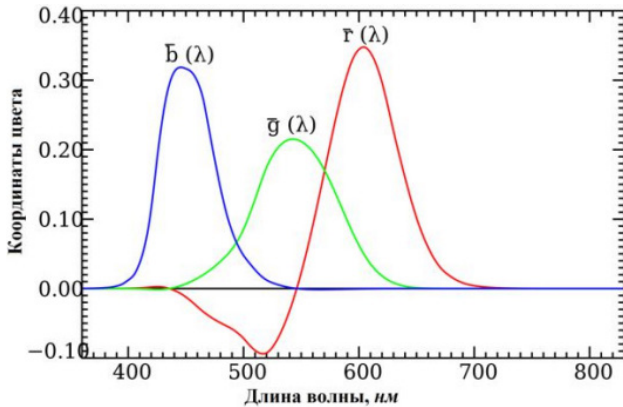


Рис. 2. Кривые сложения цветов при  $R = 700$  нм,  $G = 546,1$  нм,  $B = 435,8$  нм по Райтеру и Гилду

Fig. 2. Color addition curves at  $R = 700$  nm,  $G = 546,1$  nm,  $B = 435,8$  nm according to Reiter and Gild

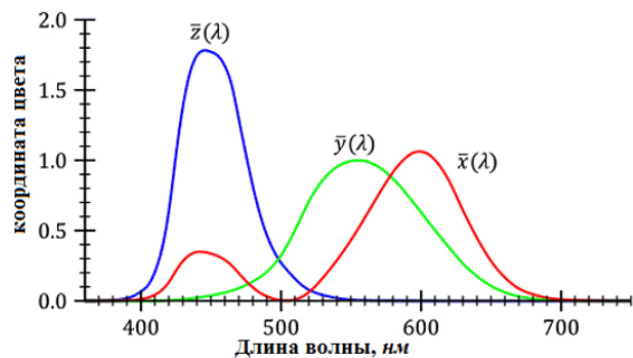


Рис. 3. Кривые сложения цветового пространства МКО 1931 ( $x, y$ )

Fig. 3. Curves of addition of color space CIE 1931 ( $x, y$ )

Табл. Соотношения размеров эллипсов Мак-Адама для различных цветовых систем  
Table. McAdam ellipse size ratios for different color systems

№ п/п	Цветовая система	Отношение площадей эллипсов Мак-Адама	Величина порога цветоразличия	Эллиптичность, $\epsilon$
1	МКО 1931 (RGB)	158,8	0,0146	24
2	МКО 1931 ( $x, y$ )	83,0	0,0059	25,9
3	МКО1960 ( $u, v$ )	7,2	0,0038	2,2
4	МКО 1976 ( $u^*, v^*$ )	228,8	4,9275	13,9
5	CIE LAB ( $a^*, b^*$ )	22,8	3,0624	15,4

Проблемой цветового пространства RGB являлось наличие отрицательных значений для красной кривой, для чего данное цветовое пространство подверглось линейному математическому преобразованию. Полученное цветовое пространство стало носить название МКО 1931 ( $x, y$ ) (рис. 1), которое использовало не реальные цвета, а мнимые. Кривые сложения данного цветового пространства представлены на рис. 3.

При исследовании данных цветовых пространств были получены результаты, представленные в таблице, из которых видно, что данные цветовые пространства не являются равноконтрастными и, как следствие, непригодны для определения цветового различия в системах передачи цвета.

## 2. Цветовое пространство МКО 1960 ( $u, v$ ), МКО 1976 ( $u^*, v^*$ ) и CIE LAB ( $a^*, b^*$ )

Цветовое пространство МКО 1960 ( $u, v$ ) появилось в результате поисков равноконтрастных цветовых пространств, было выяснено, что неравномерность цветового пространства невозможно

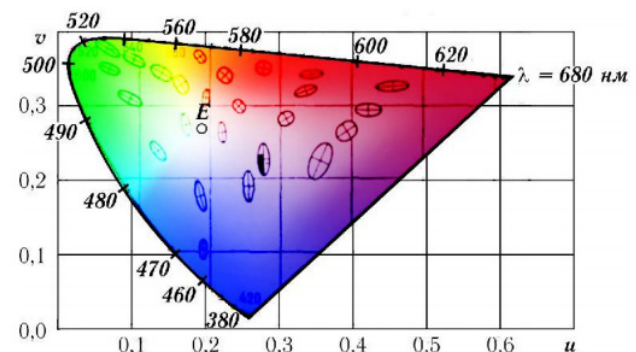


Рис. 4. Цветовое пространство МКО 1960 ( $u, v$ ) с эллипсами Мак-Адама

Fig. 4. CIE 1960 color space ( $u, v$ ) with McAdam ellipses

убрать полностью, а только свести к минимуму. Поэтому в ходе многочисленных дискуссий МКО в 1960 г. временно утвердило равноконтрастный цветовой график, разработанный Мак-Адамом и получивший название МКО 1960 ( $u, v$ ) (рис. 4).

В дальнейшем, в 1974 г., цветовое пространство МКО 1960 ( $u, v$ ) было подвергнуто модификации введением новых координат, обозначенных  $u'$  и  $v'$  [5], а уже в 1976 г. данное пространство было расширено введением третьей координаты  $W^*$ . В 1976 г. были предложены еще две модификации этого цветового пространства [6; 7]:  $Luv$  и  $Lab$ .

