



Создание циклоадаптивного режима освещения для увеличения урожайности *Lactuca sativa* L.

М. М. Дегтерева, Е. Левин, А. Э. Дегтерев,
И. А. Ламкин, С. А. Тарасов
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

В связи с необходимостью повышения урожайности растений и снижения энергопотребления источников излучения, мы вводим концепцию циклоадаптивного фоторежима (ЦАФР), который адаптируется к подстадиям (этапам) развития растений, динамически изменяет параметры освещения для оптимизации их роста и развития и способствует увеличению синтеза фотосинтетических пигментов. По результатам оценки влияния спектрального состава светодиодных устройств на развитие *Lactuca sativa* L. было определено, что светоизлучающее устройство, основанное на автоматизированном изменении спектрального состава излучения и плотности фотосинтетического фотонного потока в зависимости от этапа развития растения в соответствии с циклоадаптивной методикой освещения, приводит к увеличению урожайности культуры *Lactuca sativa* L. в 2 раза, а также снижению количества использованной воды, необходимой для образования 1 г сухого вещества, в 2,5 раза по сравнению с естественным освещением.

Ключевые слова: светодиод, спектральная характеристика, циклоадаптивный фоторежим, фотосинтетически активная радиация, плотность фотосинтетического фотонного потока, эффективность использования электроэнергии, урожайность, *Lactuca sativa* L.

Статья получена: 07.11.2024

Статья принята: 21.11.2024

Development of the Cycloadaptive Lighting Mode to Increase the *Lactuca sativa* L. Yield

M. M. Degtereva, Y. Levin, A. E. Degterev,
I. A. Lamkin, S. A. Tarasov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint Petersburg, Russia

In order to increase plant yield and reduce radiation sources energy consumption, we introduce the concept of the cycloadaptive photomode (CAPM), which adapts to the plant development substages (steps), dynamically changes lighting parameters to optimize their growth and development, and promotes increased photosynthetic pigments synthesis. Based on the results of assessing the spectral composition of LED devices effect on the *Lactuca sativa* L. development, it was determined that the light-emitting device based on the automated change in the spectral composition of radiation and the photosynthetic photon flux depending density on the stage of plant development in accordance with the cycloadaptive lighting mode leads to increase *Lactuca sativa* L. yield by 2 times, as well as a decrease in the amount of water used to form 1 g of dry matter by 2.5 times compared to natural lighting.

Keywords: light-emitting diode, spectral characteristic, cycloadaptive photomode, photosynthetically active radiation, photosynthetic photon flux density, energy efficiency, crop yield, *Lactuca sativa* L.

Article received: 07.11.2024

Article accepted: 21.11.2024



ВВЕДЕНИЕ

Светоизлучающие структуры на основе полупроводниковых соединений и их твердых растворов активно используются в устройствах искусственного освещения растений благодаря возможности генерации излучения во всем видимом диапазоне, а также высокому КПД и малому энергопотреблению [1]. Роль спектрального качества света в удовлетворении специфических потребностей на различных стадиях развития растений (прорастание, вегетация и цветение) остается недостаточно определенной и исследованной [2]. Для обеспечения эффективного развития растений необходимо отслеживать множество параметров, таких как энергия прорастания, образование листьев, длина корней и гипокотыля, площадь листьев, уровень стресса растений и ряд других факторов.

На сегодняшний день существует динамическое освещение [3–6], которое регулирует интенсивность света, длину волны и фотопериод и направлено на имитацию условий естественного освещения (ЕС) в течение основных стадий роста растений (прорастание, вегетация и цветение) без учета особенностей изменения биометрических параметров развития. Для достижения высоких показателей урожайности растений и улучшения потребительских свойств, а также для снижения энергопотребления источников излучения мы предлагаем использовать циклоадаптивный режим освещения, который учитывает подстадии традиционных фаз развития. Циклоадаптивный фоторежим – это режим освещения, который адаптируется в зависимости от цикла и подстадии развития растения и осуществляет динамическое изменение плотности фотосинтетического потока фотонов, соотношения длин волн и длительности освещения в зависимости от текущего этапа развития растения. Термин «циклоадаптивный» относится к методу освещения, адаптированному к биологическим циклам развития растений, что позволяет улучшить рост и развитие растений на разных этапах культивирования, увеличивая их урожайность и фитохимический состав. В свете активного развития агропромышленного комплекса возникает необходимость создания светодиодных облучателей, обладающих более высокой эффективностью по сравнению с традиционными источниками освещения в тепличной промышленности, для повышения урожайности сельскохозяйственных растений [7–10]. Целью работы является создание циклоадаптивного режима освещения для увеличения урожайности *Lactuca sativa* L.

INTRODUCTION

Light-emitting structures based on semiconductor compounds and their solid solutions are actively used in artificial plant lighting devices due to the ability to generate radiation in the entire visible range, as well as high efficiency and low energy consumption [1]. The role of light spectral quality in satisfying the peculiar manifestations at various stages of plant development (germination, vegetation and flowering) remains insufficient and research [2]. To ensure effective plant development, it is necessary to take into account many parameters, such as germination energy, leaf formation, root and hypocotyl length, leaf area, plant stress level and a number of other factors.

Today, there is dynamic lighting [3–6] that regulates light intensity, wavelength, and photoperiod and is aimed at simulating natural lighting (NL) conditions during the main stages of plant growth (germination, vegetation, and flowering) without taking into account the peculiarities of changes in biometric development parameters. To achieve high plant yields and improve consumer properties, as well as to reduce the radiation sources energy consumption, we propose using the cycloadaptive lighting mode that takes into account the sub-stages of traditional development phases.

Cycloadaptive photomode is a lighting mode that adapts depending on the cycle and substage of plant development and dynamically changes the photosynthetic photon flux density, the wavelengths ratio and the illumination depending duration on the plant development current stage. The term “cycloadaptive” refers to a lighting method adapted to the plant development biological cycles, which improves the growth and plants development at different stages of cultivation, increasing their yield and phytochemical composition. In the light of the rapid development of the agro-industrial complex, there is a need to create LED irradiators with higher efficiency compared to traditional lighting sources in the greenhouse industry to increase the agricultural plants yield [7–10]. The aim of the work is to create the cycloadaptive lighting mode to increase the *Lactuca sativa* L. yield.

MATERIALS AND METHODS

To assess the plant lighting efficiency at development different stages when creating universal light-emitting devices that are effective for plant growth, we proposed a study of changes in the biometric parameters of agricultural crop development during the vegetation cycle. The *Lactuca sativa* L. seed germination installation consists of 63 boxes (9×9 cm). As the study part of the LED light sources effect on the *Lactuca sativa* L. variety “Vyuga” growth, 15 experimental light-emitting devices



МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки эффективности освещения растений на разных стадиях развития при создании эффективных для роста растений универсальных светоизлучающих устройств нами предложено исследование изменения биометрических параметров развития сельскохозяйственных культур в течение вегетационного цикла. Установка для проращивания семян *Lactuca sativa* L. состоит из 63 боксов (9×9 см). В рамках исследования воздействия светодиодных источников света на рост *Lactuca sativa* L. сортообразец «Вьюга» было разработано 15 экспериментальных светоизлучающих устройств на основе светодиодов 445 нм (с) и 660 нм (к) с различным спектральным составом излучения (100с, 75с/25к, 50с/50к, 25с/75к, 100к) и значением плотности фотосинтетического фотонного потока (PPFD) 100, 200 и 300 мкмоль·м⁻²·с⁻¹.

Семена *Lactuca sativa* L. высаживались в чашки Петри на фильтровальную бумагу для удержания влаги. Фотопериод в камере для проращивания составлял 14/10 часов (день/ночь) с 8:00 утра до 22:00 вечера. Полив семян в первые 10 дней проращивания осуществлялся два раза в день по 5 мл при температуре 15 °С, в дальнейшем был увеличен до 15 мл. Температура поддерживалась в диапазоне от 19 °С до 21 °С. Все эксперименты проводились в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ-12038-84.

