

СВЕТОДИОДНА ОСВЕТИТЕЛНА УРЕДБА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФОТОСИНТЕЗАТА

Светлана Велинова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: svetliv@mail.bg; http://light-bg.eu/

РЕЗЮМЕ: За да се осъществи фотосинтеза при растенията, е необходимо да се достигне критично ниво на осветяване. За разлика от възприемане на светлината при човешкото око, което има максимална чувствителност при 555nm, фотосинтезата при растенията има максимална ефективност при облъчване със синя и червена светлина. В доклада се описва осветителна уредба, с която може да се изследва влиянието на светлина с различна дължина на вълната върху ефективността на фотосинтезата. Осветителната уредба е съставена от 18 светодиодни модула, всеки излъчващ в тясна област от спектъра. Изследвани са параметрите на модулите – V-A характеристика, спектр на светлината, мощност на излъчване, реализирано облъчване на определено разстояние до растението.

Ключови думи: LED, фотосинтеза, фотосинтетична активна радиация (ФАР), отглеждане на растения, растеж на растенията

LED LIGHTING SYSTEM FOR THE STUDY OF PHOTOSYNTHESIS

Svetlana Velinova

University of mining and geology "St. Ivan Rilski", E-mail: svetliv@mail.bg; http://light-bg.eu/

ABSTRACT: To carry out photosynthesis in plants it is necessary to reach a critical level of illumination. In contrast to the perception of light in the human eye, which has a maximum sensitivity at 555 nm, photosynthesis in plants has maximum efficiency when irradiated with blue and red light. The report describes a lighting apparatus, which can test the effect of light with different wavelengths on the efficiency of photosynthesis. The lighting system consists of 18 LED modules, each emitting in a narrow area of the spectrum. The parameters considered were the modules – V-A characteristic spectrum of the light emission power, irradiation disposed at a certain distance to the plant.

Key words: LED, photosynthesis, photosynthetic active radiation (PAR), growth of plants

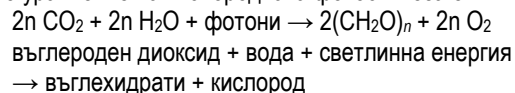
Въведение

Светлината е живот.

Зелените растения ни осигуряват този живот от преди около 2,3 - 3,5 млрд. години, когато чрез цианобактерии се е осъществила първата фотосинтеза в кислородна среда.

Фотосинтезата е физико-химичен процес, при който фотосинтезиращите организми използват светлината, за да синтезират органични съединения с голяма енергия на химичните си връзки. Светлинната енергия се трансформира в химична, а от неорганични вещества H_2O и CO_2 се синтезира глюкоза.

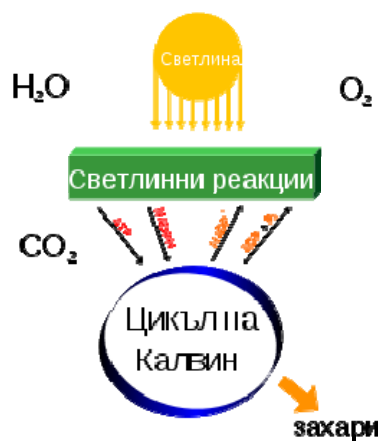
Общото уравнение на кислородната фотосинтеза е:



Отделянето на свободен кислород при фотосинтезата е странично явление с огромни последиствия. Така фотосинтезиращите организми са се приспособили да използват слънчевата енергия (E) за окисление на водата до O_2 и да произвеждат аденозинтрифосфат (АТФ) и никотинамид-аденин-динуклеотид-фосфат (НАДФ), а също - да изразходват този АТФ за С-фиксация в цикъла на Калвин.

При висшите растения фотосинтезират листата и стъблата, богати на фотосинтезиращи структури-хлоропласти.

Фотосинтезата (въздушното хранене) се извършва в тилакоидните мембрани на хлоропластите. Независимо че не участват пряко във фотосинтезата, в нея са ангажирани и корените.

