

Статья посвящена анализу спектральной световой эффективности излучения в сумеречной области зрения. Реализована аппроксимация функции спектральной световой эффективности излучения в сумеречной области зрения стандартными функциями для свето- и темноадаптированного глаза.

УДК 621.315

А.А. Серобаба, асп.,
С.С. Овчинников, докт. техн. наук
Харьковская национальная академия
городского хозяйства

ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ЯРКОСТИ КАК РЕЗУЛЬТАТ ПЕРЕСТРОЙКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТОВОСПРИНИМАЮЩИХ РЕЦЕПТОРОВ

Наиболее полное представление о зрительном воздействии света в переходной между дневным и ночным зрением дает значение эквивалентной яркости [1,2]. Оценка освещения по уровню фотометрической яркости при малых яркостях адаптации нерациональна, т.к. интенсивность восприятия света зрительным аппаратом в этом случае может различаться на порядок, в зависимости от спектрального состава излучения.

Вышесказанное диктует необходимость анализа характера изменения функции световой эффективности оптического излучения и возможности определения уровня зрительного ощущения сумеречного зрения. Сложность поставленной задачи заключается в изменении спектральной чувствительности зрительного аппарата человека при различных условиях яркости адаптации (рис.1).

Целью работы является аппроксимация набора сложных кривых функций относительной спектральной световой эффективности излучения для сумеречного зрения стандартными функциями МКО для свето- и темноадаптированного глаза либо функциями спектральной чувствительности цветовоспринимающих рецепторов.

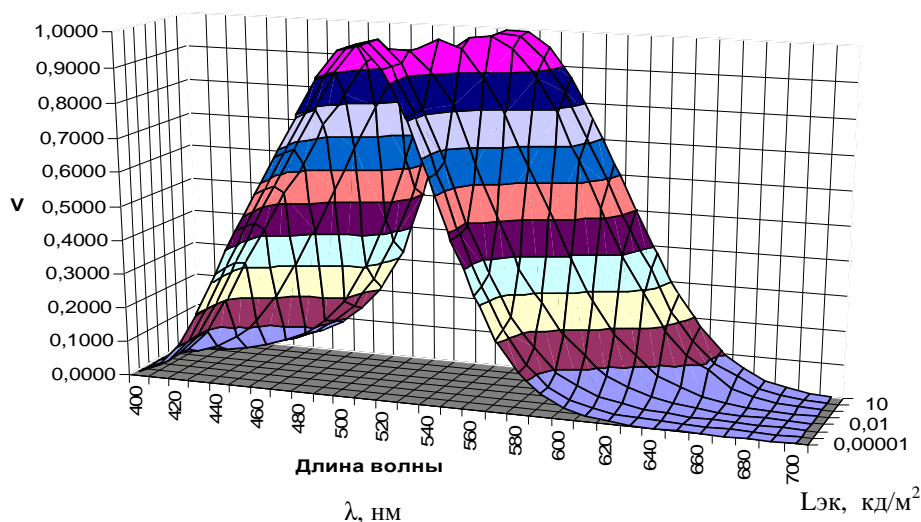


Рис. 1 Изменение относительной спектральной световой эффективности $V_{eq}(\lambda)$ при различных значениях яркости адаптации $L_{эк}$.

Согласно определению, эквивалентной яркостью поля произвольного спектрального состава называется яркость другого поля, излучение которого имеет спектральный состав планковского излучателя при температуре 2042 К и которое в определенных условиях фотометрирования представляется равносветлым первому полю [3].

В настоящее время, когда мы еще не располагаем достаточными достоверными данными об абсолютной спектральной чувствительности глаза для разных значений яркости, рекомендуется использовать промежуточные кривые относительной спектральной эффективности для мезопического зрения (рис. 1) [5].

Согласно определению, Гершуном было предложено математическое выражение для вычисления эквивалентной яркости [2]:

$$L_{\text{эк}} = L \cdot \frac{\int l_{\lambda}^0 V_{\lambda} d\lambda}{\int l_{\lambda}^0 V_{\lambda}(L_{\text{эк}}) d\lambda} \cdot \frac{\int l_{\lambda} V_{\lambda}(L_{\text{эк}}) d\lambda}{\int l_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda} \quad (1)$$

В этом выражении:

$L_{\text{эк}}$ – значение эквивалентной яркости,

L – значение фотометрической яркости,

l_{λ} – относительные значения спектральной плотности энергетической яркости исследуемого излучения,

l_{λ}^0 – относительные значения спектральной плотности энергетической яркости стандартного излучения планковского излучателя с $T_{\text{цв}}=2042^{\circ}\text{К}$,

$V_{\lambda}(L_{\text{эк}})$ – относительная спектральная световая эффективность излучения в мезопической (сумеречной) области зрения,

V_{λ} – относительная спектральная световая эффективность излучения в фотопической (дневной) области зрения.

