

Капцов В.А.¹, Дейнего В.Н.², Уласюк В.Н.²

ОСВЕЩЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ И МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ: ПРОБЛЕМА ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА

¹ФГУП ВНИИ железнодорожной гигиены, 125438, Москва;

²ЗАО «ЭЛТАН», 141190, Фрязино Московской области

Для общественного здравоохранения принципиально важно определить в какой световой среде будет развиваться, жить и работать человек в ближайшей перспективе. Настоящее и будущее световой среды определяют тенденции развития источников освещения. Важно гигиенически оценить спектры современных источников света на соответствие спектру безопасного солнечного света. Рассмотрены тенденции развития светодиодного освещения до 2020 года и методы экспериментального и машинного(цифрового) моделирования спектра солнечного света на базе светодиодов различного типа и их аналитических моделей. Показано, что предлагаемые модели позволяют синтезировать спектры светодиодных светильников близких к солнечному свету, но они не отвечают требованиям по биологической адекватности для зрительного анализатора человека по ширине спектра, непрерывности, равномерности и набору длин волн фотонных потоков, обеспечивающих эффективное функционирование зрительного анализатора человека и его гормональной системы. Предложены ограничения, которые необходимо учитывать при разработке светодиодных светильников по критерию среднеквадратичного приближения к спектру солнечного света и техническая реализация позволяющая защитить области световой чувствительности ганглиозных клеток.

Ключевые слова: светодиодное освещение; спектры современных источников; визуальные и невизуальные эффекты.

Для цитирования: Капцов В.А., Дейнего В.Н., Уласюк В.Н. Освещение образовательных и медицинских учреждений: проблема оптимального выбора. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(11): 1020-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-11-1020-25>

Для корреспонденции: Капцов Валерий Александрович, член-корр. РАН, зав. отделом гигиены труда ФГУП ВНИИ железнодорожной гигиены Роспотребнадзора. E-mail: kapcovva@rambler.ru

Kaptsov V.A.¹, Deynego V.N.², Ulasyuk V.N.²

LIGHTING ENVIRONMENT IN EDUCATIONAL AND MEDICAL INSTITUTIONS: THE PROBLEM OF THE OPTIMAL CHOICE.

¹All-Russian Research Institute of Railway Hygiene of the Federal Service for the Oversight of Consumer Protection and Welfare, Moscow, Russian Federation, 125438; Joint Stock Company "Russian Railways", Moscow, 107174, Russian Federation;

²ELTAN Ltd, Fryazino, 141190, Russian Federation

For the public health, it is essential to determine in what light environment people will develop, live and work in the near future. The present and future of the light environment determine trends in the development of lighting sources. It is important to make a hygienic assessment of the spectra of modern light sources to match the spectrum of the safe sunlight. Trends in the development of led lighting until 2020 and methods of experimental and computer (numerical) modeling of the spectrum of sunlight based on LEDs of various types and their analytical models are considered. The proposed models are shown to allow synthesizing the spectra of led lamps close to sunlight, but they do not meet the requirements of biological adequacy for the human visual analyzer in spectrum width, continuity, uniformity and a set of wavelengths of photon streams that ensure the effective functioning of the human visual analyzer and its hormonal system. The limitations must be taken into account in the development of led lamps by the criterion of root mean square approximation to the spectrum of sunlight and technical implementation to protect the light sensitivity of ganglion cells.

Key words: led lighting; spectra of modern sources; visual and non-visual effects.

For citation: Kaptsov V.A., Deynego V.N., Ulasyuk V.N. Lighting environment in educational and medical institutions: the problem of the optimal choice. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2018; 97(11): 1020-25. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-11-1020-25>

For correspondence: Valery A. Kaptsov, MD, Ph.D., DSci., professor, member-correspondent of RAS, Head of the Department of Labor Hygiene of the All-Russian Research Institute of Railway Hygiene of the Federal Service for the Oversight of Consumer Protection and Welfare, Moscow, 125438, Russian Federation. E-mail: kapcovva39@mail.ru

Information about authors: Kaptsov V.A., <https://orcid.org/0000-0002-3130-2592>.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment. The study had no sponsorship.

Received: 15 February 2018

Accepted: 18 October 2018

В настоящее время полупроводниковые источники белого света, изготовленные по светодиодной технологии, активно продвигаются на мировом светотехническом рынке. Эра светодиодного освещения наступила с того момента, когда Сюдзи Накамура, Нобелевский лауреат по физике 2014 года, покрыв синий светодиод желтым люминофором

и получил белый свет с неравномерным спектром излучения в диапазоне 435–650 нм, который отличался от равномерного и непрерывного солнечного спектра и спектра лампы накаливания в диапазоне видимого света 380–780 нм.

В США объем светодиодного рынка исчисляется сотнями миллионов долларов. В настоящее время для обще-

го освещения массово применяются светодиодные лампы первого поколения (синий кристалл, покрытый жёлтым люминофором), но неясно какие полупроводниковые технологии будут применяться на следующих этапах развития светодиодного освещения и как их спектры света повлияют на здоровье.

Эксперты Министерства энергетики США, по результатам проведённых исследований [1, 2], прогнозируют развитие технологий светодиодного освещения на 2020–2050 годы, исходя из концепции энергосбережения и обеспечения максимального уровня световой эффективности (лм/Вт) полупроводниковых источников света.

Фактический и прогнозируемый уровень световой эффективности светодиодов приведены на (рис. 1, см. на вклейке).

РС-светодиод (РС-Led) основан на синем светодиоде для перекачивания жёлто-зелёных и красных длинноволновых оптических понижающих преобразователей (как правило, люминофоров), тем самым производя белый свет. Гибридный светодиод (hy-LED) основан на синем светодиоде, используемом для перекачивания жёлто-зелёного преобразователя с понижением длины волны, затем синий и жёлто-зелёный свет смешивается со светом красного светодиода, чтобы снова производить белый свет.

Основные цвета, которые составляют *красный, зелёный, синий и янтарный* (RGBA) цветные светодиоды, объединяются для производства белого света по технологии Brilliant-Mix (pc-Led + r-Led)/ hybrid LED (hy-LED). Массовое применение РС-светодиодов на базе синего светодиода, покрытого жёлтым люминофором, обусловлено тем, что данные технологии имеют высокие показатели световой эффективности, обеспечивающие потребности общества в энергосбережении. Исходя из перспективности развития технологии sm-Led (RYGB), эксперты предлагают сосредоточить усилия на развитии синих (440–460 нм), зелёных (520–540 нм), янтарных (580–595 нм) и красных (610–620 нм) светодиодов (тёплый белый – 3000 К и холодный белый – 5700 К).

