

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 519.873

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-91-100

Оценка изменения фотосинтетической активной радиации светодиодного источника света в зависимости от времени эксплуатации*

В.С. СОЛДАТКИН^а, В.И. ТУЕВ^б, А.Ю. ХОМЯКОВ^с

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники

^а soldatkinvs@main.tusur.ru ^б vasilii.i.tuev@tusur.ru ^с khomyakov.a.yu@gmail.com

Современные светодиодные источники света позволяют создавать необходимые значения фотосинтетической облученности как для выращивания рассады, так и для выращивания овощных культур в условиях закрытого грунта. Именно светодиодные источники света в ближайшем времени придут на смену натриевым лампам, которые используются в большинстве тепличных хозяйств, площадь которых на территории Российской Федерации насчитывается более трех тысяч гектар, при потреблении электроэнергии на освещение одного гектара теплицы не менее 1 МВт в час. В работе изложены результаты экспериментальных исследований фотонных характеристик светодиодных ламп. Проведены измерения светотехнических характеристик светодиодных ламп; проведен перерасчет световых величин в энергетические в соответствии с ГОСТ Р 58461–2019; проведены исследовательские испытания светодиодных ламп в нормальных климатических условиях в течение 10 000 часов с промежуточным испытанием на наработку в 5000 часов. Установлено, что среднеарифметическое значение фотосинтетической облученности снизилось в 1,9 раза. Со временем эксплуатации растет спектральная составляющая в синей области оптического спектра от 0,35 до 0,6 относительных единиц, при этом спектральная составляющая в желто-красной области оптического спектра снижается со временем эксплуатации. Снижение фотосинтетической облученности связано с деградацией люминофорной композиции со временем эксплуатации. Результаты данных исследований могут быть использованы разработчиками светодиодных источников света с целью повышения сохраняемости фотонных характеристик со временем эксплуатации, а в частности для совершенствования люминофорной композиции, обеспечивающей фотосинтетическую облученность источника света со временем эксплуатации.

Ключевые слова: фотосинтетическая облученность, светодиодные источники света, тепличные хозяйства, закрытый грунт, спектральные характеристики источников света, сохраняемость фотонных характеристик в процессе эксплуатации, люминофорная композиция, надежность, срок службы

* Статья получена 08 февраля 2022 г.

ВВЕДЕНИЕ

Свет важен не только для человека, но и для объектов всего биологического разнообразия на планете. Свет играет ключевую роль в росте, развитии и плодородности растений. Фотосинтез – фотобиологический процесс образования органических веществ из углекислого газа и воды под действием оптического излучения с выделением кислорода. Фотосинтез является неотъемлемым процессом развития растений [1]. Согласно [2], в рацион питания населения должны входить овощи, зелень и др. На большей части территории Российской Федерации исходя из климатических условий не представляется возможным в круглогодичном режиме обеспечивать население свежими овощами и зеленью, выращенными в открытом грунте. По этой причине используются сооружения защищенного грунта для выращивания продовольственных растений, таких как томаты, огурцы, салат и т. д. Согласно оценке экспертов [3], на территории нашей страны, общая площадь теплиц, эксплуатируемых в зимний период 2021 г., составила 3298 га, в весенний – 1017 га и в летний (парники и укрытия) – 56 га. Урожайность теплиц должна составлять в среднем 50 кг с одного квадратного метра, и для обеспечения рентабельности тепличное хозяйство должно иметь площадь не менее пяти гектар. Потребление электроэнергии на освещение одного гектара теплицы составляет примерно 1 МВт в час [4, 5]. Для сопоставления значений: в России за январь–июль 2022 г. объем электрической генерации составил $6,586 \times 10^8$ МВт в час [6], город Москва на утилитарное освещение потребляет от 450 до 1500 МВт в час в зависимости от длительности светового дня [7].

В настоящее время большинство тепличных хозяйств для освещения используют газоразрядные лампы ДНаТ (или ДНаЗ). Известно, что применение светодиодов в освещении теплиц позволяет снизить затраты на электроэнергию до 40 % [8]. На этом основании исследование применения светодиодных светильников в теплицах является актуальным.

Целью работы является исследование зависимости фотосинтетически активного потока радиации светодиодного источника света от времени эксплуатации.

Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи:

- 1) изготовить макеты светодиодных источников света;
- 2) провести измерение спектральных характеристик светодиодных источников излучения непосредственно после изготовления, а также после наработки через 10 000 часов;
- 3) провести сравнительный анализ полученных результатов.

1. УТОЧНЕНИЕ ЗАДАЧИ

Известно, что светодиодные источники света обладают световой отдачей до 250 лм/Вт и индексом цветопередачи до 95 [9–11]. Для освещения растений ключевыми параметрами являются фотосинтетический поток фотонов, фотосинтетическая облученность и эффективность облучательного прибора в области фотосинтетически активной радиации. Фотосинтетический поток излучения – это поток излучения в области фотосинтетически активной радиации

(ФАР), а ФАР – это оптическое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, используемое растениями для фотосинтеза, роста и развития [4].

В стандарте [12] указано, что эффективность приборов в области фотосинтетически активной радиации должна быть:

- не менее 2,0 (мкмоль/с) / Вт – для приборов, предназначенных для освещения растений сверху;

- не менее 2,0 1,8 (мкмоль/с) / Вт – для приборов, предназначенных для дополнительного освещения растений в объеме циноза (межрядное освещение);

- не менее 2,0 1,9 (мкмоль/с) / Вт – для приборов, предназначенных для освещения растений в многоярусных установках стеллажного типа.

Согласно исследованиям [13], оптимальный спектр излучения источника света для фотосинтеза для всех видов и условий выращивания растений имеет два широких максимума длин волн с центрами на 620 и 440 нм и с «плечом» на 670 нм. Известно, что принцип работы большинства светодиодов белого цвета свечения основан на электролюминесценции кристалла синего цвета свечения в диапазоне длин волн 440...460 нм и фотолуминесценции люминофорной композиции в диапазоне длин волн 480...780 нм с максимумом длины волны 560 нм [14–16]. Соответственно, такие светодиоды белого цвета свечения можно использовать для выращивания растений. По данным [15], в России в 2019 г. для агропромышленного освещения произведено светодиодных светильников 2,2 тыс. шт. на сумму 8,1 млн рублей, традиционных – 129,3 тыс. шт. на сумму 451,8 млн рублей. Импортировано светодиодных светильников 134,6 тыс. шт. на сумму 2 252,2 млн рублей, традиционных – 39,9 тыс. шт., на сумму 554,2 млн рублей.

Для создания искусственного освещения для выращивания овощей и рассады применяются натриевые зеркальные лампы, например, ДНаЗ «Рефлекс» производства ООО «МОСТ Продакшн» или Philips [18].

На смену ДНаЗ в настоящее время приходят светодиодные источники света, например, светодиоды LM301H EVO производства ПАО Samsung (Республика Корея) при значениях прямого тока 65 мА и напряжения 2,7 В, фотосинтетический поток фотонов 0,56 мкмоль/с, эффективность облучательного прибора в области фотосинтетически активной радиации 3,14 мкмоль/Дж [11] или, например, светодиодный светильник «Diora Quadro Agro 30/4000 (PPF 70) Д лира», который имеет мощность 30 Вт, коррелированную цветовую температуру 4500 К, фотосинтетический поток излучения 70 мкмоль/с [19].

Отдельно следует отметить светодиодную лампу, которая содержит колбу, заполненную инертным газом, внутри которой находятся светодиодные излучающие элементы, электрически соединенные с устройством питания и управления, размещенным в цоколе лампы, при этом колба герметично соединена с цоколем лампы [16].

Конструкция лампы обеспечивает монтаж в стандартные светильники для ламп накаливания, что позволяет применять ее для выращивания рассады в бытовых условиях.

Для проведения оценки изменения фотосинтетического потока излучения светодиодного источника света в зависимости от времени эксплуатации выбрана светодиодная лампа [16], которая может применяться для выращивания рассады в бытовых условиях.

1.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ, СВЕТОВЫЕ И ФОТОННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Согласно [1], к энергетическим физическим величинам, в частности, относятся поток излучения (Вт), сила излучения (Вт/ср) и облученность (Вт/м²).

Аналогами энергетическим являются световые физические величины: световой поток (лм), сила света (кд), освещенность (лк).

