

Преобразования эллипсов МакАдама в широком диапазоне яркостей

В.П.Будак¹, Р.А.Делян¹

¹ НИУ МЭИ, Красноказарменная 14, Москва, 111250, Россия

Аннотация

В утилитарном и внутреннем освещении последнего десятилетия светоизлучающие диоды (СД) получают все большую популярность. Это связано с преимуществами данного источника света (ИС), к которым можно отнести: высокую энергоэффективность, длительный срок службы, простоту управлением световым потоком и экологичность. Все это позволяет СД вытеснять с рынка разрядные ИС. Однако, применение СД в искусственном освещении началось относительно недавно, что определяет необходимость лучшего изучения особенностей ИС и постоянного совершенствования нормативной базы. Оценка однородности цветности излучения проводится с помощью цветных порогов, полученных в эксперименте МакАдама и получившие название по своей форме – эллипсы МакАдама. Данный эксперимент проводился при одних условиях наблюдения. Применение их в практике ограничено и требует исследования в широком диапазоне условий наблюдения. В данной работе рассмотрены две модели: модель цветового восприятия CIECAM02, которая одобрена МКО (Международной комиссией по освещению) и модель Беляевой – Матвеева, разработанная 1964г., в МЭИ. Выбор второй модели связан с тем, что она более точная в сравнении с моделями общепринятыми CIELUV и CIELAB. Было проведено исследование преобразования эллипсов МакАдама в двух моделях при изменении условий наблюдений как по яркости, так и по цветности и дальнейшее сравнение полученных результатов. Полученные данные позволяют говорить об актуальности дальнейших исследований восприятия излучения белых цветов в широких диапазонах цветности и яркости для усовершенствования алгоритмов модели цветового восприятия.

Ключевые слова

Эллипсы МакАдама, цветовая температура, яркостная адаптация, цветовая адаптация, CIECAM02, модель Беляевой-Матвеева, модель цветового восприятия.

Transformations of Macadam Ellipses in a Wide Range of Brightness

V.P. Budak¹, R. A.Delian¹

¹ National Research University "MPEI", Krasnokazarmennaya 14, Moscow, 111250, Russia

Abstract

In the utilitarian and interior lighting of the last decade, light-emitting diodes (LED) are becoming increasingly popular. This is due to the advantages of this light source, which include: high energy efficiency, long service life, ease of light flow control and environmental friendliness. All this allows LED to displace discharge light sources from the market. However, the use of LED in artificial lighting began relatively recently, which determines the need for a better study of the features of the light source and the constant improvement of the regulatory framework. The uniformity of the chromaticity of the radiation is estimated using the color thresholds obtained in the Macadam experiment and called by their shape – Macadam ellipses. This experiment was conducted under the same observation conditions. Their application in practice is limited and

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: budakvp@gmail.com (V. Budak); ruzana_delyan@mail.ru (R. A.Delian)

ORCID: 0000-0003-4750-0160 (V. Budak); 0000-0002-8360-1180 (R. A.Delian)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

requires research in a wide range of observation conditions. In this paper, two models are considered: the CIECAM02 color perception model, which is approved by the ICO (International Commission on Lighting) and the Belyaeva–Matveev model, developed in 1964, at the MPEI. The choice of the second model is due to the fact that it is more accurate in comparison with the generally accepted CIELUV and CIELAB models. A study of the transformation of Macadam ellipses in two models was carried out under changing observation conditions in both brightness and chromaticity and further comparison of the results obtained. The data obtained allow us to speak about the relevance of further studies of the perception of white color radiation in wide ranges of chromaticity and brightness to improve the algorithms of the color perception model.

Keywords

MacAdam ellipse, color temperature, adaptation luminance, chroma adaptation, CIECAM02, Belyaeva–Matveev model, color appearance model.

