

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 621.321:631.544.45

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-62-67



Роль спектральных характеристик источников излучения в формировании урожая салата при выращивании методом гидропоники

Долгих Павел Павлович[✉], канд. техн. наук, доцент

dpp10@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-3443-5726>

Трепуз Сергей Валерьевич, аспирант²

mail@growshop24.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0699-6788>

Попова Наталья Михайловна, научный сотрудник

nmpopova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3863-6261>

Красноярский государственный аграрный университет; 660049, Российская Федерация, г. Красноярск, пр-кт Мира, 90

Аннотация. Выращивание растений в закрытых помещениях с контролируемой средой подразумевает применение светодиодных систем с регулируемым спектром и интенсивностью с ручным или дистанционным управлением. С целью разработки требований к конструкции светодиодного облучателя проведено исследование роли различных спектров светодиодного излучения на показатели роста, развития и урожайности салата, выращиваемого методом гидропоники. Исследования проводились на растениях салата сортов Кук, Афицион, Хризолит в вегетационной установке с гидропоникой периодического затопления с тремя разноспектральными облучателями: первый – со спектром излучения, совпадающим с функцией спектрального распределения относительной фотосинтетической активности солнечного излучения (контроль); второй – с излучением, совпадающим с функцией спектральной чувствительности растений по К.Дж. МакКрее; третий – с регулируемым спектром по трём каналам управления для трёх участков спектра, совпадающим с функциями синтеза хлорофилла. Установлено, что реакция различных сортов салата на спектральный состав излучения является специфичной. Максимальная урожайность сорта Кук (4,45 кг/м²) получена под первым облучателем, салатов Афицион (4,7 кг/м²) и Хризолит (6,55 кг/м²) – под вторым. На основе полученных результатов исследований разработаны требования и спроектирован светодиодный облучатель, совмещающий в себе все достоинства светодиодных и цифровых технологий и позволяющий реализовывать требуемые функции излучения для лабораторных исследований и при выращивании растений in-vitro. Отмечено, что светодиодный модуль облучателя должен включать в себя светодиоды фиолетового, синего, красного, тёмно-красного и дальнего красного излучений, а также светодиоды тёплого и холодного белого света.


Ключевые слова: вегетационная установка, метод гидропоники, светокультура, светодиодный облучатель, спектральный состав излучения, урожайность

Формат цитирования: Долгих П.П., Трепуз С.В., Попова Н.М. Роль спектральных характеристик источников излучения в формировании урожая салата при выращивании методом гидропоники // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 5. С. 62-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-62-67>.

© Долгих П.П., Трепуз С.В., Попова Н.М., 2023

ORIGINAL PAPER

Role of the spectral characteristics of radiating sources in the formation of lettuce yield in hydroponics cultivation

Pavel P. Dolgikh , CSc (Eng), Associate Professor

dpp10@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3443-5726>; SPIN-код: 9234-1792

Sergey V. Trepuz, postgraduate student, Department of Systems Power Engineering

mail@growshop24.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0699-6788>; SPIN-код: 3900-0363

Natalia M. Popova, Research Associate

nmpopova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3863-6261>; SPIN-код: 1592-6823

Krasnoyarsk State Agrarian University; 90, Mira Ave, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

Abstract. Growing plants indoors in the controlled environment involves the use of LED systems with an adjustable spectrum and intensity with manual or remote control. The aim of the study was to determine the role of different LED emission spectra in growth, development, and yield of lettuce cultivated hydroponically to develop requirements for the LED irradiator design. Studies were carried out in a growth chamber with periodic flooding hydroponics when irradiating lettuce plants of Kuk, Afitsion, and Khrizolit varieties under multispectral irradiators. The first irradiator has a radiation spectrum coinciding with the spectral distribution function of relative photosynthetic activity of solar radiation (control). The radiation of the second one coincides with the function of the spectral sensitivity of plants according to K.J. McCree. The third irradiator has an adjustable spectrum by three control channels for three parts of the spectrum coinciding with chlorophyll synthesis functions. It was found that the response of different lettuce varieties to the spectral composition of irradiation is specific. The maximum yield of the Kuk variety (4.45 kg/m²) was obtained under the first irradiator, that of lettuce Afitsion (4.7 kg/m²) and Khrizolit (6.55 kg/m²) – under the second one. Based on the results obtained the authors made requirements and designed an LED irradiator, which combines all the advantages of LED and digital technologies and provides for the implementation of the required radiation functions for laboratory research and in-vitro plant cultivation. It is noted that the LED module of the irradiator should include LEDs of violet, blue, red, dark red, and far red radiation, as well as LEDs of warm and cool white light colours.