Переход от энергетических величин к световым осуществляется через коэффициент преобразования по формуле

$$A_c = K_{э,с} A_э, \quad (1)$$

где A_c – световой поток, лм (сила света или освещенность); $K_{э,с}$ – коэффициент преобразования; $A_э$ – поток излучения, Вт.

Коэффициент преобразования определяется по формуле

$$K_{э,с} = \frac{K_m \int_{400}^{700} \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{700} \varphi(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где K_m – множитель для дневного зрения, равный 683 лм/Вт; $\varphi(\lambda)$ – спектральное распределение, Вт/нм; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность излучения; λ – длина волны, нм.

Аналогами энергетическим являются также фотонные физические величины: поток фотонов, фотонная сила света, фотонная облученность и т. д.

Переход от энергетических величин $A_э$ к фотонным $A_{ф}$ осуществляется через коэффициент преобразования $K_{э,ф}$ по формулам:

$$A_{ф} = K_{э,ф} A_э; \quad (3)$$

$$K_{э,ф} = \frac{\int_{400}^{700} \varphi(\lambda) \frac{\lambda}{hc N_a} d\lambda}{\int_{400}^{700} \varphi(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^{17}$ нм/с – скорость света; $N_a = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Преобразование световых величин в фотонные осуществляется по формуле

$$A_{ф} = K_{с,ф} A_c, \quad (5)$$

где $A_{ф}$ – фотосинтетический поток фотонов, мкмоль/с (фотонная сила света или фотонная облученность); A_c – световой поток, лм (сила света или освещенность).

щенность); $K_{с.ф}$ – коэффициент преобразования, который определяется по формуле

$$K_{с.ф} = \frac{\int_{400}^{700} \varphi(\lambda) \frac{\lambda}{hcN_a} d\lambda}{K_m \int_{400}^{700} \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda}. \quad (6)$$

В случае измерения спектрометрическим спектральной плотности энергетической облученности в области ФАР в диапазоне от 400 до 700 нм облученность $E_{ФАР}$, мкмоль / (с · м²), рассчитывают по формуле

$$E_{ФАР} = \int_{400}^{700} E_{\lambda} \frac{\lambda}{hcN_a} d\lambda = K \int_{400}^{700} E_{\lambda} \lambda d\lambda. \quad (7)$$

где E_{λ} – спектральная плотность энергетической облученности, Вт/(м² · нм); $K = 8,36 \cdot 10^{-3}$ мкмоль · нм⁻¹ · Дж⁻¹ – коэффициент.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения эксперимента изготовлено 10 макетов светодиодных ламп с цоколем E27 ГОСТ 28108-89, тип колбы А ГОСТ Р МЭК 60064-99. В качестве источника оптического излучения используются светодиодные излучающие элементы ленточного типа.

Для проведения исследовательских испытаний в соответствии с ГОСТ Р 54815-2011 был изготовлен лабораторный стенд для исследования светотехнических характеристик. В его состав вошли ЛАТР, ваттметр и спектроколориметр ТКА-ВД/02.

Исследовательские испытания проводились в затемненной комнате и нормальных условиях в следующем порядке: макет лампы устанавливается в зажим цоколем вверх; оптическая ось выставляется в горизонтальной плоскости между макетом лампы (центром колбы) с фотоэлементом спектроколориметра; макет лампы подключается к ЛАТР, путем вращения ручки ЛАТР устанавливается напряжение на его выходе 220 ± 2 В; макет лампы выдерживается во включенном состоянии не менее 5 минут для термостабилизации; затем проводится измерение светотехнических характеристик лампы с применением спектроколориметра ТКА-ВД/02 и комплектного программного обеспечения. Далее по данной методике проводятся испытания для оставшихся девяти ламп.