1. Введение

Качественные показатели искусственного освещения, такие как цветовая температура, общий индекс цветопередачи, спектральное распределение излучения, коэффициент пульсации, определяют зрительный комфорт человека. Для создания качественной и комфортной осветительной установки проектировщику необходимо понимание всех указанных параметров и характеристик, а также их изменения с зависимости от влияния внешних условий.

В данной статье приводится анализ одного показателя, цветовой однородности излучения, при изменении условий наблюдений: яркостной и цветовой адаптации. Говоря о цветовой однородности излучения, мы подразумеваем об однородности освещения пространства, в котором мы не наблюдаем видимых отличий цветности искусственного освещения. На рисунке 1 продемонстрирован пример неоднородного по цветности освещения, где часть светильников имеют желтоватый оттенок, а другая – синеватый.



Рисунок 1 – Пример применения в освещении светильников неоднородных по цветности

Критерий оценки цветовой однородности, применяемый сегодня в нормативной документации на светильники [2] основан на нормировании разбросов координат цветности x , y , связанных с линейным масштабированием результатов эксперимента МакАдама по оценке порога цветоразличения [3]. Нормирование разбросов цветности СД проводится в рамках эллипсов для разных T_{cv} , представленных на рисунке 2. Однако, даже при выполнении указанных требований возможно наблюдать отчетливое различие в цветности ИС [4].

Основными недостатками нормирования однородности цветности излучения, основанного на эллипсах МакАдама описаны в статье [5].

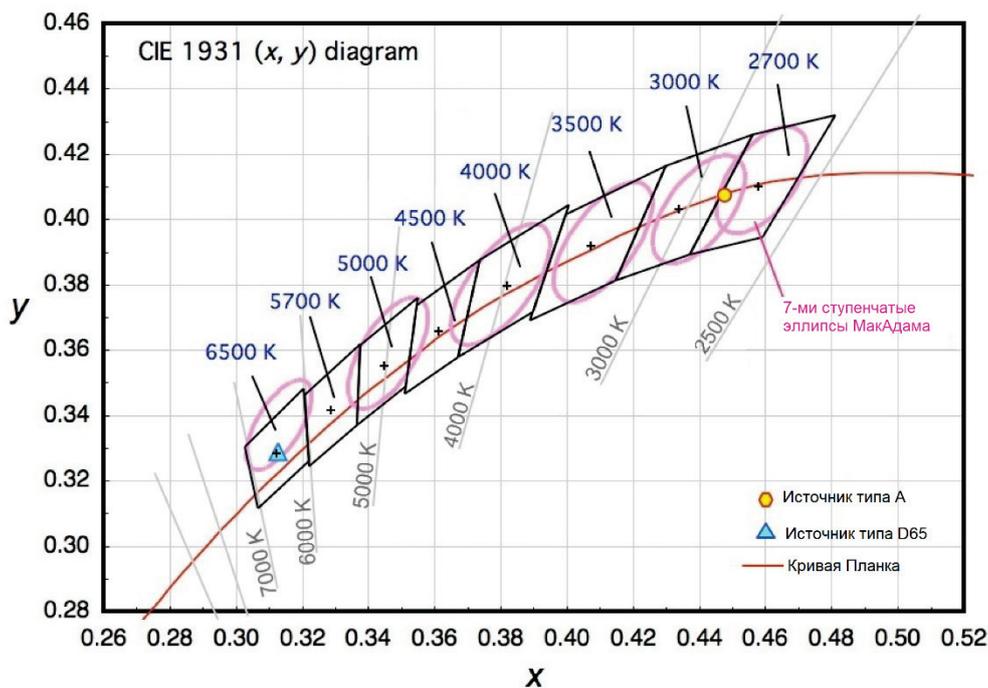


Рисунок 2 – 7-ступенчатые эллипсы МакАдама на цветовом графике МКО 1931 г.

2. Методы

Для исследования влияния хроматической и яркостной адаптации на изменение цветковых порогов были использованы две модели:

- модель цветового восприятия CIECAM02, которая является рекомендованной на данный момент МКО;
- равноконтрастная модель цветовых ощущений на основе физиологической системы КЗС, разработанной Беляевой-Матвеевым на кафедре Светотехника, МЭИ в 1964 г.