Применение монохромных светодиодов (RYGB) для формирования белого света приведёт к тому, что в будущем планируется применять для освещения общественных зданий белый свет с дискретным спектром. Эксперты светотехники предлагают такой путь развития светодиодного освещения, но из-за высокой неравномерности спектра света на этот прогноз накладываются серьёзные ограничения работниками общественного здравоохранения (гигиенистами, офтальмологами). Такие ограничения обусловлены тем, что существующие и предлагаемые светодиодные технологии получения белого света с дискретным спектром излучения могут неблагоприятно влиять на здоровье человека и особенно детей из-за наличия выбросов и провалов в спектре света в биологически значимых диапазонах длин волн.

Эксперты [3] считают, что «Поскольку применимость светодиодного освещения увеличивается, важно, чтобы эти продукты были разработаны с учётом физиологии человека. Светодиоды являются долговременной технологией, и поэтому настало время провести исследование и дать рекомендации по освещению с положительными последствиями для человека. Чтобы включить физиологическое полезное освещение в качестве товарной и привлекательной характеристики, эти эффекты необходимо количественно оценить с помощью стандартизированных показателей».

Вся физиология зрения формировалась в условиях непрерывного солнечного света, но при этом необходимо учесть, что принцип восприятия света и передачи зритель-

ной информации одновременно приводит к фактору риска повреждения зрительного анализатора при световой перегрузке и является фотобиологическим парадоксом зрения. Этот термин введён академиком РАН М.А. Островским [4]. Ключевым словом является световая перегрузка, которая зависит от уровня светового воздействия и адекватности работы диаметра зрачка глаза на её ограничение.

На очередном заседании НТС «Светотехника» (12 декабря 2017 г., кафедра светотехники МЭИ) в своём докладе «Особенности воздействия светодиодных источников света на орган зрения взрослых, детей и подростков» офтальмохирург, доктор мед. наук, академик Российской Академии медико-технических наук, член Американской Ассоциации детских офтальмологов и страбизмологов Игорь Азнаурян обратил внимание светотехников на тот факт, что при светодиодном освещении зрачок более открыт, чем при солнечном свете, при равном уровне освещённости. В заключении своего доклада Игорь Азнаурян отмечал: «Учитывая, что родители всё чаще задают нам, офтальмологам, вопрос: можно ли освещать детское рабочее место светодиодной лампой? – хотелось бы исследовать еще один аспект – влияние освещенности на аккомодацию, с которой напрямую связаны и рефрактогенез, и глазодвигательные функции глаз, и, возможно, астенопические жалобы. Однако в литературе эта проблема остаётся не раскрытой».

С целью обеспечения здорового образа жизни в помещениях американский институт сертификации зелёного строительства (IWBI) разработал новый стандарт. Этот строительный стандарт под названием WELL, будучи введённым в систему сертификации Руководства по энергоэффективному и экологическому проектированию (от англ. Leadership in Energy and Environmental Design, LEED), определяет правила построения интерьеров, отвечающих медико-санитарным требованиям. Согласно новому стандарту, все здания оцениваются по семи параметрам: освещение, комфорт, воздух, вода, питание, физическое состояние человека и настроение. Освещение – самый главный критерий WELL, так как количество и качество света влияет на биоритмы, а значит и на работоспособность человека. WELL Building Standard® стремится пойти гораздо дальше, чем обычные рекомендации по освещению, чтобы учитывать не только остроту зрения и избегание бликов, но и важную роль ганглиозных клеток ipRGCs, которые влияют на формирование изображения и циркадные эффекты». В отечественных строительных стандартах основные положения зелёного строительства отсутствуют.

Сегодня решается главный вопрос выбора правильно-го белого света безопасного и комфортного для человека всех возрастных групп. Правильным светом является солнечный свет с гигиенически безопасной цветовой температурой менее 5000 К. Степень приближения спектра искусственного света к солнечному может служить количественной оценкой его соответствия правильному свету. Этот подход можно положить в основу гигиенической оценки различных концепций светодиодного освещения. Для стандартизированной и количественной оценки необходимо выбрать математические модели описания спектрально-энергетических характеристик солнечного света, спектральной чувствительности пигментов клеток сетчатки глаза и полупроводниковых источников света, из которых будут построены светильники и осветительные системы.

На рис. 2 (см. на вклейке) приведён общий вид спектра солнечного света в видимой части диапазона с цветовой температурой 5000 К.

Но для оценки светотехнических параметров световой среды применять спектр солнечного света сложно из-за высокой динамики его параметров в течение дня, для чего в светотехнике существуют стандартные источники освещения.

В 1931 г. были определены стандартные источники освещения. Первоначально их было три: *A*, *B*, *C*. Они были приближены к обычным условиям освещения, вместе с тем их можно было легко воспроизвести.

В 1963 г. были определены дополнительные источники излучения – *D* – имитация солнечного света. В неё входят *D50*, *D55*, *D65* и *D75*, причём последний практически не применяется.

Источник света *A* (лампа накаливания) с цветовой температурой 2856 К. Излучение *A*, по определению, свободно от какой-либо корреляции, поскольку представляет собой излучение абсолютно чёрного тела при абсолютной температуре 2856 К. Обычные лампы накаливания близки к излучению *A* как по спектру, так и по цветовой температуре.

Стандартное излучение *A* имеет желтовато-оранжевый оттенок, поскольку его мощность в красной области преобладает над мощностью в синей.

Тип *D50* – имитация дневного света с цветовой температурой 5000 К «Полуденное небо» (CIE *D50*). Тип Daylight *D50*: прямой полуденный солнечный свет – Стандарт Noon Sky Daylight (ASTM) (12–14ч). *D50* Daylight – Red Shade (с оттенком красного).

Тип *D65* – имитация дневного света с цветовой температурой 6504 К «Среднее северное небо» (CIE *D65*). Нейтральный оттенок. Рассеянный солнечный свет или солнечный свет в пасмурную погоду.

Тип Daylight *D65*: полуденный дневной свет в тени – Стандарт Average North Sky (ASTM).

Тип *D75* – имитация дневного света с цветовой температурой 7500 К «Северное небо» (CIE *D75*). Соответствует стандартам США для точной визуальной оценки цвета, в частности, ASTM *D1729*. *D75* Daylight – Blue Shade (голубой оттенок).

Общий вид спектра стандартных источников света *A*, *D50* и *D65* приведён на рис. 3 (см. на вклейке).

С гигиенической точки зрения, в качестве стандартного эталона солнечного света необходимо использовать *D50* [5], но светотехники при сравнении светодиодных спектров зачастую используют стандартный эталон солнечного света *D65* (цветовая температура 6500 К) и выше, при этом выброс синей составляющей светодиодного спектра света не выделяет так значимо по сравнению с дозой синего света более 6500 К.