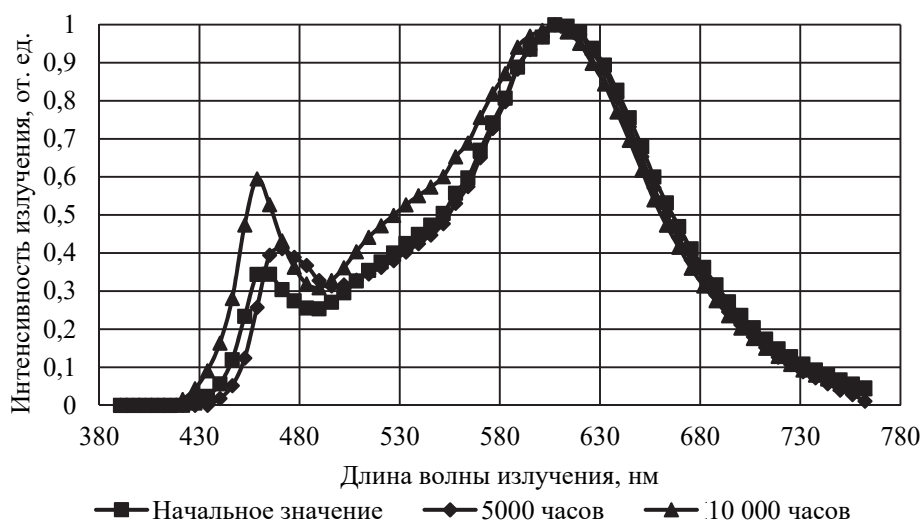
Полученные светотехнические характеристики светодиодных ламп представлены на рисунке и в таблице, среднеарифметическое значение потребляемой мощности ($3,7 \pm 10$ %) Вт.

Далее лампы были установлены в испытательный стенд до наработки в 10 000 часов с промежуточным испытанием на наработке в 5000 часов. На каждом из этапов проводилось измерение светотехнических характеристик ламп

и с использованием формул (1) – (7) выполнялся перерасчет световых величин в энергетические. Полученные данные занесены в таблицу.

Из сопоставления данных рисунка следует, что со временем эксплуатации растет спектральная составляющая в синей области оптического спектра от 0,35 до 0,6 относительных единиц. Так как шкала интенсивности излучения нормирована, из графика можно сделать вывод, что спектральная составляющая в желто-красной области оптического спектра снижается со временем эксплуатации.

В таблице приведены среднеарифметические значения параметров светодиодных ламп до эксплуатации и в процессе эксплуатации, из которых видно, что со временем эксплуатации снижается излучательная способность светодиодной лампы.



Спектральные характеристики светодиодных ламп в зависимости от времени эксплуатации

Spectral characteristics of LED lamps depending on the operating time

Среднеарифметические значения результатов измерения ламп до эксплуатации и в процессе эксплуатации

Arithmetic mean values of lamp measurements before and during operation

Наименование параметра	Начальное значение	5000 часов	10 000 часов
Освещенность, лк	$2596 \pm 10 \%$	$2573,1 \pm 10 \%$	$1369,8 \pm 10 \%$
Облученность, Вт/м ²	$8,18 \pm 10 \%$	$8,11 \pm 10 \%$	$4,26 \pm 10 \%$
Фотосинтетическая облученность, мкмоль/с·м ²	$40,3 \pm 10 \%$	$39,9 \pm 10 \%$	$20,5 \pm 10 \%$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены результаты проведения экспериментальных исследований фотонных характеристик светодиодных ламп. Проведены измерения спектров излучения светодиодных ламп, рассчитаны значения фотосинтетической облученности, проведены исследовательские испытания светодиодных ламп в нормальных климатических условиях в течение 10 000 часов.

Установлено, что при эксплуатации в течение 10 000 часов в нормальных климатических условиях среднеарифметическое значение фотосинтетической облученности снизилось в 1,9 раза. Из графика со спектрами излучения светодиодных ламп можно сделать вывод, что снижение фотосинтетической облученности связано с деградацией люминофорной композиции при эксплуатации.