Существующие методы нахождения эквивалентной яркости громоздки и трудоемки, поэтому не вошли в светотехническую инженерную практику. Разрабатываемый метод заключается в представлении функции эквивалентной яркости следующим выражением:

$$V_{\text{эк}}(\lambda, L_{\text{эк}}) = K_1(L_{\text{эк}})S_1(\lambda) + \dots + K_n(L_{\text{эк}})S_n(\lambda) \quad (2)$$

Поскольку в процессе зрительного восприятия участвуют 4 типа рецепторов, ожидается, что число слагаемых не будет превышать эту цифру.

Для начала представим (2) на основе стандартизированных кривых относительной спектральной световой эффективности для дневного и ночного зрения (рис. 2).

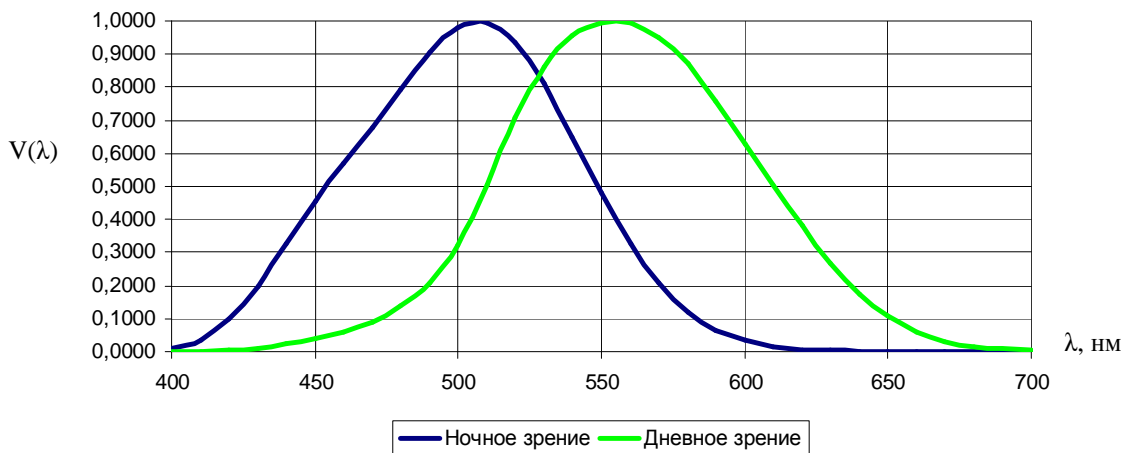


Рис. 2. Функции относительной спектральной световой эффективности для дневного и ночного зрения

Получаем:

$$V_{\text{эк}}(\lambda, L_{\text{эк}}) = K_1(L_{\text{эк}})V'(\lambda) + K_2(L_{\text{эк}})V(\lambda) \quad (3)$$

Преобразуя это выражение можно вычислить коэффициенты K_1 и K_2 для различных значений $L_{\text{эк}}$. Поскольку $K_1 + K_2 = 1$ имеем:

$$K_1(L_{\text{эк}}) = \frac{V_{\text{эк}}(\lambda, L_{\text{эк}}) - V(\lambda)}{V'(\lambda) - V(\lambda)} \quad (4)$$

$$K_2(L_{\text{эк}}) = \frac{V_{\text{эк}}(\lambda, L_{\text{эк}}) - V'(\lambda)}{V(\lambda) - V'(\lambda)} \quad (5)$$

Расчитанные значения приведены в таблице 1:

Таблица. 1
Коэффициенты K_1 и K_2 для мезопической области зрения

$L_{\text{эк}}$	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	0,1	1	10	10^2
K_1	1,00	0,92	0,90	0,81	0,47	0,13	0,06	0,00
K_2	0,00	0,07	0,09	0,19	0,52	0,87	0,94	1,00

Анализируя исходные данные и результаты вычисления формулы (2) можно заметить некоторое несоответствие полученных функций исходным. Особенно заметны эти различия для средних значений исследуемого диапазона эквивалентной яркости. Результат первого приближения приведен на рис. 3.