Солнечный свет является основополагающим для всего живого на земле. Каждый биологический объект в силу структурной организации светочувствительных клеток воспринимает ту часть солнечного света, которая для него является жизненно важной. Эти части спектра биологически адекватны для физиологии конкретного объекта и могут служить качественной и количественной оценкой адекватности спектра излучения искусственных источников света физиологии биологического объекта.

На рис. 4 (см. на вклейке) приведены данные спектральной чувствительности клеток сетчатки глаз различных биологических объектов.

Как видно из рис. 4, спектральная чувствительность клеток зрительного анализатора различных объектов имеет своё распределение. Но искусственные источники света, имеющие спектр отличный от солнечного, могут вызывать неадекватную зрительную и физиологическую реакцию в организме биологического объекта. Эффектив-

ность действия искусственного освещения во многом зависит от степени адаптации применяемых источников оптического излучения под спектральную чувствительность органа зрения биообъекта.

В статье [6] приведена оценка эффективности источников излучения для птицеводческих ферм по относительному коэффициенту использования излучения в соответствии с функцией относительной спектральной чувствительности органа зрения биообъекта – птицы (курицы) аналогично коэффициенту полезного излучения фотосинтеза для растений. Предполагается, что правильно подобранный спектр источников излучения в соответствии с функцией относительной спектральной чувствительности органа зрения птицекурцы позволит не только улучшить качество мяса птицы (курицы), но и сократить потребление электроэнергии на освещение.

В настоящее время функцию относительной спектральной чувствительности органа зрения курицы оценивают по методике, предложенной исследователями N.V. Prescott & C.M. Wathes, которая состоит из четырёх колоколообразных кривых с максимумами чувствительности в красной (К или LWS) – 630 нм, зелёной (З или MWS) 555–565 нм, синей (С или SWS2) – 480 нм, ультрафиолетовой (Уф или SWS1) – 380 нм, и с относительными уровнями в областях спектра: ультрафиолетовой – 0,20, синей – 0,83, зелёной – 1, красной – 0,64 [6, 7]. На рис. 5 (см. на вклейке) в координатах относительных величин приведена спектральная чувствительность глаза человека и курицы, а также спектр света белого светодиода.

Светодиод излучает белый свет, но его спектр находится в диссонансе с кривой чувствительности зрения курицы по следующим параметрам:

- отсутствие фотонного потока на 380 нм для клеток SWS1;
- провал фотонного потока в спектр светодиода в области 480 нм для клеток SWS2;
- резкий спад фотонного потока в спектре светодиода в области 630 нм для клеток LWS.

В статьях [8–13] показано, что задача воспроизведения спектра естественного солнечного света с помощью светодиодов решается путём комбинации состава полупроводниковых излучателей или подбором соответствующей люминофорной смеси. В них приведены результаты моделирования комбинации необходимого числа светодиодов для аппроксимации спектральной характеристики солнечного излучения и дана оценка относительной погрешности аппроксимации. Но при этом авторы не учитывали особенности ограничений, которые вытекают из физиологии работы зрительного анализатора и частности ганглиозных и других светочувствительных клеток. Светотехники рассматривали механизм восприятия света через кривые чувствительности фоторецепторов колбочек и палочек. В работах [14 и 15] для аппроксимации функций относительной спектральной чувствительности рецепторов сетчатки была применена функция Гаусса.

В статье [14] в уравнении регрессии для каждого вида фоторецепторов использовались функции $S_i(\lambda, L)$ в виде функции плотности нормального распределения вероятности:

$$s_i(\lambda, L) \approx \frac{1}{\sigma_i(L)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_{i\max})^2}{2\sigma_i^2(L)}\right), \quad (1)$$

где $\lambda_{i\max}$ и $\sigma_i(L)$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение λ_i от $\lambda_{i\max}$ для i -го вида фоторецепторов соответственно. При этом подразумевается, что $\lambda_{i\max}$ имеют общепринятые значения: 445 нм для

C-колбочек ($i \equiv c$), 505 нм для палочек ($i \equiv n$), 546 нм для 3-колбочек ($i \equiv z$) и 570 нм для K-колбочек ($i \equiv k$).

Уравнение регрессии для $V(\lambda, L)$ с $S_i(\lambda_i, L)$ в формуле (1) – это уравнение нелинейной нормальной регрессии, которое удобно использовать в виде

$$V(\lambda, L) \approx \alpha_c(L) \frac{1}{\sigma_c(L)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda-445)^2}{2\cdot\sigma_c^2(L)}\right) + \alpha_n(L) \frac{1}{\sigma_n(L)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda-505)^2}{2\cdot\sigma_n^2(L)}\right) + \alpha_z(L) \frac{1}{\sigma_z(L)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda-546)^2}{2\cdot\sigma_z^2(L)}\right) + \alpha_k(L) \frac{1}{\sigma_k(L)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda-570)^2}{2\cdot\sigma_k^2(L)}\right), \quad (2)$$

где $\alpha_i(L)$ – весовой коэффициент для i -го вида фоторецепторов.

Математические ожидания значений параметров α_i и σ_i уравнения регрессии (2) для различных значений L , полученные методом итераций с использованием программного продукта Data Fit 9.0, представлены в таблице.

Из анализа представленных в таблице данных видно, что каждому значению яркости адаптации существует свой набор значений коэффициентов $\alpha_i(L)$ и $\sigma_i(L)$, но при значениях $\lambda_i \max$ остаются постоянными и могут служить контрольными значениями для оценки спектра искусственного источника света на адекватность воздействия.

В статье [16] приведены результаты моделирования спектра солнечного излучения с помощью светодиодов. В основу моделирования дневного света с помощью светодиодов при формировании спектра излучения светодиодного светильника по заданной цветовой температуре положено следующее соотношение:

$$FeSum = \sum_{i=1}^N f_i m_i n_i, \quad (3)$$

где $FeSum$ – световой поток светильника, состоящего из N (семи) типов светодиодов; n_i – количество полупроводниковых источников света со спектральными характеристиками; m_i – дополнительные нормирующие коэффициенты.

Примем следующие обозначения спектральных характеристик светодиодов: f_1 –холодно-белого, f_2 – тепло-белого, f_3 – ультрафиолетового (370 нм), f_4 – синего (460нм), f_5 – зелёного (520нм), f_6 – жёлтого (590нм), f_7 – красного (660нм).

