

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 581.1.03:535.2
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-282-292>

Поступила в редакцию 20.10.2022
Received 20.10.2022

**О. В. Молчан¹, Л. В. Обуховская¹, Т. Н. Куделина¹, Н. И. Астасенко²,
М. И. Баркун², Ю. В. Трофимов²**

¹*Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

АКТИВАЦИЯ LED-ОСВЕЩЕНИЕМ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ И РОСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ РАСТЕНИЙ ТОМАТА В УСЛОВИЯХ ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО УЧАСТКА

Аннотация. Показано преимущество использования светодиодных облучательных приборов FLORA LED по сравнению с лампами ДНаТ (ДНаТ 1000) для культивирования растений высокостебельных сортов томата в условиях производства. При светодиодном освещении хорошо сбалансированного спектрального состава растения томата уже в стадии вегетативного роста (рассады) по основным физиологическим показателям (сухая масса и накопление сухого вещества вегетативных органов, содержание фотосинтетических пигментов, скорость выделения кислорода при фотосинтезе, коэффициент фотосинтетической эффективности) превосходили растения, выращенные при освещении лампами ДНаТ. Предполагается, что повышенная фотосинтетическая активность и интенсивные процессы роста и развития обеспечили растениям, выращенным при LED-освещении, более высокий адаптивный потенциал и приживаемость при пересадке, раннее плодоношение и повышение урожайности.

Ключевые слова: LED-освещение, спектральный состав, *Lycopersicon esculentum* Mill.

Для цитирования: Активация LED-освещением фотосинтетических и ростовых процессов растений томата в условиях опытно-производственного участка / О. В. Молчан [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. наук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 282–292. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-282-292>

**Olga V. Molchan¹, Lyudmila V. Obukhovskaya¹, Tatiana N. Kudelina¹, Nikolay I. Astasenko²,
Mikhail I. Barkun², Yuri V. Trofimov²**

¹*V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

²*Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

ACTIVATION OF GROWTH AND PHOTOSYNTHETIC PROCESSES OF TOMATO PLANTS BY LED LIGHTING UNDER PRODUCTION CONDITIONS

Abstract. The advantage of FLORA LED lighting in comparison with HPS lamps for cultivation of tall tomato varieties under production conditions is shown. Under LED illumination with well-balanced spectral composition, the main growth and physiological parameters of tomato juvenile plants (such as dry weight and accumulation of dry matter of vegetative organs, content of photosynthetic pigments, rate of oxygen release during photosynthesis, coefficient of photosynthetic efficiency, time of flowering onset) were superior to plants grown under HPS lamp illumination. It is assumed that increased photosynthetic activity, as well as more intensive growth and development processes provided a higher adaptive potential and survival during transplantation, early fruiting and higher yields to plants grown under LED lighting.

Keywords: LED lighting, spectral composition, *Lycopersicon esculentum* Mill.

For citation: Molchan O. V., Obukhovskaya L. V., Kudelina T. N., Astasenko N. I., Barkun M. I., Trofimov Yu. V. Activation of growth and photosynthetic processes of tomato plants by LED lighting under production conditions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 282–292 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-282-292>

Введение. Разработка и внедрение энергосберегающих технологий в различные области хозяйственной деятельности является актуальной задачей на современном этапе развития экономики практически всех стран мира. Особенно важна сегодня оптимизация производства продуктов питания, поэтому остро стоит проблема повышения продуктивности растениеводства, в том

числе в условиях закрытого грунта. Совершенно необходимым условием для успешного тепличного производства, получения продукции при высоких производительности и качестве является использование искусственного освещения. Разработки технологического облечения в современном сельскохозяйственном производстве должны быть основаны на фундаментальных фотобиологических эффектах, конкретных агротехнических подходах и световых технологиях, предусматривающих применение высокоэффективного светотехнического оборудования. Традиционно источником искусственного оптического излучения в теплицах являются натриевые лампы высокого давления. Несмотря на то что их спектр считается не самым оптимальным для роста и развития растений, именно благодаря использованию этих ламп в сочетании с передовой агротехникой удалось достичь высоких уровней продуктивности целого ряда культур. Возможно, это обусловлено тем, что в промышленных теплицах искусственные источники света применяются, как правило, совместно с естественным освещением. Поэтому даже в самое «темное» время года (декабрь–январь), когда доля искусственного излучения достигает 90 %, суммарный световой поток получает существенную добавку от естественного освещения в синей части физиологически активной радиации (ФАР), обеспечивающую необходимое фоторегуляторное действие на растения.

На широте Беларуси продолжительность светового периода поздней осенью, в зимний период и ранней весной не превышает 8–10 ч, а интенсивность освещения, как правило, очень низкая. В то же время фотопериод для культивирования растений чаще всего должен составлять 17–18 ч. Также растениям важно получить достаточную дозу энергии света, спектральный состав которого должен быть хорошо сбалансирован для управления процессами роста и дифференцировки на всех уровнях – от клеточного до организменного. Эффективное функционирование фотосинтетического аппарата, в том числе биосинтез хлорофилла и транспорт электронов, регуляция роста и развития растений осуществляются с участием систем фотосинтеза и фотоморфогенеза, поглощающих излучение во всем диапазоне ФАР (380–780 нм). Следует также отметить, что влияние спектрального состава и интенсивности света на метаболизм зависит от стадии развития растения [1].

