

УДК 614/5: 644.36

ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ С СОЛНЕПОДОБНЫМ СПЕКТРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Капцов В.А.¹, Дейнего В.Н.¹, Гордиенко В.Р.²

¹ФГУП Всероссийский НИИ гигиены транспорта Роспотребнадзора

²ООО «Диодосвет»

Представлены методики гигиенической оценки светодиодных источников белого света с солнцеподобным спектром излучения. В их основу положена методика измерений цвета стандартных источников света. Так как цвет является важнейшим информационным показателем окружающей среды, а правильное распознавание цветовых сигналов в световой среде – залог безопасного существования в ней.

Цель: определение технологий, позволяющих создавать эталонные (стандартные) светодиодные источники света и метод соответствия их спектра спектру солнечного света при одинаковом значении коррелированной цветовой температуры.

Методы: оценка совпадения спектра проектируемого светодиодного источника света со спектром стандартного источника.

Обсуждение: показано, что современный уровень светодиодной технологии и производства люминофоров позволяют реализовать на единой технологической базе любой стандартный источник света типа А, В, С и D, что дает возможность на их основе создать любую светотехническую систему как в интересах транспортной безопасности, так и световой среды, окружающей человека, с биологически адекватными и персонифицированными характеристиками.

Результаты: гостированная методика стандартных источников света типа А, В, С и D позволяет проводить инструментальную оценку спектра светодиодных источников белого света с солнцеподобным спектром излучения.

Ключевые слова: источник света, светодиод, люминофор, световая среда, безопасный свет, транспорт.

Для цитирования: Капцов В.А., Дейнего В.Н., Гордиенко В.Р. Гигиеническая оценка светодиодных источников с солнцеподобным спектром излучения. Медицина труда и экология человека. 2024; 1:6-24.

Для корреспонденции: Капцов В.А., зав отделом, член-корр. РАН, д.м.н., профессор, Карсовва39@mail.ru.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10101>

HYGIENIC ASSESSMENT OF LED SOURCES WITH A SUN-LIKE RADIATION SPECTRUM

Kaptsov V.A.¹, Deinego V.N.¹, Gordienko V.R.²

¹ All-Russian Research Institute of Transport Hygiene

² Diodosvet LLC

The methods of hygienic assessment of LED white light sources with a sun-like radiation spectrum are presented. They are based on the method of measuring the color of standard light sources. Since color is the most important information indicator of the environment, and the correct recognition of color signals in a light environment is the key to a safe existence in it. It has been shown that the modern level of LED technology and the production of phosphors make it possible to implement on a single technological basis any standard light source of type A, B, C and D, which allows them to create any lighting system based on them both in the interests of transport safety and the light environment of the human environment with biologically adequate and personalized characteristics. The state-of-the-art methodology of standard light sources of type A, B, C and D allows for an instrumental assessment of the spectrum of LED white light sources with a sun-like radiation spectrum.

Keywords: light source, LED, phosphor, light environment, safe light, transport.

For citation: Kaptsov V.A., Deinego V.N., Gordienko V.R. Hygienic assessment of led sources with a sun-like radiation spectrum. Occupational Health and Human Ecology, 2024;1:6-24.

For correspondence: V.A. Kaptsov, Head of the Department, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc. (Medicine), Professor, Kapcovva39@mail.ru

Financing: the study had no financial support

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10101>

В соответствии с приказом Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 345 от 05.06.2023 в ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф. Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора 23–24 ноября 2023 г. прошел Первый Всероссийский научный конгресс с международным участием «Эрисмановские чтения – 2023. На мероприятии был представлен наш доклад «Светодиодные источники света с солнцеподобным спектром излучения для детских учреждений». В выпущенной по итогам конгресса резолюции было отмечено, что необходимо:

- определить головную организацию по оценке рисков воздействия спектра света на здоровье человека;
- создать специальную лабораторию гигиены искусственного освещения;
- оценить влияние современных источников освещения на здоровье;
- определить порядок аттестации светильников, поставляемых для образовательных и медицинских организаций, на соответствие скорректированным требованиям по спектру излучаемого света.

Во исполнение Резолюции «Эрисмановских чтений - 2023» нами были определены подходы к созданию требований к инструментальной гигиенической оценке светодиодных источников белого света с солнцеподобным спектром излучения.

Одна из базовых основ в познании человеком окружающего мира – анализ гаммы цветов окружающей его среды, а также оценка зрительного комфорта и эмоционального восприятия пространства [1]. Матрица цветности формируется в раннем детстве и оказывает влияние на психоэмоциональное состояние человека на протяжении всей жизни. В ходе эволюции человека формировался генетический базис матрицы цветности, который меняется, если спектр света окружающей среды отличается от спектра солнечного света. В условиях светодиодного освещения (синий кристалл-желтый люминофор) увеличивается вероятность ложного определения цвета сигнала (путают зеленый и красные сигналы) [2].

В соответствии с ГОСТом 34935-2023 «Освещение наружное объектов железнодорожного транспорта. Нормы и методы контроля» пунктом А.4 «Не допускается применять НЛВД для освещения парков станций, железнодорожных переездов и мостов, пассажирских платформ и других открытых железнодорожных территорий и сооружений. *Примечание* – Допускается применять НЛВД для освещения подземных пешеходных переходов, а также территорий, на которых отсутствуют светофоры». Такие требования обусловлены тем, что использование натриевых ламп высокого давления, имеющих желтый спектр излучения, может привести к ошибочному восприятию сигнала желтого света.

Роль положительного влияния солнечного света на здоровье человека трудно переоценить, если соблюдаются требования гигиены [3].

Офтальмологи рекомендуют детям, как можно больше времени находиться в среде солнечного света [2]. Сегодня существует несколько методов оценки спектра искусственных источников света.

Впервые подходы по созданию источников белого света с солнцеподобным спектром излучения были применены и реализованы при разработке стандартных источников света типа А, В, С и D для измерений цвета. Были разработаны поколения соответствующих стандартов:

- CIE 63-1984. The spectroradiometric measurement of light sources;
- CIE 17.4-1987. International Lighting Vocabulary, ILV (joint IEC/CIE publication);
- CIE standard illuminants for colorimetry; CIE 15:2004. Colorimetry, 3rd edition;
- ISO/CIE 10527-1991 Colorimetric observers;
- ISO 10526/CIE S 005-1999 CIE standard illuminants for colorimetry;
- ISO 23603:2005 Стандартный метод оценки спектрального качества имитаторов дневного света для визуальной оценки и измерения цвета.

