

С. А. Ракутько, Е. Н. Ракутько

*Институт агроинженерных и экологических проблем агропромышленного производства,
Санкт-Петербург***ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ
ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЫГОНКЕ ПЕТРУШКИ**

*Исследовали эффективность выгонки петрушки (*Petroselinum tuberosum*) под светодиодным излучением. Выявлено, что при равноэнергетическом спектре (S1) растения имели более крепкий вид, большее количество листьев в розетке, сырую и сухую массу, чем при спектре, приближенном к относительной спектральной эффективности фотосинтеза (S2). Энергоемкость выгонки при S1 на 12 % меньше, чем при S2.*

Ключевые слова: светодиод, спектр, петрушка, выгонка, рост, фотоморфогенез, энергоемкость

Постановка проблемы. Энергия потока оптического излучения в области фотосинтетически активной радиации (ФАР) с длиной волны от 400 до 700 нм является основой обеспечения процессов фотосинтеза и получения полезной продукции в светокультуре. Большое влияние на рост, развитие и физиологию растений оказывает спектральный состав излучения [1].

Недостаточная интенсивность света или его неудовлетворительный спектральный состав ухудшает рост и развитие растений. Как для дополнительного досвечивания растений в теплицах, так и в условиях интенсивной светокультуры необходимый уровень облученности создают с помощью натриевых, металлогалогенных или люминесцентных ламп. Эти источники света являются достаточно эффективными приборами для преобразования электрической энергии в энергию фотонного потока в целом, однако спектр их излучения далек от действительной потребности зеленого растения в энергии излучения на различных длинах волн ФАР.

Достижение соответствия спектра излучения источника спектру чувствительности облучаемого растения на каждой длине волны диапазона ФАР представляется достаточно труднореализуемой задачей. Для ее практического решения спектральный состав излучения предложено характеризовать соотношением интенсивности излучения трех спектральных диапазонов ФАР: синего $k_{син}$ (400–500 нм), зеленого $k_{зел}$ (500–600 нм) и красного $k_{кр}$ (600–700 нм). Именно в этих диапазонах на практике добиваются соответствия реального и требуемого спектра потока. В результате ряда фотобиологических исследований для некоторых светокультур найдены спектральные

соотношения, обеспечивающие наилучшую продуктивность выращиваемых растений [2].

Анализ состояния вопроса. Частные реакции растений на действие излучения отдельных спектральных диапазонов могут быть предсказаны на основании хорошо известных закономерностей. Так, синий свет снижает вытягивание растения [3, 4] и препятствует увеличению площади листа [5]. Зеленый свет имеет большую проникающую способность, что ведет к интенсификации фотофизиологических процессов в глубине кроны [6]. Желтый свет приводит к сильному вытягиванию растений, удлинению как гипокотыля, так и первых междоузлий. Красный свет способствует удлинению гипокотыля и увеличению площади листьев [7].

Что касается общей реакции растений на действие излучения с комбинированным спектром, то ее прогнозировать труднее из-за сложного взаимодействия откликов растения на излучения отдельных диапазонов ФАР. На величину урожая и его качество также влияет совокупность других факторов окружающей среды.

В силу взаимозависимости продуктивности и экономических показателей светокультуры [8], исследование закономерностей роста и развития растений, выращиваемых под излучением различного спектрального состава, представляет не только теоретический интерес, но и является практически значимым и актуальным. Перспективными для применения в светокультуре являются светодиодные источники света [9].

Цель работы – выявление различия в параметрах светокультуры петрушки, выращиваемой под светодиодным излучением с различным спектральным составом и определение энергоэффективности выгонки.

Основной материал. Выбор петрушки (*Petroselinum tuberosum*) объясняется тем, что это

одна из важнейших зеленных и пряно-вкусовых культур, производство и потребление которой в настоящее время увеличивается. Проводится большая селекционная работа по улучшению качества производимой продукции. Для различных сортов петрушки характерно значительное варьирование биохимического состава листьев и корнеплодов. Петрушка светолюбива, но у корнеплодов листья могут отрастать и развиваться при низком уровне освещенности, что используется при выгонке [10].

В эксперименте использовали корнеплоды корневого сорта петрушки Урожайная, заготовленные осенью 2014 г. до заморозков. После уборки и до начала экспериментов корнеплоды хранили при температуре воздуха 1–3 °С и относительной влажности воздуха 60–65 %. Брели корнеплоды средних размеров в количестве 16 шт, массой от 22 до 88 г, диаметром 2–4 см в верхней части. Содержание сухого вещества в корнеплоде составляло 17,6 %.

Перед высадкой в контейнеры производили обрезку листьев, оставляя черешки длиной 2–3 см с сохранением верхушечной почки, а также кончиков корней, чтобы посадочный материал имел одинаковую длину.