Такой набор полупроводниковых источников света совпадает с набором, который рекомендовано рассматривать как перспективные: синих (440–460нм), зелёных (520–540 нм), янтарных (580–595 нм) и красных (610–620 нм) светодиодов (тёплый белый – 3000 K и холодный белый – 5700 K. После приведения к единой размерности спектральных характеристик можно переходить к задаче среднеквадратичного приближения [16].

$$S = \sum_{i=1}^N (FeSum_i - FeSum)^2, \quad (4)$$

где $FeSum_i$ – элементы массива спектра дневного света; $FeSum$ – элементы спектральной характеристики всех светодиодов; n – размерность массивов.

Затем на основании выражения (2) вычисляется среднеквадратичная ошибка аппроксимации, при этом используется общепринятое выражение для оценки среднеквадратического приближения [16]:

$$E_2 = \sqrt{\frac{S}{n}} \quad (5)$$

где n – размерность массива спектральной характеристики.

В результате моделирования и аппроксимации автограми [16] получены следующие значения: мощность излучения спектра – 14345,1 отн. ед.; мощность излучения

Математические ожидания значений параметров α_i и σ_i уравнения регрессии (2) для различных значений L

Фото-рецепторы сетчатки глаза	Яркость адаптации, L , кд/м ²							
	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹	10 ²
C-колбочки								
$\alpha_c(L)$	5,34	5,28	5,30	4,92	2,64	2,29	1,75	1,36
$\sigma_c(L)$	15,32	15,60	15,66	13,28	16,38	18,78	18,13	18,10
Палочки								
$\alpha_n(L)$	91,58	89,39	88,33	83,70	43,34	1,43	2,35	2,73
$\sigma_n(L)$	36,62	36,40	36,34	35,16	36,33	33,52	30,29	29,73
3-колбочки								
$\alpha_z(L)$	2,30	3,80	3,69	5,92	49,02	83,31	63,32	57,39
$\sigma_z(L)$	31,75	29,77	24,97	23,31	36,43	43,57	42,97	42,89
K-колбочки								
$\alpha_k(L)$	0,01	0,05	3,77	11,18	21,08	29,50	49,88	55,70
$\sigma_k(L)$	42,00	42,00	43,00	36,58	42,71	44,09	43,75	43,67

светодиодов – 11049,7 отн. ед.; приведённая относительная погрешность аппроксимации спектра солнечного излучения – 21,4204%. Число светодиодов каждого типа в светодиодном источнике составило: холодно-белых – 206 шт; тепло-белых – 376 шт; ультрафиолетовых – 4 шт; синих – 0; зелёных – 11шт; жёлтых – 0; красных – 58 шт; общее число светодиодов – 655 шт. Сравнительная диаграмма характеристик представлена на рис. 6 (см. на вклейке).

В случае, когда в аппроксимации не участвуют ультрафиолетовые, а затем и зеленые светодиоды, относительная приведённая погрешность увеличивается до 22,6571 и 24,4948%, соответственно. В этих случаях значения погрешности оказываются выше (сравним с 21,4204%). Очевидно, что дополнительный ввод светодиодов специфического цвета приведёт к уменьшению погрешности аппроксимации.

Как показали численные эксперименты, основную долю в результирующем спектре берут на себя холодно-белые и тепло-белые светодиоды.

Смоделированный спектр показал, что он приближается к солнечному свету, но имеет высокую неравномерность в области работы ганглиозных клеток (460 и 480 нм) сетчатки глаза человека и большой спад в области красного света (670 нм). Такой спектр света мало пригоден для освещения среды обитания человека, так как не учитывается спектральная чувствительность ганглиозных клеток сетчатки глаз человека. К таким осветительным приборам относятся симуляторы солнечного света [17, 18].

В работе [19] специалисты светотехники попытались с помощью совокупности светодиодов и люминофоров синтезировать спектр источника света D65 с индексом цветопередачи 98,5. Дальнейшие исследования показали, что этих 14 монохромных светодиодов недостаточно для желаемого воспроизведения спектра стандартного источника дневного света типа D65 [19]. Это обусловлено тем, что монохромные светодиоды имеют узкий спектр излучения. Такое многообразие светодиодов приводит к необходимости применения сложной микропроцессорной системы их управления. В комплексе такие светодиодные системы получили название мультиспектральный светодиодный кластер или мультиспектральные источники освещения [20, 21].

Для минимизации количества типов монохромных светодиодов применены светодиоды с люминофором с длиной возбуждения 405 нм. Результаты моделирования приведены на рис. 7 (см. на вклейке).

Из анализа представленного спектра видно, что он приближается к спектру имитатора солнечного света D65 в диапазоне 405–670 нм, но при этом в области чувствительности ганглиозных клеток видна высокая степень неравномерности спектра – выброс в области 450 нм и существенный провал в области 480 нм.

При этом следует отметить, что в диапазоне длин волн 530 и 630 нм происходит суммирование частных реализаций спектров, и при этом суммарное значение становится равным амплитудному значению в спектре D65.

$$\sum_j^m = f_i^j(\lambda_i) = f_i^{sum}(\lambda_i). \quad (6)$$

Например:

1. 546 нм для Z-колбочек. Для D65 амплитудное значение при 546 нм равно 0,89 от. ед. для длины волны 546 нм (макс. чувствительности Z-колбочек).

2. $f^{d50}(546) = f^1(546) + f^2(546) + f^3(546) = 0,09 + 0,5 + 0,3 = 0,89$

3. 570 нм для K-колбочек. Для D65 амплитудное значение при 570 нм равно 0,8 от. ед. для длины волны – 570 нм (макс. чувствительности K-колбочек).

4. $f^{d50}(570) = f^1(570) + f^2(546) = 0,4 + 0,4 = 0,8$

В работах [16, 19–21] спектр солнечного света моделируется конечным числом полупроводниковых излучателей (монохромных и белых светодиодов). Каждый полупроводниковый излучатель характеризуется мощностью потребления электрической энергии и спектральной плотностью потока, которая интегрируется в общий световой поток светильника, имитирующего стандартный источник света D50. Это позволяет сформулировать дополнительные конструктивные ограничения для оптимизации светодиодного светильника:

$$\sum_{j=1}^m P_j^m \leq P_{\text{треб}}, \quad (7)$$

$$\Phi_v = K \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} V(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda \geq \Phi_v^{\text{треб}}, \quad (8)$$

где Φ_e , λ – спектральная плотность потока излучения светильника, который синтезирован из светодиодных модулей излучателей; K – коэффициент, величина которого определяется используемой системой единиц. В системе СИ этот коэффициент равен 683 лм/Вт; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения, имеющая смысл быть нормированной в максимуме на единицу чувствительности среднего человеческого глаза при дневном зрении.