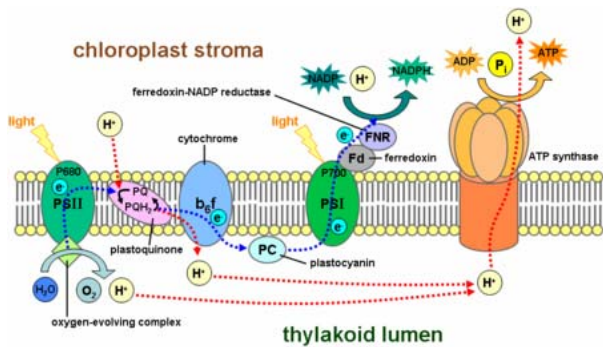


Фиг. 1. Цикъл на Калвин

В хлоропластите се извършва: абсорбция на светлината от хлорофила; трансформация на светлинната E в химична; фиксация и редукция на CO_2 ; фотолиза на водата.

Основна роля във фотосинтезата играят растителните пигменти, изпълняващи ролята на първични акцептори на

светлинните кванти и осъществяващи по-нататъшно превръщане на химичната Е.



Фиг. 2. Схематично представяне на светлинната фаза на фотосинтезата, протичаща в тилакоидната мембрана на хлоропластите.

Растителните пигменти се делят на 4 вида: хлорофили, каротиноиди, фикобилини, антоциани.

Хлорофили - зелени пигменти, открити в листата през 1818г. от Пелетиер и Кавентон. Хлорофилът има циклична структура с няколко активни групи и Mg-йон. В зависимост от наличието на една или друга група съществуват 5 вида хлорофил: хлорофил А (със синьозелен цвят); хлорофил В (жълтозелен); хлорофил С и хлорофил Д - в червени и кафяви водорасли; бактериохлорофил - в серни, несерни пурпурни и зелени бактерии.

Основното свойство на хлорофила е да поглъща избирателно светлинните лъчи - максимум на поглъщане в червената област с дължина на вълната 668nm; способен да флуоресцира – разтворен в органични разтворители излъчва червена светлина.



Фиг. 3. Устройство на хлоропластите.

Каротиноиди – жълто или оранжево оцветени пигменти (около 300 вида). Във фотосинтетичния апарат на висшите растения 98% от жълтите пигменти са каротиноиди. В зависимост от това дали съдържат кислород или не се делят на:

- каротини - безкислородни съединения с двойни връзки; ликопини; γ - каротини.

Двойните връзки в молекулите им придават жълт цвят.

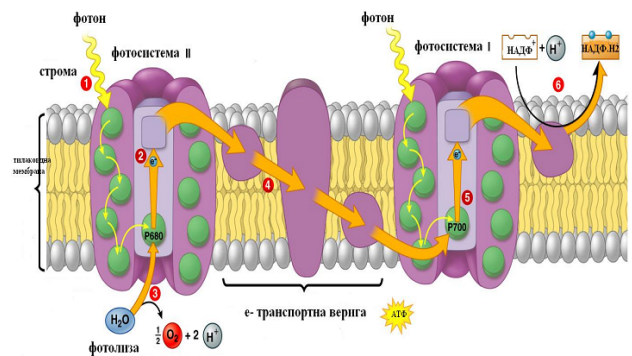
- ксантофили - с кислород в хидроксилна група;
- α- и β- каротин (с два или три изопренови пръстена).

Значение - каротиноидите предпазват хлорофила от окисление, могат да се превръщат от един вид в друг с участие на O₂, поглъщат светлината в определен спектър.

Фикобилини – съдържат се в морските червени, криптофитови водорасли (фикоеритрин), цианобактериите и някои синьозелени водорасли (фикоцианин). Разтворими във вода, полициклични съединения, предават погълнатите кванти светлина на хлорофила в зеления и жълтия спектър. Така морските водорасли могат да поглъщат по-дълбоко достигащата зелена светлина и да я използват за фотосинтеза.

Антоциани – водоразтворими пигменти, разположени в клетъчния сок. Оцветяват растителните части в лилаво, червено, кафяво през есента и при ниски температури.

Процесът на поглъщане на светлина става в рамките на две специализирани биологични единици, наречени **фотосистеми** (I и II). В състава на всяка фотосистема има: множество пигментни молекули групирани в **светлосъбиращ комплекс** (ССК); един **реакционен център**, представляващ белтъчен комплекс и специална пигментна молекула; както и множество спомагателни компоненти.



Съвместно действие на ФС I и ФС II

Фиг. 4. Съвместно действие на фотосистеми I и II.

