

## СВЕТОДИОДНЫЕ МОДУЛИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

S.V. Trepuz, P.P. Dolgikh,  
M.Kh. Sanginov, G.N. Khusenov

## LED MODULES IN PLANT GROWING OF PROTECTED SOIL

**Трепуз С.В.** – магистрант каф. системознергетики Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: mail@growshop24.ru

**Долгих П.П.** – канд. техн. наук, доц. каф. системознергетики Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: dpp10@yandex.ru

**Сангинов М.Х.** – асп. каф. системознергетики Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: energy1989@bk.ru

**Хусенов Г.Н.** – асп. каф. системознергетики Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: dpp10@yandex.ru

**Trepuz S.V.** – Post-Graduate Student, Chair of Systems of Energetics, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: mail@growshop24.ru

**Dolgikh P.P.** – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Systems of Energetics, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: dpp@rambler.ru

**Sanginov M.H.** – Post-Graduate Student, Chair of Systems of Energetics, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: energy1989@bk.ru

**Khusenov G.N.** – Post-Graduate Student, Chair of Systems of Energetics, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: dpp10@yandex.ru

Облучательные установки в овощеводстве защищенного грунта являются эффективным инструментом управления агроценозами в силу своих специфических характеристик. Рациональное управление облученностью, спектральным составом и продолжительностью воздействия должно осуществляться по определенным закономерностям для получения урожая с требуемыми параметрами качества. Разработка рационального по энергетическим и спектральным характеристикам облучателя для тепличных технологий является целью исследования. Исследованы четыре светодиодных модуля разной мощности: два – по 60 Вт и два – по 43 Вт. За базовый критерий эффективности был принят показатель эффективной отдачи  $\eta_{\Phi}$ . Исследования показали, что светодиодный модуль на базе светодиодов с «полным спектром» обладает самой низкой эффективностью, поскольку в них максимальная плотность излучения ( $\Phi = 120,6 \text{ мВт/нм}$ ) приходится на  $\lambda = 450 \text{ нм}$ , т. е. синюю часть спектра. Увеличение эффективности такого модуля при сохранении неизменной мощности достигается путем замены части светодиодов на красные и синие. Добавление светодиодов с коротковолновым красным излучением ( $\lambda = 635 \text{ нм}$ ) в отношении 1 : 3 к светодиодам с длинноволновым красным излучением ( $\lambda = 660 \text{ нм}$ ) при равном количестве белых ( $\lambda = 400\text{--}700 \text{ нм}$ ) и синих ( $\lambda = 450 \text{ нм}$ ) светодиодов дает увеличение фотосинтезного фотонного потока на 8,5 % по сравнению с вариантом, где это отношение 3 : 1. Высокая эффективность красного светодиода приводит к тому, что добавление красного к белому повышает энергетическую эффективность облучателя до  $\eta_{\Phi} = 1,92 \text{ мкмоль/Вт}$ . На базе светодиодного модуля, построенного из светодиодов фирмы Cree, разработан тепличный облучатель H-Light FITO 43W LED Light, рекомендуемый как для применения в вегетационной установке для экспериментальных исследований, так и для промышленного применения в стеллажных установках.

**Ключевые слова:** сооружения защищенного грунта, светодиодный модуль, спектр излучения, мощность источников излучения, спектрограмма, тепличный облучатель, эффективность.

Irradiation installations in vegetable growing of protected soil are an effective tool for managing agrocenoses due to their specific characteristics. Rational management of irradiance, spectral composition and duration of exposure should be carried out according to certain regularities for obtaining the crop of required quality parameters. The development of rational for the energy and spectral characteristics irradiator for greenhouse technologies is the goal of the study. Four LED modules of different power are investigated: two – 60 W each and two – 43 W each. For the basic efficiency criterion, the effective return coefficient  $\eta_{\Phi}$  was adopted. The studies have shown that LED module based on full-spectrum LEDs has the lowest efficiency, because there is the maximum radiation density  $\Phi=120.6 \text{ mW/nm}$  is at  $\lambda=450 \text{ nm}$ , i.e. the blue part of the spectrum. Increasing the efficiency of such module while maintaining unchanged power is achieved by technical solution: replacing part of the LEDs with red and blue ones. Adding LEDs with short-wave red radiation ( $\lambda=635 \text{ nm}$ ) in the ratio of 1:3 to LEDs with long-wave red radiation ( $\lambda=660 \text{ nm}$ ) with equal number of white ( $\lambda=400\text{--}700 \text{ nm}$ ) and blue ( $\lambda=450 \text{ nm}$ ) gives the increase in photosynthetic photon flux by 8.5 % compared with the version where this ratio is 3:1. High efficiency of the red LED leads to the fact that the addition of red to white increases the energy efficiency of the irradiator to  $\eta_{\Phi}=1.92 \text{ }\mu\text{mol/W}$ . On the basis of the LED module of LEDs from Cree, the H-Light FITO 43W LED Light irradiator has been developed, which is recommended both for using in vegetation plant for experimental research and for industrial applications in rack installations.