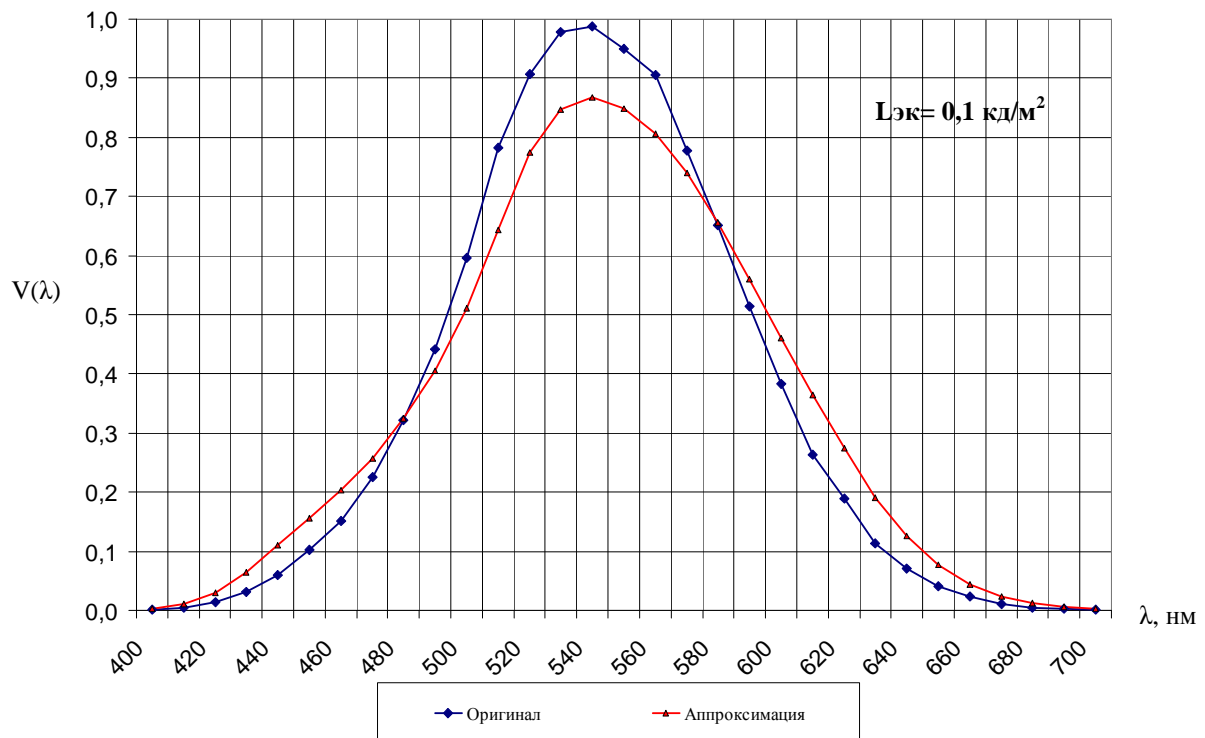


Рис. 3. Одна из семейства кривых, полученная в результате аппроксимации.