Keywords: growth chamber, hydroponic technology, photoculture, LED irradiators, spectral composition of radiation, crop yield

For citation: Dolgikh P.P., Trepuz S.V., Popova N.M. Role of the spectral characteristics of radiating sources in the formation of lettuce yield in hydroponics cultivation. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(5):62-67. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-62-67>.

Введение. По данным ФАО, к 2050 г. населению мира потребуется на 60% больше продовольствия, чем производится в настоящее время¹. В связи с этим все большее значение приобретают технологии закрытого вертикального земледелия с использованием систем промышленного выращивания растений и установок искусственного облучения². Первоначально концепция выращивания светокультуры разрабатывалась для изучения влияния на рост и развитие растений факторов окружающей среды [1].

В настоящее время изучается влияние искусственного облучения в закрытых агроэкосистемах

¹ FAO. The future of food and agriculture – drivers and triggers for transformation. *The Future of Food and Agriculture*. 2022. № 3. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc0959en>.

² Kozai T., Niu G., Takagaki M. *Plant Factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Second edition. Academic press. 2020. 516 p. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00969-X>.

на изменение морфофизиологических признаков, накопление биологически активных веществ в растениях, определяется их роль в получении функциональных продуктов питания [2]. Повышение урожайности и качества растений достигается путём сочетания достижений в области контроля окружающей среды, физиологии и автоматизированных систем, позволяющих выращивать разнообразный сортимент культур с оптимальным размером с акцентом на потребительских свойствах.

На сегодняшний день не существует альтернативы экспериментальному методу оптимизации основных светотехнических параметров облучателей для светокультуры растений [3]. Реализация дополнительных возможностей применения светодиодных систем в светокультуре связана с созданием облучателей с регулируемым спектром и интенсивностью с использованием модулей удалённого управления, которое

также может осуществляться с помощью климатического компьютера с поддержкой DALI. Это позволит корректировать спектральный состав излучения для стимулирования необходимых морфогенетических или биохимических реакций [4].

При выращивании растений на фабрике со светокulturой, с использованием метода гидропоники, оптимальным вариантом является технология Ebb&Flow (технология периодического затопления)³. Однако эффективность её применения определяется правильно подобранным циклом орошения и рациональным расположением отдельных элементов и частей. Управление гидропонным питательным раствором способствует получению низкокалорийных овощей, а также овощей с низким содержанием нитратов [5].

Цель исследований: определение роли различных спектров светодиодного излучения на показатели роста, развития и урожайности салата, выращиваемого методом гидропоники, с целью разработки требований к конструкции светодиодного облучателя.

Материалы и методы. Исследования проводились в вегетационной установке, содержащей три камеры для выращивания, в каждой из которых установлены светодиодные облучатели соизмеримой мощности, порядка 100 Вт, при обеспечении облученности $PPFD = 150 \pm 10\%$ мкмоль/(м²·с) и коэффициенте минимальной облученности $z \approx 0,8$. Моделирование производилось в программе DIALux evo. Подробная методика проведения эксперимента в указанной установке изложена в источнике [6]. Описание системы автоматизированного управления представлено в работе [7]. Настройка оборудования осуществлялась

с учётом требований температурно-влажностного режима и режима облучения, применяемых при выращивании салата.

