

УДК 635.52:581.1:58.035

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ И СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ НА РОСТ И МОРФОГЕНЕЗ САЛАТА ЛИСТОВОГО

Плотникова Л.Я., Самойлов В.Н.

ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина», Омск,  
e-mail: lplotnikova2010@yandex.ru

Влияние интенсивности и спектров освещения на рост и морфогенез салата листового исследовано в условиях полной светокультуры и глубоководной гидропоники. Эксперименты по изучению действия интенсивности света в пределах 120–600 мкмоль/м<sup>2</sup>·с фотосинтетически активной радиации проводили с применением натриевых ламп высокого давления (НЛ). При увеличении интенсивности освещения в промежутке от 120 до 200 мкмоль/м<sup>2</sup>·с рост сырой массы был близок к линейному, а продуктивность растений возрастала двукратно. При 200–400 мкмоль/м<sup>2</sup>·с показатели были максимальными и существенно не различались, а при 600 мкмоль/м<sup>2</sup>·с отмечено угнетение роста. Для изучения влияния спектров освещения на рост и морфогенез салата использовали светодиодные (СД) светильники с комбинациями белого холодного и красного (БХК), белого холодного и теплого (БХТ) спектров, а также НЛ (контроль). Эксперименты проводили при интенсивности освещения 200 мкмоль/м<sup>2</sup>·с. Через 28 сут. после пересадки в гидропонную систему растения имели максимальную сырую массу под НЛ, под СД-светильниками со спектрами БХК и БХТ – меньшую (на 6 и 16% соответственно). При этом под СД-светильниками растения накапливали больше сухих веществ. Спектры освещения оказывали влияние на процесс фотосинтеза и морфогенез салата. Чистая продуктивность фотосинтеза была выше в вариантах со светодиодным освещением. Под НЛ формировались низкие раскидистые растения, с перекрывающимися листьями нижних ярусов, занимавшие большую площадь. Под СД-светильниками растения имели более компактную форму и занимали площадь в 2,3–2,8 раза меньше, чем под НЛ. Это дает возможность уплотнить посадку растений без существенного снижения их продуктивности. В целом оптимизация интенсивности и спектров освещения позволяет значительно повысить выход продукции в салатных линиях.

**Ключевые слова:** *Lactuca sativa* L., интенсивность освещения, светодиоды, спектры излучения, фотосинтез, морфогенез

## INFLUENCE OF THE INTENSITY AND IRRADIATION SPECTRA OF LED LAMPS ON THE GROWTH AND MORPHOGENESIS OF LETTUCE

Plotnikova L.Ya., Samoilov V.N.

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, e-mail: lplotnikova2010@yandex.ru

The effect of light intensity and irradiation spectra on the growth and morphogenesis of lettuce was studied under indoor conditions and deep-water culture. Experiments to study the effect of light intensity in the range of 120–600 μmol / m<sup>2</sup> · s of photosynthetically active radiation were carried out using sodium high-pressure lamps (SL). It was found that with an increase in the light intensity in the range from 120 to 200 μmol / m<sup>2</sup> · s, the growth of the crude weight of plants was close to linear and the productivity of the plants increased twofold. At 200–400 μmol / m<sup>2</sup> · s, the indicators were maximum and did not differ significantly, and at 600 μmol / m<sup>2</sup> · s, growth partially was inhibited. To study the effect of the emission spectra the LED lamps with a combinations of white cold-red (WCR) and white cold-warm (WCW) spectra were used, as well as SL (control) at a light intensity of 200 μmol / m<sup>2</sup> · s. It was found that 28 days after the transfer to the hydroponic system, the maximum plant crude weight was under the SL, and under the LED lamps with the spectra of WCR and WCW was less (8 and 18%, respectively). At the same time, the plants had more dry material under the LED-lamps. The light spectra influenced the photosynthesis morphogenesis of plants. The net productivity of photosynthesis was higher in the variants with LED lighting. Low spreading plants with overlapping leaves of the lower tiers, which occupied a large area, were formed under the SL. Plants under LED-lamps had a more compact shape and occupied an area 2.3–2.8 times less than under the SL. This makes it possible to compact the planting without valuable reducing their productivity. In general, the optimization of the intensity and spectrum of lighting can significantly increase the yields in salad lines.