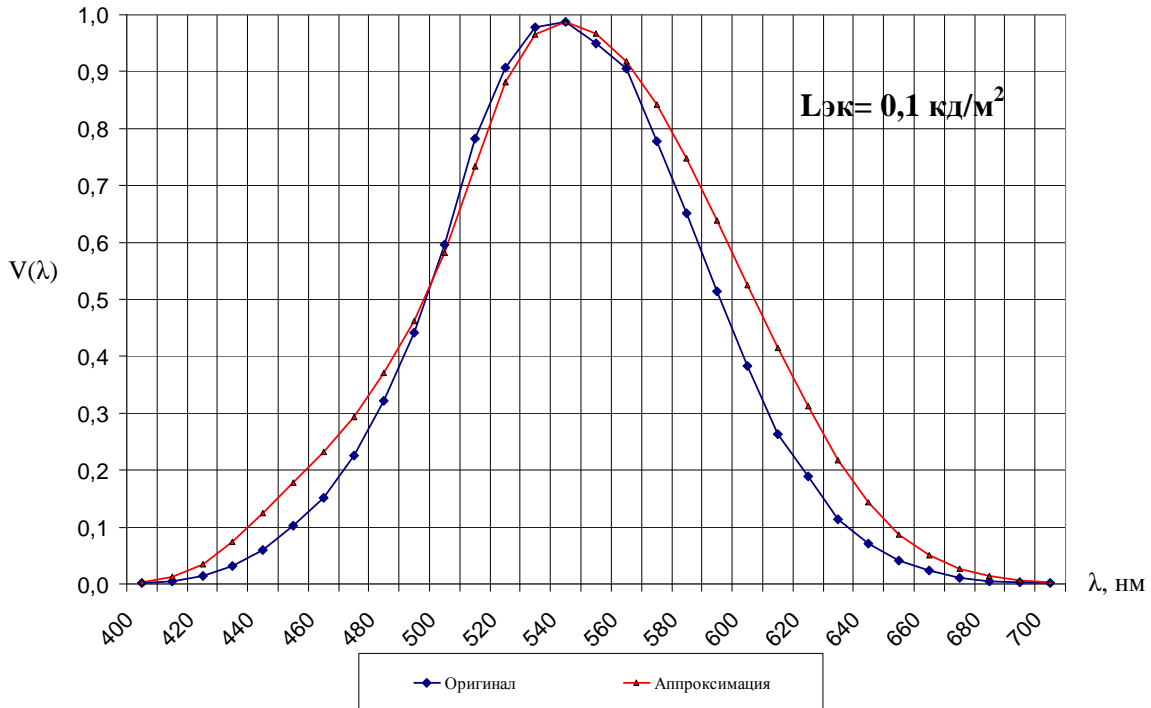


Рис. 4. Одна из семейства кривых, полученная в результате нормирования.

Для большей сходимости функций необходимо нормировать кривую аппроксимации.

После нормирования получаем зависимости, приведенные на рис. 4. Отчетливо видно, что кривые функций накладываются намного лучше, чем до него. Но все же, различие форм кривых говорит о необходимости дальнейшего уточнения аппроксимации.

Исследуя абсолютную погрешность аппроксимации для уровней эквивалентной яркости, отличающихся на порядок и меньше, можно заметить некоторую закономерность повторения формы кривой функции погрешности от длины волны (рис. 5). А именно, отчетливо просматриваются точки экстремумов в области длин волн 460 и 610 нм.

Наибольшую погрешность дает аппроксимации функции эквивалентной яркости на уровне $0,3 \text{ кд/м}^2$.

Используя ее как базовую, выразим остальные, используя выражение:

$$S_{L_{\text{эк}}}(\lambda) = K_3 S_0'(\lambda), \quad (6)$$

где $S_0'(\lambda)$ - функция погрешности аппроксимации на уровне $0,3 \text{ кд/м}^2$, $S_{L_{\text{эк}}}(\lambda)$ - функция погрешности аппроксимации на уровне $L_{\text{эк}} \text{ кд/м}^2$, K_3 - коэффициент согласования уровней эквивалентной яркости.

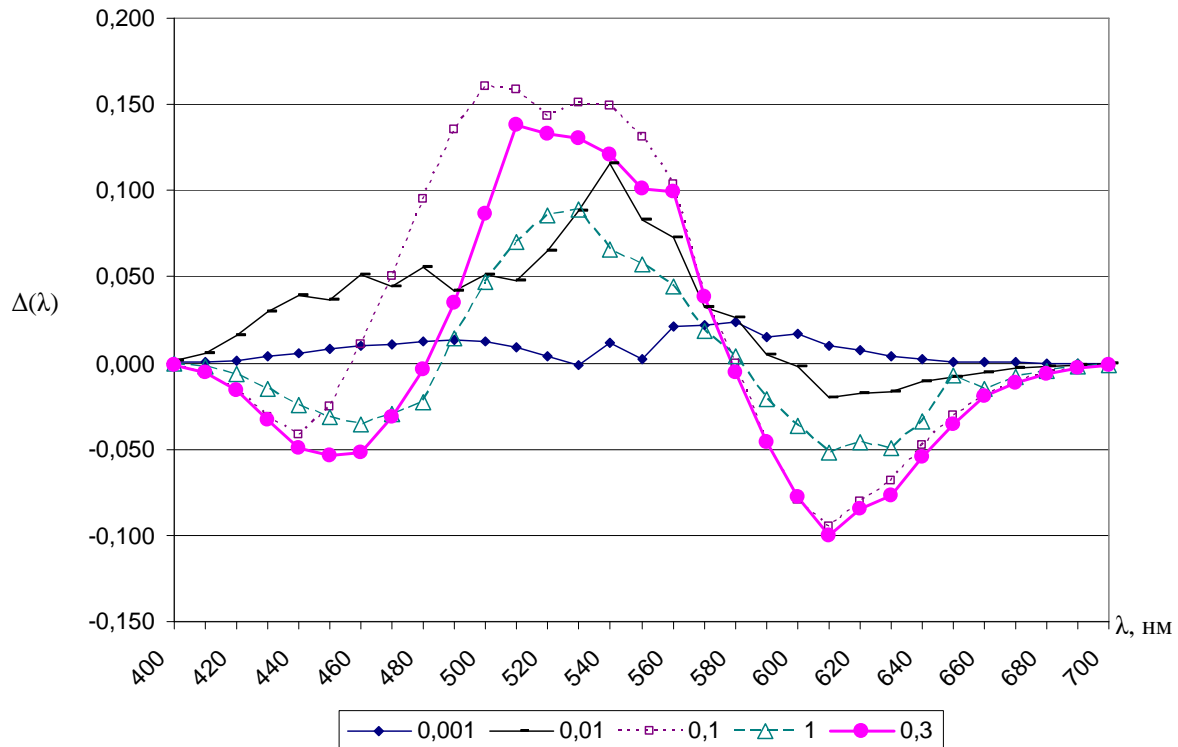


Рис. 5. Абсолютная погрешность аппроксимации функции эквивалентной яркости.