Согласно плану эксперимента вегетационная установка обеспечивалась тремя типами облучателей:

1 камера – облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектрального распределения относительной фотосинтетической активности солнечного излучения (контроль)⁴, с распределением в отдельных областях ФАР: синяя (с) – 33%, зеленая (з) – 33%, красная (к) – 33%;

2 камера – облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектральной чувствительности растений по К.И. McCree, используемой в мировой практике в качестве универсальной кривой (опыт 1) [8]: с – 20%, з – 30%, к – 50%;

3 камера – облучатель с регулируемым спектром по трём каналам управления для трёх участков спектра (опыт 2), совпадающим с функциями синтеза хлорофилла А и В (опыт 2)⁵. Данный облучатель включается по сценарию: «Рассвет» (с – 70%, з – 10%, к – 20%), продолжительность – 2 ч; «День» (с – 10%, з – 10%, к – 80%) – 13 ч; «Закат» (с – 50%, з – 10%, к – 40%) – 1 ч.

Светодиодный облучатель H-Light FITO 92W LED Light, установленный в первой камере, представляет собой конструкцию из алюминиевого профиля БПО-2595, с линзой из боросиликатного стекла диаметром 100 мм, резонансным источником тока на 100 Вт и LED-модулем (рис. 1).

Во второй камере установлен облучатель H-Light FITO ultra 100W-120 LED Light, габаритные размеры которого составляют 550×60×200 мм (рис. 2).

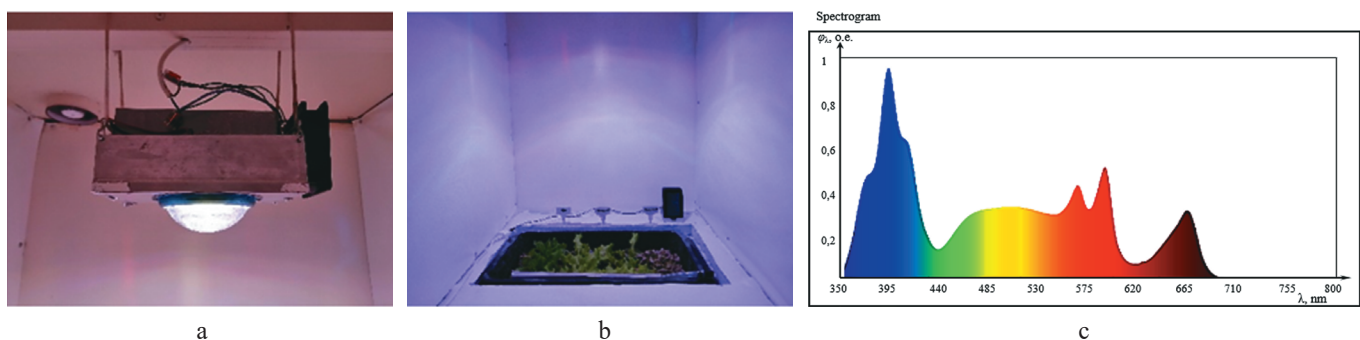


Рис. 1. Светодиодный облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектрального распределения относительной фотосинтетической активности солнечного излучения:

a) облучатель в работе; b) первая камера для выращивания; c) спектр излучения

Fig. 1. LED irradiator with radiation coinciding with the spectral distribution function of the intensity of scattered solar radiation:

a) irradiator in operation; b) growth chamber 1; c) radiation spectrum

³ Тексье У. Гидропоника для всех. Все о садоводстве на дому. М.: HydroScope, 2013. 296 с.

⁴ Professional lighting DH Licht 2023. Каталог. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dhlicht.de/wp-content/uploads/2023/06/DHLicht-Katalog-2023.pdf>.

⁵ Федулов Ю.П., Подушин Ю.В. Фотосинтез и дыхание растений: Учебное пособие. Краснодар: КубГАУ, 2019. 101 с.

Облучатель H-Light FITO_STRADA_Reg 108W (98W_{Po/P} = 0,52 LED Light), установленный в третьей камере для выращивания, содержит три канала

управления группой светодиодов. Каждый канал управляется отдельно через контроллер управления с возможностью установки заранее желаемых режимов (рис. 3).