С математической точки зрения, аппроксимация непрерывной функции спектра солнечного света с цветовой температурой 5000 K в диапазоне 380–780 нм может достигаться путём применения суммирования дискретных функций Гаусса, которые являются аппроксимацией функции спектра полупроводниковых квантовых излучателей света в диапазонах длин волн меньше, чем диапазон 380–780 нм. Но при этом должны учитываться ограничения для следующего перечня физиологически значимых для зрения длин волн.

При проведении аппроксимации f_i^{sum} необходимо учитывать следующие ограничения и соотношения:

$$\sum_j^m = f_i^j(\lambda_i) = f_i^{sum}(\lambda_i). \quad (9)$$

Для адекватной работы зрительного анализатора человека необходимо соблюдать соотношения:

$$f_i^{sum}(\lambda_{380}) - \sum_j^m f_{380}^j(\lambda_{380}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{480}) - \sum_j^m f_{480}^j(\lambda_{480}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{450}) - \sum_j^m f_{450}^j(\lambda_{450}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{460}) - \sum_j^m f_{460}^j(\lambda_{460}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{497}) - \sum_j^m f_{497}^j(\lambda_{497}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{500}) - \sum_j^m f_{500}^j(\lambda_{500}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{543}) - \sum_j^m f_{543}^j(\lambda_{543}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{570}) - \sum_j^m f_{570}^j(\lambda_{570}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{540}) - \sum_j^m f_{540}^j(\lambda_{540}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{440}) - \sum_j^m f_{440}^j(\lambda_{440}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{630}) - \sum_j^m f_{630}^j(\lambda_{630}) = 0,$$

$$f_i^{sum}(\lambda_{670}) - \sum_j^m f_{670}^j(\lambda_{670}) = 0,$$

$$\sum_j^m f_{450}^j(\lambda_{450}) < \sum_j^m f_{460}^j(\lambda_{460}) < \sum_j^m f_{480}^j(\lambda_{480}), \quad (10)$$

где значения длин волн 380, 440, 450, 460, 480, 497, 500, 540, 543, 570, 630 и 670 нм являются значимыми для зрительного анализатора человека. Данный перечень может уточняться по мере получения новых знаний по физиологии зрения.

Минимизация значений показателя аппроксимации (приближения) спектра искусственного света к спектру гигиенически безопасного солнечного света или спектру стандартного источника дневного света типа D50 при соблюдении конструктивных ограничений (по световому потоку, потребляемой электрической мощности) и ограничений по адекватности спектра излучения к биологическому объекту позволит оптимизировать разработки новых светодиодных светильников и проводить оценку перспективности концепций развития светодиодного освещения.

Первым шагом в решении проблемы разработки светодиодного светильника с биологически адекватным спектром излучения – это заполнение провала светодиодного спектра в области 480 нм. Для этого был синтезирован люминофор $Ba_{0,85}Sr_{0,12}Eu_{0,03}SiO_{3,96}F_{0,02}$ голубовато-зелёного цвета свечения с шириной спектра, позволяющей в сумме со спектром белых светодиодов получить непрерывный и равномерный спектр как у ламп накаливания (рис. 8, см. на вклейке).

Этот спектр белого света не имеет недостатков, присутствующих стандартному белому светодиоду (синий кристалл, покрытый жёлтым люминофором), и более гладок по сравнению со спектром ранее разработанных ламп. Данный спектр является непрерывным и по составу соответствует спектру радужного солнечного света при безопасной цветовой температуре 3000 K.

В настоящее время конструкция лампы дорабатывается и улучшается и уже разработана лампа с биологически адекватным спектром излучения (световой поток 1550 лм и светоотдача 95 лм/Вт с драйвером; 104 лм/Вт при пита-

нии от источника постоянного тока), которая может заменить 100 Вт лампы накаливания.

Заключение

1. Совершенствование белых светодиодов для освещения (синий кристалл, покрытый жёлтым люминофором) является перспективным направлением энергосбережения. Но при этом эксперты США, Европы и России считают, что для полного достижения потенциала твердотельного освещения на базе этих светодиодов необходимы дальнейшие исследования его влияния на здоровье человека.

2. Предлагаемая математическая модель оценки биологической аппроксимации может быть использована для оптимизации разработки новых светодиодных светильников и оценки перспективности концепций развития светодиодного освещения.

3. Для освещения образовательных и медицинских учреждений необходимо применять светодиодное освещение с биологически адекватным для организма человека спектром излучения.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература (пп. 1–3, 7, 17, 18 см. References)

- Островский М. А. фотобиологический парадокс зрения <http://www.library.biophys.msu.ru/PDF/3353.pdf>
- Дейнего В.Н., Капцов В.А., Балашевич Л.И., Светлова О.В., Макаров Ф.Н., Гусева М.Г., Кошиц И.Н. Профилактика глазных заболеваний у детей и подростков в учебных помещениях со светодиодными источниками света первого поколения. *Российская детская офтальмология*. 2016; (2): 57-73
- Пильщикова Ю.А., Коваленко О.Ю., Гусева Е.Д., Кудашкина М.В. Моделирование относительной спектральной чувствительности органа зрения биообъектов для оценки эффективности источников излучения. *Современные проблемы науки и образования*. 2014; (4).
- Волков А.С., Кузьмин В.Н. Новый тип колориметра для измерения цветовых характеристик источников света. *Светотехника*; 2012; (2).
- Коваленко О.Ю., Овчукова С.А., Микаева С.А. Основы действия оптического излучения на биообъект. *Инженерная физика*. 2008; (2): 43-48.
- Ронки Л., Шанда Я. Функции относительной спектральной световой эффективности в стандартах и отклонения от них на практике. *Светотехника*. 2003; (4): 14–19.
- Аладов А.В., Бирючинский С.Б., Дубина М.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н. Цветодинамически управляемый операционный светильник с полноцветным светодиодом. *Светотехника*. 2012 (2): 11-18.
- Аладов А.В., Бирючинский С.Б., Валюхов В.П., Закгейм А.Л. Динамически управляемая система освещения светодиодами с широким диапазоном цветовых температур (2800–10000К) и высоким качеством цветопередачи ($R_a > 90$). *Светотехника*. 2014; (4): 19-25.
- Шанда Я. Что такое точность воспроизведения цвета в музейном освещении? *Светотехника*. 2014; (5): 23-27
- Леонидов А.В. Об аналитическом представлении функции относительной спектральной световой эффективности. *Светотехника*; 2012 (2).
- Леонидов А.В. Аппроксимация функций относительной спектральной чувствительности рецепторов сетчатки. *Светотехника*. 2010; (5): 49–51.
- Афонин В., Коваленко О., Гусева Е., Пильщикова Ю. Моделирование спектра солнечного излучения с помощью светодиодов. *Фотоника*. 2016; (2): 56.
- Гутцайт Э.М., Закгейм А.Л., Коган Л.М., Маслов В.Э., Сошин Н.П. К моделированию стандартных источников света светодиодными модулями. *Светотехника* 2013; (4): 61-65.
- Арапова С.П., Арапов С.Ю., Дубинин И.С., Солодова М.С. Метод управления мультиспектральными источниками освещения. Компьютерный анализ изображений: *Интеллектуальные решения в промышленных сетях (CAI-2016): сборник научных трудов по материалам I Международной конференции 5-6 мая 2016 г.* Под общ. ред. А. Г. Тягунова. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2016: 25-30.

