

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА БЛОК ЗА ОСВЕТЛЕНИЕ НА СВЕТОДИОДИ В ЛАБОРАТОРНИ УСЛОВИЯ ЗА ОТГЛЕЖДАНЕ НА ЛИСТНА ЦИКОРИЯ

Илиана Илиева, Йордан Найденов

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: iliana_ilieva@space.bas.bg*

Ключови думи: Космическа оранжерия, светодиодно осветление, листна цикория

Резюме: Блоковете за осветление (БО) се явяват критичен компонент на космическите оранжерии. Те трябва да отговарят както на физиологичните потребности на растенията – пригодност на генерираната от тях изкуствена светлина за поддържане на нормални за жизнената дейност фотосинтетичните процеси, така и на редица специфични за космическата апаратура технически изисквания. Към първото се отнасят характеристики, пряко свързани с параметрите на излъчваната светлина: възможност за динамично вариране на количеството и качеството на светлинния поток в зависимост от физиологичното състояние и стадия на растеж и развитие на растенията. Към второто спадат изисквания към енергоемкостта на блока, надеждността и безопасността на съставните му елементи, електромагнитната съвместимост, възможността за ръчно поемане на управлението и регулиране на работата му от екипажа в случай на нещатна ситуация, и много други.

В настоящата статия се разглеждат резултати от наземни лабораторни биотехнологични и технически изпитания на два блока за осветление, разработени за Космическа оранжерия (КО) Свет. Като моделно растение е използвана листна цикория (*Cichorium intybus* L. subsp. *intybus*). Целта на експериментите е дефиниране на границите на оперативен режим за БО на светодиоди, които да се използват реално в бордови КО. Резултатите от експериментите показаха, че всеки един от двата основни светлинни параметъра – спектрален състав и плътност на фотосинтетичния фотонен поток, може да бъде компенсиран в определени граници чрез вариране на другия, което дава възможност за вземане на гъвкави решения при конструирането на БО, така че да се постигне баланс между изискванията на растенията и ограниченията на бордовата апаратура.

RESULTS OF USING LED LIGHT UNIT FOR LEAF CHICORY CULTIVATION IN CONTROLLED ENVIRONMENT

Iliana Ilieva, Yordan Naydenov

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: iliana_ilieva@space.bas.bg*

Keywords: Space Greenhouse (SG), LED lighting, leaf chicory

Abstract: Crucial component of each Space Greenhouse is its Light Unit (LU). It must both satisfy the plant physiological requirements by irradiating artificial light capable to sustain a steady photosynthesis for active growth and development, as well as be fully compliant with the technical constraints of a space flight qualified device. The former is achieved by means of dynamically varying the spectral composition and intensity of the light flux in response to the current plant physiological status, growth stage and phase of development. The design and implementation constraints are related to power consumption, reliability and safety issues, electro-magnetic compatibility, and many more.

This article summarizes the results obtained during several ground experiments in a controlled environment with the use of two LUs developed for Space Greenhouse (SG) Svet. A cultivar of leaf chicory (*Cichorium intybus* L. subsp. *intybus*) is used as a model plant. The primary aim was to define a range of operation for LU on light-emitting diodes (LEDs) that is appropriate for use in on-board SGs. Results showed that the two physiologically most important light parameters – spectral composition and photosynthetic photon flux density, could

interchangeably vary in given limits so that the unfavourable levels of one to be compensated by the value of other. This parameter trade-off could reconcile the stringent LU on-board design constraints with the demanding LU operational requirements imposed by the plants.