Последний позволяет оценить спектральное качество излучения, обеспечиваемого имитатором дневного света, который может использоваться как для визуальной оценки цветов и измерения цвета, так и для оценки качества. Он определяет максимально допустимое отклонение цветности моделируемого источника дневного света CIE от цветности имитируемого источника света CIE стандартного дневного света симулятора.

Сегодня разрабатывается стандарт ISO/CIE DIS 23603.2 «Стандартный метод оценки спектрального качества имитаторов дневного света для визуальной оценки и измерения цвета», который заменит действующий стандарт ISO/CIE 23603:2005.

В нашей стране до 2000 года действовал ГОСТ 7721-89 «Источники света для измерений цвета. Типы. Технические требования. Маркировка». Настоящий стандарт распространялся на источники света для освещения образцов материалов при измерениях их цвета.

Он устанавливал следующие типы стандартных источников света:

- а) А – газонаполненная электрическая лампа накаливания с коррелированной цветовой температурой излучения $T = 2856$ К. Воспроизводит условия искусственного освещения электрическими лампами накаливания;
- б) В - источник света А в комбинации с точно определенным жидкостным или стеклянным светофильтром, предназначенным для создания излучения с коррелированной цветовой температурой $T = 4874$ К. Воспроизводит условия прямого солнечного освещения;

- в) С - источник света А в комбинации с точно определенным жидкостным или стеклянным светофильтром, предназначенным для создания излучения с коррелированной цветовой температурой $T = 6774$ К. Воспроизводит условия освещения рассеянным дневным светом;
- г) D65 - должен воспроизводить излучение с коррелированной цветовой температурой $T = 6504$ К.

В Приложении 1 этого стандарта приведено «Относительное спектральное распределение энергии излучения Φ_λ стандартных источников света типа А, В, С и D45». Это очень важно, так как относительно показателя Φ_λ стандартных источников света типа А, В, С и D45 можно проводить оценку реального спектра светодиодного источника света с солнцеподобным спектром излучения.

В соответствии с ГОСТом источники света А, В, С и D65 должны быть аттестованы по координатам цветности x, y , определенным в системе цветных координат X, Y, Z , установленных МКО в 1931 г., и должны соответствовать значениям, указанным в табл. 1. При этом допускается отклонение координат цветности от номинального значения в пределах $\pm 0,02$.

Таблица 1. Координаты цветности различных типов источников света.

Table 1. Chromaticity coordinates of different types of light sources.

ТИПЫ ИСТОЧНИКА СВЕТА	Координаты цветности	
	x	y
А	0,448	0,407
В	0,348	0,352
С	0,310	0,316
D65	0,313	0,329

При создании источников света типов В и С допустимое отклонение координат цветности источника света А от значений, указанных в табл. 1, в пределах $\pm 0,003$.

В настоящее время нет рекомендации МКО для воспроизведения стандартного источника D65. На рис. 1 приведены спектры стандартных источников света, а на рис. 2 – их координаты цветности.

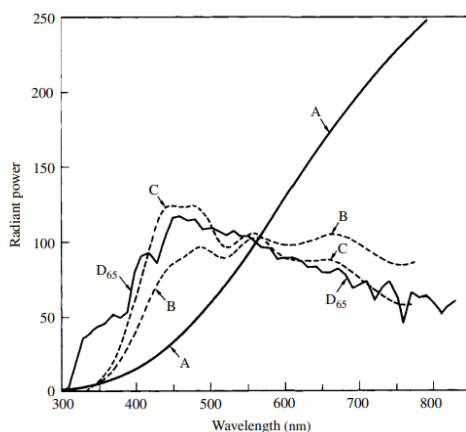


Рис. 1. Спектральное распределение источников света CIE A, B, C и D65 [4]

Fig.1. Spectral distribution of light sources CIE A, B, C and D65 [4]

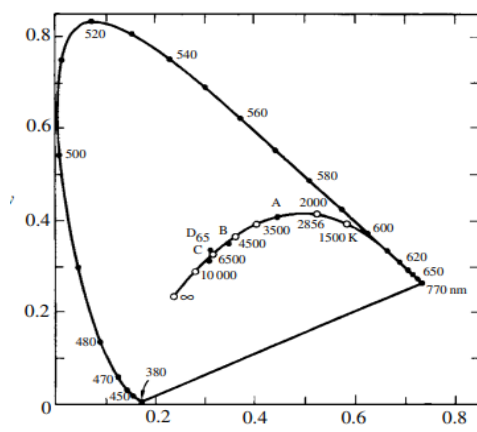


Рис. 2. Планковский locus (открытые круги) и точки цветности для стандартных и дополнительных источников освещения CIE (заполненные круги) [4]

Fig. 2. Planck locus (open circles) and chromaticity points for standard and additional CIE illuminants (filled circles) [4]

Анализ конструктивных особенностей стандартных источников света типа A, B, C и D45 показал сложности их применения в системах общего освещения.

Однако требования к относительной спектральной распределенной энергии излучения Φ_{λ} стандартных источников света типа A, B, C и D45 и к координатам цветности x , y , определенным в системе цветовых координат X , Y , Z , установленных МКО в 1931 г., могут быть положены в основу требований к светодиодным источникам с солнцеподобным спектром излучения.

Цель: определение технологий, позволяющих создавать эталонные (стандартные) светодиодные источники света и метод соответствия их спектра спектру

солнечного света при одинаковом значении коррелированной цветовой температуры.

В настоящее время технологии изготовления светодиодов белого света и люминофоров так быстро развиваются, что имитация солнечного света с их помощью становится коммерческим преимуществом на рынке светодиодного освещения [5].

Современные светодиодные источники белого света с солнцеподобным спектром излучения могут быть как в стандартных источниках света для определения цветности, так и в системах освещения среды обитания человека.

Рассмотрим примеры сравнительной оценки стандартных источников света и светодиодных источников света с солнцеподобным спектром излучения.

Так, специалисты фирмы Yujil, основываясь на технологии люминофоров Yujileds®, могут имитировать спектр солнечного света. Они могут выбрать люминофоры с хорошей термической стабильностью и превратить их в пленку PiG (люминофор в стекле) или люминофор в керамике (PiC) [6].

Это позволяет изготовить источник, имитирующий солнечный свет с высокой плотностью мощности. В настоящее время специалисты фирмы Yujil могут имитировать спектр галогенов с применением одного возбуждающего светодиода с комплексным люминофором. Мы по разработанной технологии создали свой эталонный светодиодный источник белого света. На рис. 3 приведены спектры таких источников.