**Keywords:** *Lactuca sativa* L., light intensity, LEDs, emission spectra, photosynthesis, morphogenesis

Салат листовой *Lactuca sativa* L. входит в число наиболее востребованных листовых овощных культур в связи с низкой калорийностью, а также высоким содержанием витаминов и минералов [1]. Для улучшения пищевого рациона населения необходимо увеличивать производство салата, что может быть достигнуто за счет повышения урожайности, а также сокращения време-

ни его выращивания (производственного цикла).

Продуктивность растений зависит от процесса фотосинтеза, в ходе которого происходит усвоение солнечной энергии и накопление органических веществ. Эффективность фотосинтеза существенно зависит от продолжительности, интенсивности и спектра освещения [2]. В тепличных

комплексах важное значение в управлении урожайностью растений имеет оптимизация параметров освещения. Длительное время в мире для досвечивания растений в условиях короткого дня использовали натриевые лампы высокого давления (НЛ), а затем люминесцентные светильники [3]. В последнее десятилетие усилился интерес к использованию светодиодных источников освещения (Light-emitting diode – LED), преимуществом которых является возможность гибкого регулирования интенсивности и спектров освещения [4; 5]. Особый интерес к данному направлению связан с развитием технологии многоуровневого выращивания растений (вертикальное земледелие) без естественного освещения в закрытых помещениях (indoor culture – полная светокультура) [3].

Потребности растений в интенсивности и спектре освещения зависят от вида и технологии их выращивания [2]. Мнения об оптимальной интенсивности освещения салата листового разнятся, в литературе есть данные о применении режимов освещения от 120 до 600 мкмоль/м<sup>2</sup>·с [6–8]. Кроме того, важное значение для роста и морфогенеза растений имеет спектральный состав света. Известно, что растения в ходе фотосинтеза усваивают волны видимой части спектра (фотосинтетически активная радиация – ФАР). При этом хлорофиллы имеют максимумы поглощения в красной (КС) и синей (СС), а каротиноиды – в синей части спектра. На первых этапах исследовали действие на растения СД-светильников с узкими спектрами излучения КС и СС, близкими к максимумам поглощения фотосинтетических пигментов. При этом было показано, что растения способны осуществлять фотосинтез, однако их продуктивность была ниже, чем под традиционными НЛ и люминесцентными лампами [4; 8]. Позже было установлено, что волны других частей спектра света также необходимы в качестве сигналов для развития и адаптации к условиям среды [9]. В настоящее время сложилось понимание, что для получения высокой урожайности необходим индивидуальный подбор параметров освещения с учетом культуры и способов ее выращивания.

Целью работы было изучение влияния интенсивности и спектров освещения на рост и морфогенез салата листового в условиях полной светокультуры и глубоководной гидропонии.

### Материалы и методы исследования

Объектом исследований был салат листовой *Lactuca sativa* L., сорт Афицион.

Растения выращивали рассадным способом на вермикулите в 30%-ном растворе Кноппа, затем в возрасте 11 сут. пересаживали в гидропонную систему на плоты из вспененного пластика (deep-water culture) (рис. 1) [10].



Рис. 1. Выращивание салата по технологии глубоководной гидропонии на плоты из вспененного пластика

Салат выращивали в полной светокультуре, без доступа естественного света, с 16-часовым светопериодом. Использовали светильники с разными спектрами излучения: 1) натриевые лампы высокого давления марки OSRAM Plantastar 250 Вт (НЛ – контроль); 2) светильники с комбинацией мультиспектрных светодиодов с белым холодным спектром и монохромных с красным спектром (СД БХК); 3) светильники с комбинацией мультиспектрных светодиодов с белым холодным и теплым спектром (СД БХТ) (рис. 2).

Влияние интенсивности освещения на рост растений изучали с использованием НЛ. Интенсивность измеряли в квантовых единицах плотности фотосинтетически активного потока фотонов (мкмоль/м<sup>2</sup>·с). Освещение изменяли в промежутке 120–220, а также в точках 400 и 600 мкмоль/м<sup>2</sup>·с ФАР. Параметры освещения на уровне плотов контролировали с помощью спектрометра марки «ТКА-Спектр» (ФАР) (НТП «ТКА», Россия). Влияние спектров излучения на рост и морфогенез исследовали при интенсивности 200 ± 10 мкмоль/м<sup>2</sup>·с. Температура на уровне плотов под СД-светильниками составляла 23 °С, под НЛ 25,5–27,0 ± 1 °С, что связано с их высокой теплоотдачей.