В связи с изложенным выше в настоящее время интенсивно изучают и внедряют в производство в тепличных комбинатах республики светодиодные (Light Emission Diodes – LED) источники света. Современные светодиодные облучатели обладают рядом важных преимуществ по сравнению с традиционными лампами. LED-освещение практически не влияет на температурный режим растения и не приводит к его перегреву [2]. Современные LED-облучатели по энергоэффективности превосходят люминесцентные лампы и лампы накаливания и не уступают газоразрядным лампам [3]. Отдельные светодиоды излучают свет в узком диапазоне – 20–30 нм, и различные их комбинации позволяют получить облучатель практически с любым спектральным составом в области ФАР и эффективно управлять ростом, морфогенезом растений, урожайностью и даже качеством получаемой продукции [4–6]. К настоящему времени накоплено достаточно много информации, указывающей на возможность использования излучателей на основе светодиодов для возделывания овощных культур в регулируемых условиях, а также на влияние света различного спектрального состава на синтез метаболитов и продуктивность растений [5]. В то же время фитоизлучатели многих производителей включают свет только в красном ($\lambda_{\max} = 660$ нм) и синем ($\lambda_{\max} = 450$ нм) спектральных диапазонах, которых явно недостаточно для эффективного управления ростом и развитием растений. Под действием такого света неправильно функционирует фотосинтетический аппарат и может снижаться продуктивность тепличных культур. Кроме того, усложняется работа персонала теплиц вследствие некомфортного для человека освещения [1].

На фоне быстрого развития светодиодных технологий происходят радикальные изменения на рынке тепличного освещения. Превысив уровень натриевых фитооблучателей по энергоэффективности, светодиодные превосходят их также по возможности оптимизации спектральных характеристик с учетом видовых особенностей конкретных культур и задач выращивания, а также по возможностям управления системой электроосвещения теплиц. Принципиальное отличие источников света для наружного освещения открытых пространств и внутренних поме-

щений зданий и сооружений от фитооблучателей для теплиц заключается в том, что первые обеспечивают информацией человека для его ориентации в окружающем пространстве, а вторые являются одновременно и информационно-регуляторным, и энергетическим оборудованием для воздействия на растения и получения хозяйственно-полезного урожая. В то же время внедрение новых светодиодных источников вызывает необходимость изменения технических решений и подходов при проектировании культивационных сооружений защищенного грунта [6]. Однако, к сожалению, для реализации потенциальных возможностей светодиодных фитооблучателей, например с оптимальным для получения хозяйственно-полезного урожая спектром излучения, пока не разработаны научные основы для проектирования теплиц и других культивационных сооружений защищенного грунта. Динамичное развитие светокультуры и появление светодиодных фитооблучателей подчеркнули важность разработки и формирования нормативно-технической базы технологического облучения промышленных теплиц и новых систем выращивания растений многоярусного типа, которая фактически отсутствует. Для нашей страны такие разработки сегодня особенно актуальны.

Одной из важнейших культур тепличного производства являются томаты, особенно высокостебельных сортов [7]. Широкое распространение они получили благодаря высокой пищевой и биологической ценности плодов, содержащих ряд таких биологически активных веществ, как органические кислоты, пектины, витамины С, В₁, В₂, а также каротиноиды, включая β-каротин и ликопин [8]. Исследования показали, что с использованием LED-освещения можно выращивать многие растения, в том числе и томат [9, 10]. Например, растения томата, выращенные с использованием монохроматического красного света, в фазе вегетативного роста имели наибольшую длину гипокотыля и высоту [11]. Облучение растений монохроматическим синим цветом приводило к повышению скорости транспирации и устьичной проводимости [11]. Светодиодное освещение со спектром зеленый + красный (1 : 1) обеспечивало накопление сухой массы надземной части и корней и повышение содержания хлорофилла в листьях [11]. Использование LED-источника света, содержащего только синие и красные светодиоды, при соотношении красного и синего 1 : 7 по плотности потока фотонов стимулировало образование вегетативной биомассы растений томата черри по сравнению с люминесцентным освещением [12]. Интенсивный рост рассады сохранялся и после пересадки, что приводило к увеличению урожая [12].

Таким образом, изучение действия монохроматического красного и синего света, а также соотношения красной и синей областей спектра освещения на рост растений, включая тепличные культуры, проводятся достаточно давно. Но только в последнее время внимание исследователей привлекло действие света регуляторных частей спектра ФАР, в частности зеленого и дальнего красного. Поэтому влияние на растения света с разным соотношением частей спектра при LED-освещении, включающем все длины волн ФАР, все еще недостаточно изучено. Это связано также с тем, что ответная реакция растений на свет отдельных частей спектра (при монохромном освещении) или же их сочетания (полихромное освещение) является видоспецифичной и определяется генотипом культуры [6]. Более того, требования к спектральному составу могут отличаться не только у видов, но даже у разных сортов одной культуры [1]. Сегодня очевидно, что разработка и использование специализированного источника света с оптимальным спектральным составом, соответствующим потребностям конкретного вида и сорта растения, позволит не только увеличить урожайность, но и улучшить качество плодов. Хотя исследователи давно высказывали идею о необходимости такого источника света, появление облучателя нового типа в последнее время становится возможным лишь благодаря развитию светодиодных технологий. Государственное предприятие «ЦСОТ НАН Беларуси» разработало источники света на основе светодиодов серии FLORA LED для создания энергоэффективного искусственного освещения в теплицах. Возможность оптимизации спектральных характеристик современных LED-облучателей, вполне вероятно, позволит повысить продуктивность культур закрытого грунта [1, 2]. При этом особенно важно проводить исследования не только в лабораторных условиях, но и в условиях реального производства.

Целью данной работы было изучение влияния искусственного освещения на основе светодиодных облучательных приборов FLORA LED на рост и интенсивность фотосинтеза растений

томата в стадии вегетативного роста (рассады) в сравнении с освещением натриевыми лампами высокого давления (ДНаТ 1000) и оценка эффективности использования LED-освещения для выращивания высокостебельных сортов томата в условиях опытно-производственного участка.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования были растения в фазе вегетативного роста (рассада) томатов *Lycopersicon esculentum* Mill. сорта Тореро. Растения выращивали в условиях опытно-производственного участка на КУП «Минская овощная фабрика» малообъемным гидропонным способом на минеральной вате, с соблюдением всех требований используемой производственной технологии. Эксперименты проводили в течение 2015–2018 гг. при выполнении проекта, финансируемого инновационным фондом Мингорисполкома.