- Арапова С.П., Арапов С.Ю., Мезенцева С.Г. Управляемый мультиспектральный светодиодный кластер для репродукционных исследований. *Информация: передача, обработка, восприятие: материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.)*. Екатеринбург: УрФУ, 2016: 104-111.

References

- DOE SSL Program, “2017 Suggested Research Topics Supplement: Technology and Market Context,” edited by James Brodrick, Ph.D. DOE SSL.
- Solid-State Lighting 2017 Suggested Research Topics September 2017
- Human Physiological Responses to Light Meeting Report July 19th, 2016 Washington, D.C. U.S. Department of Energy Solid-State Lighting Program. SSLS, Inc. Navigant. September 2016.
- Ostrovskij M. A. fotobiologicheskij paradoks zreniya <http://www.library.biophys.msu.ru/PDF/3353.pdf>
- Dejnego V.N., Kapcov V.A., Balashevich L.I., Svetlova O.V., Makarov F.N., Guseva M.G., Koshic I.N. Profilaktika glaznyh zabolevanij u detej i podrostkov v uchebnyh pomeshcheniyah so svetodiodnymi istochnikami sveta pervogo pokoleniya. *Rossiyskaya detskaya oftal'mologiya*, 2016 (2): 57-73.
- Pil'shchikova YU.A. I Kovalenko O.YU. I Guseva E.D. I Kudashkina M.V. Modelirovanie otноситel'noj spektral'noj chuvstvitel'nosti organa zreniya bioob'ektov dlya ocenki ehffektivnosti istochnikov izlucheniya ZHurnal *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014; (4).
- Lee. Highly energy-efficient agricultural lighting by B+R LEDs with beam shaping using micro-lens diffuser. *Optical communications*, 2011; 291: 7-14.
- Volkov A.S., Kuz'min V.N. Novyj tip kolorimetra dlya izmereniya cvetovyh harakteristik istochnikov sveta *Svetotekhnika*; 2012 (2).
- Kovalenko O.Yu., Ovchukova S.A., Mikaeva S.A. Osnovy dejstviya opticheskogo izlucheniya na bioob'ekt. *Inzhenernaya fizika*. 2008; (2): 43-48.
- Ronki L., Shanda YA. Funkcii otноситel'noj spektral'noj svetovoj ehffektivnosti v standartah i otkloneniya ot nih na praktike. *Svetotekhnika*. 2003; (4): 14–19.
- Aladov A.V., Biryuchinskij S.B., Dubina M.V., Zakgejm A.L., Mizerov M.N. Cvetodinamicheski upravlyaemyj operacionnyj svetil'nik s polnocvetnym svetodiodom. *Svetotekhnika*. 2012(2): 11-18.
- Aladov A.V., Biryuchinskij S.B. Valyuhov V.P. Zakgejm A.L. Dinamicheski upravlyaemaya sistema osveshcheniya svetodiodami s shirokim diapazonom cvetovyh temperatur (2800-10000K) i vysokim kachestvom cvetoperedachi ($R_a > 90$) *Svetotekhnika*. 2014; (4): 19-25.
- Shanda YA. Chto takoe tochnost' vosproizvedeniya cveta v muzejnom osveshchenii? *Svetotekhnika*. 2014; (5): 23-27.
- Leonidov A.V. Ob analiticheskom predstavlenii funkcii otноситel'noj spektral'noj svetovoj ehffektivnosti. *Svetotekhnika*, 2012;(2).
- Leonidov A.V. Approksimaciya funkcion otноситel'noj spektral'noj chuvstvitel'nosti receptorov setchatki. *Svetotekhnika*. 2010; (5): 49–51.
- Afonin V., Kovalenko O., Guseva E., Pil'shchikova Yu. Modelirovanie spektra solnechnogo izlucheniya s pomoshch'yu svetodiodov *Fotonika*. 2016; (2): 56.
- Reynolds K. ProPhotonix LED-Based Sun-Simulator Design: Technical and Commercial Considerations Photonics Spectra. March 2015.
- Kurt J. Linden, William R. Neal, Harvey B. Serreze. Adjustable spectrum LED solar simulator, Proc. SPIE 9003, Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XVIII, 900317 (27 February 2014); doi: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2035649>
- Gutcajt E.H.M., Zakgejm A.L., Kogan L.M., Maslov V.E.H. Soshchin N.P. K modelirovaniyu standartnyh istochnikov sveta svetodiodnymi moduljami. *Svetotekhnika*. 2013; (4): 61-65.
- Arapova S. P., Arapov S. Yu., Dubinin I. S., Solodova M. S. Metod upravleniya mul'tispektral'nymi istochnikami osveshcheniya. *Komp'yuternyy analiz izobrazhenij: Intellektual'nye resheniya v promyshlennyh setyah (CAI-2016): sbornik nauchnyh trudov po materialam I Mezhdunarodnoj konferencii 5-6 maya 2016*. Ed. Tyagunova A.G. Ekaterinburg: Izd-vo UMC UPI, 2016: 25-30.
- Arapova S. P., Arapov S. Yu., Mezenceva S. G. Upravlyaemyj mul'tispektral'nyj svetodiodnyj klaster dlya reprodukcionnyh issledovanij. *Informaciya: peredacha, obrabotka, vospriyatie: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (Ekaterinburg, 12–13 yanvara 2016)*. Ekaterinburg: UrFU, 2016: 104-111.