Выбор данных двух моделей был продиктован следующими причинами: модели CIELAB и CIELUV, также рекомендованные МКО обладают недостатками [6]:

- низкая точность модели хроматической адаптации;
- отсутствие учета яркостного влияния просматриваемых объектов;
- отсутствие механизма моделирования когнитивных эффектов, таких, как когнитивное обесцвечивание осветителя;
- в CIELAB и CIELUV не рассчитываются корреляты с абсолютными атрибутами восприятия, такими, как субъективная яркость и полнота цвета.

Помимо этого, выбранные модели обладают преимуществами перед остальными.

К преимуществам модели CIECAM02 можно отнести [6]:

- Модель включает в себя предикторы относительных цветковых характеристик светлоты, насыщенности и цветового тона, которые позволяют описать восприятие цвета.
- Модель включают преобразование хроматической адаптации (проще в сравнении с предыдущей версии CIECAM97s).
- Модель способна прогнозировать широкий диапазон эффектов, зависящих от адаптации, окружения и яркости.
- В модели учитывается окружение объекта: среднее (печатная продукция), темное (проекторный показ слайдов) и тусклое (просмотр изображений на мониторе).

Преимуществами модели цветовых ощущений являются [7]:

- учет влияния фона на процессы адаптации и индукции;
- применение в основе модели физиологических кривых чувствительностей трех цветовоспринимающих рецепторов, в том числе благодаря чему модель позволяет с высокой точностью определить закономерности цветового зрения: изменение цветового порога по цветовому тону для однородных излучений, изменение насыщенности в функции длины волны, явление Бецольда-Брюкке, эффект Бецольда-Эбнея, эффект Кольрауша;
- высокая степень равноконтрастности цветового графика системы.

Приведенные модели не применимы к ситуациям, при которых значим палочковый компонент зрения (сумеречное и ночное зрение), или к ситуациям с экстремально высокими уровнями яркости, способными вызвать колбочковое ослепление [6].

Подробнее о расчете в модели СЕСАМ02 приведено в статье [5].

В основе модели цветового восприятия заложена идея о том, что уровни возбуждения в каждом из цветовоспринимающих рецепторов глаза пропорциональны частоте импульсов токов действия, а ощущение цвета – трем уровням возбуждения [8].

Расчет в равноконтрастном пространстве цветовых ощущений:

$$V_m = \frac{A_m \cdot m'_{0}}{\alpha_m \cdot m'_{0} + m'_{ad}} + C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi} \right)^p,$$

где $m'_{ad} = \left[t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi} \cdot m'_{0} + (1 - t_m) \cdot \frac{L_0}{L_\phi} \cdot m'_{\phi} \right] \left(\frac{L_0}{L_\phi} \right)^n$ - расчет влияния адаптации

$m'_{0} = \begin{vmatrix} K \\ 3 \\ C \end{vmatrix}$ - координаты цветов объекта в физиологической системе КЗС

$m'_{\phi} = \begin{vmatrix} K_{\phi} \\ 3_{\phi} \\ C_{\phi} \end{vmatrix}$ - координаты цветов фона в физиологической системе КЗС

Исследование изменений эллипсов МакАдама при яркостной и цветовой адаптации проводилось при трех различных условиях (таблица 1). В первом исследовании влияния яркостной адаптации рассматривается в широком диапазоне яркости объекта (L_0) при неизменной яркости фона (L_ϕ). Во исследовании № 2, 3 рассматривается влияние изменения $T_{цв}$ фона.