Результаты данных исследований могут быть использованы разработчиками светодиодных источников света для выращивания рассады и растений с целью повышения сохраняемости фотонных характеристик при эксплуатации, а в частности, для совершенствования люминофорной композиции, обеспечивающей фотосинтетическую облученность источника света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 58461–2019. Освещение растений в сооружениях защищенного грунта. Термины и определения. – М: Стандартинформ, 2020. – 19 с.
2. СанПиН 2.3/2.4.3590-20. Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения. – 2020. – 57 с.
3. Багненко О. Тепличная отрасль России – 2022. – URL: <https://www.apk-news.ru/teplichnaya-otrasl-rossii-2022-3/> (дата обращения: 07.03.2023).
4. Глушков М. Тепличное строительство: почему российские олигархи «подсели» на овощи / беседу вела Е. Мацейко // Строительство.ru. – 03.11.2016. – URL: <https://rcmm.ru/ekonomika-i-biznes/31113-teplichnoe-stroitelstvo-pochemu-rossiyskie-oligarhi-podseli-na-ovoschi.html> (дата обращения: 07.03.2023).
5. Гнездова О.Е., Чугункова Е.С. Энергообеспечение тепличных хозяйств с генерацией электрической и тепловой энергии и выработкой CO₂ // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 141–151.
6. Информационное агентство «АК&М». – URL: https://www.akm.ru/news/obem_elektricheskoy_generatsii_v_rossii_za_yanvar_iyul_2022_goda_vyros_na_1_5/ (дата обращения: 07.03.2023).
7. Официальный сайт МИА «Россия сегодня». – URL: <https://realty.ria.ru/20221111/usa-1830751971.html> (дата обращения: 07.03.2023).
8. Медведева А. Реальную экономию от светодиодов в теплицах подсчитать сложно, но можно. – URL: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agromir-xxi/novosti/realnuyu-yekonomiyu-ot-svetodiodov-v-teplicah-podschitat-slozhno-no-mozhno.html> (дата обращения: 07.03.2023).
9. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy / Y. Narukawa, M. Ichikawa, D. Sanga, M. Sano, T. Mukai // Journal of Physics: Applied Physics. – 2010. – Vol. 43. – P. 354002.
10. Андреева М.В., Солдаткин В.С., Туев В.И. Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С. 75–88. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88.
11. Официальный сайт Samsung. – URL: <https://www.samsung.com/led/lighting/mid-power-leds/3030-leds/lm301h-evo/> (дата обращения: 07.03.2023).
12. ГОСТ Р 57671–2017. Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия. – М: Стандартинформ, 2017. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200147051> (дата обращения: 07.03.2023).

13. McCree K.J. Action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants // *Agricultural Meteorology*. – 1972. – N 9. – P. 191–216.
14. Определение температурной зависимости электрических и световых параметров светодиодных элементов в лампе общего назначения / В.С. Солдаткин, К.Н. Афонин, В.С. Каменкова, Е.С. Ганская, В.И. Туев // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 148–151.
15. Группа компаний «Лайтинг Бизнес Консалтинг»: сайт. – URL: <https://www.lbconsulting.ru> (дата обращения: 07.03.2023).
16. Патент на полезную модель № 188947 U1 Российская Федерация, МПК F21V 29/10, F21V 15/04, F21K 9/66. Светодиодная лампа: № 2018119785: заявл. 23.05.2018: опубл. 30.04.2019 / Афонин К.Н., Вилисов А.А., Солдаткин В.С. [и др.]; заявитель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).
17. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады: РД-АПК 1.10.09.01-14 / разраб. П.Н. Виноградовым и др. – М.: б. и., 2014. – 109 с.
18. OSRAM GmbH: website. – URL: <https://www.osram.com/ecat/> (accessed: 07.03.2023).
19. Полторацкий Д.А., Былков Д.В, Ильчук А.В. Светодиодный светильник для овощеводства в промышленных тепличных хозяйствах // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 18–20 мая 2022 г.: в 3 ч.* – Томск, 2022. – Ч. 1. – С. 270–275. – URL: <https://storage.tusur.ru/files/154431/2022-izb-1.pdf> (дата обращения: 07.03.2023).
20. Спектроколориметр «ТКА-ВД». – URL: http://www.spectrocolorimeter.ru/modif/tka_vd.html (дата обращения: 07.03.2023).