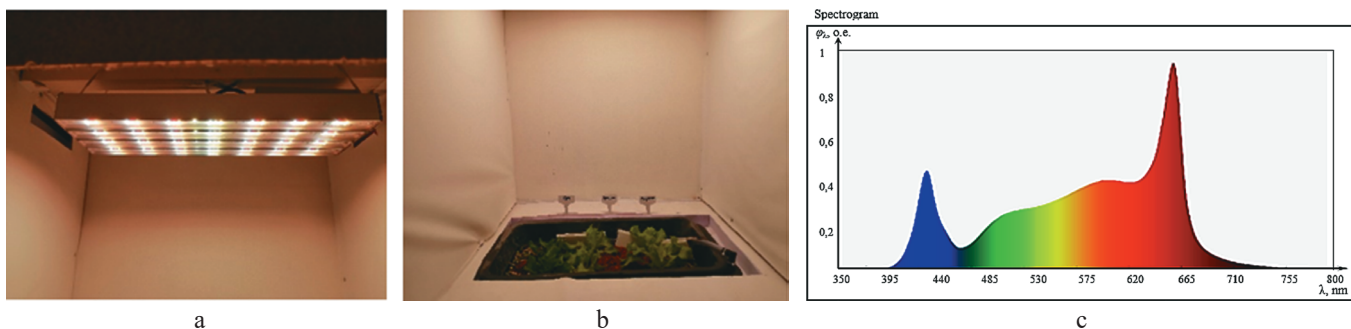


Рис. 2. Светодиодный облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектральной чувствительности растений по К.Дж. МакКри:
a) облучатель в работе; b) вторая камера для выращивания; c) спектр излучения
Fig. 2. LED irradiator with radiation coinciding with the spectral sensitivity function of plants according to K.J. McCree:
a) irradiator in operation; b) growth chamber 2; c) radiation spectrum