Подготовленные к выгонке корнеплоды разделили на две партии, предназначенные для выращивания в различных условиях облучения таким образом, что общие массы корнеплодов обеих партий были практически одинаковы.

Высадили корнеплоды 19.11.2014 г. в полипропиленовые контейнеры объемом 663 см³. Для заполнения контейнеров использовали кислый (рН 3,6) верховой сфагновый торф торфопредприятия «Пельгорское-М» Ленинградской области со степенью разложения 10 %, влажностью 35 % и низким содержанием основных элементов питания. Кислотность торфа нейтрализовали мелом до рН 6,2. Производили заправку торфа основными элементами питания и микроэлементами. Содержание подвижных форм элементов питания доводили до уровней, мг/л: NH₄⁺ – 20; NO₃⁺ – 194,5; K⁺ – 189,6; Ca²⁺ – 160; Mg²⁺ – 60; Mn²⁺ – 0,5; Cu²⁺ – 0,05; Mo⁶⁺ – 0,05; B³⁺ – 0,05. Содержание P⁵⁺ – 20 мг/ 100 г сухого торфа. ЕС – 1,0 мСм/см.

При посадке головку и шейку корнеплодов оставляли открытой. Почву вокруг саженцев уплотнили, полили и поставили контейнеры в темное место с температурой воздуха +14 °С для образования боковых корней. В процессе выращивания поддерживали температуру воздуха +18 °С, влажность воздуха 60 % [11]. Полив производили небольшими порциями воды, избегая увлажнения головки корнеплода.

Уровень фотонной облученности на уровне 50 ммольс⁻¹м⁻² поддерживали в эксперименте изменением высоты подвеса светодиодных излучателей над верхушками растений в секциях вегетационной камеры. Спектральную облученность измеряли прибором ТКА ВД/04. Спектр излучения S1 в первой секции камеры имел практически равномерное распределение энергии в диапазоне ФАР ($k_{син} = 32,4 \%$, $k_{зел} = 34,2 \%$, $k_{кр} = 33,2 \%$).

Спектр излучения S2 во второй секции камеры был приближен к относительной спектральной эффективности фотосинтеза в зеленом листе растения ($k_{син} = 15,7 \%$, $k_{зел} = 9,8 \%$, $k_{кр} = 74,2 \%$).

Графически спектры излучения в секциях камеры показаны на рис. Фотопериод составлял 8 ч. в сутки.

В конце эксперимента фиксировали длину наиболее развитого листа в розетке, количество листьев в розетке, сырую массу листьев, содержание сухого вещества, расстояния между жилками в листьях петрушки для всех растений.

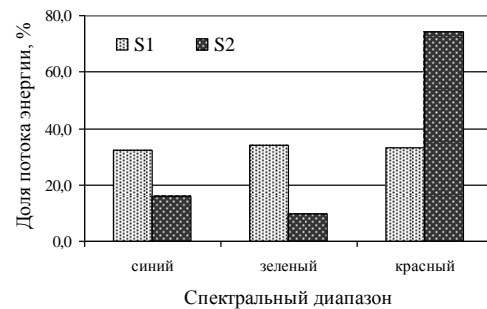


Рис. 1 - Спектр излучения в секциях камеры

Растения петрушки, выращиваемые под спектром излучения S1, характеризуются равными долями энергии в отдельных спектральных диапазонах ФАР, несмотря на несколько меньшую длину листа, имели более крепкий и пушистый вид, большее количество листьев в розетке, большую сырую массу листьев и большее содержание сухого вещества в листьях. Было отмечено, что увеличение общей длины листьев у растений петрушки, выращиваемых под спектром S2, приближенном к относительной спектральной эффективности фотосинтеза в зеленом листе растения, происходит за счет вытягивания черешка при сохранении пропорций оставшейся части листа.

Для оценки энергоэффективности процесса выгонки использовали величину энергоемкости [12]. Энергоемкость показывает, какое количество энергии потока излучения затрачивается на синтез 1 г сухого вещества. Величина энергоемкости рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{\Phi}{M_c}, \quad (1)$$

где Φ - поток излучения, ммоль.

$$\Phi = ETS, \quad (2)$$

где E - облученность растений, $E = 50$ ммоль \cdot с $^{-1}$ ·м $^{-2}$;
 T - время облучения, $T = 1,04 \cdot 10^6$ с;
 S - площадь облучения, $S = 0,25$ м 2 .