Система МКО LABUV является проективным равноконтрастным преобразованием системы МКО XYZ, в то время как  $L^*a^*b^*$  – криволинейным. Поэтому прямые линии, построенные на графике  $xy$ , будут передаваться прямыми на графике  $u^*v^*$ , однако на графике  $a^*b^*$  станут кривыми. Координаты  $a^*$  и  $b^*$  уже не являются независимыми координатами цветности, поскольку в формулы для их определения включен коэффициент яркости  $Y_0$  белого света

Достоинством цветовой модели  $L^*a^*b^*$  МКО (сокращенно МКО Lab), определившим ее широкое использование в колориметрии и промышленности, явилось не только то обстоятельство, что она очень эффективно решила проблему разработки равноконтрастного цветового пространства, но также и то, что описание цвета в этой системе фактически моделирует процесс представления цвета аппаратом человеческого зрения.

Результаты исследования данных цветовых пространств представлены в таблице.

## Заключение

В результате исследования цветовых пространств МКО можно сделать вывод, что цветовые пространства МКО, которые используются в настоящее время, не являются строго равноконтрастными, т. е. не существует ни одной известной колориметрической системы координат, в которой бы эллипсы Мак-Адама изображались бы равновеликими окружностями, что говорит о том, что данные цветовые пространства непригодны для определения цветового различия в системах передачи цвета. Наиболее приближенной к равноконтрастным цветовым пространствам является МКО1960 ( $u, v$ ), но и она имеет овальность в красной и пурпурной области. Из существующих колориметрических систем как пример строго равноконтрастного цветового пространства можно привести цветовое пространство  $(\alpha, \beta)$ , представленное в [7], эллиптичность которого составляет 0,2, что намного меньше, чем у других цветовых пространств.

## Список литературы

1. Новаковский С.В. Цветное телевидение. Основы теории цветовоспроизведения. М.: Связь, 1975. 376 с.
2. Luo M.R., Cui G., Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 // Color Research and Application. 2001. Vol. 26, no. 5. P. 340–350. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.1049>
3. MacAdam D.L. Visual sensitivities to color differences in daylight // Journal of the Optical Society of America. 1942. Vol. 32, no. 5. P. 247–274. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.32.000247>
4. Wright W.D. Researches on Normal and Defective Colour Vision. London: Henry Kimpton, 1946. 383 p.
5. CIE 15.2-1986. Colorimetry. 2nd ed. Vienna: Commission International de l'Eclairage, 1986. 85 p.
6. Фершильд М.Д. Модели цветового восприятия; 2-е изд. М.: Издательство А. Шадрин, 2004. 438 с.
7. Ложкин Л.Д. Дифференциальная колориметрия в телевидении: автореф. дис. ... д-ра тех. наук. Санкт-Петербург, 2014. 31 с.

## References

1. Novakovskij S.V. Color Television. Fundamentals of the Theory of Color Reproduction. Moscow: Svjaz', 1975, 376 p. (In Russ.)
2. Luo M.R., Cui G., Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. Color Research and Application, 2001, vol. 26, no. 5, pp. 340–350. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.1049>
3. MacAdam D.L. Visual sensitivities to color differences in daylight. Journal of the Optical Society of America, 1942, vol. 32, no. 5, pp. 247–274. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.32.000247>
4. Wright W.D. Researches on Normal and Defective Colour Vision. London: Henry Kimpton, 1946, 383 p.
5. CIE 15.2-1986. Colorimetry. 2nd ed. Vienna: Commission International de l'Eclairage, 1986, 85 p.
6. Fershil'd M.D. Color Perception Models. 2nd ed. Moscow: Izdatel'stvo A. Shadrin, 2004, 438 p. (In Russ.)
7. Lozhkin L.D. Differential colorimetry in television. Avtoref. dis. ... d-ra teh. nauk. Saint Peterburg, 2014, 31 p. (In Russ.)

**Leonid D. Lozhkin, Alexander A. Kuzmenko**

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics  
23, L. Tolstoy Street,  
Samara, 443010, Russia

*Abstract* – The equidistance of the color space plays a significant role in determining the color difference in color transmission systems. Strictly equal contrasting color spaces can be considered only those color spaces in which equal changes in the visual perception of color are provided with an equal change in the color coordinates in this color space. Currently, the International Commission on Lighting (CIE) has adopted a number of color spaces called equal-contrast. The article presents the results of the study of color spaces adopted by CIE for equal contrast, i.e. on the differences in the thresholds of color differentiation in different areas of the color locus. The article investigated such color spaces as CIE 1931 (RGB), CIE 1931 ( $x, y$ ), CIE 1960 ( $u, v$ ), CIE 1976 ( $u^*, v^*$ ), CIE LAB ( $a^*, b^*$ ).

*Keywords* – color spaces; equal to contrast; CIE 1931 (RGB); CIE 1931 ( $x, y$ ); CIE 1960 ( $u, v$ ); CIE 1976 ( $u^*, v^*$ ); CIE LAB ( $a^*, b^*$ ).

**Информация об авторах**

**Ложкин Леонид Дидимович**, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

*Область научных интересов:* телевидение, в том числе и цифровое, колориметрия и цветковые пространства, оптика, модели передачи цвета и цветовосприятия, астрофизика и космология.

*E-mail:* leon.lozhkin@yandex.ru

**Кузьменко Александр Александрович**, инженер кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

*Область научных интересов:* радиотехника, колориметрия.

*E-mail:* alexandr291294@mail.ru

**Information about the Authors**

**Leonid D. Lozhkin**, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radio Electronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

*Research interests:* television, including digital, colorimetry and color spaces, optics, models of color transmission and color perception, astrophysics and cosmology.

*E-mail:* leon.lozhkin@yandex.ru

**Alexander A. Kuzmenko**, engineer of the Department of Radio Electronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

*Research interests:* radio engineering, colorimetry.

*E-mail:* alexandr291294@mail.ru