Для искусственного освещения растений на контрольном участке использовали светильники с натриевыми лампами высокого давления (ДНаТ 1000), на экспериментальном участке – светодиодные фитооблучатели FLORA LED производства Республиканского научно-производственного унитарного предприятия ЦСОТ НАН Беларуси. Средняя горизонтальная облученность на обоих участках составляла: фотонная – 200 мкмоль/(с·м²), энергетическая – 40 Вт/м². Фотопериод на обоих участках составлял 17 ч, дневная доза облучения растений – 12,2 моль/м² (2,5 МДж/м²). Спектральный состав излучения светодиодных фитооблучателей FLORA LED (в фотонной системе измерения): в диапазоне 380–499 нм – 12,9 %; 500–599 нм – 28,3; 600–699 нм – 49,1; 700–780 нм – 9,7 %.

Календарный возраст и климатические условия культивирования рассады при ДНаТ- и LED-освещении были одинаковыми. Анализ физиологических параметров проводили в промежутки времени от посева семян до переноса растений на постоянное место культивирования в производственном отделении. Определяли основные морфометрические параметры: сырую и сухую массу надземной части, длину стебля и междоузлий, количество междоузлий, листьев и цветков растения. Концентрацию фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b*) и каротиноидов оценивали согласно D. Wettstein [13]. Удельную поверхностную плотность листьев (УППЛ) рассчитывали как отношение сухой массы листа к его площади [14]. Скорости дыхания и фотосинтеза исследовали с помощью системы PlantVital®5030 (INNO-Concept GmbH, Германия). По соотношению скоростей чистой продукции O₂ при фотосинтезе и потребления его в процессе темнового дыхания рассчитывали коэффициент фотосинтетической эффективности (KphA) по формуле $KphA = S/R$, где *S* – скорость фотосинтеза, *R* – скорость дыхания.

Объем экспериментальной выборки для исследований в каждом варианте составлял 15 растений. Данные на гистограммах представлены в виде средних арифметических значений и стандартного отклонения.

Результаты и их обсуждение. По внешнему виду растения томата *Lycopersicon esculentum* Mill. сорта Тореро в возрасте 27 сут, выращенные под фитооблучателями FLORA LED и лампами ДНаТ 1000, различаются (при LED-освещении они выглядят более компактными).

Оценка накопления биомассы вегетативными органами показала, что различий в накоплении сырой вегетативной массы между вариантами не наблюдается (рис. 1, *a*). В то же время сухая масса надземной части растения и содержание сухого вещества при LED-освещении были больше, а к 40-м суткам культивирования – выше почти в 2 раза, чем под лампами ДНаТ (рис. 1, *b*, *c*). Показатель УППЛ, который позволяет оценить уровень накопления сухого вещества листовой пластинкой, косвенно характеризует толщину листа и, как правило, коррелирует с интенсивностью фотосинтеза, также был значительно больше (в 4–5 раз) при воздействии LED-облучателей (рис. 1, *d*). Очевидно, это обусловлено повышенным фотосинтетическим и биосинтетическим потенциалом растений при используемом светодиодном освещении, поскольку для интенсивного роста и развития важно, чтобы они получали хорошо сбалансированный по спектру свет.

При оптимизации светового режима культивирования следует ориентироваться также на оценку содержания фотосинтетических пигментов и активность работы фотосинтетического аппарата растений. В нашей работе были определены содержание хлорофиллов и каротиноидов (рис. 2), скорость выделения кислорода при фотосинтезе и поглощения при дыхании (рис. 3, *a*) и коэффициент фотосинтетической эффективности *KphA* (рис. 3, *b*). Показано значительное (в 1,5–1,8 раза) повышение содержания сумм фотосинтетических пигментов в листьях растений