Показатели эффективности выгонки петрушки приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Показатели эффективности выгонки петрушки

Показатель	S1	S2
Общая масса листьев M_0 , г	79,49	76,03
Кол-во сухого в-ва M_c , г	11,66	10,47
Энергоемкость ε_i , ммоль/г	1,11	1,24

Снижение величины энергоемкости в относительных единицах составляет

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_{S2} - \varepsilon_{S1}}{\varepsilon_{S1}}. \quad (3)$$

В проведенном сравнительном эксперименте $\Delta\varepsilon = 0,12$ отн.ед. Это означает, что применение спектра с равномерным распределением энергии по диапазонам ФАР на 12 % энергоэкономичней по сравнению со спектром, приближенным к стандартной относительной спектральной эффективности фотосинтеза зеленого листа растения.

Выводы. Проведенные исследования показали, что при выбранном достаточно низком уровне облученности эффективность выгонки петрушки существенно зависит от спектрального состава излучения. Это дает основания к поиску спектрального состава излучения, обеспечивающего максимальную эффективность выгонки при минимальных затратах на облучение. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что рекомендуемые некоторыми производителями для светокультуры облучатели, состоящие только из комбинации синих и красных светодиодов (с большей долей красного излучения), не являются оптимальными для применения при выгонке петрушки.

Литература

1. Smith, H. Light quality, photoperception, and plant strategy [Текст] / H. Smith // Annu. Rev. Plant Physiol. 1992. – N 33. – P 481–518.
2. Сарычев Г. С. Продуктивность ценозов огурцов и томатов в функции спектральных характеристик ОСУ [Текст] / Г. С. Сарычев // Светотехника. – 2001. – №2. – С.27 – 29.
3. Nanya K. Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings [Текст] / K. Nanya, Y. Ishigami, S. Hikosaka, E. Goto // Acta Horticulturae. 2012. – N 956. – P. 261 – 266.

4. Javanmardi J. Response of tomato and pepper transplants to light spectra provided by light emitting diodes [Текст] / J. Javanmardi, S. Emami // International Journal of Vegetable Science. 2013. – N 19. – P. 138 – 149.

5. Samuolienė G. Cultivation of vegetable transplants using solid-state lamps for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses [Текст] / A. Brazaitytė, P. Duchovskis, A. Viršilė, J. Jankauskienė, R. Sirtautas, A. Novičkovas, S. Sakalauskienė, J. Sakalauskaitė // Acta Horticulturae. 2012. – N 952. – P. 885 – 892.

6. Folta K. M. Green light: a signal to slow down or stop [Текст] / K. M. Folta, S. A. Maruhnich // Journal of Experimental Botany. 2007. – vol. 58, N 12. – P. 3099 – 3111.

7. Johkan M. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in Lactuca sativa [Текст] / M. Johkan, K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, T. Yoshihara // Environmental and Experimental Botany. 2012. – N 75. – P.128 – 133.

8. Ракутько С. А. Спектральные отклонения и энергоемкость процесса облучения растений [Текст] / С.А.Ракутько // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2008. – №10. – С.156 – 160.

9. Ракутько С. А. Энергоэффективность применения светодиодных источников излучения в светокультуре [Текст] / С. А. Ракутько, А. Э. Пацуков // Світлотехніка та електроенергетика. - 2013. – №2 (34). – С. 18 – 22.

10. Циунель М.М. Петрушка – доходная культура [Текст] / М.М.Циунель // Гавриш. – 2005. – №6. – С.13 – 15.

11. Потехин Г. А. Биохимическая оценка коллекции петрушки в условиях Московской области [Текст] / Г. А. Потехин, В. А. Харченко, В. Ф. Пивоваров, Н. Ю. Свистунова, А. М. Рабинович // Гавриш. – 2011. – №1. – С.40 – 43.

12. Ракутько С. А. Оптимизация технологического процесса облучения в АПК по минимуму энергоемкости [Текст] / С. А. Ракутько // Светотехника. – 2009. – №4. – С.57 – 60.

References

1. Smith H. (1982). Light quality, photoperception, and plant strategy. Annu. Rev. Plant Physiol., 33, 481 - 518.
2. Sarychev G. S. (2001). Produktivnost' cenozov ogurcov i tomатов v funkcii spektral'nyh harakteristik OSU. Svetotekhnika, 2, 27 - 29.
3. Nanya, K., Ishigami, Y., Hikosaka, S., Goto, E. (2012). Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings. Acta Horticulturae, 956, 261 –266.
4. Javanmardi J., Emami S. (2013). Response of tomato and pepper transplants to light spectra provided by light emitting diodes. International Journal of Vegetable Science, 19, 138 – 149.
5. Samuolienė G., Brazaitytė A., Duchovskis P., Viršilė A., Jankauskienė J., Sirtautas R., Novičkovas A., Sakalauskienė S., Sakalauskaitė J. (2012). Cultivation of vegetable transplants using solid-state lamps for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses. Acta Horticulturae, 952, 885 – 892.
6. Folta K. M., Maruhnich S. A. Green light: a signal to slow down or stop // Journal of Experimental Botany. vol. 58, 12, 3099 – 3111.
7. Johkan M., Shoji K., Goto F., Hahida S., Yoshihara T. (2012). Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in Lactuca sativa. Environmental and Experimental Botany, 75, 128 – 133.