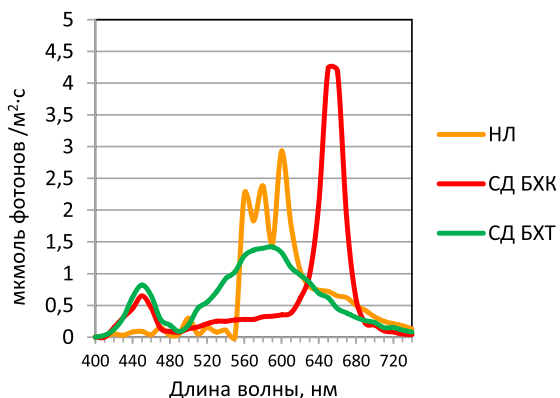


Рис. 2. Спектры излучения светильников: НЛ – натриевая лампа высокого давления, СД БХК – СД-светильник с белым холодным и красным спектром, СД БХТ – СД-светильник с белым холодным и теплым спектрами

Результаты экспериментов учитывали через 28 сут. после пересадки растений. Определяли параметры: сырую и сухую массу (г); длину и ширину листьев (см), высоту растений (см). Площадь отдельных листьев (см<sup>2</sup>) определяли по формуле эллипса ( $S = \pi AB/4$ , где А и В – длина и ширина соответственно). Измерения проводили в трех биологических повторностях по три растения. По полученным данным рассчитывали суммарную площадь листьев растений (м<sup>2</sup>). Площадь, занимаемую растениями на плоте, рассчитывали по формуле круга, ориентируясь на размеры самого большого яруса листьев ( $S = \pi R^2$ , где R – максимальная длина листьев).

Чистую продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) в период активного роста с 14-х по 28-е сутки после пересадки высчитывали по формуле:

$$\text{ЧПФ} = \frac{B_2 - B_1}{0.5(L_1 + L_2) \cdot n},$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – сухая масса растений (г),  $L_1$  и  $L_2$  – площади листьев в начале и в конце периода (м<sup>2</sup>);  $0,5 \cdot (L_1 + L_2)$  – средняя рабочая площадь листьев за время опыта (м<sup>2</sup>); n – период между наблюдениями [11]. По полученным данным высчитывали средние значения, ошибку средней, наименьшую существенную разность ( $НСР_{05}$ ).

### Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе работа была направлена на определение оптимальной интенсивности освещения в условиях полной светокультуры. Установлено, что при уве-

личении интенсивности освещения в промежутке от 120 до 200 мкмоль/ м<sup>2</sup> · с сырая масса растений возрастала двукратно (от 119 до 240 г). При дальнейшем усилении освещения до 400 мкмоль/ м<sup>2</sup> · с отмечено незначительное (в пределах ошибки) увеличение массы, а при 600 мкмоль/ м<sup>2</sup> · с продуктивность снижалась на 23 % (рис. 3).

Близкое к линейному увеличение массы растений свидетельствует о повышении интенсивности фотосинтеза. Продуктивность достигала максимальных значений при 200–220 мкмоль/ м<sup>2</sup> · с, что, вероятно, связано со световым насыщением фотосистем. Ранее было показано, что при повышении интенсивности освещения возможно ускорение роста салата, это позволяет сокращать производственный цикл до 7 суток [12]. Снижение продуктивности растений при 600 мкмоль/ м<sup>2</sup> · с, вероятно, связано со стрессовым воздействием избыточного освещения. Ранее подобный эффект, вплоть до нарушения развития, был показан и на других видах [13]. Таким образом, интенсивность освещения 200 мкмоль/ м<sup>2</sup> · с была оптимальной для выращивания салата при используемой технологии.

Ранее было показано, что под НЛ, имеющими значительную долю излучения в желто-оранжевой области (550–620 нм), растения салата росли интенсивнее, чем под СД-светильниками с узким красным и синим спектром [14]. В связи с этим в данном исследовании были использованы СД-светильники со спектрами излучения, приближенными к НЛ. При этом в варианте СД БХТ светильник излучал преимущественно волны зелено-желто-оранжевого диапазона, небольшую часть – синего. В варианте СД БХК светильник имел небольшую долю зелено-желто-оранжевых лучей, а также пики в синей и красной областях спектра (рис. 2).