Поскольку $S_0'(\lambda)$ и семейство кривых $S_{L_{эк}}(\lambda)$ уже определено, рассчитаем коэффициент K_3 .

$$K_3 = \frac{S_{L_{эк}}(\lambda)}{S_0'(\lambda)} \quad (7)$$

Получаем

Таблица 2.

Коэффициент K_3 для различных значений эквивалентной яркости.

$L_{эк}$	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,3	1	3	10	30	10^2
K_3	0,00	-0,05	-0,05	-0,07	0,20	0,40	0,85	1,00	0,60	0,40	0,10	0,00

Используя формулу (3) и (6), получаем выражение, достаточно точно описывающее изменение спектральной эффективности излучения в мезопической области.

$$V_{эк}(\lambda, L_{эк}) = K_1(L_{эк})V'(\lambda) + K_2(L_{эк})V(\lambda) + K_3S_0'(\lambda) \quad (8)$$

Кривые, построенные на основе оригинальных табличных значений и формулы (8) весьма близки (рис. 7).

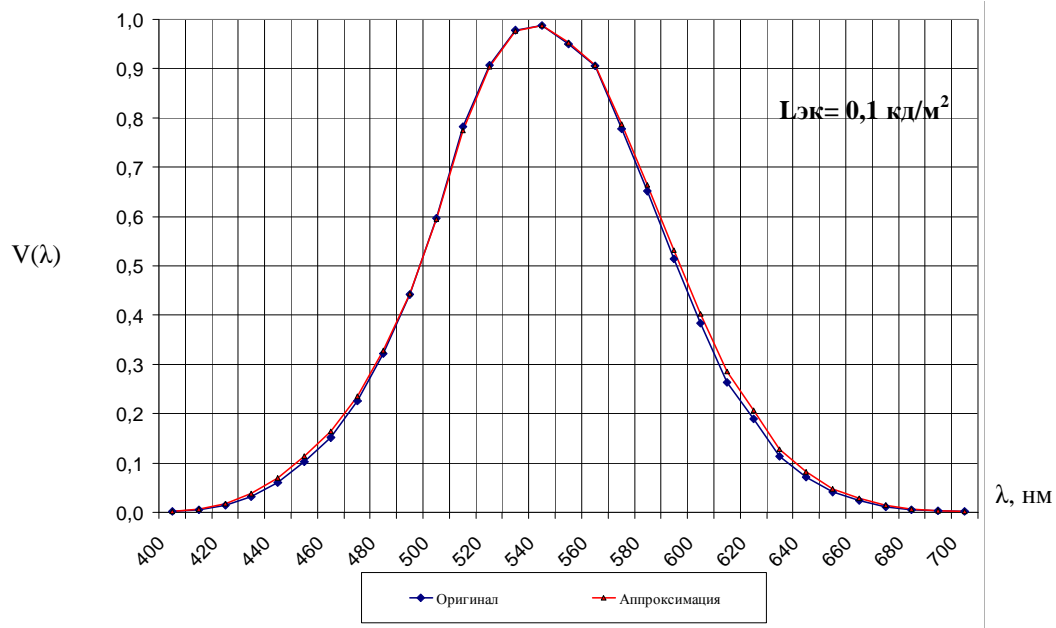


Рис. 7. Одна из семейства кривых, полученная в результате коррекции аппроксимации

Поскольку кривая функции S_0 не является стандартной, выразим ее следующим выражением:

$$S_0(\lambda) = K_4(L_{эк})V_L(\lambda) + K_5(L_{эк})V_M(\lambda) + K_6(L_{эк})V_S(\lambda) \quad (9)$$

Где $V_L(\lambda)$, $V_M(\lambda)$, $V_S(\lambda)$ - относительные спектральные чувствительности соответственно К, З и С рецепторов (рис. 8).