Роберт Емерсън открива наличието на две реакции, които са светлинно зависими, но изискват различни дължини на вълната. С червена светлина реакциите от светлинната фаза на фотосинтезата са подтиснати, но когато синя и червена светлина се комбинират, скоростта на процеса значително нараства. Обяснението е в наличието на различни абсорбционни максимуми, характерни за съответните реакционни центрове на двете фотосистеми. Фотосистема II има абсорбционен максимум около 680nm, докато фотосистема I - около 700nm. Заклученията от подобни експерименти показват, че ефективността на процеса е максимална, когато двете фотосистеми получават еднакво количество енергия от двете дължини на вълната.

Ефективността на преобразуване на енергията на светлината в химична енергия при растенията се изчислява между 3 и 6%. Същинската ефективност на фотосинтезата варира значително при изменения в светлинния спектър, интензитета на светлината, температурата и концентрацията на въглероден диоксид, като границите на изменение на ефективността са между 0,1 и 8%.

При постоянна температура скоростта на въглеродната фиксация зависи от светлинния интензитет, като първо-

начално скоростта нараства с увеличаване на интензитета на светлината. Друг съществен елемент, що се касае до светлинните изисквания на фотосинтетичния процес, е светлинният спектър - при различните растения има ясна и точна зависимост между интензитета на фотосинтетичния процес и дължината на вълната на поглъщаната светлина.

Като източник на Е се използва видимата част от светлинния спектър и част от ултравиолетовата и инфрачервената област (380 - 750nm), а при бактериите дължината на лъча достига 900nm. Затова тази част от спектъра на слънчевото излъчване (400-700nm) се нарича **фотосинтетично активна радиация** (ФАР). В процеса на фотосинтезата практически се използва едва 1-3% от ФАР. Обикновено ФАР се изразява в μmol фотони $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ и се изчислява по следната формула:

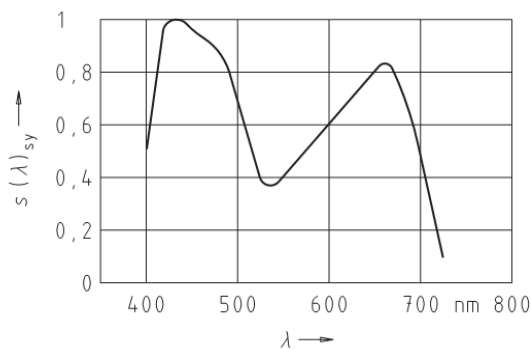
$$E_{\text{phot}} = \frac{1}{h \cdot c} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda \quad (1)$$

където: $E(\lambda)$ е измереното спектрално разпределение на лъчистия поток, W ;

$\lambda_{1,2}$ – диапазон на дължината на вълните;

h – константа на Планк = $6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$;

c – скорост на светлината във вакуум $299\,792\,458 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Фиг. 5. Ефективен спектър на фотосинтезата $S(\lambda)_{sy}$ съобразно DIN 5031-10

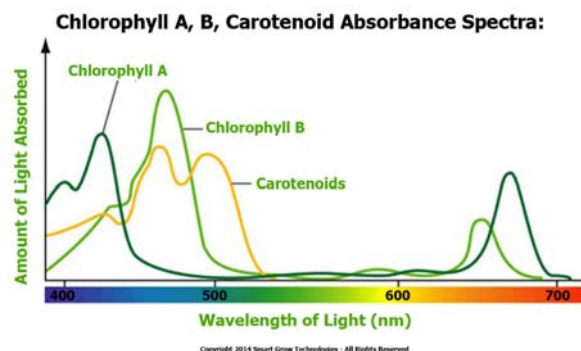
Възможно е също така и да се изчисли и ефективната ФАР, като стойностите за $S(\lambda)$ се вземат от DIN 5031-10:

$$E_{\text{photbiol}} = \frac{1}{h \cdot c} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda \quad (2)$$

Известно е, че фотосинтезата е активна в областта на червените и сините лъчи. (За сравнение: човешкото око има максимална чувствителност в жълто-зеления обхват, около 555 нанометра.)