Спектр Yujileds A создан с помощью одного светодиодного кристалла и 7 люминофоров, что является беспрецедентной сложностью для светодиодной технологии. Специалисты фирмы Yujil считают, что это будет важной вехой, поскольку светодиод может спектрально воспроизводить галоген или источник света CIE A в видимом диапазоне освещения.

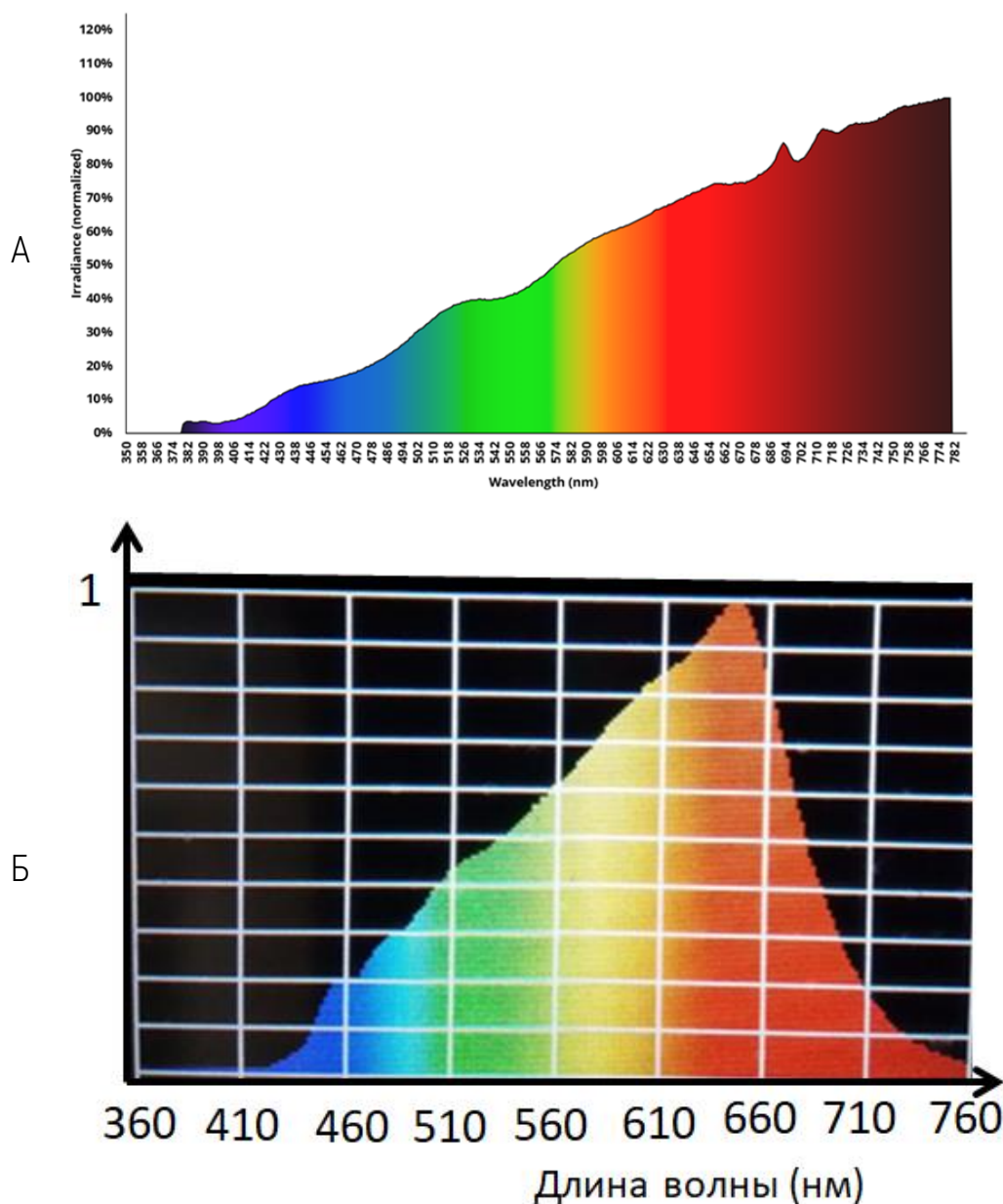


Рис. 3. Спектр светодиодного источника белого света: а) фирмы Yujileds [7], б) разработанный по нашей технологии эталонный стандартный источник излучения белого свет типа ledA₂₈ ($T_{кцт} = 2870K$, $Ra \geq 94$ и $x=04579$, $y=04294$).
Fig. 3. Spectrum of Yujileds LED white light source [7]

На рис. 4 приведены спектры светодиодов с солнечным спектром излучения фирмы Yujil в сравнении со стандартными источниками света.