**Keywords:** constructions of protected ground, LED module, radiation spectrum, power of radiation sources, spectrogram, greenhouse irradiator, efficiency.

**Введение.** В настоящее время уделяется большое внимание развитию промышленной светокультуры, в частности интенсивной светокультуры растений с широким использованием искусственных источников света.

На сегодняшний момент установлен ряд фундаментальных положений о роли спектра и интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР) в формировании наиболее важных составляющих продукционного процесса. Так, установлены общие закономерности воздействия излучения различного участка спектра ФАР на рост, развитие, направленность биосинтеза, фоторегуляцию и другие процессы, влияющие на формирование

конечной продукции. Исследования по этим вопросам отражены в монографиях ученых [1–7].

Решение вопроса по поиску оптимального по спектру и интенсивности излучения для различных видов основных сельскохозяйственных растений должно быть связано с получением световых кривых по накоплению хозяйственно-полезной биомассы.

На рисунке 1 представлены световые кривые по накоплению хозяйственно-полезной биомассы ценозами редиса Вировский белый при различном сочетании отдельных областей ФАР.

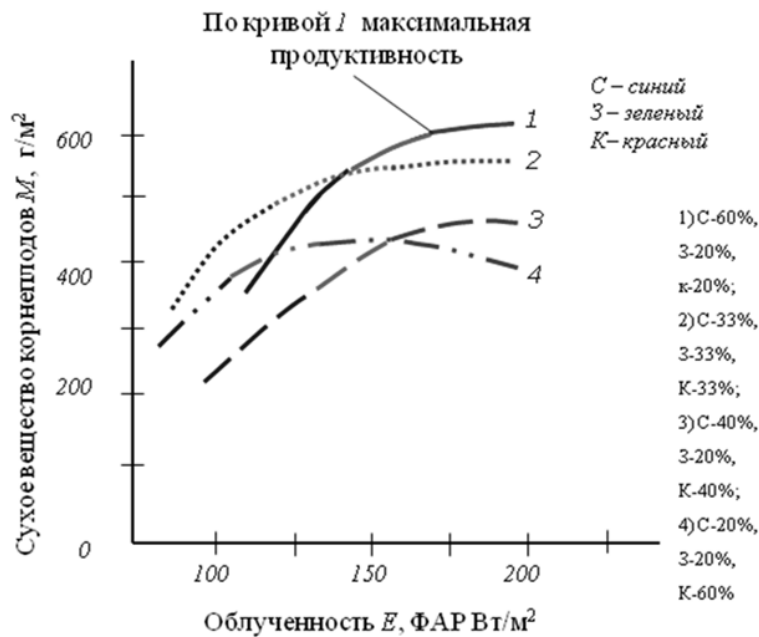


Рис. 1. Световые кривые по накоплению хозяйственно-полезной биомассы ценозами редиса Вировский белый при различном сочетании отдельных областей ФАР [8]

Пользуясь таким семейством кривых, можно найти оптимальный спектральный состав для данного уровня облученности и, наоборот, имея возможность создать излучение определенного спектрального состава, – подобрать нужный уровень облученности, чтобы получить максимум полезной продукции. С этих позиций можно, например, оценить возможности имеющихся в распоряжении источников света (зная их спектр излучения, мощность и энергоотдачу) для выращивания данной культуры.

Эксперименты по получению таких зависимостей сдерживались ограниченной номенклатурой светотехнических изделий. В частности, отсутствовали соответствующие источники излучения, позволяющие воспроизводить отдельные участки спектра и обладающие высокой надежностью. Для воспроизводства отдельных участков спектра приходилось пользоваться либо специальными цветными светофильтрами, либо изготавливать экспериментальные светильники с различными комбинациями горелок в лампах. С мощным развитием светодиодных технологий данная научная задача приобрела новый импульс развития.

Все усилия по поиску оптимального соотношения между интенсивностью и спектром излучения для условий ис-

кусственного облучения растений должны в конце концов проявиться в выборе наиболее подходящего по своим спектральным и энергетическим характеристикам источника света. От данных характеристик зависит продуктивность фотосинтеза и в конечном итоге урожайность сельскохозяйственных культур [8]. В настоящее время интенсивно ведутся работы в данном направлении [9–11].

Повышение эффективности использования излучения искусственных источников фотосинтетически активной радиации при выращивании растений в сооружениях защищенного грунта является актуальной задачей, позволяющей решить продовольственную проблему.

**Цель исследования:** разработка рационального по энергетическим и спектральным характеристикам облучателя для тепличных технологий.