Сините и червените лъчи оказват влияние върху фотосинтезата директно и индиректно. Сините фотони (70ккал/мол) имат енергия около 1.5 пъти повече от червените (40ккал/мол). Съгласно квантовата теория, след като един фотон избива само един електрон от пигментната молекула, то при сините се губи повече непроизводителна енергия. Установено е, че при нормална осветеност с еднаква по енергия синя и червена светлина, фотосинтезата е по-ефективна при червените лъчи. Това

може да се обясни с факта, че при еднаква Е повече червени кванти ще паднат върху листата и съответно повече пигментни молекули ще се възбудят.



Фиг. 6. Спектрална чувствителност при фотосинтезата (части от светлинния спектър, използвани от пигментите във фотосинтезата).

При високо ниво на осветеност, обаче, преимущество имат сините лъчи, тъй като те активират белтъчната синтеза и това оказва стимулиращ ефект върху карбоксилиращите ензими, докато червените лъчи - засилват образуването на въглехидрати. Прибавянето на синя светлина (около 20%) към червената, усилва значително фотосинтезата и може да се използва в оранжерийното производство.

Качественият състав на светлината през деня се изменя. Обикновено червените лъчи имат голям дял при малък ъгъл на падане (сутрин и вечер), когато делът им достига до 2/3 от ФАР. При растенията от умерения пояс съществуват два пика на фотосинтезата – преди обяд и около 16 ч.

Фотосинтезата доставя храна и необходимия за дишането кислород на всички организми. Благодарение на фотосинтезата са се образували каменните въглища. Целият енергиен баланс на биосферата се дължи на този процес. В резултат на фотосинтезата върху земната повърхност ежегодно се натрупват 382 млрд. т. органична материя - 99% от земната биомаса е получена в резултат на фотосинтезата. За производството на тази биомаса от атмосферата се поглъщат 68 млрд. т. CO_2 , а заедно с морските растения - 398 млрд. т. Въпреки голямата консумация на CO_2 , неговото количество в атмосферата остава постоянно - 0,03%, което се дължи на противоположния процес – дишане.

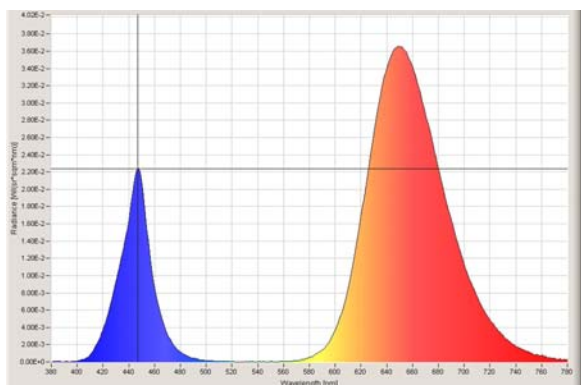
С изобретяването на електрическата крушка към края на 19 век и с употребата на електрическия ток за изкуствено осветление човечеството е извоювало реална възможност да "удължи" деня или направо да го "доведе" там, където никога досега не го е имало – под водата, под земята и на места, където не е стъпвал човешки крак. На теория фотосинтезата може да се осъществява и на светлината на запалена свещ, затова и още със започването на първите космически програми са правени опити за отглеждането на растения в изцяло изкуствена и контролирана среда, което включва, разбира се, и използването на изкуственото осветление като основен или допълнителен източник на светлина.

Отглеждането на растения на изкуствена светлина в последните години добива особена популярност. Това е

икономически изгодно за места със слабо слънчево греене – през зимните месеци или на места над 50-ия паралел. Дори в условията на нашата страна през зимните месеци е изгодно да се отглеждат някои зеленчуци на изкуствено осветление. Интерес представлява също и отглеждането на растения в космоса - при по-продължително пребиваване извън Земята, където освен за снабдяването с кислород и преработването на въглеродния диоксид на космонавтите ще бъде нужна растителността като храна и място за отмора.

За да се осъществи фотосинтезата, е необходимо да се достигне критично ниво на осветяване. Фотосинтезата при растенията има максимална ефективност при облъчване със синя и с червена светлина.

Реализирането на изкуственото осветление за фотосинтеза може да се осъществи със специални лампи, излъчващи в тази част на спектъра. Водещите производители на светлинни източници произвеждат такива лампи на базата на натриеви лампи с високо налягане или метал-халогенни лампи. В последните години поради бурното развитие на технологиите в областта на светодиодната техника като такива източници на светлина се използват светодиодни осветители. Такъв специализиран светодиоден осветител се предлага и от много фирми. Спектърът на излъчване на този източник е показан на фиг. 7.