Солдаткин Василий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – технологии производства энергоэффективных световых устройств. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: soldatkinvs@main.tusur.ru

Туев Василий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – технологии производства энергоэффективных световых устройств. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: tviretem@main.tusur.ru

Хомяков Артем Юрьевич, инженер, старший преподаватель кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – полупроводниковая светотехника. Имеет более 20 печатных работ и учебных пособий. E-mail: khomyakov.a.yu@gmail.com

Soldatki Vasily S, PhD (Eng.), an associate professor at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is production technology of energy-efficient lighting devices. He has more than 50 printed works and manuals. E-mail: soldatkinvs@main.tusur.ru

Tuev Vasily I, D.Sc. (Eng.), a professor of the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is production technology of energy-efficient lighting devices. He has more than 50 printed works and manuals. E-mail: tviretem@main.tusur.ru

Khomyakov Artem Yu, an engineer, a senior lecturer at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is semiconductor lighting engineering. He has more than 20 printed works and manuals. E-mail: khomyakov.a.yu@gmail.com

Evaluation of the change in photosynthetic active radiation of the LED light source depending on the operating time*V.S. SOLDATKIN^a, V.I. TUEV^b, A.YU. KHOMYAKOV^c

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a soldatkinvs@main.tusur.ru ^b vasilii.i.tuev@tusur.ru ^c khomyakov.a.yu@gmail.com**Abstract**

Modern LED light sources make it possible to create the necessary values of photosynthetic irradiance both for growing seedlings and for growing vegetable crops in greenhouse conditions. It is LED light sources that in the near future will replace sodium lamps, which are used in most greenhouses. The area of these greenhouses in the Russian Federation is more than three thousand hectares, with electricity consumption for lighting one hectare of the greenhouse being at least 1 MW per hour. The paper presents the results of experimental studies of the photonic characteristics of LED lamps. Lighting characteristics of LED lamps were measured; light values were recalculated into energy values in accordance with GOST R 58461-2019. Research tests of LED lamps were carried under normal climatic conditions for 10,000 hours, with an intermediate test running time of 5,000 hours. It was found that the arithmetic mean value of photosynthetic irradiance decreased by 1.9 times. In the process of operation, a spectral component in the blue region of the optical spectrum grows from 0.35 to 0.6 relative units, while the spectral component in the yellow-red region of the optical spectrum decreases with time of operation. The decrease in photosynthetic irradiance is caused with the degradation of the phosphor composition over time. The results of these studies can be used by developers of LED light sources in order to improve the preservation of photonic characteristics over time, and in particular, to improve the phosphor composition that provides photosynthetic irradiation of the light source over time.

Keywords: photosynthetic irradiance, LED light sources, greenhouses, closed ground, spectral characteristics of light sources, preservation of photonic characteristics during operation, luminous composition, reliability, service life

REFERENCES

1. GOST R 58461–2019. *Osveshchenie rastenii v sooruzheniyakh zashchishchennogo grunta. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 58461–2019. Plants illumination in greenhouses. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 19 p.
2. SanPiN 2.3/2.4.3590-20. *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k organizatsii obshchestvennogo pitaniya naseleniya* [SanPiN 2.3/2.4.3590-20. Sanitary and epidemiological requirements for the organization of public catering of the population]. 2020. 57 p.
3. Bagnenko O. *Teplichnaya otrasl' Rossii – 2022* [Greenhouse industry of Russia – 2022]. Available at: <https://www.apk-news.ru/teplichnaya-otrasl-rossii-2022-3/> (accessed 07.03.2023).
4. Glushkov M. Teplichnoe stroitel'stvo: pochemu rossiiskie oligarkhi «podseli» na ovoshchi [Greenhouse construction: why the Russian oligarchs are "hooked" on vegetables]. Interviewer E. Matseiko. *Stroitel'stvo.ru*, 03.11.2016. (In Russian). Available at: <https://rmm.ru/ekonomika-i-biznes/31113-teplichnoe-stroitelstvo-pochemu-rossiyskie-oligarhi-podseli-na-ovoshchi.html> (accessed 07.03.2023).
5. Gnezdova O.E., Chugunkova E.S. Energoobespechenie teplichnykh khozyaistv s generatsiei elektricheskoi i teplovoi energii i vyrabotkoi CO₂ [Thermal/electric energy generation and CO₂ production for greenhouse facilities]. *Silovoe i energeticheskoe oborudovanie. Avtonomnye sistemy = Power and Autonomous Equipment*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 141–151.
6. Information agency "AK&M". (In Russian). Available at: https://www.akm.ru/news/obem_elektricheskoy_generatsii_v_rossii_za_yanvar_iyul_2022_goda_vyros_na_1_5/ (accessed 07.03.2023).