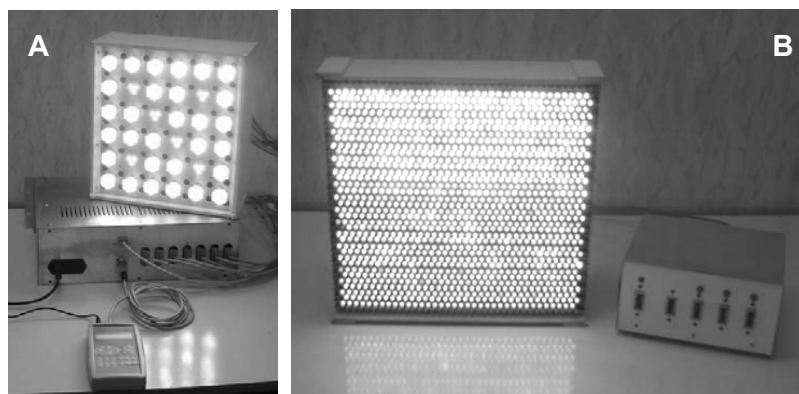
Въведение

Ключов елемент в конструкцията на Космическите оранжерии (КО) е Блокът за осветление (БО), тъй като това е най-енергоемкият конструктивен елемент. Енергията е ресурс, който е ограничен в космически условия, поради което през последните години като перспективен източник на светлина за конструирането на БО се наложиха светодиодите. Ниската консумацията на енергия, малките размери, продължителният период на експлоатация, голяма надеждност и безопасност при работа са само част от характеристиките на светодиодите, които им осигуриха предимство пред останалите изкуствени източници на светлина [1,2]. Конструираният досега БО на светодиоди тествани в реални космически условия (на американските космически совалки – Astroculture [3] и на Международната космическа станция – Advanced Astroculture [4]) съдържат червени и сини светодиоди, които са достатъчни за протичането на фотосинтезата и за нормалната морфогенеза на растенията, но много наземни изследвания показаха, че добавянето и на зелена светлина в спектъра оказва положително влияние върху растежа и развитието на растенията [5,6].

Блок за осветление на мощни сини, зелени и червени светодиоди (БО-LED) беше разработен за Космическа оранжерия СВЕТ (КО СВЕТ) с цел да замени БО на флуоресцентни лампи [7]. Разработен беше и втори блок – БО-LED-M на нискоенергийни светодиоди, който лесно може да бъде мултиплициран за вграждане в оранжерии с по-голяма площ [8].

БО-LED съдържа 108 мощни светодиода разположени в 36 спота (по 3 броя светодиоди на спот) с максимум на излъчване в следните области на спектъра: червена - 632 nm, зелена - 525 nm и синя - 468 nm (фиг. 1-A). Управлението на блока се извършва чрез DMX програматор, позволяващ индивидуален контрол на всеки цвят светодиоди и задаване на спектрален състав и интензитет на светлината в широк диапазон, което значително разширява възможностите за изследвания [9].

БО-LED-M (Фиг.1-B) съдържа общо 1332 светодиода разположени в 37 реда (по 36 на ред) - 20 червени (630 nm), 8 зелени (525 nm), 7 сини (468 nm) и 2 бели. Белите светодиоди са добавени за да се улесни наблюдението и фотографирането на растенията. Максималният интензитет на светлината, който може да се постигне е $144 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ при спектръ $50:15:35\%$ R:G:B, следователно възможността за вариране на спектъра и интензитета е значително ограничена.



Фиг. 1. А – Блок за осветление БО-LED; В – Блок за осветление БО-LED-M

Дефинирането на границите на оперативен режим на БО на светодиоди, както и уточняването на конструкцията, броя и мощността на светодиодите са само част от задачите изискващи продължителни изследвания с различни растения за да бъдат определени.

Цел на настоящата статия е да обобщи получените резултати от експериментите с растението листна цикория, изследвали различни аспекти на влияние на интензитета и спектралния състав на RGB светлината, емитирана от БО-LED и БО-LED-M.

Методология на изследванията

Към БО на светодиоди се поставят редица изисквания: осигуряване на светлина с интензитет $350-400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ и възможност за задаване на различни спектри; възможност за спектри, в които червената, зелената и синята светлини да са съответно: 0 – 100%, 0 – 20%, 0 – 50%; автоматично управление на спектъра, интензитета и фотопериода на светлината; конструиране на БО като отделни модули, които лесно да се мултиплицират и да образуват по-голям БО за вграждане в оранжерия с по-голяма площ [10].