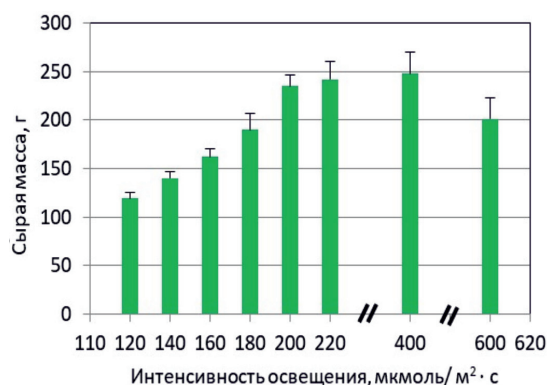


Рис. 3. Зависимость сырой массы растений салата от интенсивности освещения

В экспериментах с использованием светильников с разными спектрами излучения было показано, что под НЛ растения имели наибольшую сырую и сухую массу (241 и 16,1 г соответственно), а также площадь листьев (таблица). Близкие к контролю показатели имели растения в варианте СД БХК (223 и 15,7 г соответственно), худшие – в варианте СД БХТ. Снижение сырой массы растений по отношению к контролю составило 8 и 18% соответственно. В пересчете на единицу поверхности листа салата под СД-светильниками имели более высокую сырую массу, что, очевидно, связано с их большей толщиной. При этом в варианте СД БХК доля сухого вещества в общей массе растения была достоверно выше по сравнению с контролем, что указывает на меньшее содержание в них воды.

Показатель ЧПФ, характеризующий интенсивность ежесуточного накопления сухой массы единицей поверхности растений, был самым высоким в варианте СД БХК,

средним – с СД БХТ, худшим – с НЛ. Это свидетельствует о том, что накопление сухого вещества под СД-светильниками происходило интенсивнее, несмотря на меньшую площадь листьев.

Для определения влияния спектров освещения на морфогенез были измерены высота растений и длина листьев по ярусам. Результаты показали, что под НЛ растения были самыми низкими и раскидистыми. При этом листья второго и третьего ярусов были самыми длинными и перекрывали нижние (рис. 4). Поскольку затенение приводит к ухудшению освещения нижних листьев, то становится понятным достоверное снижение ЧПФ под НЛ. Растения под СД-светильниками были выше и компактнее. В варианте СД БХТ растения имели форму, сходную с контрольной, но меньшие размеры. В варианте СД БХК листья разных ярусов были близки по размерам, что обеспечивало лучшее освещение. Очевидно, такая форма способствовала более высокому показателю ЧПФ.

#### Изменение показателей салата листового при выращивании под светильниками с разными спектрами излучения\*

Вариант	Масса, г		Доля сухой массы, %	ЧПФ	Площадь листьев, см <sup>2</sup>	Сырая масса листа, г/см <sup>2</sup>	Высота, см	Максимальная длина листьев, см	Площадь, занимаемая растением, см <sup>2</sup>
	сырая	сухая							
НЛ – контроль	241	16,1	6,68	2,51	3139	0,077	20,3	22,0	1518
СД БХК	223	15,7	7,04	3,53	2422	0,092	25,4	14,7	674
СД БХТ	203	13,3	6,54	2,95	2293	0,089	21,0	13,2	547
НСР <sub>05</sub>	15,3	0,33	0,33	0,33	61,3	0,003	2,4	1,2	51

Примечание: НЛ – натриевая лампа высокого давления; СД БХК – СД-светильник с белым холодным и красным спектром; СД БХТ – СД-светильник с белым холодным и теплым спектром; ЧПФ – чистая продуктивность фотосинтеза.