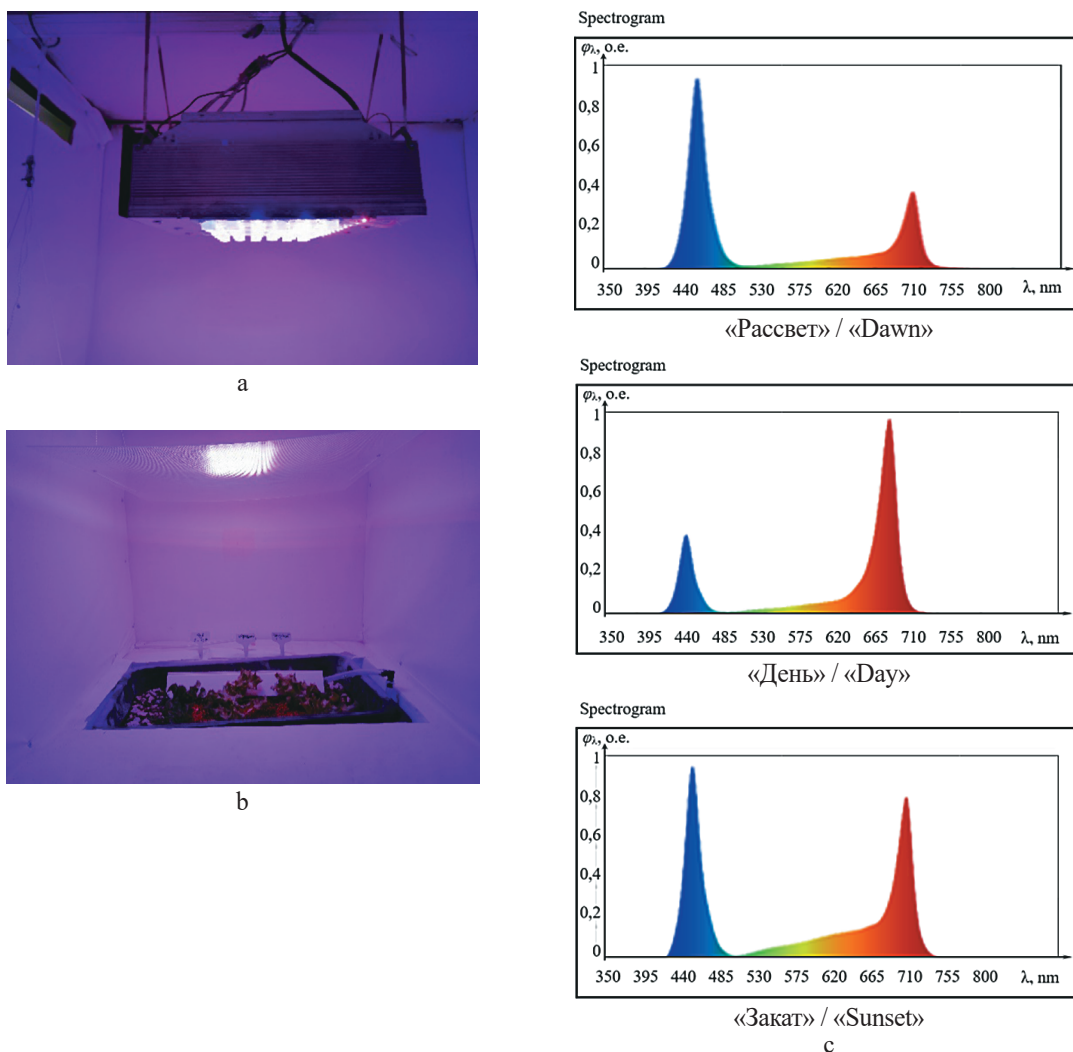


Рис. 3. Облучатель с регулируемым спектром по трём каналам:
a) облучатель в работе; b) третья камера для выращивания; c) спектр излучения
Fig. 3. Irradiator with an adjustable spectrum in three channels:
a) irradiator in operation; b) growth chamber 3; c) radiation spectrum

Эксперимент проводился с салатами трёх сортов⁶: Кук со средней заявленной урожайностью 2,6 кг/м²; Афицион – 5,8 кг/м²; Хризолит – 3,8...4,1 кг/м². Определялось влияние различных спектров светодиодного излучения на количественные показатели: рост, развитие, урожайность.

В ходе проведения эксперимента семена высаживались в рассадные горшки с торфяным субстратом по три семени в каждый, горшки размещались в камере проращивания до стадии образования розетки. После этого на каждый стеллаж для лотков с субстратом помещали по два горшка трёх сортов салата и устанавливали маркеры сортов.

Площадь листовой поверхности определялась по сортам. Применён метод определения площади листа по его параметрам⁷, основанный на сопоставлении фигуры листа с некоторой простой геометрической фигурой, достаточно хорошо совпадающей с конфигурацией данного листа⁸.

За период выращивания три раза с периодичностью в 10 дней производился замер количества листьев салата в каждом горшке и определялось среднее значение из двух растений по сортам.

Результаты и их обсуждение. К моменту уборки урожая динамика роста числа листьев по трём сортам салата в целом являлась положительной. К концу эксперимента у кочанного сорта Афицион и листового Хризолит в опытах 1 и 2 насчитывалось примерно 20 листьев, у листового салата Кук в опыте 1 насчитывались 51 лист и 42 листа в опыте 2.

Изменение площади листьев на одно растение при выращивании в условиях с различным спектром излучения имеет такую же закономерность, что и изменение среднего размера листа⁹.

Установлено, что в опыте 1 (спектр излучения совпадает с функцией спектральной чувствительности растений по К.Дж. МакКри) все три сорта салата показывают наилучший результат по средней площади листьев: Кук – 0,0629 м²; Афицион – 0,2943 м²; Хризолит – 0,3592 м².

Отметим, что регулирование спектра в течение светового дня с имитацией рассвета и заката

с помощью облучателя, установленного в камере для выращивания 3, ухудшает показатель средней площади листьев салата рассматриваемых сортов.

Анализируя урожайность салата по сортам, можно сказать, что у Кука наивысшая урожайность составила около 4,45 кг/м² в контроле, что на 12,5% больше, чем в опыте 1, и на 27,5% больше, чем в опыте 2; у Афициона – примерно 4,7 кг/м² в опытах 1 и 2, что на 20,5% больше, чем в контроле; у Хризолита – примерно 6,55 кг/м² в опыте 1, что на 27,5% больше, чем в опыте 2, и на 32% больше, чем в контроле.