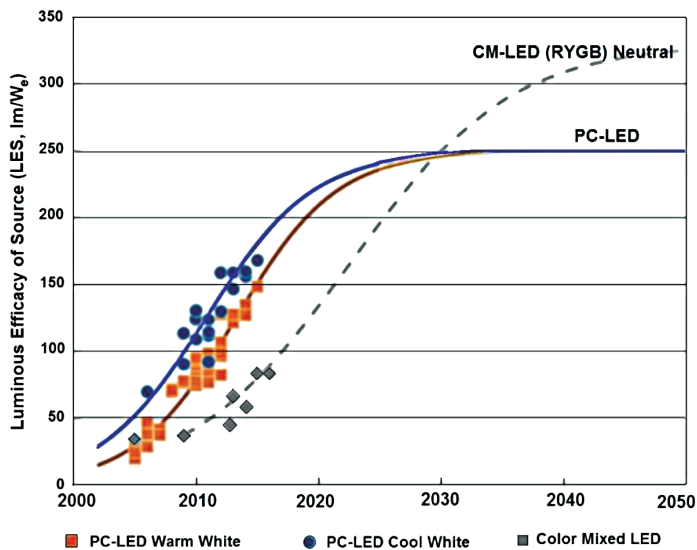


Рис. 1. Достигнутые и прогнозируемые уровни световой эффективности часто применяемых светодиодов (круги – холодные белые (5700 K) pc-Led, квадраты – тёплый белый (3000 K) pc-Led и квадраты на штриховой линии – cm-Led (RYGB)).

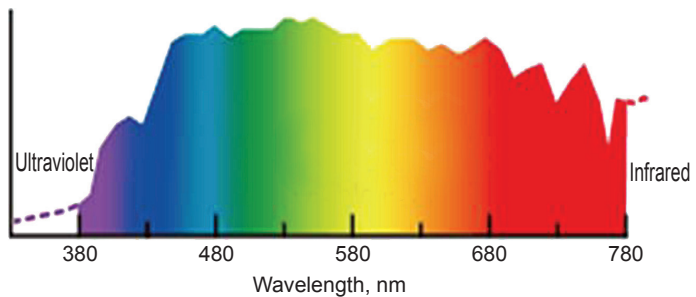


Рис. 2. Общий вид спектра солнечного света при цветовой температуре K = 5000.

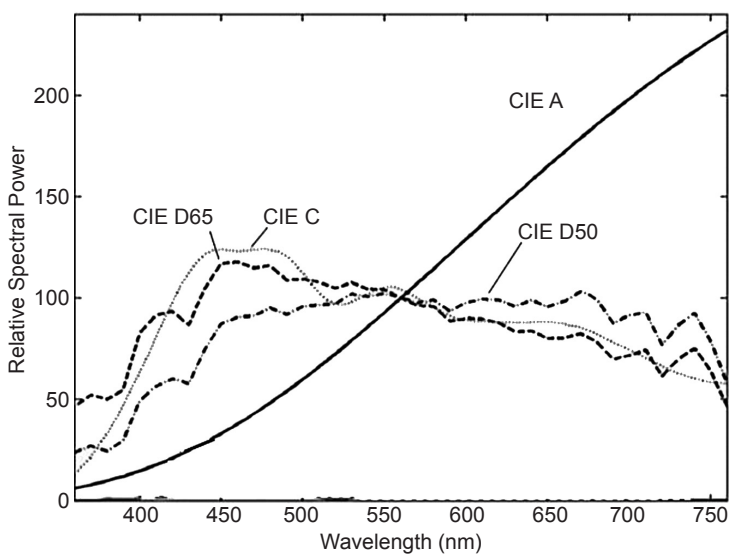


Рис. 3. Стандартные спектры источников освещения.

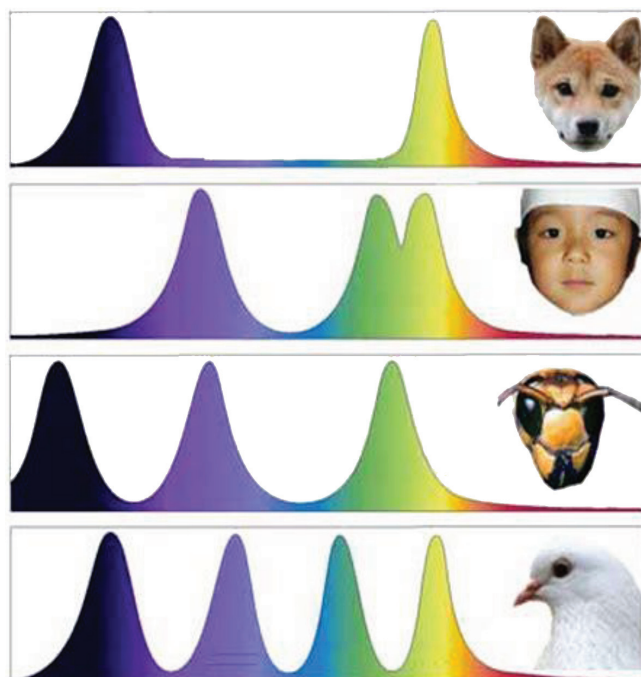


Рис. 4. Спектральная чувствительность клеток сетчатки глаз различных биологических объектов.

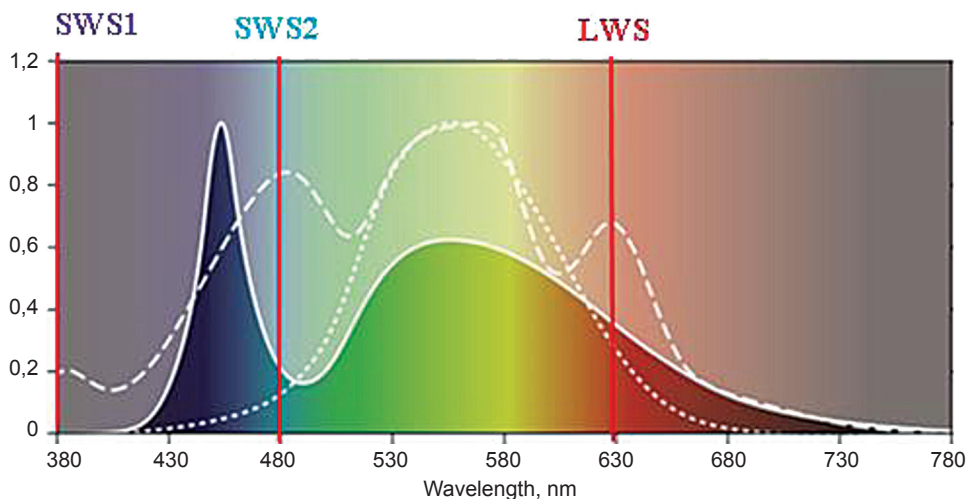


Рис. 5. Спектральная чувствительность глаза человека и курицы, а также спектр света белого светодиода.