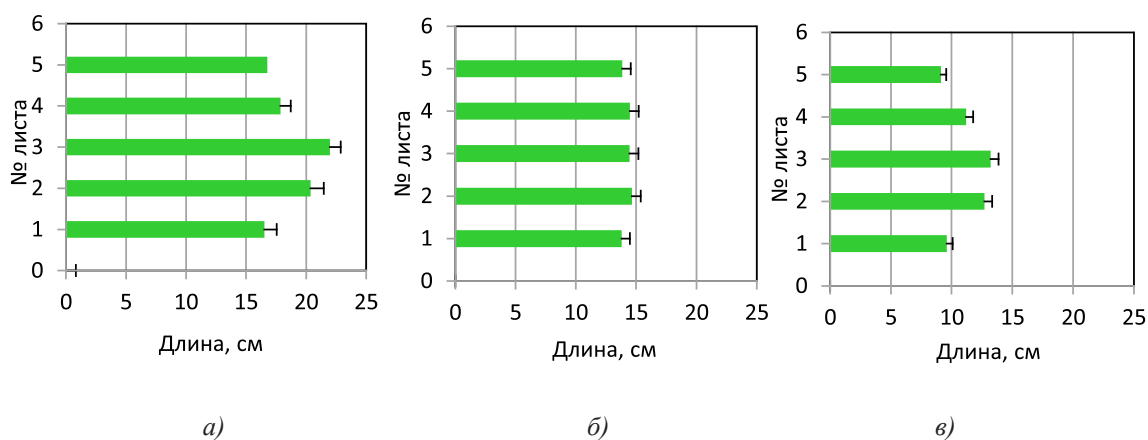


Рис. 4. Влияние спектров освещения на размеры листьев салата разных ярусов (1 – нижний, 5 – верхний): а – натриевая лампа НЛ; б – светодиодный светильник с белым холодным и красным спектром СД БХК; в – светодиодный светильник с белым холодным и теплым спектром СД БХТ

Большая масса растений под НЛ может быть обусловлена разными причинами. Одной из причин может быть то, что, несмотря на выравнивание интенсивности освещения, температура под НЛ была на 2,5–3 °С выше, чем под СД-светильниками. Большой нагрев связан с высокой теплоотдачей ламп. Известно, что в оптимальном промежутке повышение температуры линейно усиливает интенсивность фотосинтеза [15]. Кроме того, установлено, что при затенении растений может проявляться эффект «синдрома избегания тени» (shade-avoidance syndrome–SAS). SAS-эффект связан с усилением синтеза и транспорта ауксинов, что приводит к удлинению органов растений [9]. Поскольку в варианте с НЛ значительная часть нижних листьев была затенена, то SAS-эффект мог стимулировать увеличение размеров растений.

С учетом того что затенение снижает ЧПФ, нами была рассчитана площадь (в форме круга), которая необходима растениям для избегания конкуренции за освещение. Расчеты показали, что в варианте с НЛ необходима площадь 1518 см<sup>2</sup>, а в вариантах СД БХК и СД БХТ была достаточна площадь меньше в 2,3 и 2,8 раза соответственно. Эти результаты показывают, что возможно выращивание растений в уплотненной схеме. При небольшом проигрыше в продуктивности под СД-светильниками (на 8–18%) уплотненная посадка позволит значительно поднять урожайность салатных линий.

### Заключение

Таким образом, полученные результаты показали, что в условиях полной светокультуры и глубоководной гидропоники оптимальной была интенсивность освещения 200 мкмоль/ м<sup>2</sup> · с. Продуктивность растений под натриевыми лампами и СД-светильниками с белым холодным и красным спектром была близка, но доля сухого вещества в растениях под СД-светильниками была выше. Применение СД-светильников позволяет формировать компактные растения и повысить урожайность за счет уплотненной схемы их размещения.

### Список литературы / References

1. Amoogzar A., Mohammadi A., Sabzalian M.R. Impact of light-emitting diode irradiation on photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. Grizzly. *Photosynthetica*. 2017. № 55 (1). P. 85–95.  
2. Eichhorn Bilodeau E.S., Wu B.S., Ruyikiri A.S., MacPherson S., Lefsrud M. An update on plant photobiology

and implications for cannabis production. *Front. Plant Sci.* 2019. Vol. 10. P. 296. DOI: 10.3389/fpls.2019.00296.

3. Kozai T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: concept, estimation and application to plant factory. *Proc. Jpn. Acad. Ser. B.* 2013. Vol. 89. P. 447–461.

4. Аверчева О.В., Беркович Ю.А., Ерохин А.Н., Жигалова Т.В., Погосян С.И., Смолянина С.О. Особенности роста и фотосинтез растений китайской капусты при выращивании под светодиодными светильниками // *Физиология растений*. 2009. Т. 56. № 1. С. 17–26.

Avercheva O.V., Zhigalova T.V., Pogosyan S.I., Berkovich Yu.A., Erokhin A.N., Smolyanina S.O. Growth and photosynthesis of Chinese cabbage plants growth under Light-emitting diode-based light source // *Fiziologiya rasteniy*. 2009. Vol. 56. No. 1. P. 14–21 (in Russian).

5. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Зависимость площади листьев салата (*Lactuca sativa* L.) от дозы потока оптического излучения и ее составляющих // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2018. № 50. С. 213–219.

Rakutko S.A., Rakutko E.N. Dependence of the area of lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.) on the dose of the optical radiation flux and its components // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018. No. 50. P. 213–219 (in Russian).