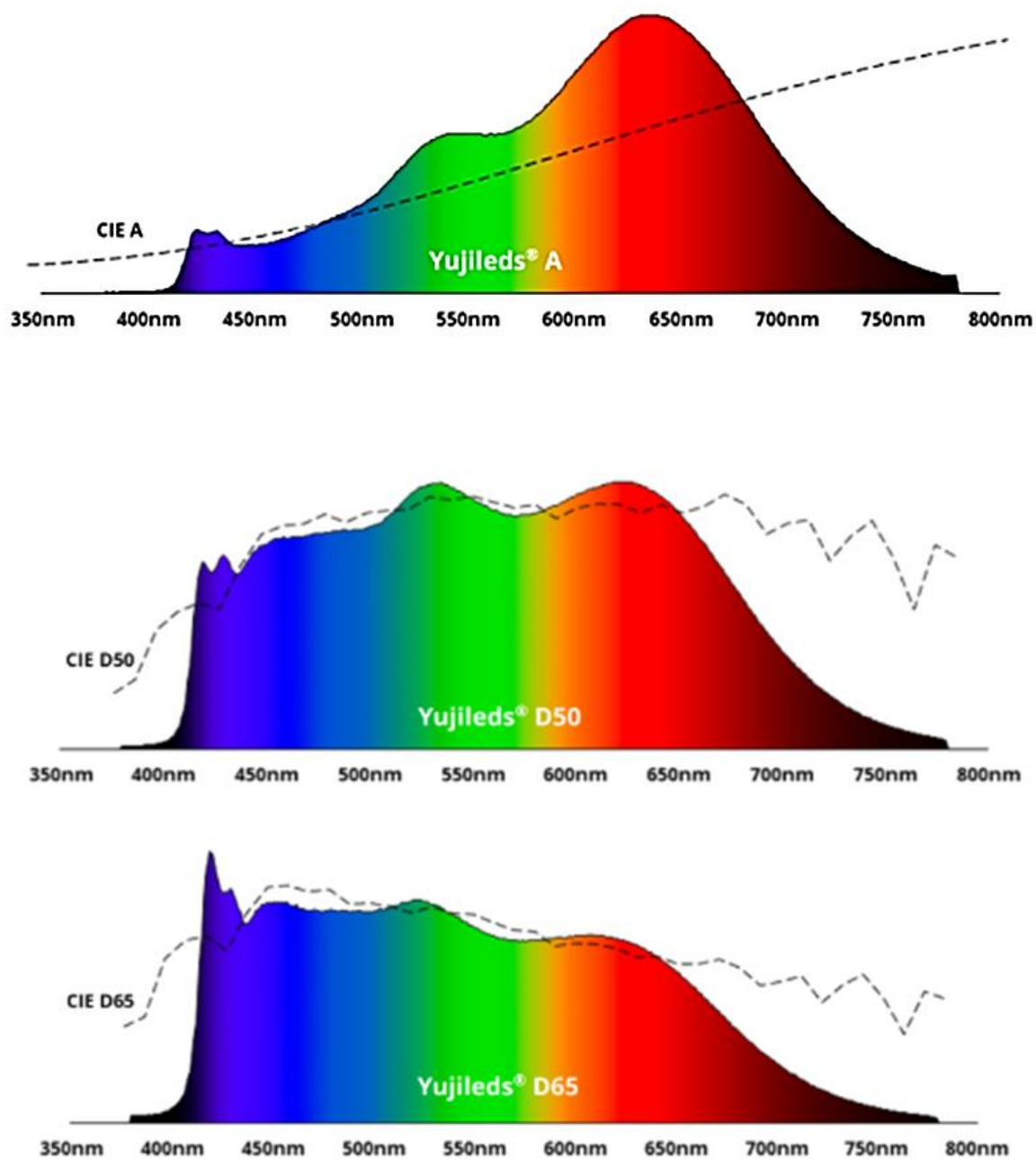


Рис. 4. Сравнение спектров стандартных источников света CIE A и D₅₀, D₆₅ со спектрами светодиодов Yujileds® A (B), Yujileds® D₅₀ (Б) и Yujileds® D₆₅(C) [8]

Fig. 4. Comparison of the spectra of standard CIE A and D₅₀, D₆₅ light sources with the spectra of Yujileds® A (B), Yujileds® D₅₀ (B) and Yujileds® D₆₅ (C) LEDs [8]

Аккумулируя мировой опыт, производители светодиодов Китая выпускают светодиоды со спектрами, которые имитируют солнечный спектр и спектр стандартных источников света CIE A и D.

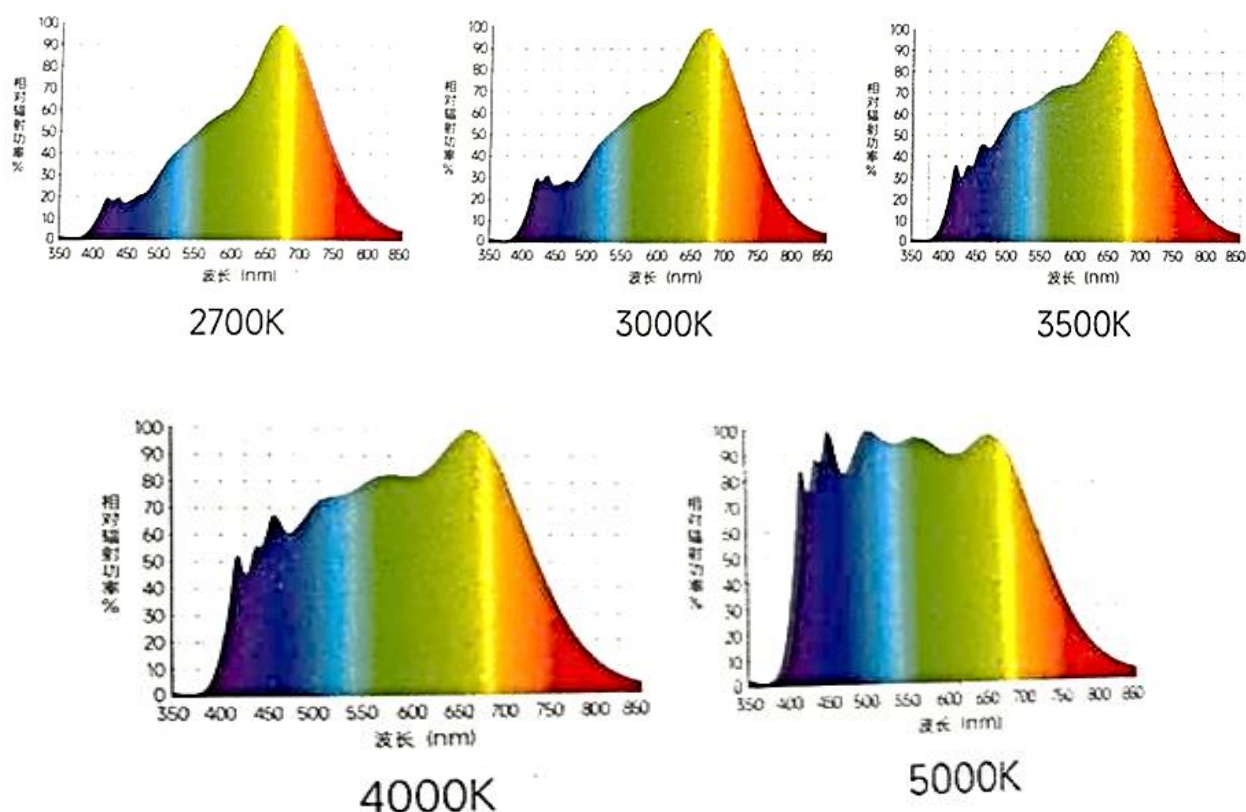


Рис. 5. Примеры реализации специалистами Китая спектров светодиодов с солнцеподобным спектром излучения для разных значений коррелированной цветовой температуры от 2700 К до 5000 К

Fig. 5. Examples of implementation by Chinese specialists of LED spectra with a sun-like emission spectrum for different values of correlated color temperature from 2700 K to 5000 K

Несмотря на успехи зарубежных партнеров в области разработки светодиодов белого света с солнцеподобным спектром излучения, а в основу их методологии положена имитация спектра солнечного света, нами были разработаны теоретические основы создания светодиодных источников света на основе биологии воздействия света на глаза и кожу человека. По этой методике был разработан светодиодный источник света с солнцеподобным спектром излучения с биологически адекватными характеристиками для освещения среды обитания человека. На рис. 6 приведен такой спектр света.