С увеличением доли излучения в красной области спектра с 33 до 60% урожайность салата сорта Кук снижается с 4,45 до 3,2 кг/м², но остается выше средней нормируемой на 23% даже при минимальной, полученной в опыте.

Салат сорта Хризолит показал рост урожайности от 4,46 до 6,55 кг/м² со снижением доли излучения в синей области спектра с 33 до 20%. Однако даже минимальный урожай оказался выше среднего нормируемого от 15 до 8%.

Урожайность сорта Афицион снижается с 4,7 до 3,8 кг/м² при увеличении доли излучения в синей области спектра с 20 до 33%, причём максимальный полученный урожай ниже нормируемого на 19%.

Таким образом, установлено, что реакция различных сортов салата на спектральный состав излучения является специфичной. Положительный результат показывает как регулируемый, так и стандартный постоянный спектры излучения. Поэтому был разработан светодиодный облучатель (рис. 4), совмещающий в себе все достоинства светодиодных и цифровых технологий и позволяющий реализовывать требуемые функции излучения для лабораторных

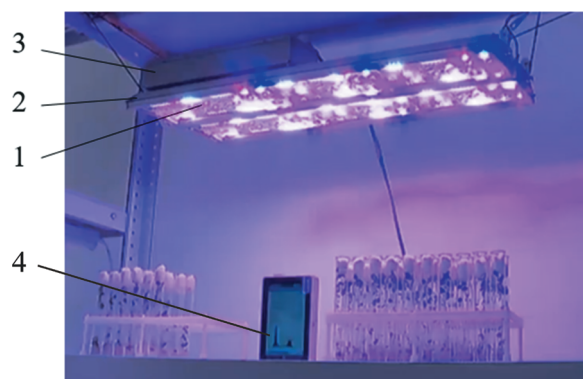


Рис. 4. Светодиодный облучатель с регулируемым спектром излучения:
1 – матрицы со светодиодами; 2 – корпус;
3 – блок питания и управления;
4 – спектрометр PAR OHSP350P

Fig. 4. LED irradiator with a variable emission spectrum:
1 – matrices with LEDs; 2 – housing;
3 – power and control unit; 4 – PAR OHSP350P spectrometer

⁶ Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. Сорта растений: Официальное издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. 719 с.

⁷ Третьяков Н.Н., Карнаухова Т.В., Паничкин Л.А. и др. Практикум по физиологии растений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с. EDN: WCUGTZ

⁸ Математические методы определения площади листьев растений. URL: <http://pandia.ru/text/80/145/48877.php> (дата обращения: 12.01.2023).

⁹ Маракаев О.А. Экологическая физиология растений: фотосинтез и свет: Текст лекций. Ярославль: ЯрГУ, 2005. 95 с. EDN: QKQAYZ.

исследований, в том числе при выращивании растений in-vitro.

В конструкцию разработанного светодиодного облучателя входят корпус со светодиодными модулями, блок питания, блок управления, линзы-рассеиватели. В составе каждого светодиодного модуля находятся светодиоды фиолетового, синего, красного, темно-красного и дальнего красного излучений, а также светодиоды теплого и холодного белого света. Блок управления соединяется проводами с драйвером питания, посредством кабеля – с каждым светодиодным модулем, а через проводной интерфейс связи (и/или беспроводной Wi-Fi модуль) подключён к человеку-машинному интерфейсу.