6. Park Y.G., Park J.E., Hwang S.J., Jeong B.R. Light Source and CO<sub>2</sub> Concentration Effect Growth and Anthocyanin Content of Lettuce under Controlled Environment. *Hort. Environ. Biotechnol.* 2012. Vol. 53. No. 6. P. 460–466.

7. Далькэ И.В., Буткин А.В., Табаленкова Г.Н., Малышев Р.В., Григорай Е.Е., Головки Т.К.

Эффективность использования световой энергии тепличной культурой листового салата // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2013. № 5. С. 60–68.

Dal'ke I.V., Butkin A.V., Tabalenkova G.N., Malyshev R.V., Grigoraj E.E., Golovko T.K. Efficiency of the use of light energy by the greenhouse culture of lettuce // *Izvestiya Timiryazevskoj sel'skohozyajstvennoj akademii*. 2013. No. 5. P. 60–68 (in Russian).

8. Ракутько С.А., Маркова А.Е., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н. Применение красных и синих светодиодов в светокультуре салата // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 4–6. С. 1073–1076.

Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P., Rakutko E.N. Application of red and blue LEDs in lettuce indoor plant cultivation // *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*. 2016. no. 4–6. P. 1073–1076 (in Russian).

9. Войцеховская О.В. Фитохромы и другие (фото)рецепторы информации у растений // *Физиология растений*. 2019. Т. 66. № 3. С. 163–177. DOI: 10.1134/S0015330319030151.

Voitsekhovskaja O.V. Phytochromes and other (photo) receptors of information of plants // *Fiziologiya rasteniy*. 2019. Vol. 66. No. 3. P. 351–364 (in Russian).

10. Brechner M., Both A.J. *Cornell Controlled Environment Agriculture: Hydroponic Lettuce Handbook*. Cornell University, 2012. 48 p.

11. Третьяков Н.Н., Паничкин Л.А., Кондратьев М.Н. Практикум по физиологии растений. М.: КолосС, 2003. 288 с.

Tret'yakov N.N., Panichkin L.A., Kondrat'ev M.N. Practical training in Physiology. M.: KolosS, 2003. 288 p. (in Russian).

12. Самойлов В.Н., Плотникова Л.Я. Результаты изучения влияния различных источников освещения на параметры фотосинтетического процесса салата листового // *Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий: сборник II Всероссийской (национальной) научной конференции (г. Новосибирск, 25 декабря 2017 г.)*. Новосибирск. 2017. С. 108–111.

Samoilov V.N., Plotnikova L.Ya. Results of studying the influence of various light sources on the parameters of the photo-

synthetic process of lettuce // Rol' agrarnoj nauki v ustojchivom razvitii sel'skih territorij: sbornik II Vserossijskoj (nacional'noj) nauchnoj konferencii (g. Novosibirsk, 25 December 2017 g.). Novosibirsk, 2017. P. 108–111 (in Russian).

13. Solovchenko A.E., Merzlyak M.N. Screening of visible and UV radiation as a photoprotective mechanism in plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2019. Vol. 55. No. 6. P. 719–737.

14. Плотникова Л.Я., Самойлов В.Н., Новикова Е.С., Бережкова Г.А. Влияние интенсивности освещения на продуктивность салата листового в условиях полной светокультуры // Состояние и перспективы развития садоводства в Сибири: материалы II Национальной научно-практической конференции, посвященной 85-летию плодового сада Омского ГАУ имени профессора А.Д. Кизюрина (г. Омск, 7–9 декабря 2016 г.). Омск, 2016. С. 88–91.

Plotnikova L.Ya., Samoilo V.N. The effect of light intensity on the productivity of lettuce in the conditions of full light culture // Sostoyanie i perspektivy razvitiya sadovodstva v Sibiri: materialy II Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 85-letiyu plodovogo sada Omnskogo GAU imeni professora A.D. Kizyurina (g. Omsk, 7–9 December 2016 g.). Omsk, 2016. P. 88–91 (in Russian).

15. Закурин А.О., Щенникова А.В., Камионская А.М. Светокультура растениеводства защищенного грунта: фотосинтез, фотоморфогенез и перспективы применения светодиодов // Физиология растений. 2020. Т. 67. № 3. С. 246–258. DOI: 10.31857/S0015330320030227.

Zakurin A.O., Shchennikova A.V., Kamionskaya A.V. Artificial-light culture in protected ground plant growing: Photosynthesis, photomorphogenesis, and prospects of LED application // *Fiziologiya rasteniy*. 2020. Vol. 67. No. 3. P. 246–258 (in Russian).