**Задачи исследования:** 1) разработать светодиодные модули двух мощностей на основе люминофорных и кристаллических светодиодов; 2) исследовать характеристики светодиодных модулей и выявить параметры, определяющие эффективность их работы; 3) разработать конструкцию тепличного облучателя и дать рекомендации по его применению.

**Методы исследования.** Для создания наиболее подходящего по своим спектральным и энергетическим характеристикам источника излучения были разработаны четыре светодиодных модуля (рис. 1), описание которых приведено ниже. За базовый критерий эффективности был принят показатель эффективной отдачи  $\eta_{\phi}$ , т. е. отношение фотосинтетического фотонного потока  $PPF$ , (мкмоль/с) к номинальной мощности  $P$  (Вт).

$$\eta_{\phi} = \frac{PPF}{P} \rightarrow \max.$$

При оценке спектральной эффективности исходили из следующих соображений:

1. Поглощение ФАР растениями неравномерно по спектру. Максимум поглощения приходится на синюю (460 нм) и красную (670 нм) области, в которых поглощают преимущественно молекулы хлорофилла. Поэтому при построении схем светодиодных модулей необходимо воспроизводить весь спектр в области ФАР, акцентируя отдельно «синий» и «красный» пики.

2. Нет необходимости полностью повторять в источнике излучения спектры действия как для фотосинтеза, так и для фоторегулирующих пигментов, поскольку с ростом уровня облученности происходит трансформация структуры оптимального спектра [7, 8], так как функция спектральной чувствительности ценоза  $\nu_{\phi\delta}$  изменяется с изменением облученности  $E$ , т. е.

$$\nu_{\phi\delta} = \nu(\lambda, E).$$

Исходя из второго условия, необходимо рассмотреть светодиодные модули с двумя уровнями мощности для создания, по меньшей мере, двух уровней облученностей.

Построение светодиодных модулей осуществлялось по принципу равной мощности: два светодиодных модуля по 60 Вт и два – по 43 Вт.

Светодиодный модуль № 1 «Люминофор» (рис. 3, а) был изготовлен из 22 светодиодов *bridgelux full spectrum 3 w*, позиционируемых на рынке светотехнической продукции как наиболее оптимальные с точки зрения спектральных характеристик, так как содержат так называемый полный спектр излучения, близкий к солнечному спектру с двумя максимумами в области 440 и 660 нм. Нужный спектр в данных светодиодах достигается путем нанесения специальных люминофоров. Аналогичным по мощности (60 Вт) для сравнения был разработан светодиодный модуль № 2 «Люминофор+660/450» из 26 светодиодов. Здесь использовали *bridgelux 3 w. full spectrum* – 12 шт., а также красные светодиоды с длиной волны  $\lambda=660$  нм – 10 шт. и синие светодиоды с длиной волны  $\lambda=450$  нм – 2 шт.

Два других модуля мощностью по 43 Вт каждый созданы на базе светодиодов фирмы *Cree* в количестве 24 шт. Светодиодный модуль № 3 «*cree\35355-5\1*» содержит светодиоды *cree 3 w. XTE full spectrum (2700k)* – 4 шт., красные светодиоды с длиной волны  $\lambda=660$  нм – 12 шт., красные светодиоды с длиной волны  $\lambda=635$  нм – 4 шт., синие светодиоды с длиной волны  $\lambda=450$  нм – 4 шт.

Светодиодный модуль № 4 «*cree\35355-3\3*» собран из светодиодов *cree 3w. XTE full spectrum (2700k)* – 4 шт., красных светодиодов с длиной волны  $\lambda=660$  нм – 4 шт., красных светодиодов с длиной волны  $\lambda=635$  нм – 12 шт., синих светодиодов с длиной волны  $\lambda=450$  нм – 4 шт.

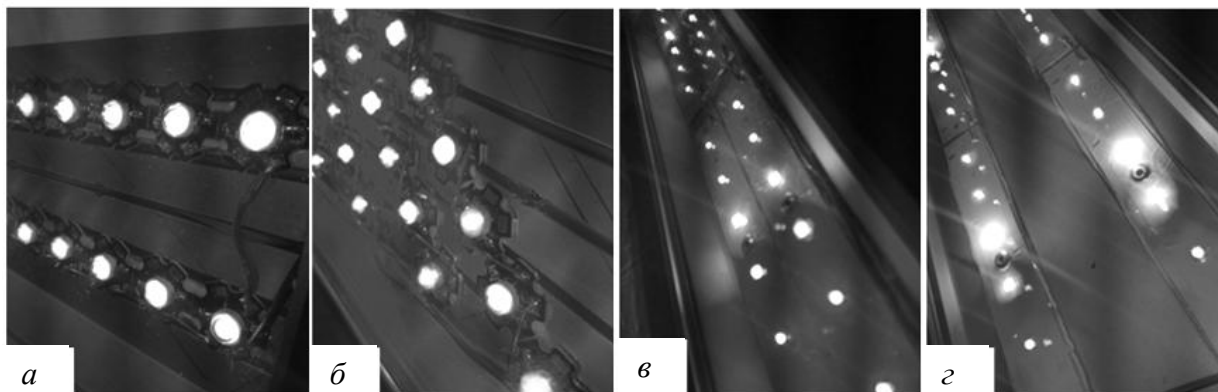


Рис. 3. Светодиодные модули: а – № 1 «Люминофор»; б – № 2 «Люминофор+660/450»; в – № 3 «*cree\kitay 35355-5\1*»; г – № 4 «*cree\kitay 35355-3\3*»