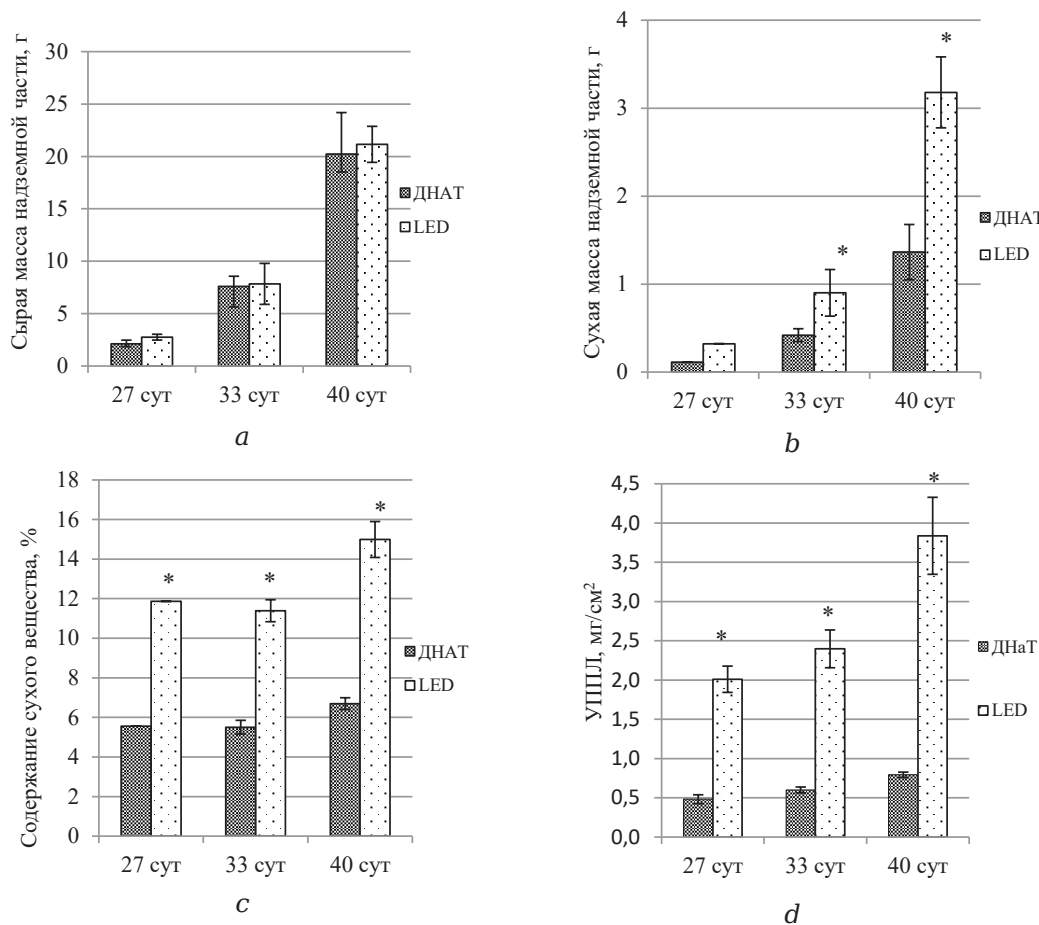


Рис. 1. Влияние ДНаТ- и LED-освещения на накопление сырой (a) и сухой (b) массы, содержание сухого вещества (c), удельную поверхностную плотность листьев (d) растений томата *Lucopersicon esculentum* Mill. * – различия достоверны по сравнению с контрольным ДНаТ-вариантом при $p \leq 0,05$

Fig. 1. HPS and LED lighting effect on the accumulation of fresh (a) and dry (b) weight, dry matter content (c), specific surface density of leaves (d) of tomato seedlings. * – differences are significant compared with the control HPS-variant at $p \leq 0.05$

под действием LED-освещения в сравнении контрольными ДНаТ-вариантами (см. рис. 2, a, b). Различия регистрировали в течение всего периода роста. Схожие эффекты у растений отмечены и при сравнении содержания хлорофилла a и хлорофилла b при разных вариантах освещения (рис. 2, c, d).

Светодиодное освещение стимулировало также интенсивность выделения кислорода фотосинтетическим аппаратом (рис. 3). У растений томата, культивируемых под лампами ДНаТ, уровень фотосинтетической активности составлял в среднем $0,6 \text{ мкмоль } \text{O}_2 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и практически не менялся с возрастом. В то же время при LED-освещении в течение всего периода роста происходила интенсификация фотосинтетической активности, а к 40-м суткам культивирования наблюдали повышение уровня выделения кислорода до $0,8\text{--}0,9 \text{ мкмоль } \text{O}_2 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и достоверные отличия от контрольного ДНаТ-варианта. Значимых различий в активности темнового дыхания у ДНаТ- и LED-вариантов обнаружено не было. Коэффициент фотосинтетической эффективности K_{phA} при светодиодном освещении также увеличивался с течением времени культивирования, а под лампами ДНаТ, наоборот, снижался (рис. 3, a, b). K_{phA} отражает физиологические состояние растения, обобщая характеристики двух важнейших процессов – фотосинтеза и дыхания. Известно, что под действием неблагоприятных факторов у растений часто происходит сдвиг в соотношении процессов дыхания и фотосинтеза в сторону активации процессов потребления O_2 и уменьшения его образования и, таким образом, уменьшается