Данный светильник был разработан в 2020 г. и проработал три года, сохранив стабильность спектра. Он может стать эталонным светодиодным источником света для коррелированной цветовой температуры 4000 К. В его спектр света был добавлен фиолетовый свет (380 нм), активно влияющий на эффективную работу

родопсина и препятствующий удлинению оптической оси глаза, а также учтена светочувствительность опсина, который обеспечивает эффективное управление хрусталиком глаза.

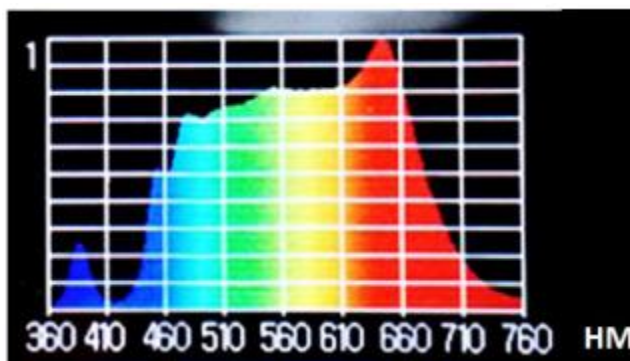


Рис. 6. Спектр светодиодного светильника, в котором есть фиолетовый свет 380 нм, заполнен провал голубого света 480 нм и есть красный 650 нм

Fig. 6. The spectrum of the LED lamp, in which there is violet light 380 nm, the gap of blue light 480 nm is filled and there is red light 650 nm

Главным отличием нашего спектра от других спектров светодиодных источников света является провал в диапазоне синего света 410-450 нм. Синий свет этого диапазона вызывает окислительный стресс клеток и их митохондрий.

В инициативном порядке нами была разработана технология изготовления светодиодных светильников с учетом гигиенических требований [9,10,11] к спектру света (рис. 7).

Световая информация об окружающей среде воспринимается как растениями, так и людьми через различные фоторецепторы, содержащие определенные светочувствительные пигменты (опсины), поглощающие электромагнитное излучение (фотоны) определенной длины волны. На базе огибающей спектра на рис. 7 можно построить огибающую кривую Дейнего-Капцова, аналогично кривой Маккри для растений, которая характеризуется коэффициентом спектральной эффективности в зависимости от длины волны света.

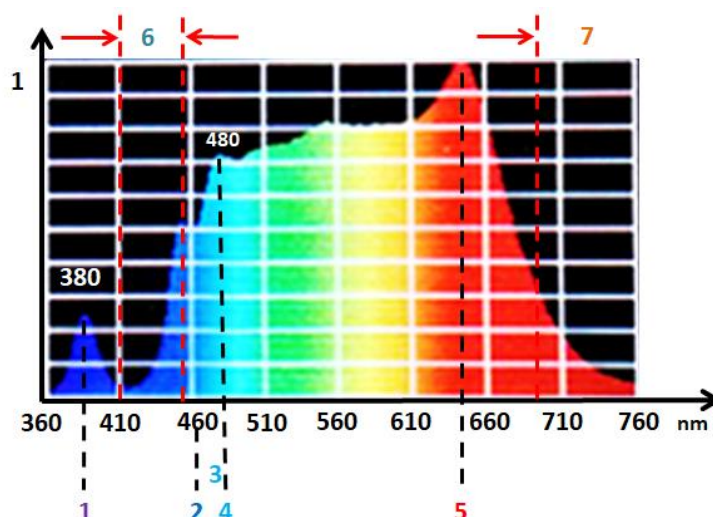


Рис 7. Пример реализации оптимального спектра. 1- управление оптической осью глаза; 2- управление «циркадным ритмом»; 3-управление размером хрусталика; 4- управление размером зрачка; 5-управление энергетическим потенциалом митохондрий ганглиозных клеток; 6- спектр фототоксичного действия на клетки RPE, окисление A2E и морфологические изменения в клетках; 7- снижение эффективности функционирования митохондрий

Fig 7. An example of the implementation of the optimal spectrum. 1- control of the optical axis of the eye; 2- control of "circadian rhythm"; 3-control the size of the lens; 4- pupil size control; 5-control of the energy potential of ganglion cell mitochondria; 6- spectrum of phototoxic effects on RPE cells, A2E oxidation and morphological changes in cells; 7- decreased efficiency of mitochondrial functioning

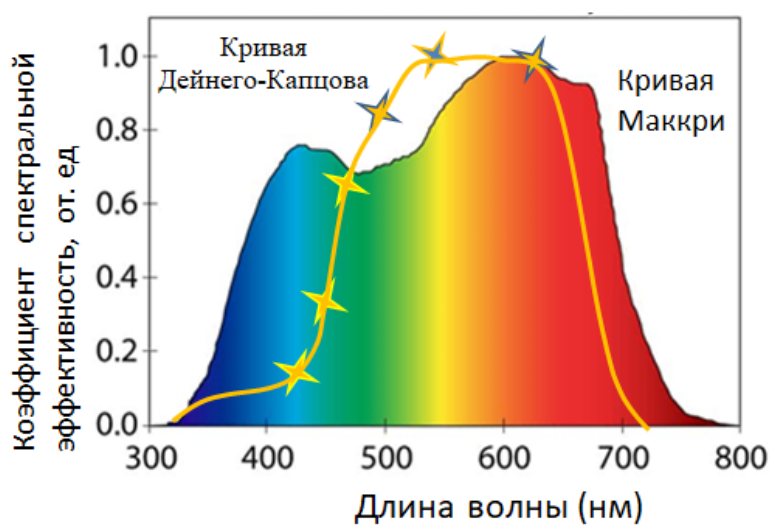


Рис. 8. Кривая Маккри и гипотетическая кривая Дейнего-Капцова

Fig. 8. McCree curve and hypothetical Deyneko-Kaptsow curve

Параметры нормирующей кривой Дейнего-Капцова будут уточняться по результатам исследования влияния спектра света на глаза и здоровье человека. Специалистами военной медицины предпринимались попытки исследовать влияние светодиодного освещения на зрение и здоровье военнослужащих в условиях Арктики [12].

В 2016 году Начальником Главного военно-медицинского управления Минобороны РФ были утверждены «Методические указания по организации и методам исследования влияния светодиодных источников света на функциональное состояние корабельных специалистов». Однако инициатива медицинской службы ВМФ не получила должной поддержки в структурах Минобороны РФ, ответственных за финансирование научных исследований [13].