В двух последних модулях акцент был сделан на варьировании в равном отношении (3 : 1 и 1 : 3) светодиодов, излучающих в «ближнем» красном и «дальнем» красном спектрах.

**Результаты исследования.** Характеристики были исследованы на сертифицированном оборудовании в Федеральном бюджетном учреждении «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае» [12]. В таблице представлены полученные характеристики светодиодных модулей.

Светодиодные модули и их характеристики

Параметр	Типы модулей			
	Светодиодный модуль № 1 «Люминофор»	Светодиодный модуль № 2 «Люминофор+660/450»	Светодиодный модуль № 3 «сree\китай35355-5\1»	Светодиодный модуль № 4 «сree\китай35355-3\3»
Номинальная мощность $P_n$ , Вт	60	60	43	43
Пиковое напряжение $U$ , В	36	36	36	36
Ток $I$ , mA	700	700	700	700
Потребляемая мощность $W$ , Вт·ч	61	61	43,2	43
Световой поток $\Phi$ , лм	1050	1280	1549	1781
Оптическая мощность $P$ , Вт	11,05	13,25	16,56	15,59
Фотосинтетический фотонный поток $PPF$ , мкмоль/с	46,52	59,04	82,4	75,9
Красный пик $\lambda$ , нм (спектральная плотность излучения $\varphi$ , мВт/нм)	647 (74,4)	640 (224,2)	664 (362,1)	648 (304,5)
Синий пик $\lambda$ , нм (спектральная плотность излучения $\varphi$ , мВт/нм)	450 (120,6)	448 (182)	451 (165,1)	450 (180,8)

В результате проведенных исследований получены спектрограммы по каждому модулю, представленные на рисунках 2–5. Как видно из таблицы, с энергетической точки зрения наиболее рациональной выглядит схема по

светодиодному модулю № 3, так как эффективная отдача  $\eta_{\varphi}=1,92$  мкмоль/Вт имеет максимальное значение, как и величина оптической мощности  $P=16,56$  Вт.