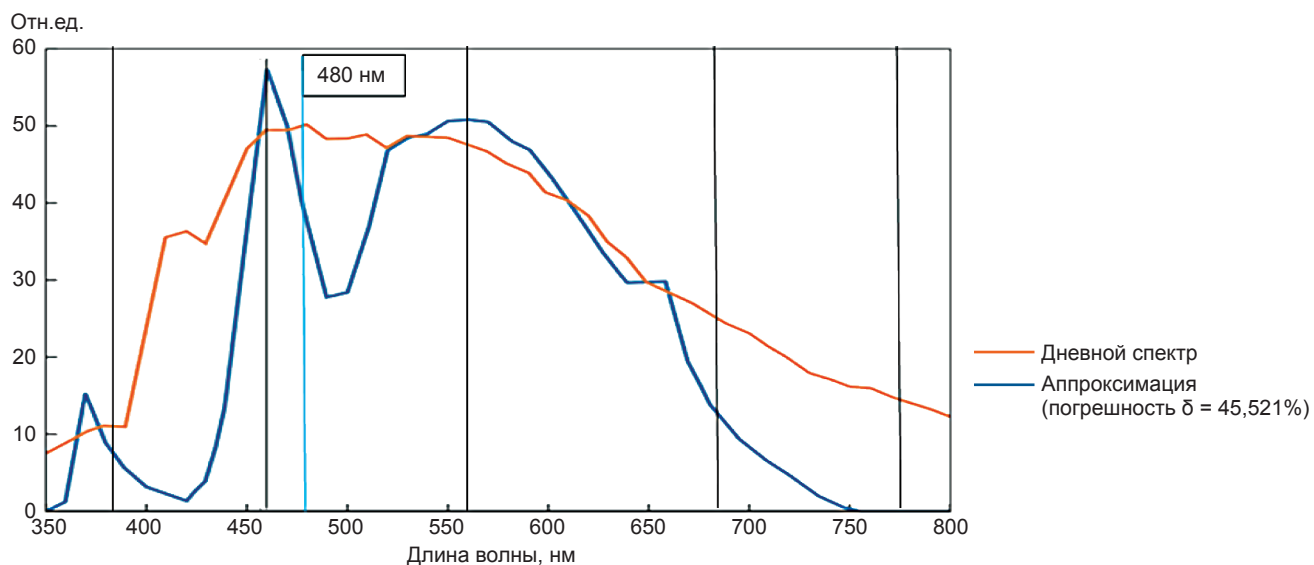


Рис. 6. Спектр солнечного и синтезированного спектров светодиодного светильника.

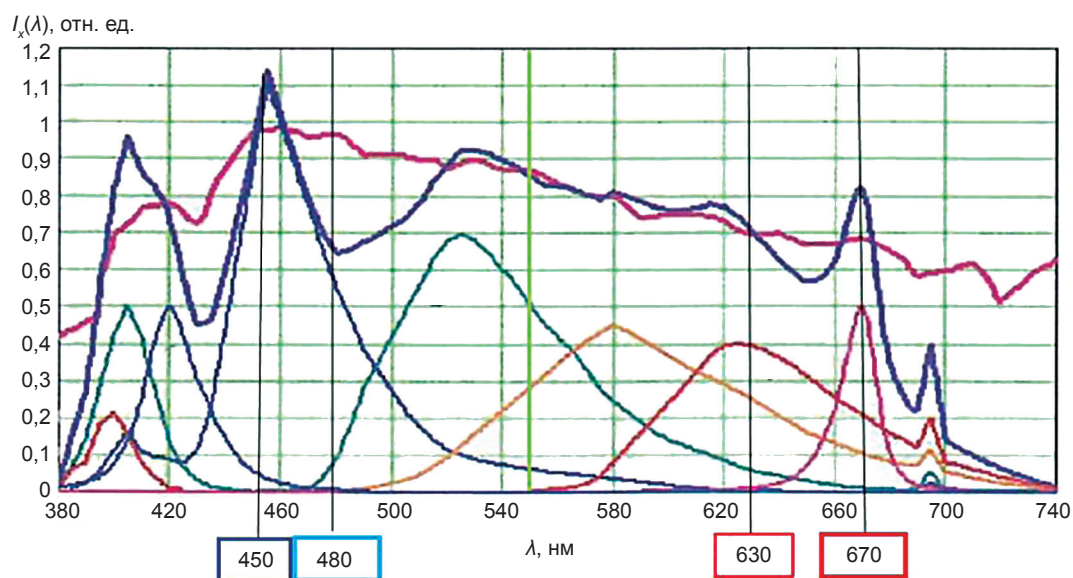


Рис. 7. Общий вид синтезированного солнечного света по отношению к спектру стандартного источника света D65.

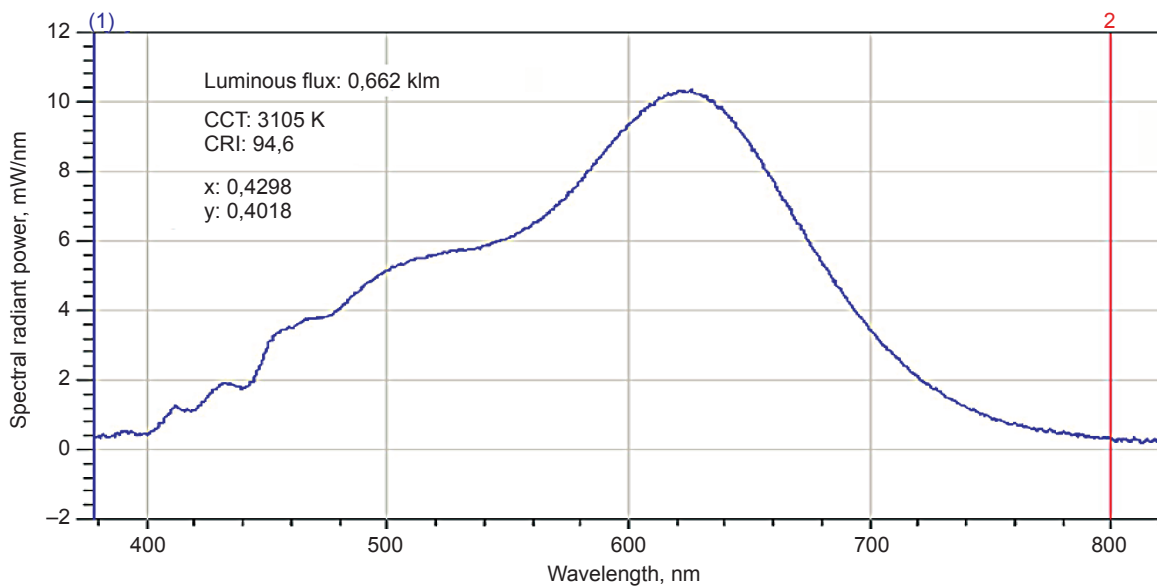


Рис. 8. Спектр света доработанной ретрофитной лампы ЗАО «ЭЛТАН».