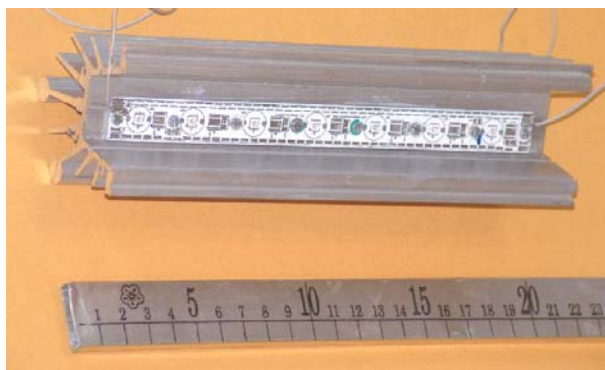
Фиг. 7. Спектър на светодиоден осветител с мощност 40W, предназначен за ефективна фотосинтеза.

Реализация

За да се изследва коя част от спектъра влияе най-силно върху фотосинтезата, е създадена специализирана осветителна уредба. Тя се състои от 18 броя светодиодни осветители, всеки от които излъчва в тясна зона от спектъра (фиг. 8). Всеки осветител се състои от светодиоден модул със 7 броя светодиоди излъчващи в тясна област на спектъра. Изглед на такъв осветител е показан на фиг. 9. Модулът е закрепен на подходящ алуминиев радиатор, осигуряващ охлаждането на светодиодите, като същевременно избраната форма на профила не позволява проникване на лъчи извън зоната на изследваното растение. За стабилизиране на тока през модулите се използва стандартно захранване със стабилизация на тока, който може да бъде регулиран в широки граници.

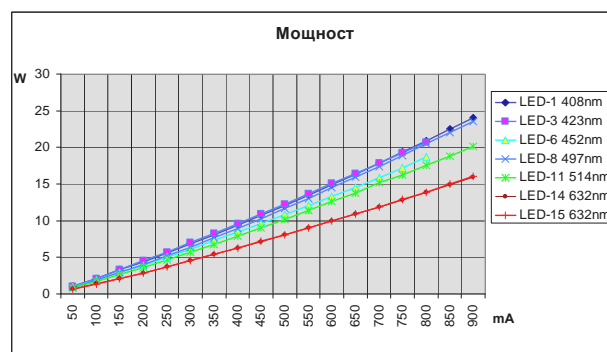


Фиг. 8. 18 броя осветители, всеки от които излъчва в тясна зона от спектъра.



Фиг. 9. Един от светодиодните осветители.

Видът на светодиодите и дължината на вълната на светлината, която излъчват, са посочени в таблица 1, а на фиг. 13 е показан спектърът на тяхната светлина. За да има сравнимост на резултатите, токум през светодиодите е подбран така, че потребяваната мощност от всеки осветител да е една и съща (фиг. 10). Това се постига чрез промяна на тока на всеки един от осветителите.



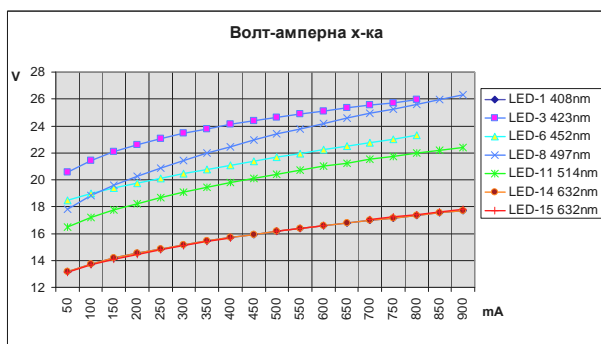
Фиг. 10. Зависимост на мощността на осветителите, излъчващи светлина с различна дължина на вълната.

На фиг. 10 е показана измерената волт-амперна характеристика на отделните осветители, излъчващи при различна дължина на вълната. На фигури 11, 12 и 13 за прегледност са показани резултатите само на 7 от 18-те осветителя, като са подбрани такива с характерна дължина на вълната на излъчената светлина (т.е. от различни части на спектъра).