Для эксперимента было отобрано 1980 растений, из них сформированы 22 группы по 30 растений при трех повторностях и помещены в разные условия освещенности. Параметры развития анализировали отдельно для каждого растения. Статистическое программное обеспечение использовалось для всех статистических анализов при уровне достоверности $p=0,05$. Данные оценивали на предмет их нормальности с использованием теста Шапиро-Уилка и впоследствии подвергали однофакторному дисперсионному анализу (ANOVA) с последующим апостериорным тестом Тьюки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В течение вегетационного периода мы определяли следующие параметры роста экспериментальных образцов: энергия прорастания, %; появление семядольных листьев, %; измерение спектров флуоресценции хлорофилла; средняя длина корня и гипокотыля, см; появление первого и последующих листьев, %; стресс растений; площадь листьев, см²; масса листовой части, г; масса сухого вещества (листовая часть), г; урожайность, кг/м²; транс-

were developed based on 445 nm (b) and 660 nm (r) LEDs with different spectral compositions of radiation (100b, 75b/25r, 50b/50r, 25b/75r, 100r) and photosynthetic photon flux density (PPFD) values of 100, 200 and 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Lactuca sativa L. seeds were planted in Petri dishes on filter paper to retain moisture. The photoperiod in the germination chamber was 14/10 hours (day/night) from 8:00 am to 10:00 pm. Seeds watering in the first 10 days of germination was carried out twice a day with 5 ml at a temperature of 15 °C, later it was increased to 15 ml. The temperature was maintained in the range from 19 °C to 21 °C. All experiments were carried out in accordance with the GOST-12038-84 standard requirements.

A total of 1980 plants were selected for the experiment, of which 22 groups of 30 plants were formed with three replicates and placed under different lighting conditions. Developmental parameters were analyzed separately for each plant. Statistical software was used for all statistical analyses at a significance level of $p=0.05$. Data were assessed for normality using the Shapiro-Wilk test and subsequently subjected to one-way analysis of variance (ANOVA) followed by a post hoc Tukey test.

RESULTS AND DISCUSSION

During the growing, we determined the following experimental samples growth parameters: germination energy, %; cotyledon leaves emergence, %; chlorophyll fluorescence spectra measurement; average root and hypocotyl length, cm; the first and subsequent leaves emergence, %; plant stress; leaf area, cm²; leaf part weight, g; dry matter weight (leaf part), g; yield, kg/m²; transpiration coefficient; chlorophylls *a* and *b*, carotenoids content.

Seeds germinated under HPS lighting were used as a control group (three boxes of 30 seeds), since the samples grown under GOST conditions showed low results. After the germination period was complete, the seedlings were transplanted into the soil. The full growth cycle in this study was 35 days.

Based on the study results, the most effective lighting modes of the universal light-emitting device at different *Lactuca sativa* L. development stages were determined. Based on the data obtained, the cycloadaptive photomode program was developed, which is given in Table.

At step 1 of germination, 50b/50r lighting mode is actively absorbed by plant photoreceptors. A high PPFD value is not required for activation, otherwise abscisic acid (ABA) is formed, which slows down seed germination. At step 2 of germination, the best growth stimulation was observed under natural sunlight (5.8 times higher than HPS). When moving to the stage of cotyledon leaves active emergence and photosynthetic pig-



пирационный коэффициент; содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов.

Семена, проращиваемые в условиях освещения ДНаТ, использовались в качестве контрольной группы (три бокса по 30 семян), поскольку образцы, культивируемые в условиях ГОСТ, показали низкие результаты. После завершения периода прорастания, ростки пересаживались в грунт. Полный цикл роста в данном исследовании составил 35 дней.

По результатам исследования были определены наиболее эффективные режимы освещения универсального светоизлучающего устройства на разных этапах развития *Lactuca sativa* L. Исходя из полученных данных, была разработана программа циклоадаптивного фоторежима, приведенная в таблице.

На этапе 1 прорастания излучение 50с/50к активно поглощается фоторецепторами растений. Для активации не требуется большое значение PPFД, иначе происходит образование абсцизовой кислоты (АБК), что приводит к замедлению прорастания семян. На этапе 2 прорастания наилучшая стимуляция роста наблюдалась в условиях

ments synthesis, more light is required, otherwise cell elongation and plant extension occur, which leads to the stem high fragility. At step 3 of germination, 100b lighting mode with a high PPFД value leads to the delay in plant extension, which contributes to an increase in leaf area. Increasing the blue light proportion reduces plant growth, but increases the chloroplasts number and the photosynthesis efficiency. At step 1 of vegetation, plants enter the active growth stage, requiring a high PPFД value. The 50b/50r lighting mode stimulates the chlorophylls and carotenoids synthesis, which leads to an increase in the photosynthesis rate. At step 2 of vegetation, a high PPFД value begins to cause plant stress, which leads to the reactive oxygen species (ROS) formation, which cause lipid peroxidation in cell membranes and lead to a decrease in the photosynthesis activity. A high proportion of UV, B and G light promotes the econdary metabolites formation, which reduce ROS. Far red (FR) light increases the photosynthetic apparatus size. At step 3 of vegetation, after the ROS formation has decreased, the phytoirradiator is switched to the 50b/50r lighting mode to reduce energy consumption. At step 4 of vegetation, a decrease in the PPFД value and an increase in the red light 25b/75r

Таблица. Характеристики циклоадаптивного фоторежима

Стадия развития	Прорастание			Веgetация			
Подстадия (этап)	Этап 1	Этап 2	Этап 3	Этап 1	Этап 2	Этап 3	Этап 4
Период, дни	1–2	2–3	3–5	5–8	8–14	14–21	21–35
PPFD, мкмоль·м ⁻² ·с ⁻¹	100	200	300	300	200	100	100
Режим освещения	50с/50к	4%УФ+ 32%С+ 35%З+ 28%К+ 1%ДК	100с	50с/50к	4%УФ+ 32%С+ 35%З+ 28%К+ 1%ДК	50с/50к	25с/75к

Table 1. Cycloadaptive photomode characteristics

Plant development stage	Germination			Vegetation			
Substage (step)	Step1	Step 2	Step 3	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
Period, days	1–2	2–3	3–5	5–8	8–14	14–21	21–35
PPFD, μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	100	200	300	300	200	100	100
Lighting mode	50b/50r	4%UV+ 32%B+ 35%G+ 28%R+ 1%FR	100b	50b/50r	4%UV+ 32%B+ 35%G+ 28%R+ 1%FR	50b/50r	25b/75r



естественного солнечного освещения (в 5,8 раза превышает ДНАТ). При переходе к этапу активного выхода семядольных листьев и синтезу фотосинтетических пигментов требуется больше света, иначе происходит растяжение клеток и вытягивание растений, что приводит к высокой хрупкости стебля. На этапе 3 прорастания излучение 100с при большом значении PPFD приводит к задержке вытягивания растений, что способствует увеличению площади листьев. Увеличение доли синего света снижает рост растений, но увеличивает количество хлоропластов и эффективность фотосинтеза. На этапе 1 вегетации растения переходят к стадии активного роста, требуется высокое значение PPFD. Режим 50с/50к стимулирует синтез хлорофиллов и каротиноидов, что приводит к увеличению скорости фотосинтеза. На этапе 2 вегетации высокое значение PPFD начинает вызывать стресс растений, что приводит к образованию активных форм кислорода (АФК), которые вызывают перекисное окисление липидов в клеточных мембранах и приводят к снижению активности фотосинтеза. Высокая доля УФ, С и З света способствует образованию вторичных метаболитов, которые снижают АФК. Дальний красный свет увеличивает размер фотосинтетического аппарата. На этапе 3 вегетации после снижения образования АФК для уменьшения энергопотребления фитооблучатель переводится в режим освещения 50с/50к. На этапе 4 вегетации снижение значения PPFD и увеличение доли красного света 25с/75к вызывает накопление фотосинтетических пигментов, что способствует снижению влияния стрессов и накоплению биомассы.