8. Rakutko S. A. (2008). Spektralnye onkloneniya i energoemkost' processa oblucheniya rastenyi. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 10, 156 – 160.

9. Rakutko S. A., Patsukov A. E. (2013). Energoeffektivnost' primeneniya svetodiodnykh istochnikov v svetokulture. Svitlotehnika ta elektroenergetika, 2 (34), 18 - 22.

10. Ciunel' M. M. (2005). Petrushka – dohodnaja kul'tura. Gavrish, 6, 13 - 15.

11. Potehin G.A., Harchenko V.A., Pivovarov V.F., Svistunova N.Ju., Rabinovich A.M. (2011). Biohimicheskaja

ocenka kolekcii petrushki v uslovijah Moskovskoj oblasti. Gavrish, 1, 40 - 43.

12. Rakutko S. A. (2009). Optimizaciya tehnologicheskogo processa oblucheniya v APK po minimumu energoemkosti. Svetotechnika, 4, 57 - 60.

Автор: РАКУТЬКО Сергей Анатольевич

доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией
института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП)
196625, Россия, Санкт-Петербург, Тярлево, Филътровское ш., 3
Конт. тел. – +7 (965)-768-33-23, E-mail – sergej1964@yandex.ru
Количество публикаций в российских изданиях – 103
Количество публикаций в украинских изданиях – 4
Количество публикаций в иностранных индексируемых изданиях – 5
Индекс Хирша (по РИНЦ) – 5.

Автор: РАКУТЬКО Елена Николаевна

младший научный сотрудник
института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП)
196625, Россия, Санкт-Петербург, Тярлево, Филътровское ш., 3
Количество публикаций в российских изданиях – 1

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ВЖИВАННЯ СВІТЛОДІОДНИХ
ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ВИРОЩУВАННІ ПЕТРУШКИ**

С.А.Ракутько, Е.Н.Ракутько

Досліджували ефективність вигонки петрушки (*Petroselinum tuberosum*) під світлодіодним випромінюванням. Виявлено, що при равноенергетическом спектрі (S1) рослини мали більший міцний вид, більша кількість листя в розетці, сиру і суху масу, ніж при спектрі, наближеному до відносної спектральної ефективності фотосинтезу (S2). Енергоємність вигонки при S1 на 12% менше, ніж при S2.

Ключові слова: світлодіод, спектр, петрушка, вигонка, зріст, фотоморфогенез, енергоємність

ENERGY EFFICIENCY OF LED LIGHT SOURCES WHEN PARSLEY FORCING

S. Rakutko, E. Rakutko

Light-emitting diodes (LEDs) are a potential irradiation source for plant culture system due to ability to control the spectral composition in red (R), green (G) and blue (B) bands of photosynthetically active radiation (PAR). To evaluate the energy efficiency of LEDs with different light quality in this study, we measured the growth and photomorphogenesis of root varieties of parsley (*Petroselinum tuberosum*). All plants were grown for 36 days at $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ photosynthetic photon flux with 8 hour photoperiod. The light quality of the flux was characterized by the ratio of the emission intensity of three spectral bands of PAR: k_B , k_G , k_R . One part of the plants were grown under the spectrum S1 closed to the equal doses of the energy flow in the bands of PAR ($k_B=32,4\%$, $k_G=34,2\%$, $k_R=33,2\%$). The other part of the plants were grown under the spectrum S2 closed to the standart relative spectral efficiency of photosynthesis in a green plant leaf ($k_B=15,7\%$, $k_G=9,8\%$, $k_R=74,2\%$). It was revealed that under the S1 spectrum the parsley had a stronger view, a greater number of leaves in the rosette, bigger wet mass of leaves and dry matter content. An increasind in the overall length of the leaves of parsley plants grown under S2 spectrum occurs by the stem elongating while maintaining the proportions of the remainder part of the leaf. The energy consumption of the forcing under S1 spectrum was 12 % lower than under S2 spectrum. The obtained results allow us to conclude that recommended by some manufacturers the irradiation systems for plant culture, consisting only of a blue and red LEDs combination (with a higher proportion of red radiation) are not optimal for use when parsley forcing.

Keywords: LED, light quality, parsley, forcing, growth, photomorphogenesis, energy consumption.