В результате расчетов были получены коэффициенты для уровня эквивалентной яркости $0,3 \text{ кд/м}^2$ - $K_4 = -0,65$, $K_5 = 1,8$ и $K_6 = -1,8$. Для получения значений этих коэффициентов для других уровней эквивалентной яркости достаточно умножить их на коэффициент K_3 .

$$V_{эк}(\lambda, L_{эк}) = K_1(L_{эк})V'(\lambda) + K_2(L_{эк})V(\lambda) + K_3(K_4(L_{эк})V_L(\lambda) + K_5(L_{эк})V_M(\lambda) + K_6(L_{эк})V_S(\lambda)) \quad (10)$$

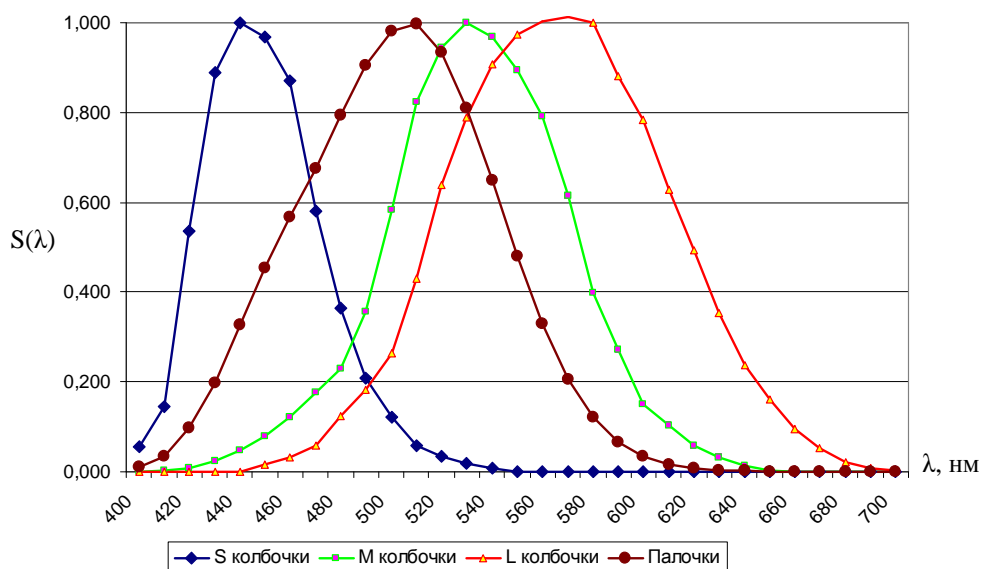
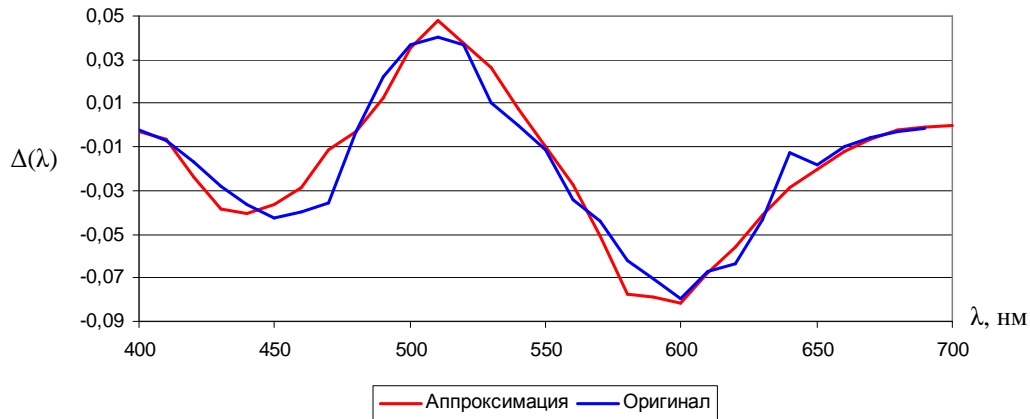


Рис. 8 Относительная спектральная чувствительность рецепторов.

Рис. 9. Аппроксимация кривой функции S_0

Поскольку функция относительной световой эффективности для дневного зрения основана на спектральных чувствительностях колбочек, можно представить выражение (10) в виде:

$$V_{\text{ЭК}}(\lambda, L_{\text{ЭК}}) = K_1(L_{\text{ЭК}})V'(\lambda) + K_2(L_{\text{ЭК}})(aV_L(\lambda) + bV_M(\lambda) + cV_S(\lambda)) + K_3(K_4(L_{\text{ЭК}})V_L(\lambda) + K_5(L_{\text{ЭК}})V_M(\lambda) + K_6(L_{\text{ЭК}})V_S(\lambda))$$

По нашим расчетам достаточно точное приближение можно получить, используя значения $a=1$, $b=33$, и $c=124$.