Для оценки эффективности работы циклоадаптивного фоторежима мы разработали светоизлучающее устройство, состоящее из трех основных частей: светоизлучающего модуля, модуля электроники, содержащего методики стимуляции повышения урожайности растений, и корпуса пробора. Светоизлучающий модуль включает ультрафиолетовые (УФ) светодиоды 370 нм с шириной спектральной линии 8 нм, определяемой как разность длин волн, соответствующих половинному уровню от максимальной интенсивности излучения измеряемого источника ($\Delta\lambda_{0,5}$), способные вызывать изменения в степени активности различных гормонов и ферментов растений, вследствие чего изменяются алгоритмы синтеза пигментов и алгоритм протекания фотосинтеза [11]; синие светодиоды 445 нм ($\Delta\lambda_{0,5}$ 19 нм), предназначенные для инициации синтеза хлорофилла у растений и способствующие увеличению толщины листьев; зеленые светодиоды

proportion causes the photosynthetic pigments accumulation, which helps to reduce the stress impact and accumulate biomass.

To evaluate the cycloadaptive photomode efficiency, we developed the light-emitting device consisting of three main parts: the light-emitting module, the electronics module containing methods for stimulating the increase in plant yield, and the appliance case. The light-emitting module includes ultraviolet LEDs 370 nm with the spectral line width of 8 nm, defined as the wavelengths difference corresponding to half the maximum radiation intensity of the measured source ($\Delta\lambda_{0,5}$), capable of causing changes in the various plant hormones activity and enzymes, as a result of which the pigment synthesis algorithms and the photosynthesis algorithm change [11]; blue LEDs 445 nm ($\Delta\lambda_{0,5}$ 19 nm), designed to initiate chlorophyll synthesis in plants and contribute to an increase in leaf thickness; green LEDs 525 nm ($\Delta\lambda_{0,5}$ 35 nm), which have an effect on stimulating photosynthesis in shaded leaves [12]; red LEDs 660 nm ($\Delta\lambda_{0,5}$ 20 nm), which promote plants vegetative growth, phytochrome activation, increase in fresh and dry weight, stem elongation and leaf growth in many plant species; far red (FR) LEDs 730 nm ($\Delta\lambda_{0,5}$ 36 nm), which in combination with 660 nm LEDs allow for the photomorphogenic effects regulation associated with the phytochromes stimulation [13]. The study of the electrical and spectral-energy LEDs characteristics (Epistar, Taiwan) used in the light-emitting device was conducted (Figure 1).

For efficient light-emitting device operation with CAPM, the photosynthetic photon flux density should be at least $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The spectral composition of the radiation and the PPFD level were measured using a Spectral PAR PG200N spectrometer at the 19 cm plant height (Figure 2).

The light-emitting device photosynthetic photon flux was measured using the fast-scanning USB4000-UV-VIS spectrometer (USA) connected via the fiber-optic cable to the AvaSphere integrating sphere (Netherlands), which is a hollow sphere with an inner part coated with fluoroplastic with high reflective and scattering properties [14]. The luminous flux absolute value for calibrating the LED emitters was measured using the LS-1-CAL-IN reference lamp (USA) with the reliably known luminous efficiency and spectral composition of the radiation, AvaSphere integrating sphere (Netherlands), USB4000-UV-VIS spectrometer (USA), and the P600-2-VIS-NIR optical fiber (USA). The LED current values, voltage, and power readings were also recorded. All measurements were carried out at the stable temperature of 25 °C and the humidity of 70%. The photosynthetic photon flux calculation was carried out according to [15]. The integration limits of



525 нм ($\Delta\lambda_{0,5}$ 35 нм), оказывающие влияние на стимулирование фотосинтеза затененных листьев [12]; красные светодиоды 660 нм ($\Delta\lambda_{0,5}$ 20 нм), способствующие вегетативному росту растений, активации фитохрома, увеличению веса в свежем и сухом виде, удлинению стебля и разрастанию листьев у многих видов растений; дальние красные (ДК) светодиоды 730 нм ($\Delta\lambda_{0,5}$ 36 нм), которые в сочетании со светодиодами 660 нм позволяют регулировать фотоморфогенные эффекты, связанные со стимуляцией фитохромов [13]. Было проведено исследование электрических и спектрально-энергетических характеристик светодиодов (Epistar, Тайвань), используемых в светоизлучающем устройстве (рис. 1).

Для эффективной работы светоизлучающего устройства с ЦАФР плотность фотосинтетического фотонного потока должна быть не менее $300 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Спектральный состав излу-

400–700 нм correspond to the photosynthetically active radiation range, where the light has sufficient energy to excite electrons in chlorophyll molecules and other photopigments, which is necessary to initiate photosynthetic reactions, growth and plants development.

$$F_{\text{PAR}} = \int_{400}^{700} \frac{\lambda}{h \cdot N_A \cdot c} \varphi \lambda d\lambda = \int_{400}^{700} \varphi \lambda \cdot \lambda d\lambda,$$

where F_{PAR} – the photosynthetic photon flux PPF, $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$;

λ – the wavelength, nm;

$h = 6.623 \cdot 10^{-34}$ – the Planck’s constant, J·s;

$\varphi \lambda$ – the radiation power distribution spectral density of the device (in the PAR region), $\text{W} \cdot \text{nm}^{-1}$;

$N_A = 6.022 \cdot 10^{17}$ is Avogadro’s number, μmol^{-1} ;

$c = 3 \cdot 10^{17}$ is the light speed, $\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$;

$K = 8.36 \cdot 10^{-3}$ is the coefficient, $\mu\text{mol} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$.

The developed light-emitting device efficiency was carried out according to [15].