Эти исследования не были проведены, что сказалось на росте заболеваний глаз и других болезней, связанных с нарушением циркадных ритмов у моряков и офицеров ВМФ в 2003–2018 гг. [14] и 2015–2020 гг. [15]. К таким болезням относятся рак, ожирение, заболевание глаз, что стало причинами для увольнения по состоянию здоровья.

Метод оценки совпадения спектра проектируемого светодиодного источника света со спектром стандартного источника

Рассмотрим один из современных подходов к оценке совпадения спектра проектируемого светодиодного источника света со спектром стандартного источника света по индексу (показателю) спектральной точности (SAI) [16].

В настоящее время большинство продуктов для моделирования спектра, представленных на рынке, все еще находятся на стадии качественного описания степени точности. Отсутствует количественный метод расчета спектральной точности. Когда компания Yujileds® разрабатывала серию осветительных приборов CIE, они использовали индекс спектральной точности (SAI) для описания точности моделирования и контроля качества продукции. Это гарантировало, что осветительные приборы CIE сохранят точные параметры от исследований и разработок до производства.

Для вычисления показателя спектральной точности необходимо использовать два спектральных распределения мощности, одно синтезированное (с помощью светодиода и люминофоров), а другое эталонное. Формула выглядит следующим образом:

$$SAI = 100 - \left(\frac{\sqrt{\sum_{Min}^{Max} (C_i - R_i^e \Delta f_i)^2}}{\sqrt{\sum_{Min}^{Max} R_i^e \Delta f_i^2}} \times 100 \right)$$

где:

C_i - нормированный измеренный спектр;

R_i^e - нормализованный опорный спектр, амплитудные значения которого могут выбираться из таблиц для стандартных источников света;

Max - максимальная длина волны в спектре;

Min - минимальная длина волны в спектре;

Δf_i – минимальный шаг измерения спектрально-энергетической характеристики спектра.

Моделирование стандартного осветительного прибора CIE A [16]

CIE Illuminant A, часто называемый стандартным источником света A, представляет собой эталонный источник света, разработанный Международной комиссией по освещению (CIE) для представления спектральных характеристик ламп накаливания. Он очень похож на теплый желтоватый свет, излучаемый традиционными бытовыми лампочками. Этот источник света имеет плавное спектральное распределение в видимом диапазоне длин волн и широко используется в различных приложениях, включая измерение цвета, фотографию и проектирование освещения, для моделирования условий освещения, обычно встречающихся в повседневной среде. В связи с тем, что лампы накаливания имеют практически неизменную спектральную морфологию после предварительного нагрева, они также широко используются в модулях источников света высокоточных приборов и оборудования.

Продукт Yujileds® идеально имитирует спектр стандартного светильника CIE A в видимом диапазоне длин волн (380 нм – 780 нм). Индекс спектральной точности (SAI) составляет до 96. SAI обычных светодиодов составляет всего 30-35. Таким образом, он может прекрасно заменить лампы накаливания в любой среде, не беспокоясь о каких-либо изменениях, вызванных отсутствием традиционных светодиодов из-за спектральных потерь. Кроме того, по сравнению с традиционными лампами накаливания, его спектр уже находится в стабильном состоянии при прямом освещении. Поэтому использование данного продукта в приборе сэкономит время ожидания стабилизации спектра лампы накаливания.

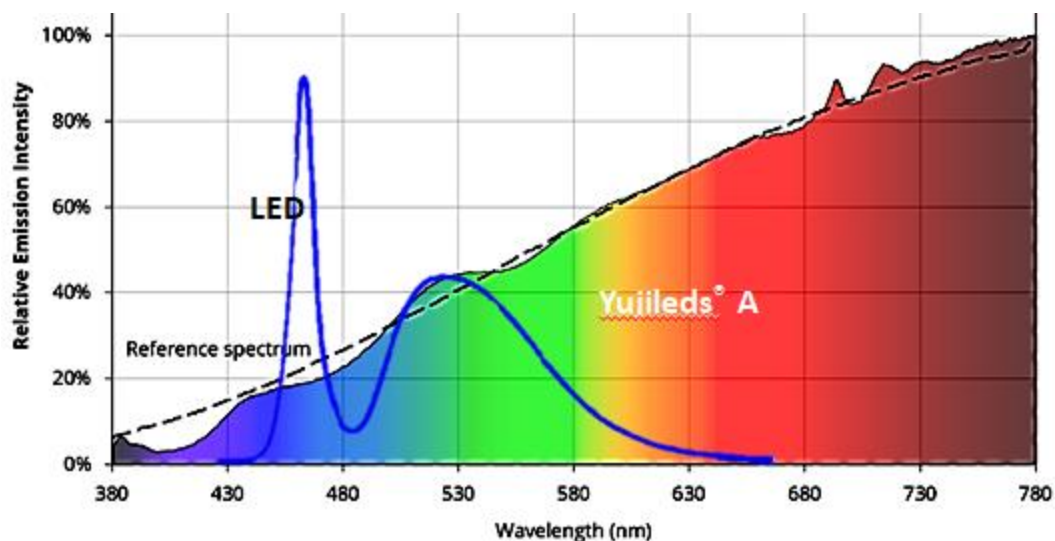


Рис. 9. Эталонный спектр стандартного источника А, спектр светодиода Yujileds®А и традиционный спектр светодиода (синий кристалл, покрытый желтым люминофором)

Fig. 9. Reference spectrum of standard source A, spectrum of Yujileds® LED and traditional spectrum of LED (blue crystal coated with yellow phosphor)

Моделирование стандартного осветительного прибора CIE D50 [16]

CIE Illuminant D50 — это стандартизированный эталонный источник света, разработанный Международной комиссией по освещению (CIE) для представления средних условий дневного света при цветовой температуре около 5000 К. Он обычно используется в качестве эталона для приложений, связанных с цветом, таких как сопоставление цветов, контроль качества и цветопередачи в полиграфии и фотографии. Являясь фундаментальным компонентом в науке о цвете, CIE Illuminant D50 играет решающую роль в обеспечении согласованной и надежной передачи цвета в различных медиа и визуальных контекстах. В отличие от CIE Illuminant A, солнечное освещение может быть нестабильно в нужный момент, на которое влияют погода, дата и время. Поэтому для точных производств необходим искусственный источник света, стабильно имитирующий D50 (рис. 10).