В конечном итоге получаем выражение, описывающее функцию относительной спектральной световой эффективности при различных условиях эквивалентной яркости адаптации:

$$V_{\text{ЭК}}(\lambda, L_{\text{ЭК}}) = K_1(L_{\text{ЭК}})V'(\lambda) + K_2(L_{\text{ЭК}})((a + K_3K_4)V_L(\lambda) + (b + K_3K_5)V_M(\lambda) + (c + K_3K_6)V_S(\lambda)) \quad (11)$$

На следующем этапе, преобразуем исходное выражение (1) к виду:

$$L_{\text{ЭК}} = f(L_{\text{ЭК}}) \cdot \int l_{\lambda} V_{\lambda}(L_{\text{ЭК}}) d\lambda \quad (12)$$

Где

$$f(L_{\text{ЭК}}) = 683 \cdot \frac{\int l_{\lambda}^0 V_{\lambda} d\lambda}{\int l_{\lambda}^0 V_{\lambda}(L_{\text{ЭК}}) d\lambda} \quad (13)$$

-функция спектрального состава эталонного излучателя и эквивалентной яркости.

В итоге определим выражение для нахождения $L_{\text{ЭК}}$, которое исключает необходимость использования $V_{\lambda}(L_{\text{ЭК}})$.

$$L_{\text{ЭК}} = f(L_{\text{ЭК}}) \int_{\lambda} [K_1(L_{\text{ЭК}})V'(\lambda) + K_2(L_{\text{ЭК}})((a + K_3K_4)V_L(\lambda) + (b + K_3K_5)V_M(\lambda) + (c + K_3K_6)V_S(\lambda))] d\lambda \quad (14)$$

Нами определены функции $f(L_{\text{ЭК}})$, $K_1(L_{\text{ЭК}})$ - $K_6(L_{\text{ЭК}})$, а функции $V'(\lambda)$, $V(\lambda)$ - стандартизированы. Проследим перестройку взаимодействия световоспринимающих рецепторов при переходе от дневного к ночному зрению. Для этого определим относительный вклад каждого из 3 типов колбочек в процесс зрительного восприятия при различных значениях эквивалентной яркости. Результаты сведены в таблице 2 и проиллюстрированы на рис. 10.

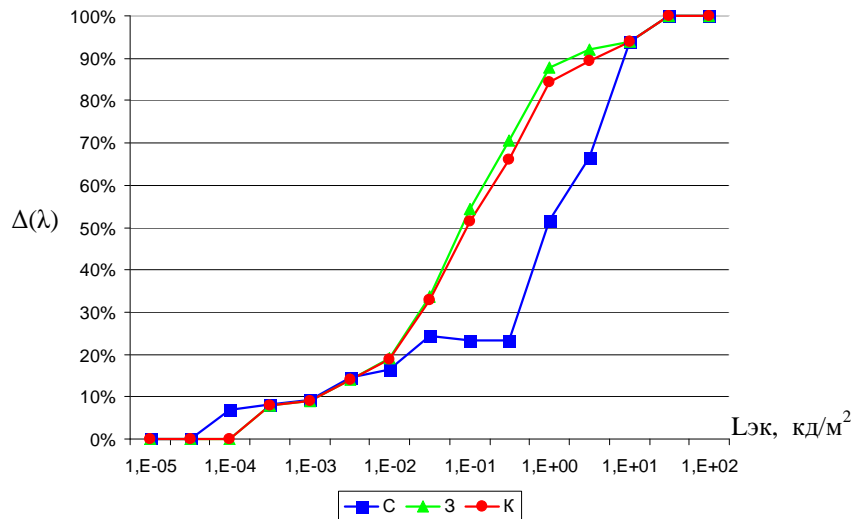


Рис. 10. Относительный вклад каждого из 3 типов колбочек в процесс зрительного восприятия при различных значениях эквивалентной яркости

Видно, что уменьшение относительной чувствительности 3 цветовоспринимающих анализаторов происходит нелинейно. В переходной области яркости чувствительность С-колбочек уменьшается в большей степени. Конечный вид аппроксимированной кривой относительной спектральной световой эффективности излучения принимает вид, показанный на рис. 11.