Влиянието на параметрите на светлината (спектър и интензитет) може да бъде определено чрез измерване на хлорофилната флуоресценция. Съществуват три начина за усвояване на погълнатата светлина от листата на растенията: 1) Светлинната енергия възбужда хлорофилните молекули във Фотосистема II и се превръща в химична енергия в процеса фотосинтеза (фотохимия). Но ако фотохимия е неефективна, излишната енергия може да доведе до увреждане на растенията, следователно: 2) Погълнатото по-голямо количество светлинна енергия може да бъде отдадено на околната среда под формата на топлина - като този процес се отчита чрез добива на показателя не-фотохимично гасене (NPQ), или 3) излъчено под формата на светлина с по-голяма дължина на вълната - хлорофилна флуоресценция. Тези три процеса се конкурират помежду си – ако добивът на който и да е от тях се повиши, то добивът на другите два се понижава, следователно, чрез измерване на количеството на хлорофилната флуоресценция ефективността на фотосинтезата може да бъде оценена [11]. При проведените експерименти са изследвани активността на Фотосистема II - Φ_{PS2} и показателя NPQ.

Проведени бяха два модула от експерименти:

1) Изследване влиянието на силен и два пъти по-слаб интензитет светлина при фиксиран спектър – 400 и 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ при спектър 70:20:10 % R:G:B, и 288 и 144 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ при спектър 50:15:35 % R:G:B. В Таблица 1 са дадени данните за интензитета (в $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) на отделните RGB светлини;

2) Изследване влиянието на съотношението на зелената към синята светлина при интензитет на светлината 220 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, като спектърът е с постоянен дял на червената светлина (70%), а съотношението на зелената към синята светлина се променя съответно **2:1** (20% зелена и 10% синя светлина) и **1:2** (10% зелена и 20% синя светлина). В Таблица 2 са дадени данните за интензитета (в $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) на RGB светлината при съответните съотношения.

Растенията са отгледани в лабораторния макет на КО Свет в контролирана лабораторна среда при: температура – 18-20°C, относителна влажност на въздуха – 60-70% и фотопериод – 16h ден / 8h нощ.

Резултати

Влияние на интензитета на светлината при различни спектри

Резултатите за Φ_{PS2} и NPQ (Таблица 1) показаха по-добри фотосинтетични характеристики за растението листна цикория, както при по-ниския интензитет на светлината – 220 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, в сравнение с 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ при спектър 70:20:10 % RGB, така и при по-високия интензитет – 288 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, в сравнение с 144 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ при спектър 50:15:35 % RGB.

Таблица 1. Интензитет на отделните светлини в спектъра на RGB светлина с различен интензитет

Интензитет на светлината [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	R:G:B Спектър [%]	Интензитети на отделните светлини [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]			Съотношение G:B	Φ_{PS2}	NPQ
		R	G	B			
400	70 : 20 : 10	280	80	40	2 : 1	0,188 ± 0,010	1,125 ± 0,020
220	70 : 20 : 10	154	44	22	2 : 1	0,300 ± 0,010	1,100 ± 0,040
288	50 : 15 : 35	144	44	100	1 : 2.3	0,353 ± 0,010	1,050 ± 0,050
144	50 : 15 : 35	72	22	50	1 : 2.3	0,154 ± 0,010	1,380 ± 0,070

Тези резултати показват, че всеки един от двата основни светлинни параметъра – спектрален състав и плътност на фотосинтетичния фотонен поток, може да бъде компенсиран в определени граници чрез вариране на другия, което дава възможност за вземане на гъвкави решения при конструирането на БО, така че да се постигне баланс между изискванията на растенията и ограниченията на бордовата апаратура.

Влияние на съотношението зелена / синя светлина

Фотосинтетичните характеристики на растенията при съотношение 1:2 зелена/синя светлина са по-добри, определени въз основа активността на Фотосистема II – Φ_{PS2} . При този спектрален състав светлината индуцира и по-слаба фотозащита, отчетена чрез по-ниското ниво на показателя Нефотохимично гасене – NPQ (Таблица 2).

Таблица 2. Интензитет на отделните светлини в спектъра на RGB светлина с различен интензитет

Интензитет на светлината [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	R:G:B Спектър [%]	Интензитети на отделните светлини [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]			Съотношение G:B	Φ_{PS2}	NPQ
		R	G	B			
220	70 : 20 : 10	154	44	22	2 : 1	$0,300 \pm 0,010$	$1,100 \pm 0,040$
220	70 : 10 : 20	154	22	44	1 : 2	$0,517 \pm 0,014$	$0,715 \pm 0,220$