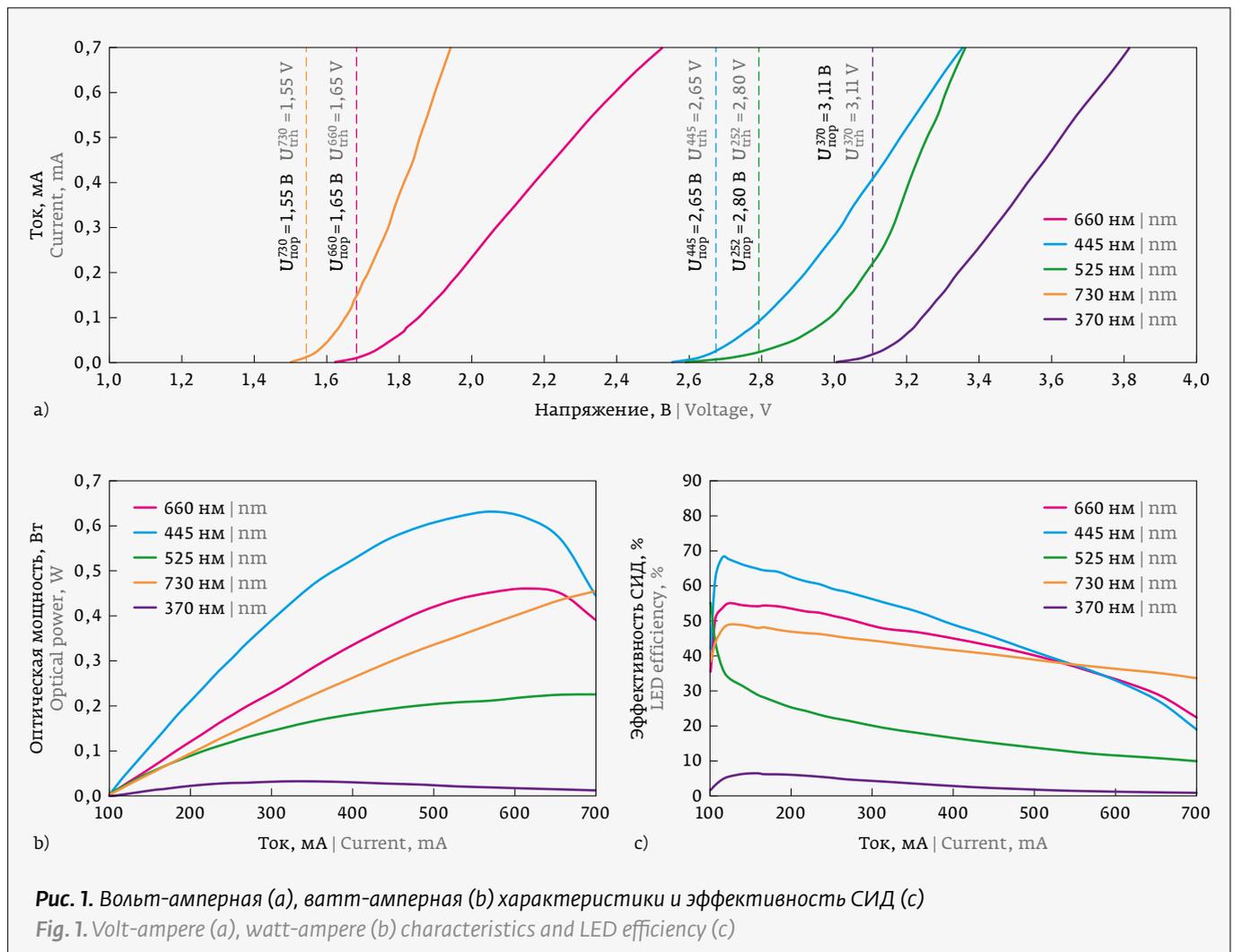


Рис. 1. Вольт-амперная (а), ватт-амперная (б) характеристики и эффективность СИД (с)
 Fig. 1. Volt-ampere (a), watt-ampere (b) characteristics and LED efficiency (c)

ния и уровень PPFD измерялись с помощью спектрометра Spectral PAR PG200N на высоте расположения растений 19 см (рис. 2).

Фотосинтетический поток фотонов светового излучающего устройства был измерен при помощи спектрометра быстрого сканирования USB4000-UV-VIS (США), соединенного через волоконно-оптический кабель с интегрирующей сферой AvaSphere (Нидерланды), которая представляет собой полую сферу, внутренняя часть которой покрыта фторопластом, обладающим высокой отражающей и рассеивающей способностью [14]. Измерение абсолютной величины светового потока для калибровки светодиодных излучателей проводилось с помощью эталонной лампы LS-1-CAL-IN (США) с достоверно известной световой отдачей и спектральным составом излучения, интегрирующей сферы AvaSphere (Нидерланды), спектрометра USB4000-UV-VIS (США) и оптического волокна P600-2-VIS-NIR (США). Также фиксировались текущие значения тока на светодиодах, показания напряжения и мощности. Все измерения проводились при стабильной температуре 25 °С и влажности 70%. Расчет фотосинтетического потока фотонов осуществлялся согласно [15]. Пределы интегрирования 400–700 нм соответствуют диапазону фотосинтетически активной радиации, где свет имеет достаточную энергию для возбуждения электронов в молекулах хлорофилла и других фотопигментов, что необходимо для запуска фотосинтетических реакций, роста и развития растений.

$$F_{\text{ФАР}} = \int_{400}^{700} \frac{\lambda}{h \cdot N_A \cdot c} \varphi \lambda d\lambda = \int_{400}^{700} \varphi \lambda \cdot \lambda d\lambda,$$

где $F_{\text{ФАР}}$ – фотосинтетический поток фотонов PPF, мкмоль·с⁻¹;
 λ – длина волны, нм;
 $h = 6,623 \cdot 10^{-34}$ – постоянная Планка, Дж·с;
 $\varphi \lambda$ – спектральная плотность распределения мощности излучения (в области ФАР), Вт·нм⁻¹;
 $N_A = 6,022 \cdot 10^{17}$ – число Авогадро, мкмоль⁻¹;
 $c = 3 \cdot 10^{17}$ – скорость света, нм·с⁻¹;
 $K = 8,36 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент, мкмоль·нм⁻¹·Дж⁻¹.
 Эффективность разработанного светоизлучающего устройства рассчитывалась согласно [15].

$$\eta_{\text{ФАР}} = \frac{F_{\text{ФАР}}}{P},$$

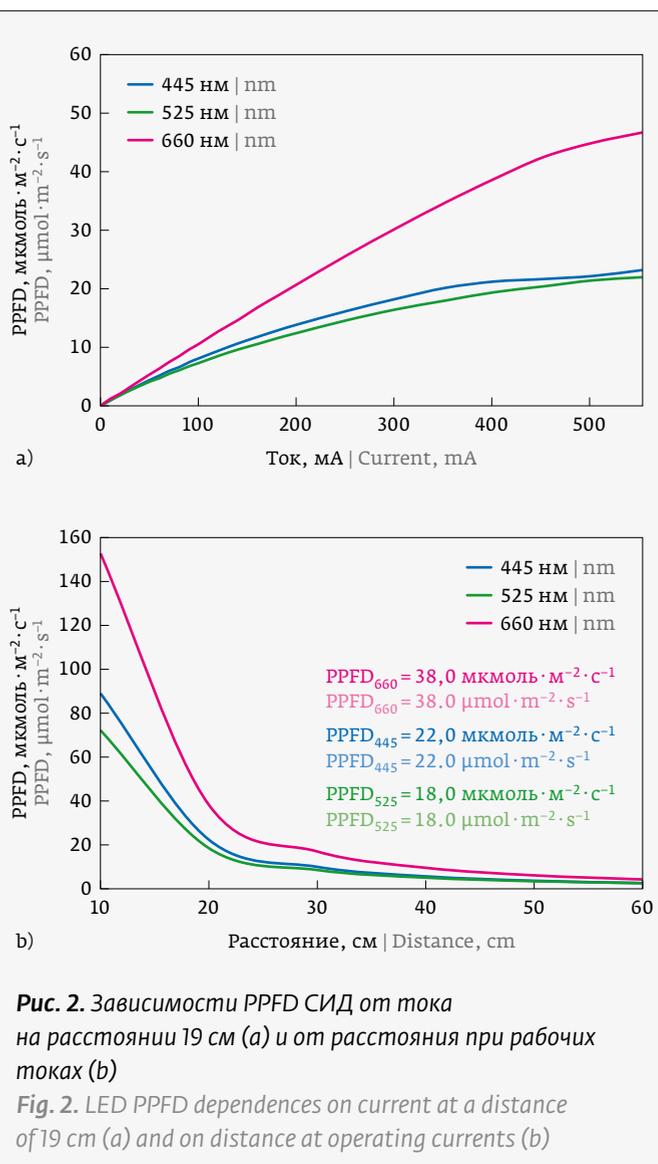
где $\eta_{\text{ФАР}}$ – эффективность в области ФАР, мкмоль·Дж⁻¹,
 $F_{\text{ФАР}}$ – фотосинтетический поток фотонов PPF, мкмоль·с⁻¹,
 P – потребляемая мощность, Вт.

$$\eta_{\text{PAR}} = \frac{F_{\text{PAR}}}{P},$$

where η_{PAR} – the efficiency in the PAR region, $\mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$;
 F_{PAR} – the photosynthetic photon flux PPF, $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$;
 P – the power consumption, W.

The device efficiency in the photosynthetically active radiation region is $2.3 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$, which is 28% higher than the efficiency in the PAR region of the traditional greenhouse radiation source – HPS. The device photosynthetic photon flux is $149.4 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ with the 65 W lamp power.