* Received 08 February 2022.

7. Official site of MIA "Russia Today". (In Russian). Available at: <https://realty.ria.ru/20221111/usa-1830751971.html> (accessed 07.03.2023).
8. Medvedeva A. *Real'nyu ekonomiyu ot svetodiodov v teplitsakh podschitat' slozhno, no mozžno* [It is difficult to calculate the real savings from LEDs in greenhouses, but it is possible]. Available at: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agromir-xxi/novosti/realnyu-yekonomiyu-ot-svetodiodov-v-teplicah-podschitat-slozhno-no-mozhno.html> (accessed 07.03.2023).
9. Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., Mukai T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2010, vol. 43, p. 354002.
10. Andreeva M.V., Soldatkin V.S., Tuev V.I. Otsenka prostranstvennogo raspredeleniya spektrokolorimetriceskikh kharakteristik svetodiodnykh lamp v shagakh MakAdama [Estimation of spatial distribution of spectrophotometric characteristics of LED lamps in MacAdam steps]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 3 (87), pp. 75–88. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88.
11. Samsung official website. Available at: <https://www.samsung.com/led/lighting/mid-power-leds/3030-leds/lm301h-evo/> (accessed 07.03.2023).
12. GOST R 57671–2017. *Pribory obluchatel'nye so svetodiodnymi istochnikami sveta dlya teplyts. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard R 57671–2017. LED irradiators for greenhouses. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200147051> (accessed 07.03.2023).
13. McCree K.J. Action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 1972, no. 9, pp. 191–216.
14. Soldatkin V.S., Afonin K.N., Kamenkova V.S., Ganskaya E.S., Tuev V.I. Opreделение temperaturnoi zavisimosti elektricheskikh i svetovykh parametrov svetodiodnykh elementov v lampe obshchego naznacheniya [Determining temperature dependence of electrical and light parameters for led elements in a general purpose lamp]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 148–151.
15. Group of Companies "Lighting Business Consulting": website. (In Russian). Available at: <https://www.lbconsulting.ru> (accessed 07.03.2023).
16. Afonin K.N., Vilisov A.A., Soldatkin V.S., et.al. *Svetodiodnaya lampa* [Utility model]. Patent RF, no. 188947 U1, 2019.
17. RD-APK 1.10.09.01-14. *Metodicheskie rekomendatsii po tekhnologicheskomu proektirovaniyu teplits i teplichnykh kombinatov dlya vyrashchivaniya ovoshchei i rassady* [Regulating document AIC 1.10.09.01-14. Guidelines for the technological design of greenhouses and greenhouse plants for growing vegetables and seedlings]. Moscow, 2014. 109 p.
18. OSRAM GmbH: website. Available at: <https://www.osram.com/ecat/> (accessed 07.03.2023).
19. Poltoratskii D.A., Bylkov D.V., Il'chuk A.V. [LED lamp for vegetable growing in industrial greenhouses]. *Sbornik izbrannykh statei nauchnoi sessii TUSUR* [Collection of selected articles of the TUSUR scientific session], Tomsk, May 18–20, 2022, pt. 1, pp. 270–275. (In Russian). Available at: <https://storage.tusur.ru/files/154431/2022-izb-1.pdf> (accessed 07.03.2023).
20. Spectrophotometer "TKA-VD". (In Russian). Available at: http://www.spectrophotometer.ru/modif/uka_vd.html (accessed 07.03.2023).

Для цитирования:

Солдаткин В.С., Туев В.И., Хомяков А.Ю. Оценка изменения фотосинтетической активной радиации светодиодного источника света в зависимости от времени эксплуатации // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 1 (89). – С. 91–100. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-91-100.

For citation:

Soldatkin V.S., Tuev V.I., Khomyakov A.Yu. Otsenka izmeneniya fotosinteticheskoi aktivnoi radiatsii svetodiodnogo istochnika sveta v zavisimosti ot vremeni ekspluatatsii [Evaluation of the change in photosynthetic active radiation of the LED light source depending on the operating time]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 91–100. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-91-100.