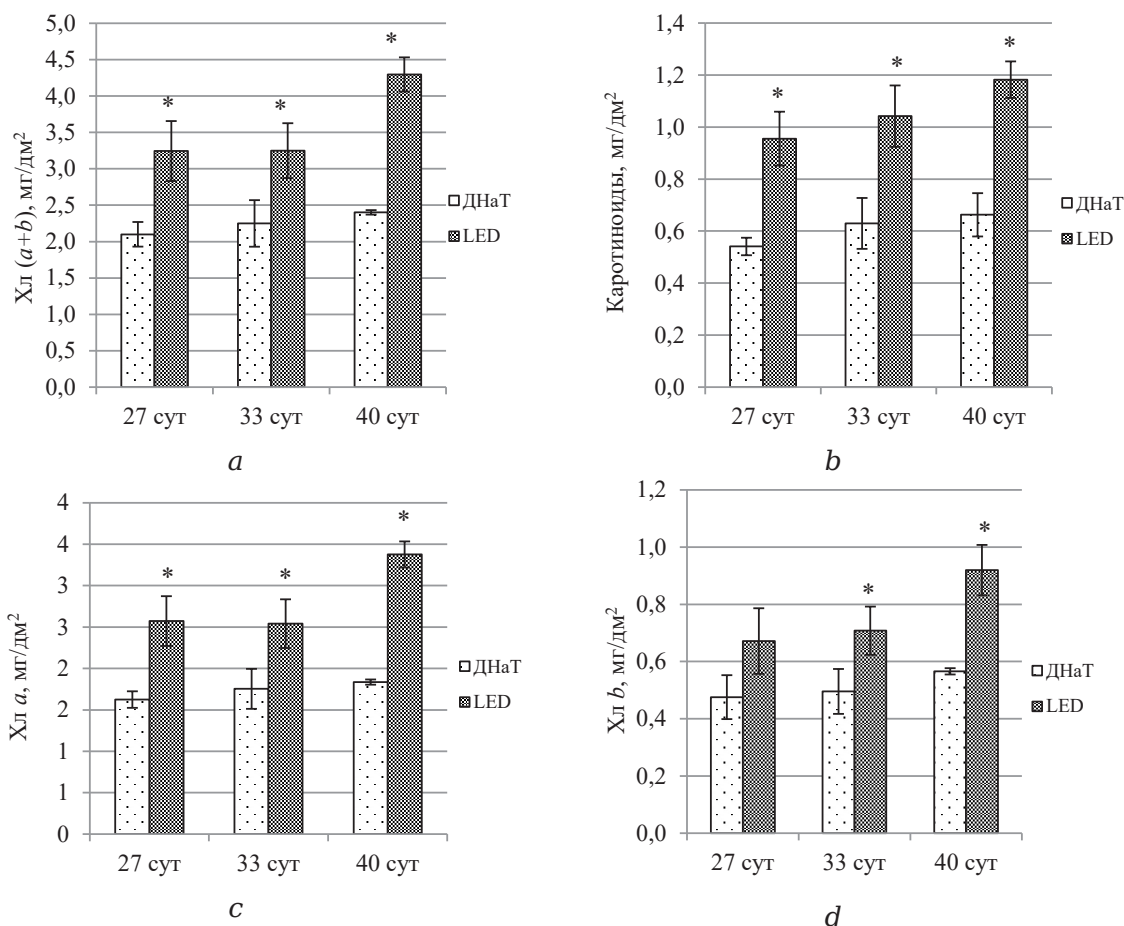


Рис. 2. Содержание суммы хлорофиллов (a), каротиноидов (b), хлорофилла a (c), хлорофилла b (d) в листьях растений томата *Lycopersicon esculentum* Mill. при ДНаТ- и LED-освещении. * – различия достоверны по сравнению с контрольным ДНаТ-вариантом при $p \leq 0,05$

Fig. 2. Content of total chlorophylls (a), carotenoids (b), chlorophyll a (c), chlorophyll b (d) in leaves of tomato plants *Lycopersicon esculentum* Mill. at HPS and LED lighting. * – differences are significant compared with the control HPS-variant at $p \leq 0.05$

коэффициент K_{phA} [15]. Поэтому снижение этого коэффициента свидетельствует скорее о неблагоприятных для растения условиях роста, в то время как его повышение является весомым аргументом в пользу эффективного использования фотосинтетическим аппаратом растений LED-освещения. Из приведенных выше данных следует, что тестируемое LED-освещение оптимизирует процессы фотосинтеза растений томата *Lycopersicon esculentum* Mill. в течение первых 40 сут вегетационного периода.

Оценка морфометрических параметров показала значительное увеличение длины стебля и междоузлий при равном их количестве у растений, выращенных под лампами ДНаТ, по сравнению с LED-вариантом (рис. 4, a–c). Удлинение междоузлий и более низкий уровень образования сухого вещества свидетельствуют об интенсификации процессов роста клеток путем растяжения, происходящих скорее за счет поглощения воды, а не в результате образования органических соединений, а значит, о недостаточно эффективном освещении растений томата лампами ДНаТ по сравнению с LED-облучателями. По количеству листьев достоверных отличий между растениями также не обнаружено (рис. 4, d). В то же время только у растений томата, культивируемых при LED-освещении, к 40-м суткам было отмечено появление генеративных органов, т. е. они раньше переходили в фазу цветения (рис. 4, b). Это может быть связано как с более высокой дозой эффективных для фотосинтеза длин волн в световом потоке, так и с оптимизацией регуляторных возможностей, обеспеченных сбалансированным спектральным соста-