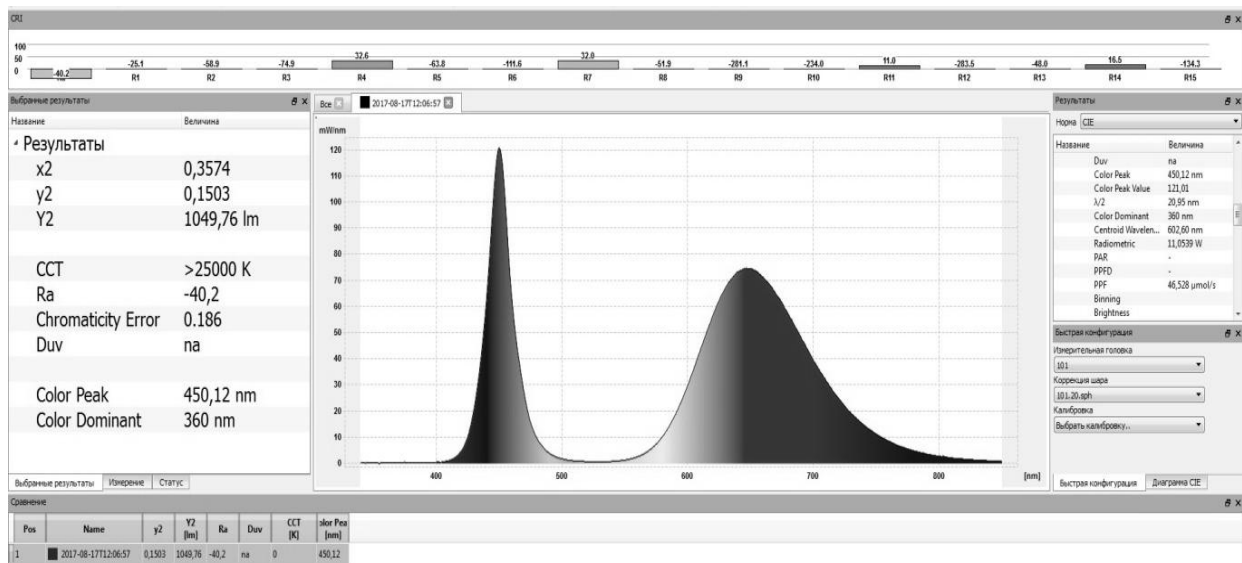


Рис. 2. Спектрограмма по светодиодному модулю № 1

Как видно из рисунка 2, максимальная плотность излучения  $\varphi=120,6$  мВт/нм приходится на  $\lambda=450$  нм, т. е. синюю часть спектра, а в красной части спектра ( $\lambda=647$  нм) максимум достигает  $\varphi=74,4$  мВт/нм. При таком составе спектра наблюдается самая низкая эффективная отдача –  $\eta_{\varphi}=0,78$  мкмоль/Вт.

Замена части светодиодов с «полным спектром» на красные ( $\lambda=660$  нм) и синие ( $\lambda=450$  нм) дала существенное увеличение эффективной отдачи до  $\eta_{\varphi}\approx 1$  мкмоль/Вт (рис. 3) при неизменной электрической мощности.

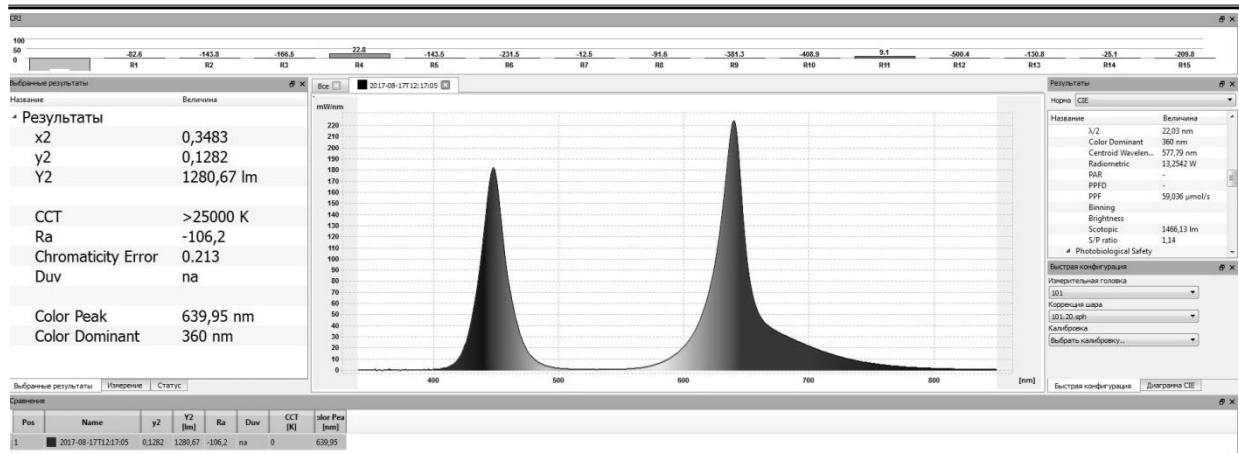


Рис. 3. Спектрограмма по светодиодному модулю № 2

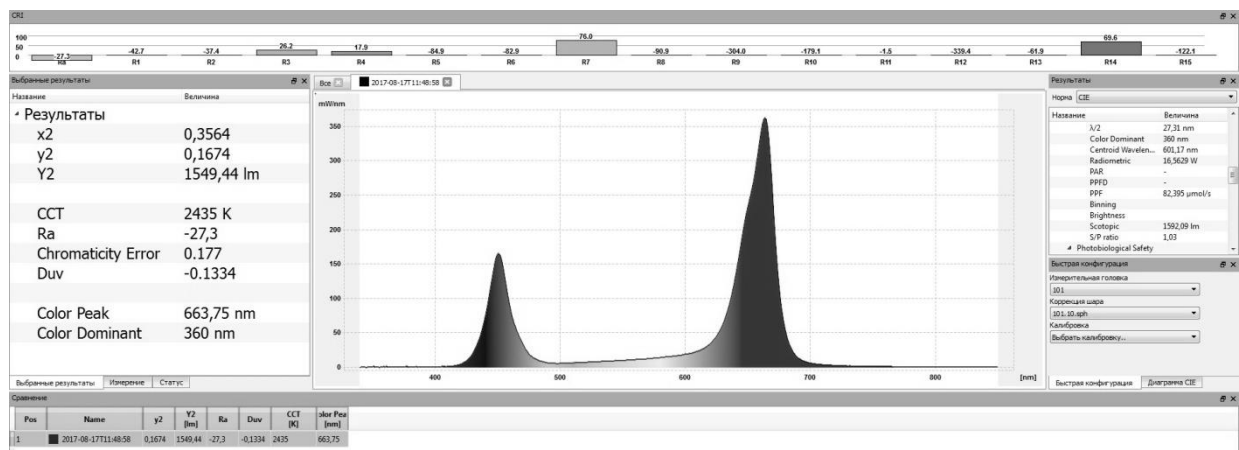


Рис. 4. Спектрограмма по светодиодному модулю № 3

Как видно из рисунка 4, при уменьшении мощности светодиодного модуля № 3 на 17 Вт, по сравнению с двумя предыдущими вариантами светодиодных модулей, где применялись светодиоды на люминофорах, технология на «кристаллах» имеет явные преимущества. Происходит увеличение эффективной отдачи до  $\eta_{\phi}=1,92$  мкмоль/Вт, а