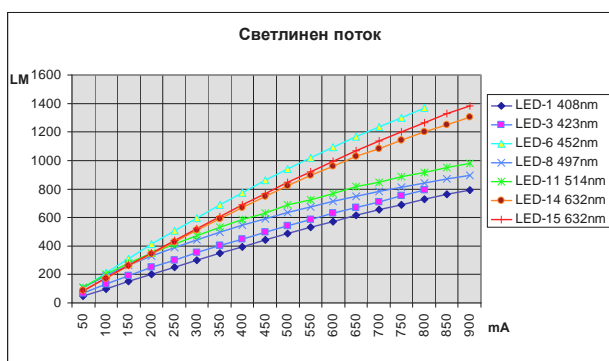
Таблица 1

LED №:	Светодиод тип	nm
1.	INDIGO BLUE	402 +/-3
2.	INDIGO BLUE	407 +/-3
3.	DEEP BLUE	422 +/-2
4.	DEEP BLUE	427 +/-2
5.	ROYAL BLUE	452 +/-2
6.	ROYAL BLUE	457 +/-2
7.	BLUE 1	462 +/-2
8.	BLUE 2	472 +/-2
9.	CYAN 1	497 +/-2
10.	CYAN 2	502 +/-2
11.	GREEN 1	522 +/-2
12.	GREEN 2	527 +/-2
13.	AMBER	592 +/-2
14.	RED 1	616 +/-3
15.	RED 2	625 +/-5
16.	TRUTH RED 1	652 +/-2
17.	TRUTH RED 2	663 +/-2
18.	DEEP RED	730 +/-10

За да има сравнимост на резултатите от различните лампи от фиг. 10, се отчита с какъв ток трябва да се захранят отделните светодиодни модули, така че мощността подавана към тях да бъде една и съща. Различията в мощностите се получават от различието на волт-амперните характеристики за диодите, излъчващи в различна част на спектъра (фиг. 11).

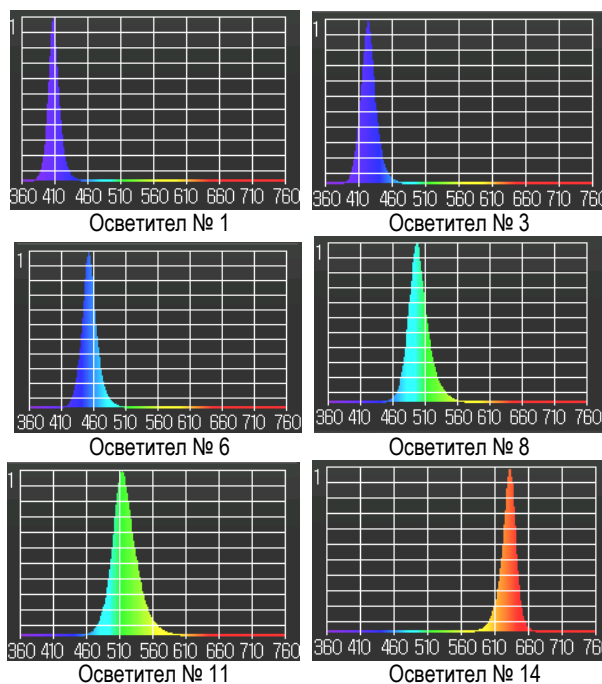


Фиг. 11. Волт-амперна характеристика на осветители, излъчващи светлина с различна дължина на вълната.



Фиг. 12. Зависимост на светлинния поток на осветители с различна дължина на вълната.

На фиг. 12 е заснета характеристиката на промяна на светлинния поток на модулите, излъчващи в различна част от спектъра. В случая интерес представлява фото-синтетично активната радиация, изчислена по (1) или (2).



Фиг. 13. Спектър на излъчване на осветителите.

Осветителите, показани на фиг. 8, са монтирани на стойки на височина около 30cm над контейнерите с растения. Под всеки осветител могат да се разположат по две кофички с посадени около 10–20 растения. Като контролни проби ще се заложат още две опитни постановки: едната от 4 контейнера, осветявани с лампата за ефективна фотосинтеза, спектърът на която е показан на фиг. 7; втората – също от 4 контейнера ще се осветява от естествена светлина. Измерването на нивото на фотосинтетично активната радиация се извършва със спектрометри Specbos 1201, включен в режим за измерване на осветеност.