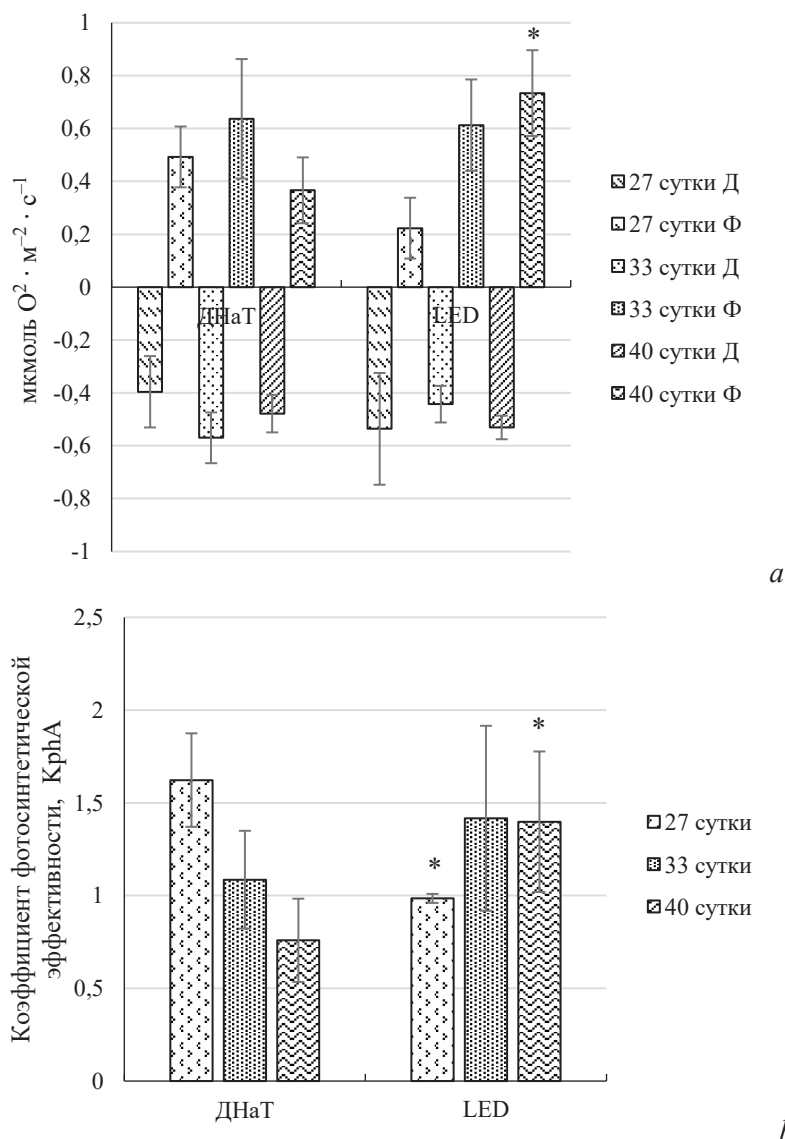


Рис. 3. Влияние ДНаТ- и LED-освещения на интенсивность выделения кислорода при фотосинтезе (Ф) и его поглощения при дыхании (Д) (а), коэффициент фотосинтетической эффективности (b) в листьях растений томата *Lucopersicon esculentum* Mill. * – различия достоверны по сравнению с контрольным ДНаТ-вариантом при $p \leq 0,05$

Fig. 3. Illumination influence on the intensity of release (F) and absorption (D) of oxygen during photosynthesis and respiration (a), coefficient of photosynthetic efficiency (b) in leaves of tomato plants *Lucopersicon esculentum* Mill.

* – differences are significant compared with the control HPS-variant at $p \leq 0.05$

вом используемого в эксперименте фитооблучателя FLORA LED. Известно, что накопление витаминов, синтез фитогормонов и других регуляторных сигнальных молекул находятся под контролем света определенных длин волн [1]. Таким образом, важным достоинством облучателей нового поколения являются уникальные возможности для оптимизации светового режима культивирования растений, включая эффективную стимуляцию фоторегуляторных механизмов. Основываясь на полученных данных, можно также предположить, что ускоренное вступление в генеративную фазу при светодиодном освещении обеспечит впоследствии раннее и более интенсивное плодоношение растений высокостебельных сортов томата.

Выращенные в условиях LED-освещения растения (рассада) уже через 14 сут культивирования в производственном отделении имели больше цветковых кистей, чем растения при традиционном освещении лампами ДНаТ, а в возрасте 60 сут были получены первые плоды. Через 3,5 мес. от начала вегетации LED-растения характеризовались в среднем на 30 % более высокой урожай-

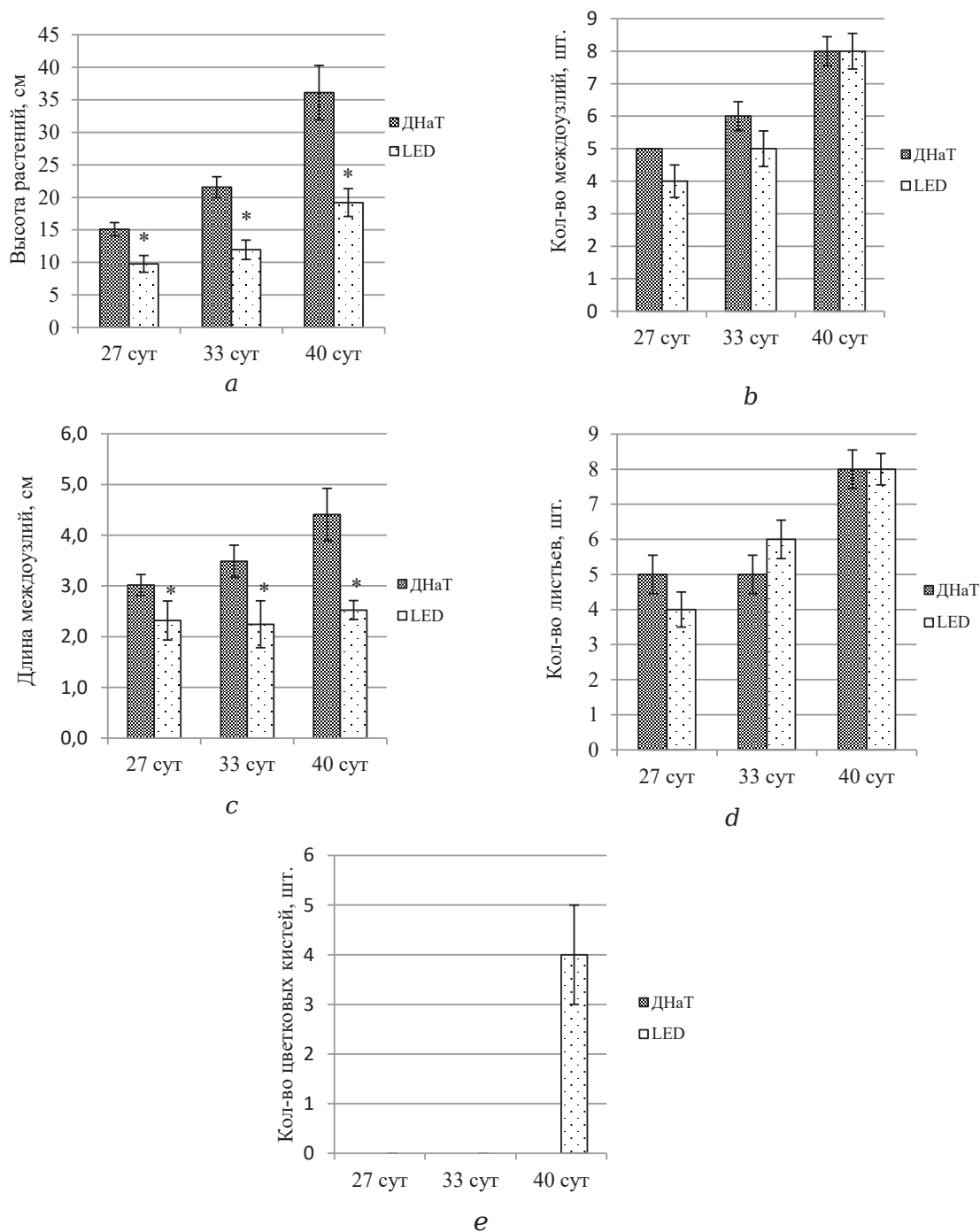


Рис. 4. Высота (a) и длина (b) растений, количество междоузлий (c), количество листьев (d) и цветковых кистей (e) растений томата *Lucopersicon esculentum* Mill. при ДНаТ- и LED-освещении. * – различия достоверны по сравнению с контрольным ДНаТ-вариантом при $p \leq 0,05$