Список использованных источников

1. Cary A. Mitchell History of Controlled Environment Horticulture: Indoor Farming and Its Key Technologies. *HortScience*. 2022;57(2):247-256. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16159-21>
2. Князева И.В. Искусственное освещение для получения функциональных продуктов питания // Вестник КрасГАУ. 2020. № 12 (165). С. 25-31. EDN: ОЕРППИ
3. Тихомиров А.А. Внутренний радиационный режим в фитоденосах и фотобиологическая эффективность излучения в условиях светокультуры // Светотехника. 2021. № 1-1. С. 13-21. EDN: YRLBZB.
4. Тихомиров А.А., Ушакова С.А., Шихов В.Н., Шклавцова Е.С. Концептуальные подходы к выбору спектра излучения ламп для выращивания растений в искусственных условиях // Светотехника. 2019. № 8. С. 19-23. EDN: NJIQCE
5. Nicole C.C.S., Mooren J., Stuks A., Krijn M.P.C.M. Nitrate control using LED lights. *Acta Horticulturae*. 2018;1227:661-668. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.84>
6. Трепуз С.В. Методика проведения эксперимента по выращиванию салата в светокультуре по гидропонной технологии // Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы XV Международной научно-практической конференции молодых ученых. Красноярск, 2022. С. 567-570. EDN: WCWZSA
7. Трепуз С.В., Долгих П.П., Барсуков В.А. Система автоматизированного управления фитотроном со светокультурой и гидропонной технологией // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 2. С. 143-149. EDN: KWZMAE
8. McCree K.J. Significance of Enhancement for Calculations Based on the Action Spectrum for Photosynthesis. *Plant Physiology*. 1972; № 49 (5):704-706. <https://doi.org/10.1104/pp.49.5.704>

Вклад авторов

П.П. Долгих – формулирование основной концепции исследования, подготовка текста статьи;
С.В. Трепуз – проведение экспериментов, анализ и дополнение текста статьи;
Н.М. Попова – сбор и обработка материалов, анализ полученных результатов.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 27.02.2023; после рецензирования и доработки 14.07.2023; принята к публикации 14.07.2023

Выводы

1. Спектральные характеристики источников излучения играют важнейшую роль в процессах роста, развития растений и влияют на показатели урожайности зеленных культур.

2. Реакция различных сортов салата на спектральный состав излучения является специфичной.

3. Разработанный светодиодный облучатель, включающий в себя светодиоды фиолетового, синего, красного, темно-красного и дальнего красного излучений, а также светодиоды теплого и холодного белого света, совмещает достоинства светодиодных и цифровых технологий.

References

1. Cary A. Mitchell History of Controlled Environment Horticulture: Indoor Farming and Its Key Technologies. *HortScience*. 2022;57(2):247-256. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16159-21>
2. Knyazeva I.V. Use of artificial lighting in functional food production. *Bulletin of KSAU*. 2020;12(165):25-31. (In Rus.)
3. Tikhomirov A.A. Internal radiation mode in phytocenoses and photobiological efficiency of radiation under photoculture conditions. *Svetotekhnika*. 2021;1-1:13-21. (In Rus.)
4. Tikhomirov A.A., Ushakova S.A., Shikhov V.N., Shkavltsova E.S. Conceptual approach to selecting radiation spectrum of lamps for plant cultivation in artificial conditions. *Svetotekhnika*. 2019;8:19-23. (In Rus.)
5. Nicole C.C.S., Mooren J., Stuks A., Krijn M.P.C.M. Nitrate control using LED lights. *Acta Horticulturae*. 2018;1227:661-668. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.84>
6. Trepuz S.V. Methodology of the experiment on growing lettuce in photoculture using the hydroponic technology. *Innovatsionnye tendentsii razvitiya rossiyskoy nauki. Materialy XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh*. Krasnoyarsk. 2022;567-570. (In Rus.)
7. Trepuz S.V., Dolgikh P.P., Barsukov V.A. Automated control system of phytotron with photoculture and the hydroponics technology. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2022;2:143-149. (In Rus.)
8. McCree K.J. Significance of Enhancement for Calculations Based on the Action Spectrum for Photosynthesis. *Plant Physiology*. 1972; № 49 (5):704-706. <https://doi.org/10.1104/pp.49.5.704>

Contribution of the authors

P.P. Dolgikh – conceptualization, draft preparation;
S.V. Trepuz – investigation, formal analysis and draft finalizing;
N.M. Popova – collecting and processing materials, formal analysis.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 27.02.2023; revised 14.07.2023; accepted 14.07.2023