For the developed light-emitting device, we also calculated the illumination uniformity coefficient based on the PPFD value at different distances from the radiation



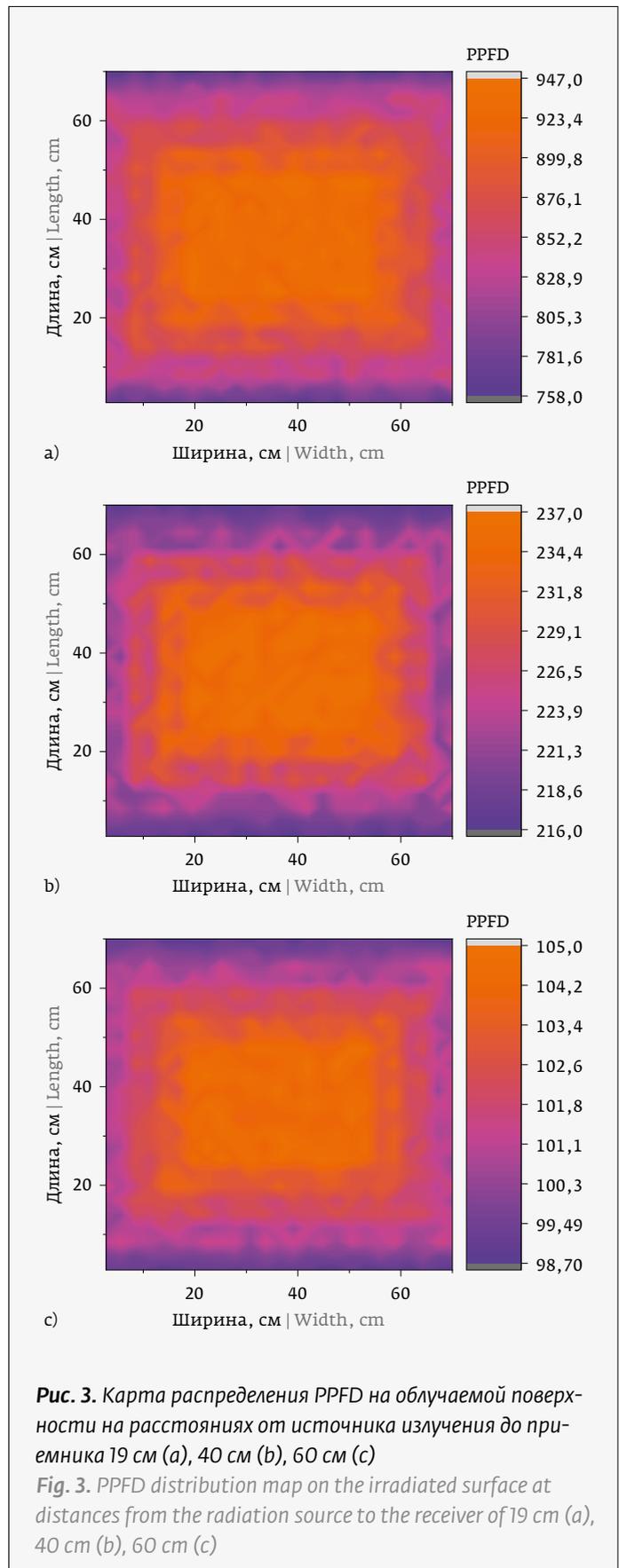
Эффективность прибора в области фотосинтетически активной радиации составляет $2,3 \text{ мкмоль} \cdot \text{Дж}^{-1}$, что на 28% превышает эффективность в области ФАР традиционного тепличного источника излучения – ДНаТ. Фотосинтетический поток фотонов устройства составляет $149,4 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$ при мощности лампы 65 Вт.

Для разработанного светоизлучающего устройства мы также рассчитывали коэффициент равномерности освещения по значению PPFD на разных расстояниях от источника излучения до приемника (рис. 3). Для расстояния 19 см коэффициент равномерности составил 0,87, для расстояния 40 см – 0,94, для расстояния 60 см – 0,96.

Программы работы устройства устанавливают оптимальные параметры светового излучения, спектрального состава, PPFD и длительности светового периода для эффективного воздействия на фоторецепторы растений, обеспечения оптимального развития, а также наилучшей морфологии сельскохозяйственных культур. Использование фитооблучателя с ЦАФР снижает затраты на электроэнергию до пяти раз по сравнению с ДНаТ благодаря возможности получения необходимых параметров пространственного распределения потока, его интенсивности и спектрального распределения в зависимости от стадии роста и вида растения.

Разработанное светоизлучающее устройство с циклоадаптивным режимом освещения позволило увеличить урожайность листовой овощной культуры *Lactuca sativa* L. в 2 раза и снизить транспирационный коэффициент в 2,5 раза по сравнению с ЕС (рис. 4). Устройство также обладает более высокой эффективностью использования электроэнергии, представляющей собой отношение выхода сырой массы растений к энергопотреблению источника излучения (в 9 раз эффективнее ДНаТ).

Помимо высокой урожайности, важной задачей является повышение содержания фотосинтетических пигментов, влияющих на скорость фотосинтеза [16]. Концентрация хлорофиллов *a* при использовании циклоадаптивного режима освещения (рис. 5) была наибольшей и превышала C_a для образцов ДНаТ на 85%, для образцов, выращенных при естественном освещении, на 55%; концентрация хлорофиллов *b* при ЦАФР больше на 64% и 92% по сравнению с ДНаТ и ЕС соответственно; концентрация каротиноидов также для ЦАФР максимальна (на 99% и 60% больше ДНаТ и ЕС соответственно).



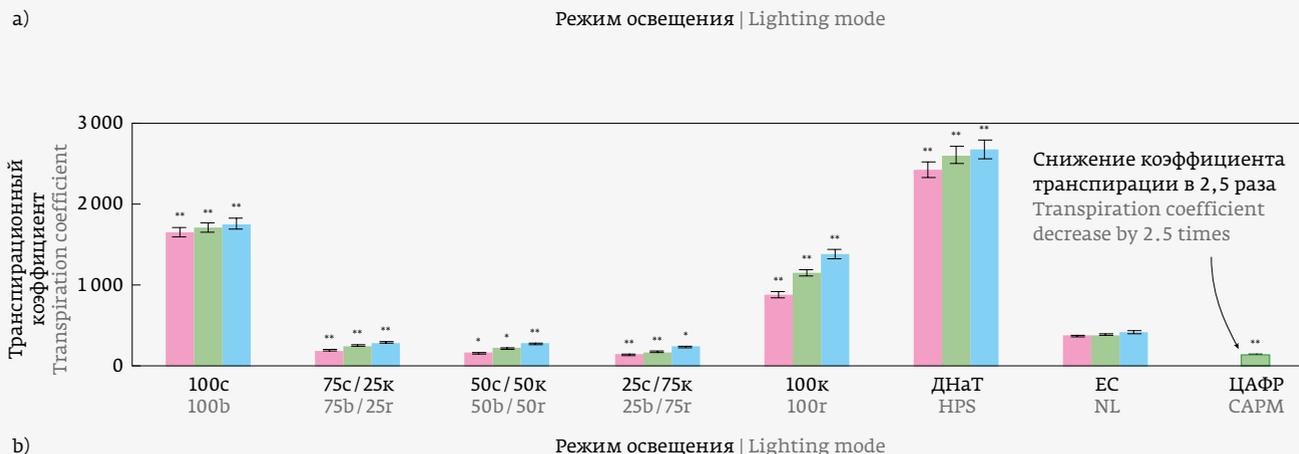
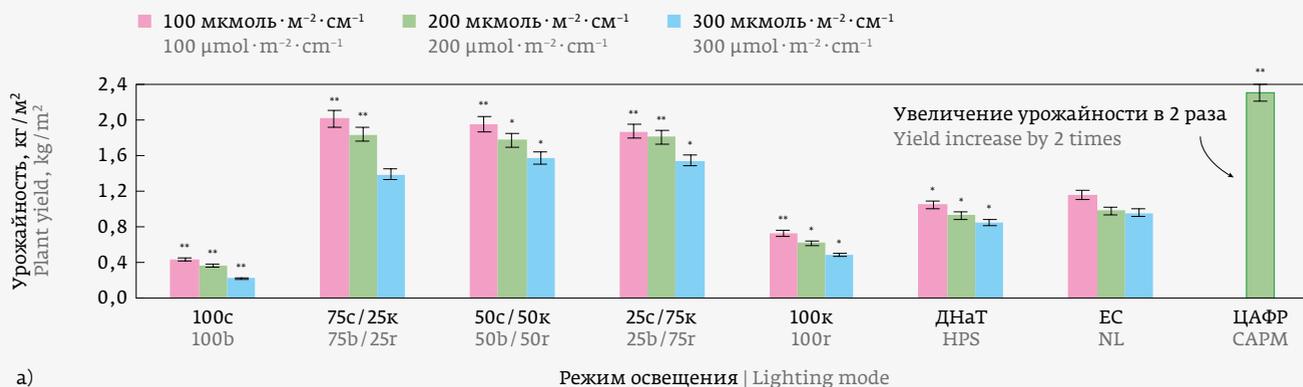