Полученият 2 пъти по-слаб интензитет на фотосинтезата при спектър със съотношение зелена / синя светлина 2:1 при растение *Cichorium intybus* насочват вниманието към внимателен подбор на съдържанието на зелена светлина в спектъра на светодиодното осветление при отглеждането на растения в контролирани условия, тъй като могат да се отключат нежелани физиологични ефекти. Взаимодействие между зелената и синята светлина изразяващо се в реверсивно влияние на зелената светлина върху индуцирано от синята светлина отваряне на устицата при редица едноседелни и двуседелни растения е наблюдаваното от Talbot *et al.* [12], като зелената светлина **не** индуцира наблюдавания ефект самостоятелно, а само в присъствието на синя светлина, и максимална реверсия се постига при съотношение на зелена към синя светлина 2:1.

Благодарности

Авторите на статията изказват своята благодарност към доц. д-р Детелин Стефанов и доц. д-р Венета Капчина – Биологически факултет, СУ “Св. Климент Охридски”; доц. д-р Николина Цветкова – Лесотехнически университет, София; проф. д-р Снежана Дончева, гл. ас. д-р Веселина Ненова и химик Емилия Гешева – Институт по физиология на растенията и генетика, БАН; Димитър Димитров – фирма ХАРДСОФТДИЗАЙН; Светослав Чакъров и Петко Лаков.

Литература:

- Barta, D. J., T. W. Tibbitts, R. J. Bula, R. C. Morrow. Evaluation of Light-Emitting Diode Characteristics for a Space-Based Plant Irradiation Source, *Advances in Space Research*, 1992, Vol. 12, No. 5, pp. 141-149.
- Bula, R.J., D.J. Tennessen, R.C. Morrow, T.W. Tibbitts, Light emitting diodes as a plant lighting source, *International Lighting in Controlled Environments Workshop*, NASA-CP-95-3309, 1994, pp. 255–267.
- Bula, R. J., R.W. Ignatius. Providing controlled environments for plant growth in space, *International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems*, Narita Japan, August 26-29, 1996.
- Link, B. M., S. J. Durst, W. Zhou, B. Stanković. Seed-to-seed Growth of *Arabidopsis thaliana* on the International Space Station, *Advances in Space Research*, 2003, Vol. 31, No. 10, pp. 2237-2243.
- Kim, H-H., G. D. Goins, R. M. Wheeler, J. C. Sager. Green-light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth under Red- and Blue-light-emitting Diodes, *HortScience*, 2004, Vol. 39, No. 7, pp. 1617-1622.
- Folta, K. M., S.A. Maruhnich. Green light: A signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany*, 2007, Vol. 58, pp. 3099-3111.
- Ivanova, T., I. Dandolov, I. Ilieva, Y. Naydenov, M. Levinskih, V. Sychev. New LEDs Light Module developed on “Greenhouse-Mars” Project, *Aerospace Research in Bulgaria*, Vol. 23, 2009, pp. 85-102.

8. Ilieva, I., Y. Naydenov, T. Ivanova, I. Dandolov, D. Stefanov, E. Gesheva. Morphometrical Characteristics and Photosynthetic activity of Radicchio under RGB LED Lighting, *Proceedings of the Seventh Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Safety" (SES 2011)*, 29 November - 1 December 2011, Sofia, Bulgaria, 2012, pp. 119-124.
9. Ilieva, I., T. Ivanova, Y. Naydenov, I. Dandolov, D. Stefanov. Plant Experiments with Light-Emitting Diode Module in SVET Space Greenhouse, *Advances in Space Research*, 2010, Vol. 46, No. 7, pp. 840-845.
10. Ivanova, T., V. Sychev. Project "Greenhouse - Mars" - Plant Growth Study With Different Spectra Leds Light Units, *Proceedings of the Second Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Nanotechnology, Safety" (SENS 2006)*, 14 – 16 June 2006, Varna, Bulgaria.
11. Maxwell, K., G. N. Johnson. Chlorophyll Fluorescence – a Practical Guide, *Journal of Experimental Botany*, 2000, Vol. 51, No. 345, pp. 659-668.
12. Talbott, L. D., G. Nikolova, A. Ortiz, I. Shmayevich, E. Zeiger. Green Light Reversal of Blue-light-stimulated Stomatal Opening is Found in a Diversity of Plant Species, *American Journal of Botany*, 2002, Vol. 89, No. 2, pp. 366-368.