за счет добавления светодиодов с коротковолновым красным излучением ( $\lambda=635$  нм) в отношении 1 : 3 к светодиодам с длинноволновым красным излучением ( $\lambda=660$  нм) происходит увеличение фотосинтетического фотонного потока.

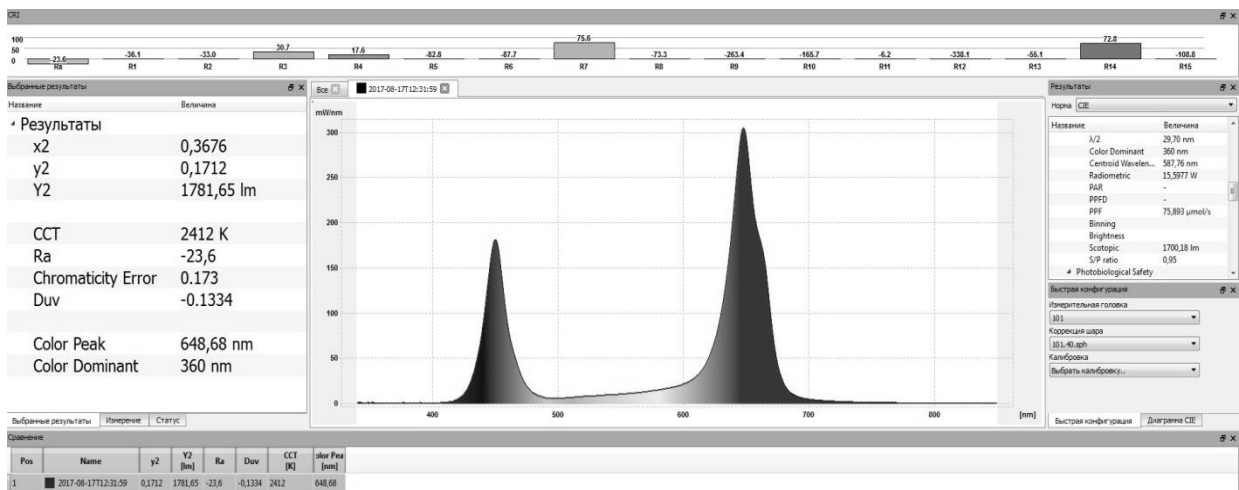


Рис. 5. Спектрограмма по светодиодному модулю № 4

Как видно из рисунка 5, максимальная плотность излучения в синей части спектра ( $\lambda=450$  нм) достигает  $\varphi=180,8$  мВт/нм, а в красной части спектра ( $\lambda=648$  нм) максимум достигает  $\varphi=304,5$  мВт/нм.

Изменение соотношения количества светодиодов с коротковолновым красным излучением ( $\lambda=635$  нм) в отношении 3 : 1 к светодиодам с длинноволновым красным излучением ( $\lambda=660$  нм) при равном количестве белых ( $\lambda=400...700$  нм) и синих ( $\lambda=450$  нм) светодиодов дает уменьшение эффективной отдачи до  $\eta_{\varphi}=1,77$  мкмоль/Вт (рисунок 5) по сравнению со светодиодным модулем №3.

На базе светодиодного модуля № 3, как наиболее эффективного, сконструирован опытный образец тепличного облучателя, изображенный на рисунке 6.

Облучатель представляет собой жесткую конструкцию из алюминиевого профиля 1 размерами 310 × 90 × 80, с оребрением 2, выполняющим функцию отвода тепла. По торцам профиля имеются пластиковые заглушки 3. Светодиодный модуль представлен четырьмя пластинами со светодиодами 4, закрепленными с помощью термопасты к основанию алюминиевого профиля 1 и закрытыми защитным стеклом 5. Управление работой светодиодного модуля 4 осуществляется LED-драйвером 6. Крепление облучателя обеспечивается с помощью подвижного узла подвеса 7.