Рис. 4. Урожайность (а) и транспирационный коэффициент (б) *Lactuca sativa* L. (сорт «Вьюга») на 35-й день роста при различных параметрах освещения ($p < 0,05$). Звездочки указывают уровень значимости различий урожайности для разных источников света и естественным светом (* $p < 0,03$; ** $p < 0,001$)

Fig. 4. Plant yield (a) and transpiration coefficient (b) of *Lactuca sativa* L. (Vyuga variety) on the 35th day of growth under different lighting modes ($p < 0.05$). Asterisks indicate the level of significance of differences in yield for different light sources and natural light (* $p < 0.03$; ** $p < 0.001$)

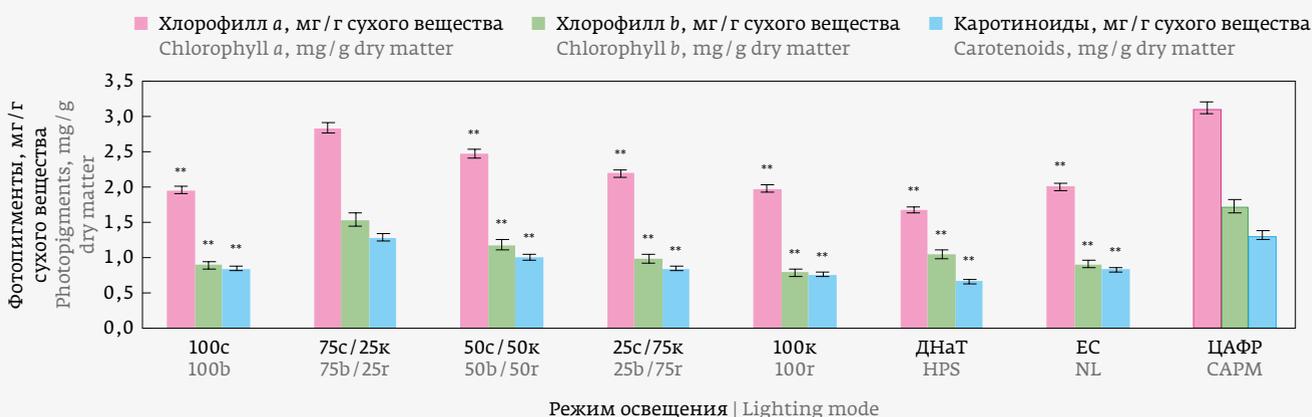


Рис. 5. Содержание хлорофилла а, хлорофилла b, общего количества каротиноидов в образцах *Lactuca sativa* L. на 35-й день (** $p < 0,001$)

Fig. 5. Chlorophyll a, chlorophyll b, total carotenoids content in *Lactuca sativa* L. samples on the 35th day (** $p < 0.001$)



На рис. 6 показано, что связь между содержанием хлорофиллов *a*, *b*, каротиноидов и урожайностью растения при PPFД 100 мкмоль·м⁻²·с⁻¹, соответствующей максимальным значениям урожайности в эксперименте, формирует линейные зависимости с коэффициентами детерминации $R^2 = 0,69$ (корреляция $r=0,833$, $p<0,05$), $R^2=0,65$ (корреляция $r=0,805$, $p<0,05$), $R^2=0,59$ (корреляция $r=0,768$, $p<0,05$) соответственно. Использование ЦАФР эффективно стимулировало биосинтез фотосинтетических пигментов, что привело к увеличению урожайности *Lactuca sativa* L.

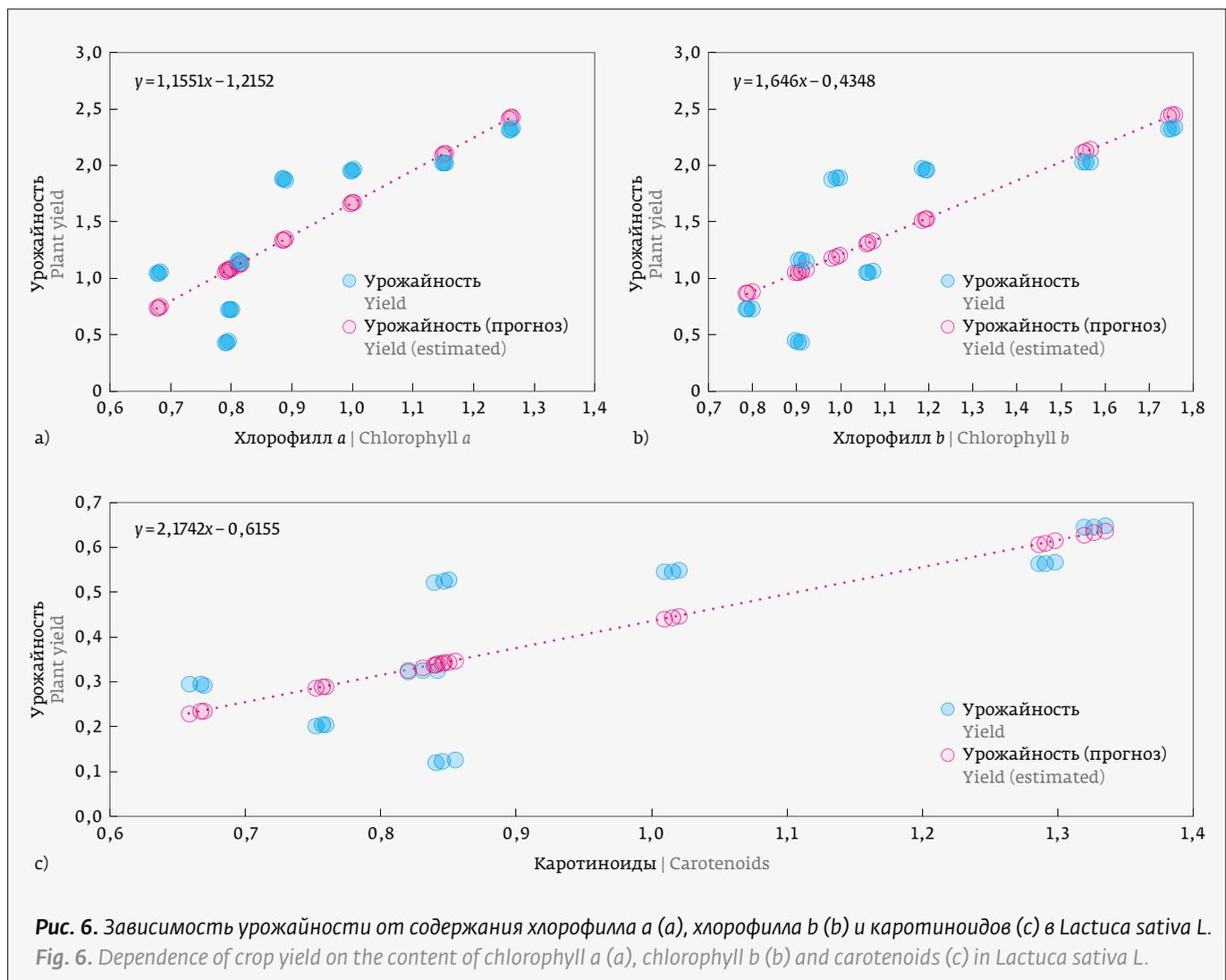
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы мы разработали циклоадаптивный фоторежим, который увеличил урожайность *Lactuca sativa* L. в два раза, снизил транспирационный коэффициент в 2,5 раза по сравнению

source to the radiation receiver (Figure 3). For the 19 cm distance, the uniformity coefficient was 0.87, for the 40 cm - 0.94, for the 60 cm - 0.96.