Таблица 1 – Условия наблюдений

| | Исследование №1 (яркостная адаптация) | Исследование №2 (цветовая адаптация) | Исследование №3 |
|-------------------------------|--|---|-----------------|
| L_0 / L_ϕ | 0,1 – 40 | 40 | 40 |
| Ладаптации, кд/м ² | 5 - 200 | 200 | 200 |
| $T_{цв}$ объекта, К | 6 500 | 2 700 | 6 500 |
| $T_{цв}$ фона, К | 6774 (ИС типа С) | 2 700 – 6 500 | 2 700 – 6 500 |

3. Результаты и обсуждения

Полученные результаты, представленные на рисунке 3 – рисунке 5 демонстрируют некоторые закономерности:

1. На низких уровнях $La < 100$ кд/м² результаты обеих моделей показывают близкие результаты. Выше 100 кд/м² эллипсы наблюдается увеличивающееся расхождение.
2. Наблюдается разнонаправленное расхождение эллипсов Макадама при увеличении яркости адаптации:
 - в исследовании №1 модель CIECAM 02 при увеличении яркости адаптации демонстрирует движение эллипсов Макадама в сторону снижения координат цветности (x, y), то в модели Беляевой- Матвеева полностью противоположные результаты – движение центров эллипсов происходит в сторону увеличения координат цветности (x, y) - Рисунок 3.
 - в исследовании № 2 (Рисунок 4) видим, что движение центров эллипсов совпадает по оси координаты цветности x, но разнонаправлены на по оси y.
 - в исследовании № 3 (Рисунок 5) наблюдается противоположная ситуация: по оси y сонаправленное изменение центров эллипсов, а по оси координаты цветности x – противоположное.