Fig. 4. Plant height (a), length (b) and number of internodes (c), number of leaves (d) and flowers (e) of tomato plants *Lucopersicon esculentum* Mill. at HPS and LED lighting. * – differences are significant compared with the control HPS-variant at $p \leq 0.05$

ностью. Таким образом, темпы роста и развития ювенильных растений (рассады) томата в условиях опытно-производственного участка при LED-освещении являются гораздо более высокими, чем под лампами ДНаТ. Правильно подобранный спектральный состав светодиодного освещения позволяет регулировать и оптимизировать процессы фотосинтеза и фотоморфогенеза, обеспечивая успешное внедрение инновационных ресурсосберегающих технологий в растениеводство.

Заключение. Показано преимущество использования LED-освещения для культивирования рассады высокостебельных сортов томата в условиях производства по сравнению с лампами ДНаТ, обусловленное прежде всего разработкой спектра, обеспечивающего оптимизацию фотосинтеза, фотоморфогенеза и ускоряющего процессы роста и развития. Так, растения, выращиваемые в условиях опытного участка на КУП «Минская овощная фабрика», оснащенного LED-облучателями, по большинству физиологических параметров (сухая масса и содержание сухого вещества вегетативных органов, содержание фотосинтетических пигментов, функциональная активность работы фотосинтетического аппарата, количество цветковых кистей и сроки их образования) превосходили растения, культивируемые при традиционном освещении лампами ДНаТ. Предполагается, что более интенсивные процессы роста и развития, повышенная фотосинтетическая и биосинтетическая активность обеспечили рассаде, выращенной при LED-освещении, более высокий адаптивный потенциал и приживаемость при пересадке, повышение урожайности, особенно за счет более раннего плодоношения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта «Осуществить сравнительный мониторинг физиолого-биохимических процессов и продуктивности растений томата и культур для салатных линий при экспериментальной светодиодной и традиционной досветках в условиях опытно-производственного участка, разработать временные регламенты досветки томата и зеленых культур» (2016–2018 гг.), финансируемого из инновационного фонда Мингорисполкома.

Авторы выражают благодарность Мингорисполкому и КУП «Минская овощная фабрика» за содействие в проведении исследований.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the project “To carry out a comparative monitoring of physiological and biochemical processes and productivity of tomato plants and crops for lettuce lines under experimental LED and traditional lighting in the conditions of a pilot production site, to develop temporary regulations for the lighting of tomato and green crops” (2016–2018) and financed by the innovation fund of the Minsk City Executive Committee.

The authors would like to express their gratitude to the Minsk City Executive Committee and the Municipal Unitary Enterprise “Minsk Vegetable Factory” for assistance in conducting research.

Список использованных источников

1. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review / M. Landi [et al.] // *Biochim. Biophys. Acta Bioenerg.* – 2020. – Vol. 1861, N 2. – Art. 148131. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2019.148131>
2. Закурин, А. О. Светокультура растениеводства защищенного грунта: фотосинтез, фотоморфогенез и перспективы применения светодиодов / А. О. Закурин, А. В. Щенникова, А. М. Каминская // *Физиология растений.* – 2020. – Т. 67, № 3. – С. 246–258.
3. Тихомиров, А. А. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / А. А. Тихомиров, В. П. Шарупич, Г. М. Лисовский. – Новосибирск : Изд-во Сибир. отд-ния РАН, 2000. – 213 с.
4. Сытников, В. Современные системы освещения / В. Сытников // *Мир теплиц.* – 2013. – № 6. – С. 24–25.
5. Light Emitting Diodes (LEDs) as agricultural lighting: impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops / M. al Murad [et al.] // *Sustainability.* – 2021. – Vol. 13, N 4. – Art. 1985. <https://doi.org/10.3390/su13041985>
6. Horticultural lighting system optimization: A review / L. Sipos [et al.] // *Scientia Horticulturae.* – 2020. – Vol. 273. – Art. 109631. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631>
7. Production of tomato by countries. Food and Agriculture Organization. 2012 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. – Date of access: 19.09.2022.
8. Enrichment of tomato paste with 6 % tomato peel increases lycopene and β -carotene bioavailability in men / E. Reboul [et al.] // *J. Nutr.* – 2005. – Vol. 135, N 4. – P. 790–794. <https://doi.org/10.1093/jn/135.4.790>
9. Philips Lumileds 2008. Light by LUXEON Newsletter [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.lumileds.com/newsletter/>. – Date of access: 19.09.2022.
10. Gunnlaugsson, B. Interlight and plant density in year-round production of tomato at northern latitudes / B. Gunnlaugsson, S. Adalsteinsson // *Acta Horticulturae.* – 2006. – Vol. 711. – P. 71–76. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.6>
11. The effect of LED lighting on the growth of seedlings of hybrid tomato / M. N. M. Al-Rukabi [et al.] // *Fourth International conference for agricultural and sustainability sciences, October 4–5, 2021, Babil, Iraq (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 910).* Art. 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/910/1/012127>
12. Son, K.-H. Growth and development of cherry tomato seedlings grown under various combined ratios of red to blue LED lights and fruit yield and quality after transplanting / Ki-Ho Son, Eun-Young Kim, Myung-Min Oh // *Protect. Hortic. Plant Factory.* – 2018. – Vol. 27, N 1. – P. 54–63. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2018.27.1.54>

13. Wettstein, D. Formula of chlorophyll determination / D. Wettstein // Exp. Cell Res. – 1957. – Vol. 12, N 3. – P. 427–489.