The device's operating programs set the light radiation optimal parameters, spectral composition, PPFД and light period duration for plant photoreceptors effective impact, ensuring optimal development, as well as the best agricultural crops morphology. The use of phytoirradiator with the CAPM reduces energy costs by up to five times compared to the HPS due to the ability to obtain the necessary spatial flow distribution parameters, its intensity and spectral distribution depending on the growth stage and plant species.

The developed light-emitting device with the cycloadaptive lighting mode made it possible to increase the leafy vegetable crop yield of *Lactuca sativa* L. by 2 times and to reduce the transpiration coefficient by 2.5 times compared to the NL (figure 4). The device also has a higher





с естественным светом. Стресс растений был снижен в 3,7 раза по сравнению с ДНаТ и в 1,5 по сравнению с естественным освещением. Концентрация хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов при использовании светоизлучающего устройства с циклоадаптивным фоторежимом была увеличена на 85%, 64% и 99%, соответственно, по сравнению с контрольной группой. Разработанное устройство обладает более высокой эффективностью использования электроэнергии (в 9 раз эффективнее ДНаТ). Использование фитооблучателя снижает затраты на электроэнергию до пяти раз благодаря возможности получения необходимых параметров пространственного распределения потока, его интенсивности и спектрального распределения в зависимости от стадии роста и вида растения. Разработанное светоизлучающее устройство обеспечивает плотность фотосинтетического потока фотонов не менее $300 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; в отличие от стандартных коммерческих фитоламп для растений эффективность прибора в области фотосинтетически активной радиации составляет $2,3 \text{ мкмоль} \cdot \text{Дж}^{-1}$, что на 28% превышает эффективность в области ФАР традиционного тепличного источника излучения – ДНаТ. Использование эффективных методик освещения сельскохозяйственных культур в агропромышленных предприятиях позволит снизить затраты на электроэнергию и водоснабжение благодаря возможности получения необходимых параметров интенсивности и спектрального распределения в зависимости от стадии роста и вида растения, а также обеспечит получение высоких показателей урожайности.

REFERENCES

1. **Al Murad M. et al.** Light Emitting Diodes (LEDs) as Agricultural Lighting: Impact and Its Potential on Improving Physiology, Flowering, and Secondary Metabolites of Crops. *Sustainability*. 2021; 13(4): 1985. <https://doi.org/10.3390/sui13041985>
2. **Hernández R., Kubota C.** Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environ Exp Bot*. 2016; 121: 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.001>
3. **Sipos L. et al.** Optimization of basil (*Ocimum basilicum* L.) production in LED light environments – a review. *Sci Hort*. 2021; 289: 110486. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110486>
4. **Viršilė A. et al.** The Comparison of Constant and Dynamic Red and Blue Light Irradiation Effects on Red and Green Leaf Lettuce. *Agronomy*. 2020; 10(11): 1802. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111802>
5. **Kamath D. et al.** Dynamic versus Concurrent Lighting with Red and Blue Light-emitting Diodes as the Sole Light Source Can Potentially Improve Campanula Stock Plant Morphology for Cutting Production. *HortScience*. 2021; 56(11): 1439–1445. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16034-21>
6. **Nakonechnaya O. V. et al.** In vitro potato plantlet development under different polychromatic LED spectra and dynamic illumination. *Botanica Pacifica*. 2021. <https://doi.org/10.17581/bp.2021.10102>
7. **Degtereva M. et al.** Influence of the Spectral Composition of Illuminating Light Sources on Biometric and Phytochemical Characteristics of *Ocimum basilicum* L. *Photonics*. 2023; 10(12): 1369. <https://doi.org/10.3390/photonics10121369>
8. **Moustakas M., Calatayud Á., Guidi L.** Editorial: Chlorophyll Fluorescence Imaging

energy use efficiency, which is the ratio of fresh plant mass yield to the radiation source energy consumption (9 times more efficient than HPS).

In addition to high yields, an important task is to increase the photosynthetic pigments content that affect the photosynthesis rate [16]. The chlorophylls *a* concentration when using the cycloadaptive lighting mode (figure 5) was the highest and exceeded concentration for the HPS samples by 85%, for the samples grown under natural light by 55%; the concentration of chlorophylls *b* under CAPM was 64% and 92% higher compared to HPS and NL, respectively; the concentration of carotenoids was also maximum for CAPM (99% and 60% higher than HPS and NL, respectively).

Figure 6 shows that the relationship between the chlorophylls *a*, *b*, carotenoids content and plant yield at PPFD of $100 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, corresponding to the maximum yield values in the experiment, forms linear dependencies with the determination coefficients $R^2=0.69$ (correlation $r=0.833$, $p<0.05$), $R^2=0.65$ (correlation $r=0.805$, $p<0.05$), $R^2=0.59$ (correlation $r=0.768$, $p<0.05$), respectively. The CAPM use effectively stimulated the photosynthetic pigments biosynthesis, which led to the increase in the *Lactuca sativa* L. yield.

CONCLUSION

As a result of the work, we developed the cycloadaptive photomode that increased the *Lactuca sativa* L. yield by two times, reduced the transpiration coefficient by 2.5 times compared to natural light. Plant stress was reduced by 3.7 times compared to HPS and by 1.5 times compared to natural light. The chlorophyll *a*, chlorophyll *b* and carotenoids concentration when using a light-emitting device with the cycloadaptive photomode was increased by 85%, 64% and 99%, respectively, compared to the control group. The developed device has a higher energy use efficiency (9 times more efficient than HPS). The phytoirradiator use reduces energy costs up to five times due to the ability to obtain the required parameters of spatial flow distribution, its intensity and spectral distribution depending on the growth stage and plant species. The developed light-emitting device provides a photosynthetic photon flux density of at least $300 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; unlike standard commercial phytolamps for plants, the device efficiency in the photosynthetically active radiation region is $2.3 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$, which is 28% higher than the efficiency of a traditional greenhouse radiation source – HPS. The use of effective lighting modes for agricultural crops in agro-industrial enterprises will reduce energy costs of electricity and water supply due to the possibility of obtaining the necessary intensity parameters and spectral distribution depending on the growth stage and type of plant, and will also ensure high yields.