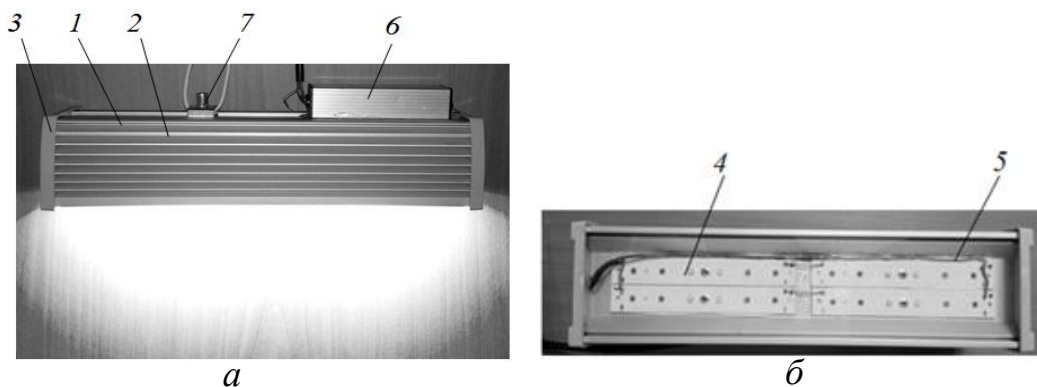


Рис. 6. Тепличный облучатель H-Light FITO 43W LED Light со светодиодным модулем № 3: а – вид спереди; б – вид снизу

Изделие адаптировано для использования в вегетационной установке, представленной на рисунке 7, которая представляет собой сооружение прямоугольной формы из сотового поликарбоната размерами 800×850×1000 мм.

Уровень облученности  $E=150$  мкмоль/(м<sup>2</sup>·с), рекомендуемый в [13] при выращивании салата, был получен путем установки облучателя на высоте 0,6 м над облуча-

емой поверхностью, при обеспечении коэффициента минимальной облученности  $z=0,8$ . Расчеты произведены в программе Dialux.

В настоящее время изделие проходит промышленные испытания в стеллажных установках при выращивании луковых, зеленых и пряных культур.

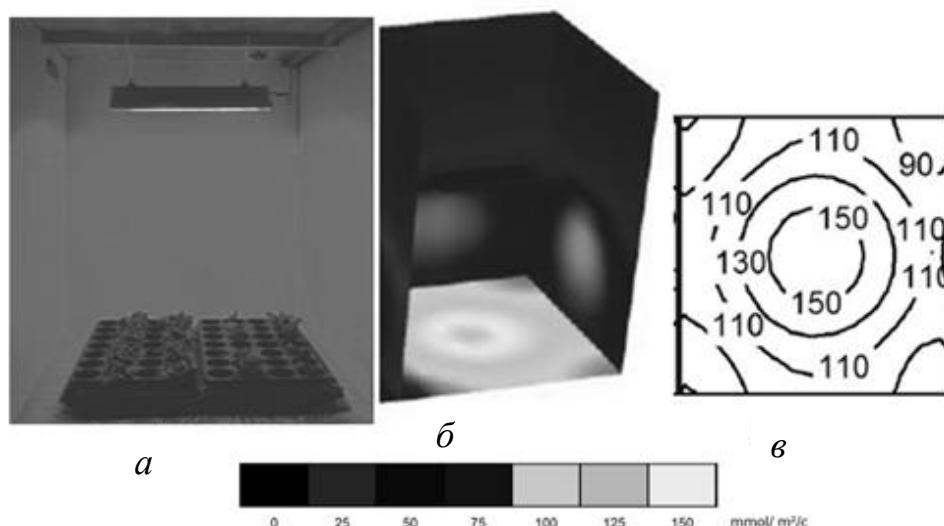


Рис. 7. Вегетационная установка: а – внешний вид; б – визуализация 3D; в – изолинии (E)

**Выводы**

1. Светодиодный модуль на базе светодиодов с «полным спектром» обладает самой низкой эффективностью, поскольку в них максимальная плотность излучения  $\varphi=120,6$  мВт/нм приходится на  $\lambda=450$  нм, т. е. синюю часть спектра. Увеличение эффективности такого модуля при сохранении неизменной мощности достигается путем технического решения: замены части светодиодов на красные и синие.

2. Добавление светодиодов с коротковолновым красным излучением ( $\lambda=635$  нм) в отношении 1 : 3 к светодиодам с длинноволновым красным излучением ( $\lambda=660$  нм) при равном количестве белых ( $\lambda=400-700$  нм) и синих ( $\lambda=450$  нм) светодиодов дает увеличение фотосинтезного фотонного потока на 8,5 % по сравнению с вариантом, где это отношение 3 : 1.

Высокая эффективность красного светодиода приводит к тому, что добавление красного к белому повышает энергетическую эффективность облучателя до  $\eta_{\varphi}=1,92$  мкмоль/Вт.

3. На базе светодиодного модуля, построенного из светодиодов фирмы Cree, разработан тепличный облучатель H-Light FITO 43W LED Light, рекомендуемый как для применения в вегетационной установке для экспериментальных исследований, так и для промышленного применения в стеллажных установках.