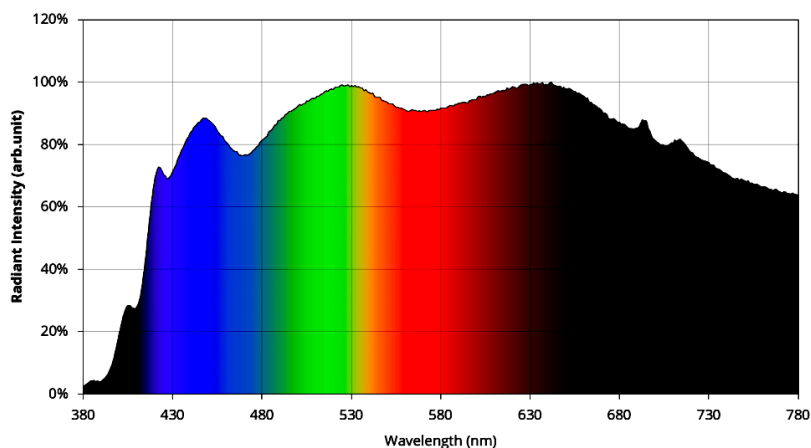


Рис. 10. Спектр светодиода Yujileds® D50

Fig. 10. Spectrum of Yujileds® D50 LED

В видимом диапазоне длин волн (380-780 нм) продукт Yujileds® идеально имитирует спектр стандартного светильника CIE D50. Индекс спектральной точности (SAI) составляет до 90. Для сравнения индекс спектральной точности (SAI) люминесцентных ламп, используемых в настоящее время для моделирования D50, составляет всего около 60.

На рис.11 приведены спектры стандартного источника света D50 и люминесцентной лампы GTIF32TS.

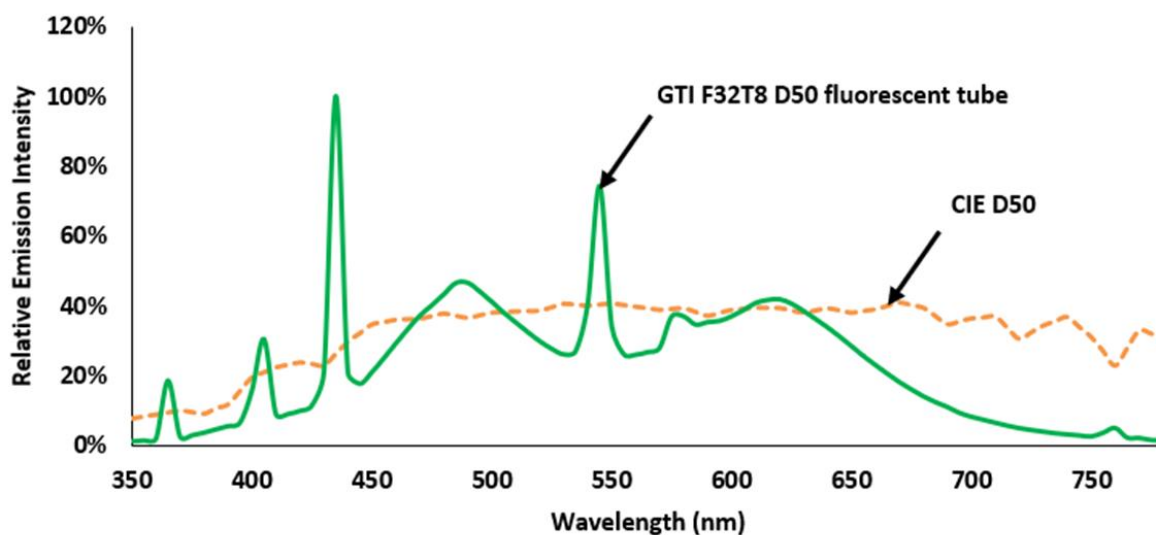


Рис. 11. Спектр стандартного источника CIE D50 и люминесцентной лампы GTIF32TS

Fig. 11. Spectrum of a standard CIE D50 source and a GTIF32TS fluorescent lamp

Светодиодная технология позволяет создавать эталонные источники света не только для светотехнических измерений, но они могут массово применяться для формирования комфортной среды обитания с биологически адекватными для человека характеристиками. На способ получения такого источника света оформлен патент на изобретение.

Обсуждение результатов

Методика расчета показателя спектральной точности совпадения, разработанного (контролируемого) светодиодного источника белого света с солнцеподобным спектром излучения со стандартным источником света показала свою эффективность и может быть доработана с учетом рекомендаций, изложенных в монографии «Эволюция искусственного освещения: взгляд гигиениста» [2] и [17, 18]. Применение кривой Дейнего-Капцова позволит нормировать спектр эталонного источника света с солнцеподобным спектром излучения для создания спектра с целью оценки разрабатываемого или проверяемого источника света на соответствие его характеристик степени адекватности светочувствительной системе человека.

Выводы:

1. Стандартные источники света А, В, С и D имеют солнцеподобный спектр излучения, и требования к ним нормируются ГОСТом и международными документами CIE и ISO.
2. Современная полупроводниковая технология и набор люминофоров позволяют реализовать любой стандартный источник света А, В, С и D.
3. Требования к стандартным источникам света А, В, С и D должны быть доработаны и уточнены с учетом биологии зрения человека и распространены для проектирования освещения среды обитания человека.
4. Методика расчета показателя спектральной точности разработанного (контролируемого) светодиодного источника белого света с солнцеподобным спектром излучения со спектром стандартных источников света показала свою эффективность и может быть использована в практике Роспотребнадзора.

Список литературы:

1. Б.Манав Световая среда и воспринимаемая среда Светотехника,2019;5:35-39.
2. Капцов В.А., Дейнего В.Н. «Эволюция искусственного освещения: взгляд гигиениста» М., РАН, 2021.