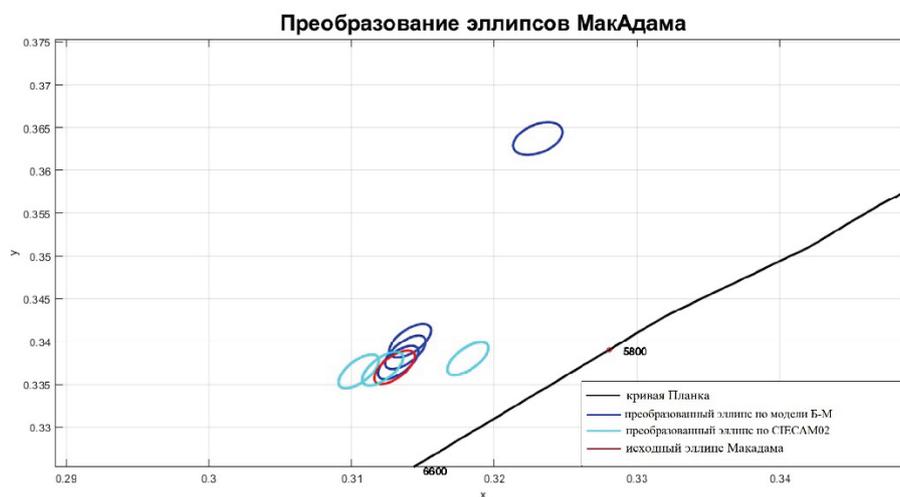


Рисунок 3 – Изменение эксцентриситета эллипсов Макадама в исследованиях №1

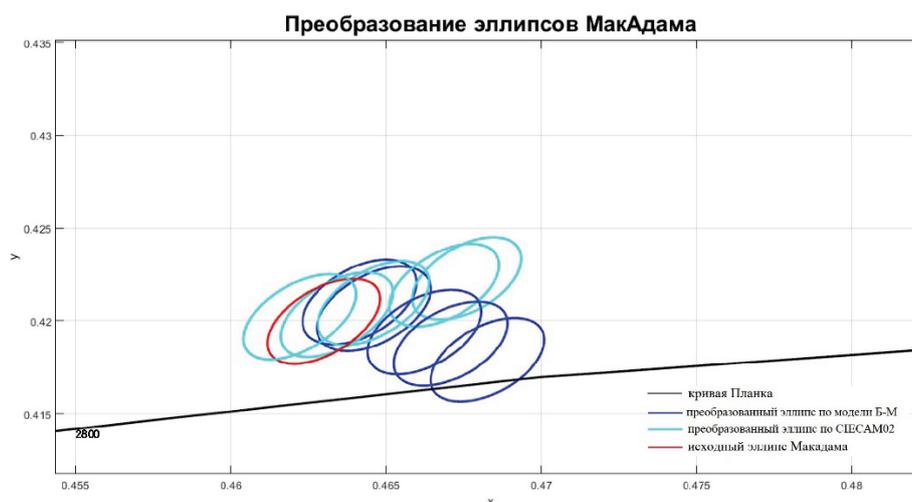


Рисунок 4 – Изменение эксцентриситета эллипсов Макадама в исследованиях №2

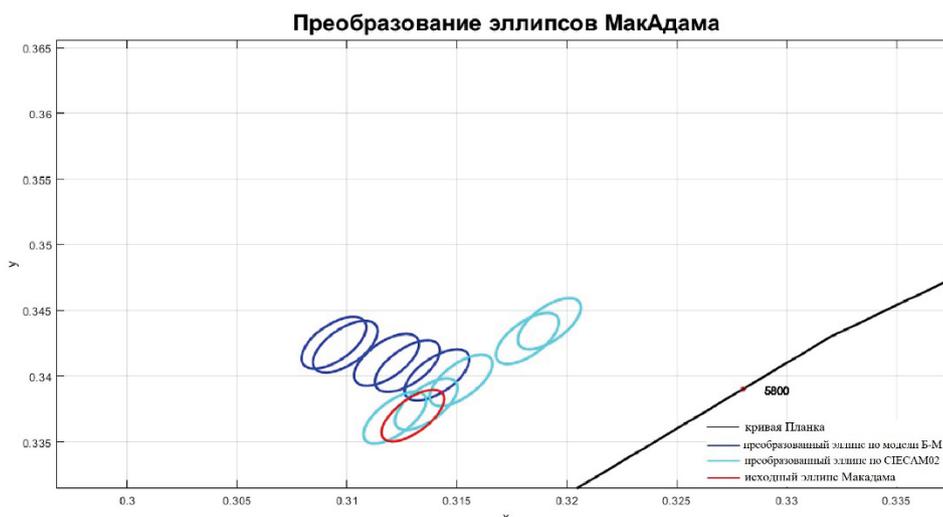


Рисунок 5 – Изменение эксцентриситета эллипсов МакАдама в исследованиях №3

4. Выводы

Моделирование изменений эллипсов Макадама продемонстрировало, что выбранные модели СИЕСАМ02 и модель Беляевой- Матвеева v_k, v_s, v_c показывает близкие результаты при яркостях до 100 кд/м^2 и дальнейшее расхождение при увеличении яркости адаптации. Представляет научный интерес дальнейшее изучение вопроса и проведение натурального эксперимента для понимания, какая из двух моделей точнее описывает процессы адаптации яркостной и хроматической в зрительном органе человека.

5. Список источников

- [1] Методическое руководство по проектированию динамического освещения общественных зданий. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве». М., 2019.
- [2] ГОСТ 34819-2021. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. М., 2022, 49 с.
- [3] MacAdam, D. L. Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight//Journal of the Optical Society of America. 1942. №5 v32. С. 247–274.
- [4] LED Lighting, Technology and Perception / Т. Q.Khanh, P.Bodrogi, Q. T. Vinh, and H. Winkler, Wiley-VCH, 2015, p. 299-301.
- [5] Будак В. П., Делян Р. А. Изменение эллипсов МакАдама с учётом адаптации// Светотехника, 2023, №2, стр. 66-69.
- [6] M.D. Fairchild, Color Appearance Models, 2nd. ed., Wiley, Chichester, 2005
- [7] Беляева Н.М., Построение равноконтрастной системы для определения цветовых соотношений в архитектурных интерьерах, кандидатская диссертация, 1972 г., Москва
- [8] Матвеев А. Б., Беляева Н. М. Равноконтрастная цветовая система // Светотехника, 1965, №9, стр. 1-6.