**Литература**

1. Максимов Н.А. Биологическая основа светокультуры растений // Тр. ин-та физиол. растений АН СССР. – 1955. – Т. 10. – С. 7–16.
2. Клешнин А.Ф. Растение и свет: теория и практика светокультуры растений. – М.: Изд-во АН СССР. – 1954. – 456 с.
3. Воскресенская Н.П. Фотосинтез и спектральный состав света. – М.: Наука, 1965. – 312 с.
4. Мошков Б.С. Выращивание растений при искусственном освещении. – Л.: Колос, 1966. – 287 с.
5. Леман В.М. Культура растений при электрическом свете. – М.: Колос, 1971. – 320 с.
6. Шульгин И.А. Растение и Солнце. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 252 с.
7. Тихомиров А.А., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я. Спектральный состав света и продуктивность растений. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. – 168 с.
8. Проблема оптимизации спектральных и энергетических характеристик излучения растениеводческих ламп / А.А. Тихомиров [и др.]; СО АН СССР. – Препринт ИФСО-28 Б. – Красноярск, 1983. – 45 с.
9. Большин Р.Г. Повышение эффективности облучения меристемных растений картофеля светодиодными (LED) фитоустановками: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 159 с.
10. Козырева И.Н. Формирование фитопотоков светодиодных облучательных установок для выращивания сельскохозяйственных культур в условиях за-

- щитенного грунта: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2014. – 119 с.
11. Каримов И.И. Повышение эффективности облучения растений с использованием светодиодных светильников в сооружениях закрытого грунта: (на примере семенного картофеля): дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2017. – 153 с.
12. GL Opti Sphere 2000. – URL: <http://gloptic.com/products/gl-opti-sphere-2000/?lang=ru> (дата обращения: 21.01.2018).
13. Ефремов Н.С. Оценка интенсивности искусственного освещения светодиодного облучателя на листовой салат в защищенном грунте // Научный журнал КубГАУ. – 2014. – № 102 (08). – С. 3–10.

**Literatura**

1. Maksimov N.A. Biologicheskaja osnova svetokul'tury rastenij // Tr. in-ta fiziol. rastenij AN SSSR. – 1955. – Т. 10. – С. 7–16.
2. Kleshnin A.F. Rastenie i svet: teorija i praktika svetokul'tury rastenij. – М.: Izd-vo AN SSSR. – 1954. – 456 s.
3. Voskresenskaja N.P. Fotosintez i spektral'nyj sostav sveta. – М.: Nauka, 1965. – 312 s.
4. Moshkov B.S. Vyrashhivanie rastenij pri iskusstvennom osveshhenii. – Л.: Kolos, 1966. – 287 s.
5. Leman V.M. Kul'tura rastenij pri jelektricheskom svete. – М.: Kolos, 1971. – 320 s.
6. Shul'gin I.A. Rastenie i Solnce. – Л.: Gidrometeoizdat, 1973. – 252 s.
7. Tihomirov A.A., Lisovskij G.M., Sid'ko F.Ja. Spektral'nyj sostav sveta i produktivnost' rastenij. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1991. – 168 s.
8. Problema optimizacii spektral'nyh i jenergeticheskikh karakteristik izluchenija rastenievodcheskih lamp / A.A. Tihomirov [i dr.]; SO AN SSSR. – Preprint IFSO-28 B. – Krasnojarsk, 1983. – 45 s.
9. Bol'shin R.G. Povyshenie jeffektivnosti obluchenija meristemnyh rastenij kartofelja svetodiodnymi (LED) fitoustanovkami: dis. ... kand. tehn. nauk. – М., 2016. – 159 s.
10. Kozyreva I.N. Formirovanie fitopotokov svetodiodnyh obluhatel'nyh ustanovok dlja vyrashhivaniya sel'skhozajstvennyh kul'tur v uslovijah zashhishhennogo grunta: dis. ... kand. tehn. nauk. – Tomsk, 2014. – 119 s.
11. Karimov I.I. Povyshenie jeffektivnosti obluchenija rastenij s ispol'zovaniem svetodiodnyh svetil'nikov v sooruzhenijah zakrytogo grunta: (na primere semennogo kartofelja): dis. ... kand. tehn. nauk. – Ufa, 2017. – 153 s.
12. GL Opti Sphere 2000. – URL: <http://gloptic.com/products/gl-opti-sphere-2000/?lang=ru> (дата обращения: 21.01.2018).
13. Efremov N.S. Ocenka intensivnosti iskusstvennogo osveshhenija svetodiodnogo obluhatelja na listovoj salat v zashhishhennom grunte // Nauchnyj zhurnal KubGAU. – 2014. – № 102 (08). – С. 3–10.