3. В. А. Капцов, В. Н. Дейнего. Новые вызовы для гигиены и охраны труда: искусственный интеллект и светодиодные технологии. *Безопасность и охрана труда*. 2023;4:48–55
4. Standard and supplementary illuminants <https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KORZHNEVA/educational%20work/Tab4/Lesson%205/Standart%20and%20supplementary%20illuminants.pdf>
5. Э.М.Гутцай, А.Л. Закгейм, Л.М. Коган, В.Э. Маслов, Н.П. Социн К моделированию стандартных источников света светодиодных модулей *Светотехника*,2013;4:61-65.
6. Phosphor in Glass / Ceramic - Yujileds (yujiintl.com) <https://www.yujiintl.com/phosphor-in-glass-ceramic/>
7. Теперь Yuji может имитировать галогенный спектр с помощью одного светодиода - Yujileds (yujiintl.com) <https://www.yujiintl.com/now-yuji-can-simulate-the-halogen-spectrum-by-one-led/>
8. Sunlight Technology – YUJILED High CRI Webstore (yujiintl.com)
9. Marie, M., Bigot, K., Angebault, C. et al. Light action spectrum on oxidative stress and mitochondrial damage in A2E-loaded retinal pigment epithelium cells. *Cell Death Dis* 9, 287 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41419-018-0331-5>
10. Капцов В.А., Дейнего В. Н. Закон необходимого разнообразия и гигиена освещения. *Ж. Санитарный врач*. 2019;12:58-65.
11. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Энергетический потенциал митохондрий в условиях светодиодного освещения и риски заболевания глаз Анализ риска здоровью. 2019; 2:175-184.
12. Жекалов А.Н., Мишин И.Ю. Оценка патогенеза нарушения зрительных функций у военноморских специалистов Арктической зоны РФ в период полярной ночи. *Морская медицина*. 2021;7(4):84–89. doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-84-89>
13. Смуров А. В., Богданов А. А., В. В. Воронов, В. Ф. Беляев Проблема гигиенической регламентации параметров световой среды в помещениях кораблей ВМФ *Морская медицина*. 2018;4(1):19-26. DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2018-4-1-18-26>
14. Евдокимов В.И., Сиващенко П.П. Сравнительный анализ увольняемости по состоянию здоровья военнослужащих Военно-Морского Флота и других видов и родов войск Вооруженных сил Российской Федерации в 2003–2018 гг. *Морская медицина*. 2019; 5(4):44–65. <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2019-5-4-44-65>.
15. Евдокимов В.И., Мосягин И.Г., Сиващенко П.П. Первичная заболеваемость офицеров Воздушно космических сил и Военно-морского флота России (2015–2020 гг.). *Морская медицина*. 2022; 8(2):38–47, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2022-8-2-38-47>
- 16.Технология CIE Illuminant - Yujileds (yujiintl.com) <https://www.yujiintl.com/cie-illuminant-technology/>
17. Сладкова Ю.Н., Крийт В.Е., Волчкова О.В., Скляр Д.Н., Плеханов В.. Освещение в жилых и общественных зданиях: основные проблемы и совершенствование методов управления. *Общественное здравоохранение и жизненная среда – PH&LE*. 2022; (5):32-40. (На русск.) <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-32-40>
- 18.Вишневикий С. А . Разработка методов расчета и конструирования интеллектуальных установок для создания оптимальных условий освещения помещений. Диссертация кандидата технических наук «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева» 2017.

References:

1. Manav B. Light environment and perceived environment. *Svetotekhnika*, 2019; 5: 35-39. (In Russ).
2. Kaptsov V.A., Deinego V.N. "The evolution of artificial lighting: a hygienist's view". M., RAN, 2021. 632 pp. (In Russ).
3. Kaptsov V.A., Deinego V. N. New challenges for occupational health and safety: artificial intelligence and LED technologies. *Bezopasnost' i okhrana truda*. 2023;4: 48–55. (In Russ).
4. Standard and supplementary illuminants <https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KORZHNEVA/educational%20work/Tab4/Lesson%205/Standart%20and%20supplementary%20illuminants.pdf>
5. Gutsay E.M., Zackheim A.L., Kogan L.M., Maslov V.E, Soshchin N.P. To the modeling of standard light sources of LED modules. *Svetotekhnika*, 2013; 4:61-65.
6. Phosphor in Glass / Ceramic - Yujileds (yujintl.com) <https://www.yujintl.com/phosphor-in-glass-ceramic/>
7. Now Yuji can simulate the halogen spectrum by one LED - Yujileds (yujintl.com) <https://www.yujintl.com/now-yuji-can-simulate-the-halogen-spectrum-by-one-led/>
8. Sunlight Technology - YUJILEDs High CRI Webstore (yujintl.com)
9. Marie M., Bigo, K., Angebault C. et al. Light action spectrum on oxidative stress and mitochondrial damage in A2E-loaded retinal pigment epithelium cells. *Cell Death Dis* 9, 287 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41419-018-0331-5>
10. Kaptsov V.A., Deinego V.N. The law of necessary diversity and lighting hygiene. *Sanitarny vrach*. 2019;12. (In Russ).
11. Kaptsov V.A., Deinego V.N. Energy potential of mitochondria under LED lighting conditions and risks of eye disease. *Analiz riska zdorov'yu*. 2019; 2: 175-184. (In Russ).
12. Zhekalov A.N., Mishin I.Yu. Assessment of the pathogenesis of visual impairment among naval specialists in the Arctic zone of the Russian Federation during the polar night. *Morskaya medicina*. 2021; 7(4):84–89, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-84-89>. (In Russ).
13. Smurov A. V., Bogdanov A. A., V. V. Voronov, V. F. Belyaev The problem of hygienic regulation of the parameters of the light environment in the premises of Navy ships. *Morskaya medicina*. 2018;4(1):19-26. DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2018-4-1-18-26>. (In Russ).
14. Evdokimov V.I., Sivashchenko P.P. Comparative analysis of dismissal due to health conditions of military personnel of the Navy and other branches of the Armed Forces of the Russian Federation in 2003–2018. *Morskaya meditsina*. 2019; 5(4):44–65. <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2019-5-4-44-65>. (In Russ).
15. Evdokimov V.I., Mosyagin I.G., Sivashchenko P.P. Primary morbidity among officers of the Aerospace Forces and the Russian Navy (2015–2020). *Morskaya meditsina*. 2022;8(2): 38–47, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2022-8-2-38-47>. (In Russ).
16. CIE Illuminant Technology - Yujileds (yujintl.com) <https://www.yujintl.com/cie-illuminant-technology/>
17. Sladkova Yu.N., Kriyt V.E., Volchkova O.V., Sklyar D.N., Plekhanov V. Lighting in residential and public buildings: main problems and improvement of management methods. *Public Health and Living Environment – PH&LE*. 2022; (5):32-40. (In Russ) <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-32-40>
18. Vishnevsky S. A. Development of methods for calculating and designing intelligent installations to create optimal indoor lighting conditions. Diss. Cand. Nauk (Tekhnika) "National'ny issledovatel'skiy Mordovskiy gosuniversitet imeni N.P.Ogareva". 2017. (In Russ).

Поступила/Received: 02.02.2024

Принята в печать/Accepted: 05.03.2024