Analysis in Biotic and Abiotic Stress. *Frontiers in Plant Science. Frontiers Media S. A.* 2021; 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.658500>

9. **Solbach J.A., Fricke A., Stützel H.** Compensation of adverse growing media effects on plant growth and morphology by supplemental LED lighting. *PLoS One. Public Library of Science.* 2023; 18(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291601>
10. **Tabbert J.M., Schulz H., Krähmer A.** Increased Plant Quality, Greenhouse Productivity and Energy Efficiency with Broad-Spectrum LED Systems: A Case Study for Thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Plants.* 2021; 10(5): 960. <https://doi.org/10.3390/plants10050960>
11. **Hooks T. et al.** Adding UVA and Far-Red Light to White LED Affects Growth, Morphology, and Phytochemicals of Indoor-Grown Microgreens. *Sustainability.* 2022; 14(14): 8552. <https://doi.org/10.3390/su14148552>
12. **Gao S. et al.** Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of welsh onion (*Allium fistulosum* L.) grown under different LED wavelengths. *BMC Plant Biol.* 2020; 20(1):78. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-2282-0>
13. **Meng Q., Runkle E. S.** Far-red radiation interacts with relative and absolute blue and red photon flux densities to regulate growth, morphology, and pigmentation of lettuce and basil seedlings. *Sci Hortic.* 2019; 255: 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.030>
14. **Degtereva M.M. et al.** Assessment Procedure for the Advantages of LED Phyto-Strip Application in the Industrial Greenhouse Complexes. *Photonics Russia.* 2023; 17(7): 566–578. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.7.566.578>
 Дегтерева М. М. и др. Методика оценки преимуществ применения светодиодной фитоленты в промышленных тепличных комплексах. *Фотоника.* 2023; 17(7): 566–578. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.7.566.578>
15. GOST R 57671-2017. Irradiation devices with LED light sources for greenhouses. General specifications: GOST R 57671-2017. Russia: National Standard of the Russian Federation, 2017; 8. (In Russ.)
 ГОСТ Р 57671-2017. Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия: ГОСТ Р 57671-2017. Россия: Национальный стандарт Российской Федерации, 2017; 8.
16. **Luo X. et al.** Improved estimates of global terrestrial photosynthesis using information on leaf chlorophyll content. *Glob Chang Biol.* 2019; 25(7): 2499–2514. <https://doi.org/10.1111/gcb.14624>

AUTHORS CONTRIBUTION

Degtereva Mariya Mikhailovna – measurement the LEDs parameters in the field of photosynthetically active radiation, experimentation, creating the cycloadaptive lighting mode, data analysis, editing of the article, analysis of literature.
 Levin Yevgeniy – measurement of spectral and energy characteristics of LEDs, editing of the article, analysis of literature.
 Degterev Alexander Eduardovich – measurement of the electrical characteristics of LEDs, editing the article.
 Lamkin Ivan Anatolyevich – scientific work management, work planning, article editing.
 Tarasov Sergey Anatolyevich – problem setting and scientific research management.

AUTHORS

Mariya M. Degtereva – assistant professor, department of photonics St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia; e-mail: mmromanovich@etu.ru. ORCID: 0000-0001-6797-0595
 Yevgeniy Levin – 2st year postgraduate student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia; e-mail: e_levin@etu.ru. ORCID: 0009-0000-3811-487X
 Alexander E. Degterev – assistant professor, department of photonics St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia; e-mail: aedegterev@etu.ru. ORCID: 0000-0002-6151-6567
 Ivan A. Lamkin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Photonics, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia; e-mail: ialamkin@etu.ru. ORCID: 0000-0002-3680-7725
 Sergey A. Tarasov – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Photonics, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia; e-mail: satarasov@etu.ru. ORCID: 0000-0002-6321-0019

ИТМО



НЕВСКАЯ ФОТОНИКА

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
13–18 ОКТЯБРЯ 2025 ГОДА
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

+ ПОВЫШЕНИЕ
КВАЛИФИКАЦИИ

ТЕМАТИКИ КОНФЕРЕНЦИИ

- Индустриальная фотоника (инженерная секция)
- Сверхбыстрая фотоника и когерентная оптика
- Оптические материалы фотоники
- Управление параметрами лазерного излучения
- Квантовая оптика и квантовые технологии
- Лазерная и силовая оптика
- ИИ в фотонике
- Нанопотоника
- Биопотоника
- Артфотоника



КРУГЛЫЕ СТОЛЫ

- Квантовые технологии
- Агробιοфотоника
- Студенческая ячейка ЛАС

ОРГАНИЗАТОРЫ

- НОЦ фотоники и оптоинформатики Университета ИТМО
- Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ

ПРИЕМ ТЕЗИСОВ ДО 22 ИЮНЯ | РЕГИСТРАЦИЯ СЛУШАТЕЛЕЙ ДО 4 ОКТЯБРЯ

nevphoton.ru



АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Дегтерева Мария Михайловна – измерение параметров светодиодов в области фотосинтетически активной радиации, проведение экспериментов, создание циклоадаптивного режима освещения, анализ данных, редактирование статьи, анализ литературы.

Левин Евгений – измерение спектрально-энергетических характеристик светодиодов, редактирование статьи, анализ литературы.

Дегтерев Александр Эдуардович – измерение электрических характеристик светодиодов, редактирование статьи.

Ламкин Иван Анатольевич – руководство научной работой, планирование работ, редактирование статьи.

Тарасов Сергей Анатольевич – постановка задачи и руководство научными исследованиями.

АВТОРЫ

Дегтерева Мария Михайловна – ассистент кафедры фотоники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия; e-mail: mmromanovich@etu.ru
ORCID: 0000-0001-6797-0595

Левин Евгений – аспирант 2 года обучения, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия; e-mail: e_levin@etu.ru.
ORCID: 0009-0000-3811-487X

Дегтерев Александр Эдуардович – ассистент кафедры фотоники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия; e-mail: aedegtereve@etu.ru.
ORCID: 0000-0002-6151-6567

Ламкин Иван Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ialamkin@etu.ru.
ORCID: 0000-0002-3680-7725

Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой фотоники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия; e-mail: satarasov@etu.ru.
ORCID: 0000-0002-6321-0019

Дорожная карта создания российского EUV-литографа

В России разработан план создания оборудования для производства современных чипов, которое будет дешевле и эффективнее, чем установки сегодняшнего монополиста рынка ASML. Эксперты компаний TSMC, Samsung и Intel подтверждают, что EUV-литография экономически эффективна. Однако надо учитывать, что эта эффективность обусловлена гигантским рынком чипов, занимаемым этими компаниями, по сути, монополистами. Кроме этих гигантов, а также американской Micron Technology и корейской SK Hynix Korea, входящих в 5-топ производителей чипов в мире, такое оборудование больше никто не приобрел и согласно прогнозам ASML на ближайшее будущее и не планирует. Авторы проекта считают, что сегодня целесообразно идти путем нидерландской компании, так как это требует высоких финансовых затрат. Поэтому Россия будет создавать EUV-установки с источником с длиной волны 11,2 нм, а не 13,5 нм. Ожидается, что этот подход снизит затраты на изготовление вакуумных элементов и систем, создание литографа и на стоимость эксплуатации. В российской установке планируется заменить оловянный лазерно-плазменный источник на ксеноновый. Это должно на порядок уменьшить загрязнения оптических элементов продуктами разлета частиц расплавленного олова.

Сравнительно крупное производство лазеров для литографии, которые будут использоваться для выпуска микросхем, начнется после 2026 года. Планируется сборка как минимум пяти таких лазеров в год. За разработку лазера отвечала ГК «Лассард». Тестовые испытания в составе литографа назначены на 2025 год. Проводить тестирование будут сотрудники «Зеленоградского нанотехнологического центра» (ЗНТЦ).

По материалам https://www.cnews.ru/news/top/2024-12-13_v_rossii_razrabotali_dorozhnyuyu



ТЕЛЕГРАММ КАНАЛ
НАУЧНОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА
ТЕХНОСФЕРА:



- Онлайн репортажи с крупнейших выставок отрасли
- Анонсы мероприятий с участием технических экспертов отрасли
- Скидки на журналы издательства до 25%
- Конкурсы и розыгрыши от ведущих компаний
- Книжные новинки и презентации новых выпусков журналов

Подписывайтесь и оставайтесь в курсе
главных событий научно-технической сферы



24-26 СЕНТЯБРЯ 2025
г. Самара



**23-я международная
выставка-форум**

ПРОМЫШЛЕННЫЙ САЛОН

**Ваше оборудование —
наши покупатели**

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



МИНИСТЕРСТВА
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ТОРГОВЛИ
САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ



СОЮЗА
МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
РОССИИ



ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОЙ
ПАЛАТЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОЙ
ПАЛАТЫ
САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ



ЭКСПО-ВОЛГА
организатор выставок с 1986 г.

г. Самара, ул. Мичурина, 23а
тел.: (846) 207-11-24

www.expo-volga.ru



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphere.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru