

Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы для стимуляции развития семян моркови и томата

А. А. Губина, Е. В. Левин, М. М. Романович ✉, А. Э. Дегтерев,
Н. О. Патоков, И. А. Ламкин, С. А. Тарасов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ mmromanovich@etu.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время светодиодное (СИД) освещение стало преобладающим во многих сферах деятельности человека, в том числе в сельском хозяйстве. С каждым годом все большей проблемой становится обеспечение населения достаточным количеством качественной продукции вследствие текущей экологической обстановки и активного роста городского населения. Для решения данной проблемы требуется разработка энергоэффективных оптических систем с целью создания оптимальных условий освещенности для ускорения роста различных типов растений и повышения качества продукции в автономных агропромышленных комплексах.

Цель работы. Определение оптимального спектрального состава излучения фитолампы, состоящей из СИД на основе AlGaInP (660 и 730 нм), на основе InGaN (440 нм) и "фитосветодиодов" (400...800 нм), для стимуляции роста и развития ростков томатов и моркови в стадии прорастивания. Расчет оптической мощности СИД и плотности фотосинтетического фотонного потока (photosynthetic photon flux density, PPFD) на ее основе.

Материалы и методы. Проведен ряд экспериментов, связанных с исследованием влияния различного качества и количества излучения видимого диапазона на параметры развития семян моркови и томатов, к которым относятся энергия прорастания, появление семядольных и первичных листьев, всхожесть семян, средняя длина гипокотили и корня; выявление оптимального спектрального состава и мощности излучения для повышения скорости роста растений.

Результаты. Показано, что досветка излучением 660 нм ростков томатов в стадии прорастивания положительно влияет на всхожесть, среднюю длину ростка и корневое развитие. Наилучшие результаты всхожести и развития моркови достигаются при облучении светом коротковолнового диапазона (PPFD 243 мкмоль·с⁻¹·м⁻²), для усиления вегетативного развития моркови подходит облучение ~170 мкмоль·с⁻¹·м⁻² синего света и 86 мкмоль·с⁻¹·м⁻² красного.

Заключение. Созданные программы освещения позволяют варьировать спектральный состав излучения и PPFD на разных этапах роста и развития культур, тем самым увеличивая урожайность и снижая энергозатраты. В перспективе данная технология может быть использована в космосе, так как высокая энергоэффективность в данном сегменте является принципиальной.

Ключевые слова: светодиод, фотосинтез, фотоморфогенез, хлорофилл, плотность фотосинтетического потока фотонов, спектральная характеристика

Для цитирования: Определение оптимального спектрального состава излучения светодиодной фитолампы для стимуляции развития семян моркови и томата / А. А. Губина, Е. В. Левин, М. М. Романович, А. Э. Дегтерев, Н. О. Патоков, И. А. Ламкин, С. А. Тарасов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 62–72. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-62-72

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.04.2022; принята к публикации после рецензирования 23.05.2022;
опубликована онлайн 28.06.2022

Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolamp for Stimulating Carrot and Tomato Seed Development

Anastasia A. Gubina, Evgeniy V. Levin, Maria M. Romanovich ✉,
Alexander E. Degterev, Nikita O. Patokov, Ivan A. Lamkin, Sergey A. Tarasov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ mmromanovich@etu.ru

Abstract

Introduction. Light-emitting diode (LED) irradiation is widely used in various spheres of human activity, including agriculture. Due to the growing urban population and aggravating environmental situation, the problem of high-quality food provision is increasingly attracting research attention. In this context, it is important to develop energy-efficient optical systems for ensuring optimal irradiation conditions for accelerating the growth of various types of plants and improving the quality of products in autonomous agro-industrial complexes.

Aim. Determination of an optimal spectral radiation composition of a phytolamp consisting of LEDs based on AlGaInP (660 and 730 nm) and InGaN (440 nm), as well as phyto-LEDs (400...800 nm), to stimulate the growth and development of tomato and carrot sprouts at the germination stage. Calculation of the LED optical power and photosynthetic photon flux density (PPFD).

Materials and methods. Experiments were carried out to study the influence of visible radiation of different quality and quantity on the development parameters of carrot and tomato seeds, including germination energy, the appearance of cotyledon and primary leaves, seed germination, average hypocotyl and root length. Optimal spectral composition and radiation power parameters ensuring effective growth of plants were determined.

Results. Additional 660-nm irradiation of tomato sprouts at the germination stage was shown to exhibit a positive effect on germination, average sprout length and root development. The best results of carrot germination and development were achieved when irradiated with short-wavelength light (PPFD 243 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$). Irradiation of $\sim 170 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ blue and 86 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ red light was found to be effective for enhancing carrot cultivation.

Conclusion. The developed irradiation schemes can be used to vary the spectral radiation composition and PPFD at different stages of crop growth and development, thereby increasing yields and reducing energy costs. In the future, this technology can be used in space research, where high energy efficiency is fundamental.

Keywords: LED, photosynthesis, photomorphogenesis, chlorophyll, photosynthetic photon flux density, spectral characteristic

For citation: Gubina A. A., Levin E. V., Romanovich M. M., Degterev A. E., Patokov N. O., Lamkin I. A., Tarasov S. A. Optimal Spectral Radiation Composition of a LED Phytolamp for Stimulating Carrot and Tomato Seed Development. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 62–72. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-62-72

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 19.04.2022; accepted 23.05.2022; published online 28.06.2022

Введение. На рост и развитие растений влияет излучение, длины волн которого попадают в диапазон фотосинтетически активной радиации (ФАР). При этом существующие в растениях пигменты и фоторецепторы, способные реагировать на свет, чувствительны к излучению только определенных длин волн. В ходе исследований [1] было выявлено, что в стадии прорастивания наиболее благоприятное воздействие на растения оказывает длинноволновая область видимой части электромагнитного спектра. Для досветки растений в качестве

эффективных источников излучения используют полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) на основе различных твердых растворов, таких, как InGaN, GaAlAs и AlGaInP. Физические свойства и состав соединения материала активной области влияют на главную характеристику СИД – спектральную характеристику и, как следствие, на длину волны излучения. Также от электрических характеристик светодиода зависят оптическая мощность излучения и плотность фотосинтетического фотонного потока (photosynthetic photon flux

density, PPFD), т. е. величины, значение которой определяет эффективность досветки (например, для томатов минимальное необходимое значение PPFD составляет $185 \dots 200 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ [2]).

В результате химических и энергетических реакций энергия света, поглощенного фоточувствительными пигментами растения, преобразуется в химическую. Основной энергетической реакцией, протекающей в зеленом листе растения, является фотосинтез – процесс поглощения кванта света молекулой и дальнейшее использование его энергии для синтеза молекулы аденозинтрифосфата (АТФ) [3]. Поглощение света при фотосинтезе осуществляется хлорофиллом и каротиноидами с максимумами поглощательной способности на длинах волн 700 и 680 нм.

Изменения, связанные со строением и процессами формообразования растений, получили название фотоморфогенеза. При этих изменениях свет выступает не как первичный источник энергии, а как сигнальное средство, регулирующее процессы роста и развития растений. Поглощение света при этом осуществляется пигментом фитохромом, максимумы поглощения которого в длинноволновой области спектра соответствуют значениям 660 и 730 нм. При этом облучение светом с длиной волны 730 нм приостанавливает процессы развития растения [4]. На рис. 1 представлены спектры поглощения основных физико-химических процессов, протекающих в зеленом листе растения: кривая 1 – спектр поглощения при синтезе хлорофилла; кривая 2 – спектр поглощения при процессе фотосинтеза; кривая 3 – поглощение при фотоморфогенезе [5].

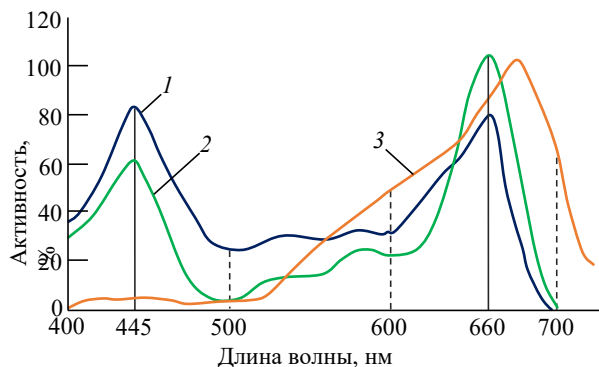


Рис. 1. Активность процессов фотосинтеза, фотоморфогенеза и синтеза хлорофилла

Fig. 1. Intensity of photosynthesis, photomorphogenesis and chlorophyll synthesis

Проведение эксперимента. В качестве источников излучения были выбраны красные (К) и дальнекрасные (ДК) СИД мощностью 3 Вт с длинами волн излучения 660 и 730 нм соответственно на основе гетероструктур AlGaInP. Светодиоды на основе данного соединения широко используются в агрофотонике для улучшения показателей роста растений [6]. Спектральные характеристики светодиодов, которые исследовались согласно методике, описанной в [7], приведены на рис. 2. Исследование проводилось при различных значениях тока накачки: 10, 30, 70, 180, 250, 300 и 350 мА. При увеличении тока накачки в приведенном диапазоне максимум спектральной характеристики увеличивался.

Также для исследования влияния излучения на рост томатов были выбраны широко используемые полноспектральные (П) (400...800 нм) люминофорные "фитосветодиоды" для растений, максимумы спектра излучения которых соответствуют длинам волн 440 и 660 нм (как это видно на измеренных спектральных харак-

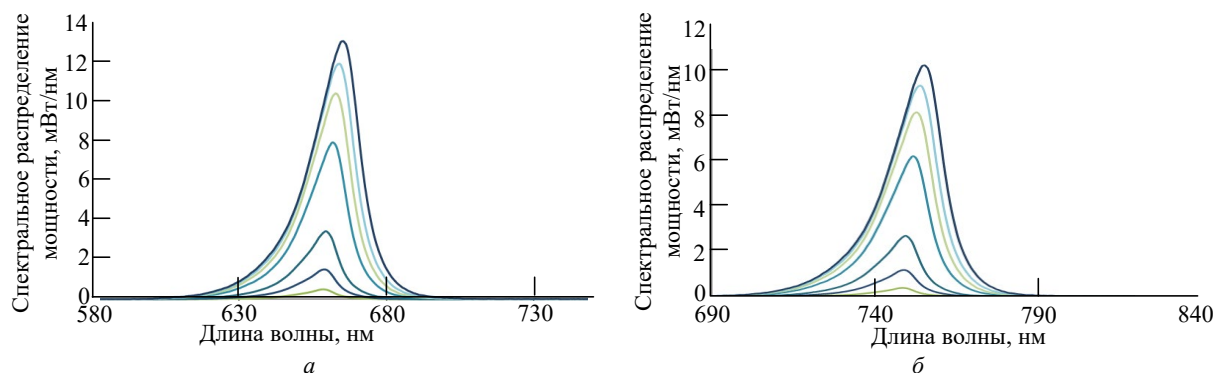


Рис. 2. Спектральные характеристики: а – красного СИД; б – дальнего красного СИД

Fig. 2. Spectral characteristics: a – red LED; б – far red LED

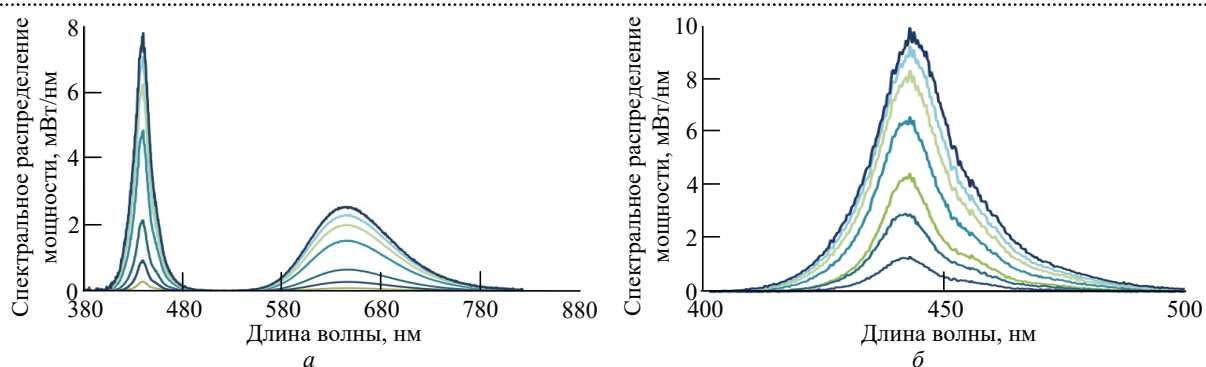


Рис. 3. Спектральные характеристики: а – полноспектрального СИД; б – синего СИД

Fig. 3. Spectral characteristics: а – full spectrum LED; б – blue LED

теристиках (рис. 3, а)), а также синие (С) СИД (440 нм) для облучения семян моркови (рис. 3, б). Исследование проводилось также при различных значениях тока накачки: 10, 30, 70, 180, 250, 300 и 350 мА. При увеличении тока накачки максимум спектральной характеристики увеличивался.

Так как максимальный ток выбранных светодиодов составляет 700 мА, и сильное снижение эффективности работы наблюдается уже при токе около 500 мА (результат нагрева активной области СИД [8]), для исследований был выбран рабочий ток установки 300 мА.

С учетом полученных спектральных характеристик значения плотности фотосинтетического фотонного потока для каждого СИД были вычислены по формуле

$$F_{\text{ФАР}} = \int_{400}^{700} \Phi_{\lambda} \frac{\lambda}{hcN_A S} d\lambda = \frac{K}{S} \int_{400}^{700} \Phi_{\lambda} \lambda d\lambda,$$

где $F_{\text{ФАР}}$ – плотность фотосинтетического потока фотонов; Φ_{λ} – спектральная плотность распределения мощности излучения прибора (в области ФАР); λ – длина волны; h – постоянная Планка; c – скорость света; N_A – постоянная Авогадро; S – площадь освещенной поверхности; K – коэффициент.

На графиках зависимости плотности фотосинтетического фотонного потока от тока накачки (рис. 4): красная кривая – значения для красного СИД; зеленая – для фитосветодиода; серая – ДК СИД; темно-синяя – для синего СИД. При выбранном рабочем токе значения плотности фотосинтетического фотонного потока составляют (рис. 4): для красного СИД –

90 мкмоль·с⁻¹·м⁻²; синего СИД – 81 мкмоль·с⁻¹·м⁻²; ДК СИД – 81 мкмоль·с⁻¹·м⁻²; П СИД – 98 мкмоль·с⁻¹·м⁻². Для обеспечения требуемого минимального PPFD для томатов, значение которого составляет 185...200 мкмоль·с⁻¹·м⁻², каждый бокс содержал по 2 СИД. Для моркови – по 3 СИД на каждый экспериментальный бокс (значение PPFD ~ 250 мкмоль·с⁻¹·м⁻²).

Для исследования влияния излучения на прорастание ростков томатов проводились эксперименты по облучению К СИД, сочетанием К и ДК и облучению П СИД. Соотношение потоков красного и дальнего красного света влияет на длину hypocotyle и формирование кроны рассады. При этом низкое соотношение К:ДК света в спектре (большая доля ДК-излучения) приводит к реакции синдрома избегания затенения, в результате которого у растения наблюдается усиленный рост [9]. Пигменты растений, у которых пик чувствительности находится в диапазоне красного излучения, отвечают за развитие корневой системы, созревание плодов и цветение растений. Так как экс-

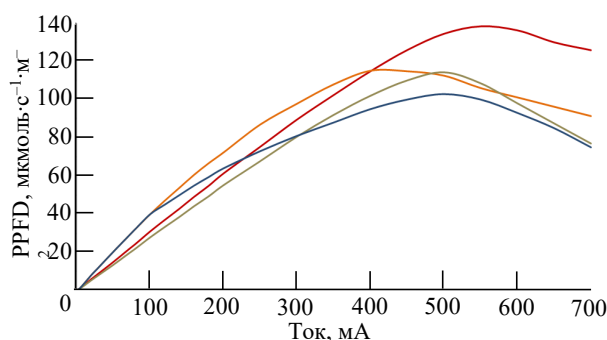


Рис. 4. Плотность фотосинтетического фотонного потока используемых СИД

Fig. 4. Density of the photosynthetic photon flux of the LEDs used

перименты проводились в стадии проращивания и наиболее важный параметр для исследования – длина hypocotyle, было выбрано соотношение К и ДК – 1:1. Пигменты с чувствительностью в диапазоне синего излучения отвечают за стимулирование образования белков и регулирование скорости роста растений. Также важную роль эти пигменты играют в развитии листьев и росте растения [10].

Для исследования влияния излучения на проращивание ростков моркови были выбраны следующие сочетания СИД: 3 синих СИД; 3 красных СИД, 2 красных СИД и 1 синий; 2 синих СИД и 1 красный.

Семена томатов и моркови помещались в боксы размерами 6×8 см, источники излучения были расположены на расстоянии 10 см от растений. В качестве контрольной группы использовались семена, проращиваемые в соответствии с ГОСТ 12038–84, для которых поддерживались следующие условия: отсутствие освещенности; постоянная температура 20°C ; в качестве подложки для проращивания использовалась фильтровальная бумага. Длительность исследований – 10 дней [11].

Результаты и обсуждение. В процессе экспериментов по проращиванию семян томатов было выявлено: ростки у семян, проращиваемых при сочетании К и ДК СИД, появились на 2–3 дня позже, чем в других экспериментальных группах. По завершении этапа проращивания, который для томатов составляет 10 дней, ростки, пророщенные при сочетании К- и ДК-света, показали самую низкую всхожесть (54 %). Это связано с "блокирующим" для развития действием дальнего красного света в соотношении 1:1 К- и ДК-поток. Ростки из контрольной партии, проращиваемые в темноте, в результате показали высокий процент всхожести (91 %), при этом имели малую площадь листа. Практически отсутствующий зеленый пигмент в ростках свидетельствует о низком уровне синтеза хлорофилла [12]. Средняя длина hypocotyle составила 42.5 мм, что примерно в 2.5 раза больше, чем у образцов, облучаемых красным светом (17.2 мм). Усиленный рост стебля свидетельствует о том, что растения подвергаются воздействию "синдрома избегания тени" [13].

Образцы, проращиваемые при досветке светодиодами 660 нм, показали наибольший процент всхожести среди всех образцов (94.7 %), усиленный рост hypocotyle (среднее значение – 17.2 мм) и корневой системы (среднее значение – 29.4 мм). Из-за нехватки синего излучения растения подвергаются влиянию скотоморфогенного развития, что также присуще росту без освещения.

Наличие "синей" части спектра в полноспектральных фитосветодиодах повлияло на усиленный синтез хлорофилла в образцах данной контрольной группы для томата, однако ростки имели истонченный стебель. Образцы показали наибольшую среднюю длину корней (33.1 мм).

Данные, полученные в работе, соответствуют ранее проведенным опытам. Среди красного диапазона наиболее благоприятными являются длины волн 625...680 нм, где происходит наибольший рост листьев и осевых органов для томатов. При недостатке красного излучения формируются неполноценные органы, что впоследствии приводит к низким урожаям. При облучении синим диапазоном спектра, который содержится в полноспектральных светодиодах, затормаживается рост стебля, корней и листа [14].

Наибольшая всхожесть ростков моркови наблюдалась при облучении СИД коротковолнового диапазона (79 %). Самое высокое среднее и максимальное значения длины стебля наблюдались в боксах с контрольными образцами, что, возможно, объясняется недостатком света и вытягиванием ростка за счет энергии, полученной из кислорода и воды. Стоит отметить, что наибольшее количество семядольных листьев наблюдалось для образцов, облучаемых сочетанием двух С СИД и одного К СИД.

Таким образом, наилучшие результаты всхожести и развития моркови были получены при облучении ростков светодиодами коротковолнового диапазона (значение PPFD – $243 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$).

Стоит отметить важную особенность: ростки томата, выращенные при сочетании К- и ДК-света, и ростки, пророщенные под фитосветодиодом, имели фиолетовый окрас стеблей и корней – в результате активации биосинтеза антоцианов. Эти пигментные вещества

синтезируются в растении в стрессовых условиях, однако данный факт еще не получил глубокого физиолого-биохимического обоснования. Таким образом, возможно, синий свет, входящий в спектр фитосветодиода, воспринимается растением как стрессовый фактор, такой же эффект оказывает излучение дальнего красного света с длиной волны 740 нм [15]. Результаты экспериментов по проращиванию томатов приведены в гистограммах на рис. 5 (синий – всхожесть, о. е.; оранжевый – среднее количество боковых корней, шт.) и на рис. 6 (синий – средняя длина ростка, мм; оранжевый – средняя длина корешка, мм). Результаты по проращиванию моркови представлены в гистограммах на рис. 7 (синий – всхожесть, %; оранже-

вый – средняя длина стебля, мм) и на рис. 8 (синий – средняя длина корня, мм; оранжевый – наличие зеленых листьев, %).

Выводы. Установлено, что использование досветки излучением полупроводниковых светодиодов в стадии проращивания ростков томатов и моркови может как положительно, так и отрицательно повлиять на рост и развитие ростков. Облучение светом СИД с максимумом спектральной характеристики на длине волны 660 нм увеличивает всхожесть ростков томата на 4 % по сравнению с образцами, выращенными согласно стандарту, и на 29 % по сравнению с образцами, проращенными под фитосветодиодами. Облучение фитосветодиодами увеличивает среднюю длину корней ростков

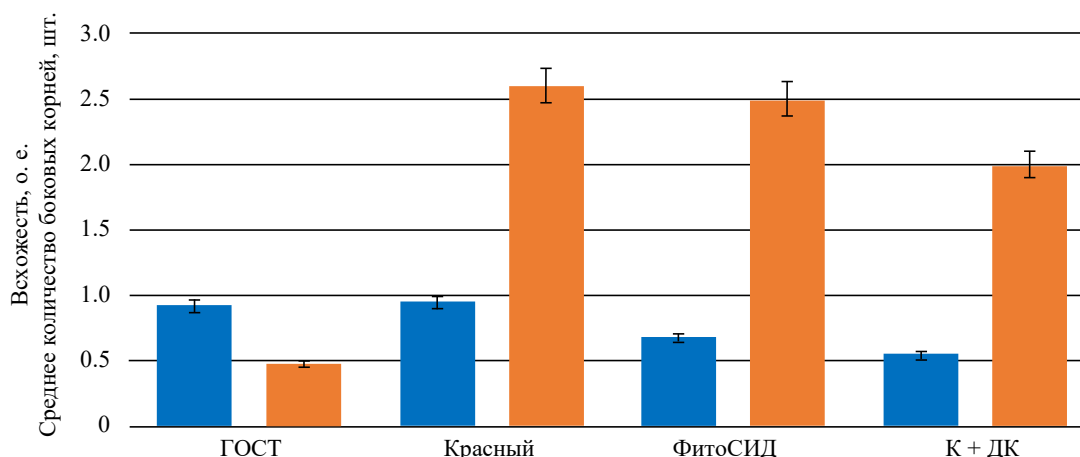


Рис. 5. Результаты экспериментов по проращиванию томатов в гистограммах: синий – всхожесть, о. е.; оранжевый – среднее количество боковых корней, шт

Fig. 5. Histograms presenting experimental results for tomato germination: blue – germination, rel. units; orange – average number of lateral roots, pcs

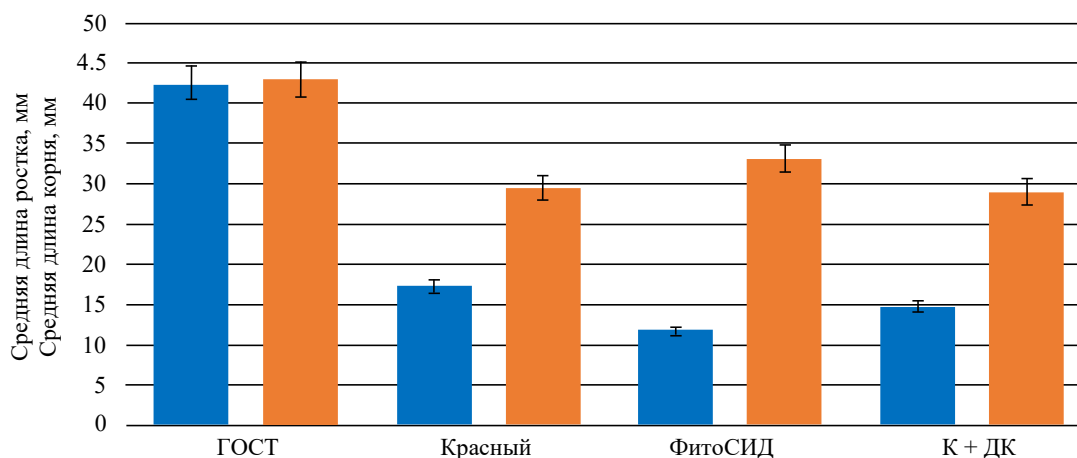


Рис. 6. Результаты экспериментов по проращиванию томатов в гистограммах: синий – средняя длина ростка, мм; оранжевый – средняя длина корня, мм

Fig. 6. Histograms presenting experimental results for tomato germination: blue – average sprout length, mm; orange – average root length, mm

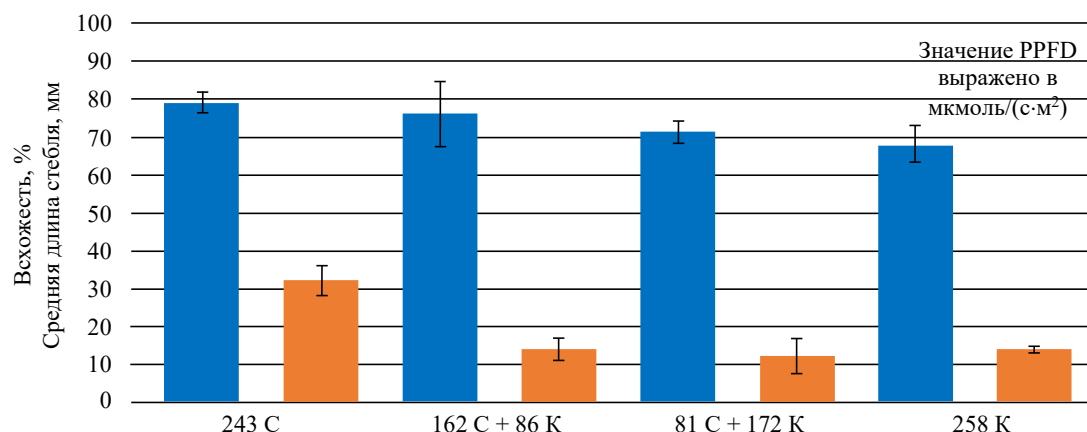


Рис. 7. Результаты экспериментов по проращиванию моркови в гистограммах: синий – всхожесть, %; оранжевый – средняя длина стебля, мм

Fig. 7. Histograms presenting experimental results for carrot germination: blue – germination, %; orange – average stem length, mm

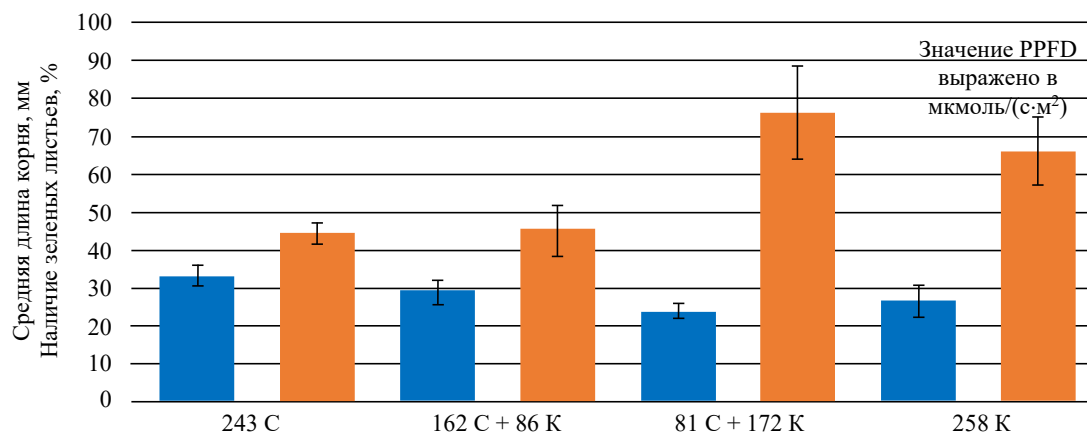


Рис. 8. Результаты экспериментов по проращиванию моркови в гистограммах: синий – средняя длина корня, мм; оранжевый – наличие зеленых листьев, %

Fig. 8. Histograms presenting experimental results for carrot germination: blue – average root length, mm; orange – presence of green leaves, %

томатов на 11 % по сравнению с образцами, проросшими при облучении красным светом (660 нм), и на 12 % по сравнению с результатами проращивания при комбинации красного и ДК-света. Облучение красным (660 нм) и дальним красным (730 нм) светом в соотношении 1:1 ухудшило результаты всхожести семян томатов на 41 % по сравнению с контрольной партией.

Для усиления вегетативного развития ростков моркови подходит излучение комбинации двух синих и одного красного СИД (значение PPFD – 253 мкмоль·с⁻¹·м⁻²). Наилучшие результаты всхо-

жести и развития моркови были получены при облучении ростков светодиодами коротковолнового диапазона спектра (440 нм) (значение PPFD – 243 мкмоль·с⁻¹·м⁻²). Таким образом, при проектировании фитоламп для досветки семян томатов на этапе проращивания необходимо учесть, что растению требуется освещение 660 нм и плотность фотосинтетического потока фотонов 200 мкмоль·с⁻¹·м⁻², а для семян моркови – 250 мкмоль·с⁻¹·м⁻² при соотношении СИД с длинами волн 440 и 660 нм 2:1.

Авторский вклад

Губина Анастасия Анатольевна – проведение и обработка экспериментов по проращиванию томатов, анализ литературы.

Левин Евгений Витальевич – проведение и обработка экспериментов по проращиванию моркови, анализ литературы.

Романович Мария Михайловна – планирование, постановка, организация экспериментов, редактирование статьи.

Дегтерев Александр Эдуардович – измерение спектральных характеристик светодиодов, организация работы на спектрометре Ocean Optics USB4000.

Патоков Никита Олегович – редактирование статьи.

Ламкин Иван Анатольевич – руководство научной работой, планирование, организация экспериментов.

Тарасов Сергей Анатольевич – постановка задачи и руководство научными исследованиями.

Author's contribution

Anastasia A. Gubina, conducting and processing experiments on the germination of tomatoes, analysis of the literature.

Evgeniy V. Levin, conducting and processing experiments on the germination of carrots, analysis of the literature.

Maria M. Romanovich, planning, staging, organization of experiments, editing the article.

Alexander E. Degterev, measurement of the spectral characteristics of LEDs, organization of work on the Ocean Optics USB4000 spectrometer.

Nikita O. Patokov – editing the article.

Ivan A. Lamkin, management of scientific work, planning, organization of experiments.

Sergey A. Tarasov, problem setting and scientific research management.

Список литературы

1. Spalding E. P., Folta K. M. Illuminating topics in plant photobiology // *Plant, Cell and Environment*. 2005. Vol. 28, № 1. P. 39–53. doi: 10.1111/j.1365-3040.2004.01282.x

2. О разработке светодиодного светильника для тепличных комбинатов / С. Д. Богатырев, Д. С. Степунин, А. П. Какуркин, В. Н. Сафрончев // *Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сб. тр. конф., Саранск, Россия, 15–16 марта 2017. Саранск, 2017. С. 225–229.*

3. Shinomura T., Uchida K., Furuya M. Elementary Processes of Photoperception by Phytochrome A for High-Irradiance Response of Hypocotyl Elongation in Arabidopsis // *Plant Physiology*. 2000. Vol. 122, № 1. P. 147–156. doi: 10.1104/pp.122.1.147

4. The Optoelectronic Semiconductor Device Based of the Leds to Improve Plant Growth / M. M. Romanovich, N. V. Roshina, A. A. Aleksandrova, S. A. Tarasov, I. A. Lamkin // *IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*, St Petersburg, Moscow, Russia, 27–30 Jan. 2020. IEEE, 2020. P. 1123–1125. doi: 10.1109/EIconRus49466.2020.9039256

5. The efficiency of UV LEDs based on GaN/AlGaIn heterostructures / A. S. Evseenkov, S. A. Tarasov, I. A. Lamkin, A. V. Solomonov, S. Y. Kurin // *Proc. of the IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.*, St Petersburg, Russia, 02–04 Feb. 2015. IEEE, 2015. P. 27–29. doi: 10.1109/EIconRusNW.2015.7102224

6. Study of the characteristics of UVA LEDs grown by HVPE: active region thickness-dependent performance / E. A. Menkovich, S. A. Tarasov, I. A. Lamkin, A. V. Solomonov, S. Yu. Kurin, A. A. Antipov, I. S. Barash, A. D. Roenkov, Yu. N. Makarov, A. S. Usikov, H. I. Helava // *J. of Physics: Conf. Series*. 2014. Vol. 541, № 1. P. 012054.

7. Ракутько Е. Н., Ракутько С. А. Выращивание рассады томата под излучением светодиодов с различным соотношением красного и дальнекрасного потоков // *Изв. СПбГАУ*. 2016. № 44. С. 281–287.

8. Влияние искусственного света на рост томатов / С. Н. Александрова, Ж. Д. Кудайбергенова, А. А. Рыбакова, Е. Г. Незнамова // *Наука и современность*. 2014. № 29. С. 141–144.

9. Oh S. I., Lee J. H., Lee A. K. Growth, antioxidant concentrations and activity in *Sedum takesimensense* as affected by supplemental LED irradiation with light quality // *Horticultural Science and Technology*. 2019. Vol. 37, № 5. P. 589–597.

10. LEDs for photons, physiology and food / P. M. Patison, J. Y. Tsao, G. C. Brainard, B. Bugbee // *Nature*. 2018. Vol. 563. P. 493–500. doi: 10.1038/s41586-018-0706-x

11. Significant reduction in energy for plant-growth lighting in space using targeted LED lighting and spectral manipulation / L. Poulet, G. D. Massa, R. C. Morrow, C. M. Bourget, R. M. Wheeler, C. A. Mitchell // *Life Science in Space Research*. 2014. Vol. 2. P. 43–53. doi: 10.1016/j.lssr.2014.06.002

12. Hernández R., Kubota C. Physiological, morphological, and energy-use efficiency comparisons of LED and HPS supplemental lighting for cucumber transplant production // *HortScience*. 2015. Vol. 50, № 3. P. 351–357.

13. Folta K. M., Maruhnich S. A. Green light: a signal to slow down or stop // *J. of Experimental Botany*. 2007. Vol. 58, № 12. P. 3099–3111. doi: 10.1093/jxb/erm130

14. Leaf shape index, growth, and phytochemicals in two leaf lettuce cultivars grown under monochromatic light emitting diodes / K.-H. Son, J.-H. Park, D. Kim, M.-M. Oh // *Korean J. of Horticultural Science and Technology*. 2012. Vol. 30, № 6. P. 664–672. doi: 10.7235/hort.2012.12063

15. Wang Y., Folta K. M. Contributions of green

light to plant growth and development // Americal J. of Botany. 2013. Vol. 100, № 1. P. 70–78. doi: 10.3732/ajb.1200354

Информация об авторах

Губина Анастасия Анатольевна – бакалавр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2020), студент магистратуры 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; агрофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: gubina.anastasia2010@yandex.ru

Левин Евгений Витальевич – бакалавр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2020), студент магистратуры 1-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – фотоника; спектральный анализ; светодиоды; агрофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: zhenya081099@gmail.com

Романович Мария Михайловна – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2019), аспирант 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; агрофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: mmromanovich@etu.ru

Дегтерев Александр Эдуардович – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2020), аспирант 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 16 научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aedegterev@etu.ru

Паточков Никита Олегович – исследователь, преподаватель-исследователь по направлению "Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии" (2021) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов: электроника; микроэлектроника; фотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: patocov@mail.ru

Ламкин Иван Анатольевич – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: ialamkin@etu.ru

Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: satarasov@etu.ru

References

1. Spalding E. P., Folta K. M. Illuminating Topics in Plant Photobiology. Plant, Cell and Environment. 2005, vol. 28, no. 1, pp. 39–53. doi: 10.1111/j.1365-3040.2004.01282.x

2. Bogatyrev S. D., Stepunin D. S., Kakurkin A. P., Safronchev V. N. *O razrabotke svetodiodnogo svetil'nika dlya teplichnykh kombinatov* [On the Development of an LED Lamp For Greenhouse Plants]. *Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoi svetotekhniki, elektrotekhniki i energetiki* [Problems and Prospects for the Development of Domestic Lighting, Electrical Engineering and Energy], Saransk, Russia, 15–16 March 2017, pp. 225–229. (In Russ.)
3. Shinomura T., Uchida K., Furuya M. Elementary Processes of Photoperception by Phytochrome A for High-Irradiance Response of Hypocotyl Elongation in Arabidopsis. *Plant Physiology*. 2000, vol. 122, no. 1, pp. 147–156. doi: 10.1104/pp.122.1.147
4. Romanovich M. M., Roshina N. V., Aleksandrova A. A., Tarasov S. A., Lamkin I. A. The Optoelectronic Semiconductor Device Based of the Leds to Improve Plant Growth. *IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St Petersburg, Moscow, Russia, 27–30 Jan. 2020. IEEE, 2020, pp. 1123–1125. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039256.
5. Evseenkov A. S., Tarasov S. A., Lamkin I. A., Solomonov A. V., Kurin S. Y. The Efficiency of UV LEDs Based on GaN/AlGaIn Heterostructures. *Proc. of the IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.*, St Petersburg, Russia, 02–04 Feb. 2015. IEEE, 2015, pp. 27–29. doi: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102224
6. Menkovich E. A., Tarasov S. A., Lamkin I. A., Solomonov A. V., Kurin S. Yu., Antipov A. A., Barash I. S., Roenkov A. D., Makarov Yu. N., Usikov A. S., Helava H. I. Study of the Characteristics of UVA LEDs Grown by HVPE: Active Region Thickness-Dependent Performance. *J. of Physics: Conf. Series*. 2014, vol. 541, no. 1, p. 012054.
7. Rakutko E. N., Rakutko S. A. Growing Tomato Seedlings under the Radiation of LEDs with Different Ratios of Red and Far-Red Fluxes. *Izv. SPbGAU*. 2016, no. 44, pp. 281–287. (In Russ.)
8. Aleksandrova S. N., Kudaibergenova Zh. D., Rybakova A. A., Neznamova E. G. Influence of Artificial Light on the Growth of Tomatoes. *Nauka i sovremennost'* [Science and Modernity]. 2014, no. 29, pp. 141–144. (In Russ.)
9. Oh S. I., Lee J. H., Lee A. K. Growth, Antioxidant Concentrations and Activity in Sedum Takesimensense as Affected by Supplemental LED Irradiation with Light Quality. *Horticultural Science Technology*. 2019, vol. 37, no. 5, pp. 589–597.
10. Pattison P. M., Tsao J. Y., Brainard G. C., Bugbee B. LEDs for Photons, Physiology and Food Research Perspective. *Nature*. 2018, vol. 563, pp. 493–500. doi: 10.1038/s41586-018-0706-x
11. Poulet L., Massa G. D., Morrow R. C., Bourget C. M., Wheeler R. M., Mitchell C. A. Significant Reduction in Energy for Plant-Growth Lighting in Space Using Targeted LED Lighting and Spectral Manipulation. *Life Science in Space Research*. 2014, vol. 2, pp. 43–53. doi: 10.1016/j.lssr.2014.06.002
12. Hernández R., Kubota C. Physiological, Morphological, and Energy-Use Efficiency Comparisons of LED and HPS Supplemental Lighting for Cucumber Transplant Production. *HortScience*. 2015, vol. 50, no. 3, pp. 351–357.
13. Folta K. M., Maruhnich S. A. Green Light: A Signal to Slow Down or Stop. *J. of Experimental Botany*. 2007, vol. 58, no. 12, pp. 3099–3111. doi: 10.1093/jxb/erm130
14. Son K.-H., Park J.-H., Kim D., Oh M.-M. Leaf Shape Index, Growth, and Phytochemicals in Two Leaf Lettuce Cultivars Grown Under Monochromatic Light Emitting Diodes. *Korean J. of Horticultural Science and Technology*. 2012, vol. 30, no. 6, pp. 664–672. doi: 10.7235/hort.2012.12063
15. Wang Y., Folta K. M. Contributions of Green Light to Plant Growth and Development. *American J. of Botany*. 2013, vol. 100, no. 1, pp. 70–78. doi: 10.3732/ajb.1200354

Information about the authors

Anastasia A. Gubina, Bachelor in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2-year Master's student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; agrophotonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: gubina.anastasia2010@yandex.ru

Evgeniy V. Levin, Bachelor in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 1st year Master's student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: photonics; spectral analysis; LEDs; agrophotonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: zhenya081099@gmail.com

Maria M. Romanovich, Master in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2nd year Postgraduate Student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; agrophotonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: mmromanovich@etu.ru

Alexander E. Degterev, Master in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2nd year Postgraduate Student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: electronics;

photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: aedegterev@etu.ru

Nikita O. Patokov – Researcher, teacher-researcher in the field of "Photonics, instrumentation, optical and bio-technical systems and technologies" (2021) Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: electronics; microelectronics; photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: patocov@mail.ru

Ivan A. Lamkin, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor at the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: ialamkin@etu.ru

Sergey A. Tarasov, Dr Sci. (Eng.) (2019), Head of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: interests: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: satarasov@etu.ru