С помощта на тази уредба се цели да се изследва влиянието на отделни части от спектъра на светлината върху количествените и качествените характеристики на фотосинтезата при различни видове растения, като същевременно се проследяват техните растеж и развитие. Като обекти за изследване са избрани следните видове: салата (*Lactuca sativa*), босилек (*Ocimum basilicum*), карамфил (*Dianthus caryophyllus*), домати (*Solanum lycopersicum*). Предвижда се да се проследяват и измерват следните показатели:

- свежо и сухо тегло на надземната част на растенията;
- морфологични показатели: височина на растенията; развитие на листната маса; брой развити листа; дължина на стъблото; дължина и ширина на листата;
- съдържание на фотосинтетично активни пигменти.

След провеждането на проучвания върху влиянието на отделните части на светлинния спектър върху растежа и развитието на растенията е целесъобразно да се проведат и проучвания върху такива при комбинация от съвместното осветяване със светлина с различни спектри, както и проучване на светлинните режими по време и честота на редуване на светла и тъмна фаза.

Литература

- Илиева М.О., В. Илиева, LED-облъчвателни уреди за растениевъдството, XV Нац. конференция с международно участие BullLight, България, 2014, с. 184-187.
- Раданова С., Физиология на растенията, <http://www.silvia-radanova.com/wp-content/uploads/2012/08/fiziologia-na-rasteniata-lecii.pdf>
- Машков П., Б. Гьоч и др., Спектрални характеристики и термични изследвания на светодиодна лампа, XV Нац. конференция с международно участие BullLight, България, 2014, с. 53-57.
- Илиева И., Й. Найденов и др., Влияние на съотношението зелена/синя светлина върху физиологията на листна цикория при RGB осветление, Eighth Scientific Conference with International Participation Space, Ecology, Safety, 4-6,12,2012, Sofia, Bulgaria, pp. 239-243
- Найденов Й., Т. Иванова и др., Растеж на растения в космическа оранжерия "СВЕТ" при флуоресцентни и светодиодни източници на светлина, Fourth Scientific Conference with International Participation Space, Ecology, Nanotechnology, Safety, 4-7, 06, 2008, Varna, Bulgaria, pp. 58-63.
- DIN 5031-10, Deutsche norm, 03, 2000, pp. 16-18
- Operating instructions: Spectroradiometer specbos.1xx1 JET1 LiVal, pp. 49-50.
- Olle M., A. Virsile, The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality, Agricultural and food science, 22, 2013, pp. 223-234.
- Cary A. Mitchell, Arend-Jan Both et al., LEDs: The Future of Greenhouse Lighting!, *Chronica horticultrae*, vol 52, numb 1, 2012, pp. 6-12
- Singh D., C. Basu et al., LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting.
<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf>
- Light-emitting diode sole-source lighting effective in bedding plant seedling production,
<http://www.sciencedaily.com/releases/2015/07/150729142020.htm>
- Абаровна С., Фотоиндуцирани структурни и спектрални промени в свойствата на растителни пигменти – автореферат, Физически факултет към СУ "Св. Климент Охридски", София, 2014, ИБФБМИ, БАН.
- Илиева И., Й. Найденов и др., Морфометрични характеристики и фотосинтетична активност на листна цикория при RGB LED осветление, Seven Scientific Conference with International Participation, SES, Sofia, Bulgaria, 29.11-01.12, 2011, pp. 119-124.
- Massa, G. D., J. Emmerich et al., Plant-growth lighting for space life support: a review, *Gravitational and Space Biology* 19(2), 08, 2006, pp. 19-29.
- Bula, R. J., D. Tennessen et al., Light emitting diodes as a plant lightning source, Intern. Lightning in Controlled Environments Workshop, NASA-CP-95-3309, pp. 225-267, 1994.
<http://biology.mcgill.ca/Phytotron/LightWkshp1994/5.11%20Bula/Bula%20text.htm>
- Folta, K., L. Koss et al., Design and fabrication of adjustable red-green-blue LED lights arrays for plant research, *BMC Plant Biology* 5, doi: 10.1186/1471-2229-5-17, 2005
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1198233/>

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електрификация на минното производство“.