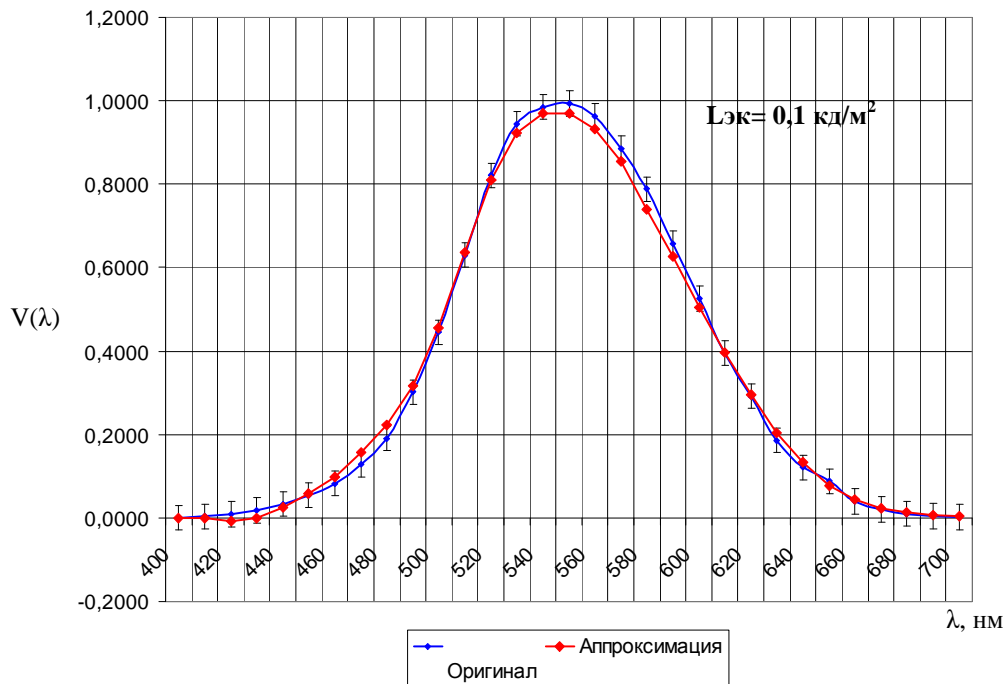


Рис.11. Аппроксимированная кривая относительной световой эффективности

Учитывая неточность и погрешности, имеющиеся на сегодняшний день в определении интенсивности зрительного восприятия, аппроксимацию функции относительной спектральной световой эффективности при различных значениях эквивалентной яркости уравнением (11) можно считать приемлемой. Рисунок 10 иллюстрирует также общеизвестный эффект Пуркине, поскольку соотношение действия световоспринимающих рецепторов изменяется в сторону преобладания влияния С-колбочек при низких уровнях яркости и в обратную сторону при высоких уровнях яркости.

Вышеописанное позволяет сформулировать следующие краткие выводы:

- При изменении уровня яркости адаптации имеет место непропорциональное изменение относительной эффективности световоспринимающих рецепторов и выявлена закономерность этого изменения.
- Получена аппроксимация функции относительной спектральной световой эффективности при различных условиях эквивалентной яркости на основе учета изменения спектральной чувствительности 3-х цветоанализаторов органа зрения человека.

Список литературы:

1. Sagawa K. Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any level including mesopic vision. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2006, Vol 26, No 3, pp 240-245.
2. Волькенштейн, А.А. Визуальная фотометрия малых яркостей – М.-Л.,: Энергия, 1965. – 143 с.
3. Мешков, В. В. Основы светотехники Ч. 1.: учеб. – М.: Энергия, 1979. – 368 с.
4. Commission Internationale de Eclairage, Comte Rendue de la 15 me Session, Vienna 1963 // CIE Publication. – 1964. - #11. – P.209-220.

ЗМІНА СПЕКТРАЛЬНОЇ СВІТЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ЗМЕНШЕННІ ЯСКРАВОСТІ ЯК РЕЗУЛЬТАТ ПЕРЕБУДОВИ ВЗАЄМОДІЇ СВІТЛОСПРИЙМАЙЧИХ РЕЦЕПТОРІВ.

О.О. Сіробаба, С.С. Овчинников

Стаття присвячена аналізу спектральної світлової ефективності випромінювання в сутінковій області зору. Реалізовано апроксимацію функції спектральної світлової ефективності випромінювання в сутінковій області зору стандартними функціями для світло- і темноадаптованного ока.

CHANGE OF SPECTRAL LIGHT EFFICIENCY OF RADIATION AT DIMINISHMENT OF BRIGHTNESS AS A RESULT OF ALTERATION OF CO-OPERATION OF PHOTOPERCEPTIVE RECEPTORS.

A.A. Serobaba, S.S. Ovchinnikov

The article is devoted to the analysis of spectral light efficiency of radiation in the twilight region of sight. Approximation of function of spectral light efficiency of radiation in the twilight region of sight by built-in functions for a bright light and dark conditions.