14. Терминология количественных характеристик при изучении роста, продуктивности и фотосинтеза сельскохозяйственных растений : метод. указания / сост. : М. И. Зеленский, О. Д. Быков. – Ленинград : НИИ растениеводства им. Н. И. Вавилова, 1982. – 45 с.

15. Новые возможности в оценке состояния растений / Н. Г. Акиншина [и др.] // Сибир. экол. журн. – 2008. – Т. 15, № 2. – С. 249–254.

References

1. Landi M., Zivcak M., Sytar O., Brestic M., Allakhverdiev S. I. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*, 2020, vol. 1861, no. 2, art. 148131. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2019.148131>

2. Zakurin A. O., Shchennikova A. V., Kamionskaya A. M. Artificial-Light Culture in Protected Ground Plant Growing: Photosynthesis, Photomorphogenesis, and Prospects of LED Application. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2020, vol. 67, no. 3, pp. 413–424. <https://doi.org/10.1134/S102144372003022X>

3. Tikhomirov A. A., Sharupich V. P., Lisovskii G. M. Light culture of plants: biophysical and biotechnological foundations. Novosibirsk, Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. 213 p. (in Russian).

4. Sytnikov V. Modern lighting systems. *Mir teplits [World of greenhouses]*, 2013, no. 6, pp. 24–25 (in Russian).

5. Al Murad M., Razi K., Jeong B. R., Samy P. M. A., Muneer S. Light Emitting Diodes (LEDs) as agricultural lighting: impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 4, art. 1985. <https://doi.org/10.3390/su13041985>

6. Sipos L., Boros I. F., Csambalik L., Szjkelyd G., Junge A., Balazs L. Horticultural lighting system optimization. *Scientia Horticulturae*, 2020, vol. 273, art. 109631. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631>

7. Production of Tomato by countries. Food and Agriculture Organization. 2012. Available at: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> (accessed 19.09.2022).

8. Reboul E., Borel P., Mikail C., Abou L., Charbonnier M., Caris-Veyrat C., Goupy P., Portugal H., Lairon D., Amiot M. Enrichment of tomato paste with 6 % tomato peel increases lycopene and β -carotene bioavailability in men. *Journal of Nutrition*, vol. 135, no. 4, pp. 790–794. <https://doi.org/10.1093/jn/135.4.790>

9. Philips Lumileds 2008. Light by LUXEON Newsletter. Available at: <http://www.lumileds.com/newsletter/> (accessed 19.09.2022).

10. Gunnlaugsson B., Adalsteinsson S. Interlight and plant density in year-round production of tomato at northern latitudes. *Acta Horticulturae*, 2006, vol. 711, pp. 71–76. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.6>

11. Al-Rukabi M. N. M., Leunov V. I., Tarakanov I. G., Tereshonkova T. A. The effect of LED lighting on the growth of seedlings of hybrid tomato. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 910, Fourth International conference for agricultural and sustainability sciences, October 4–5, 2021, Babil, Iraq. Art. 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/910/1/012127>

12. Son K.-H., Kim E.-Y., Oh M.-M. Growth and development of cherry tomato seedlings grown under various combined ratios of red to blue LED lights and fruit yield and quality after transplanting. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 54–63. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2018.27.1.54>

13. Wettstein D. Formula of chlorophyll determination. *Experimental Cell Research*, 1957, vol. 12, no. 3, pp. 427–489.

14. Zelenskii M. I., Bykov O. D. Terminology of quantitative characteristics in the study of growth, productivity and photosynthesis of agricultural plants. *Leningrad, All-Russian Research Institute of Plant Growing named after. N. I. Vavilova*, 1982. 45 p. (in Russian).

15. Akinshina N. G., Azizov A. A., Karaseva T. A., Kloze E. New opportunities in assessing the condition of plants. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal [Siberian ecological journal]*, 2008, vol. 15, no. 2, pp. 249–254 (in Russian).

Информация об авторах

Молчан Ольга Викторовна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga_molchan@mail.ru

Обуховская Людмила Владимировна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: olv_8@mail.ru

Куделина Татьяна Николаевна – науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: 10tan10@mail.ru

Information about the authors

Olga V. Molchan – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Head of the Laboratory. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olga_molchan@mail.ru

Lyudmila V. Obukhovskaya – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olv_8@mail.ru

Tatiana N. Kudelina – Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 10tan10@mail.ru

Астасенко Николай Игнатьевич – науч. сотрудник. Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси» (Логойский тракт, 20, 220090, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Баркун Михаил Иосифович – вед. инженер. Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси» (Логойский тракт, 20, 220090, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: m_barkun@ledcenter.by

Трофимов Юрий Васильевич – канд. техн. наук, директор. Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси» (Логойский тракт, 20, 220090, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: trofimo119@gmail.com

Nikolay I. Astasenko – Researcher. Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Center of LED and Optoelectronic Technologies of National Academy of Sciences of Belarus” (20, Logoiski Tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@ledcenter.by

Mikhail I. Barkun – Lead Engineer. Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Center of LED and Optoelectronic Technologies of National Academy of Sciences of Belarus” (20, Logoiski Tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m_barkun@ledcenter.by

Yuri V. Trofimov – Ph. D. (Tech.), director. Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Center of LED and Optoelectronic Technologies of National Academy of Sciences of Belarus” (20, Logoiski Tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: trofimo119@gmail.com