

ВЛИЯНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ РАЗНОГО СПЕКТРА НА РАЗВИТИЕ САЛАТА ЛИСТОВОГО (*LACTUCA SATIVA*)

© 2023 г. О. В. Наконечная*, @, А. С. Холин**, Е. П. Субботин**,
Е. В. Бурковская*, Ю. А. Хроленко*, И. В. Гафицкая*, И. Ю. Орловская*,
М. Л. Бурдуковский*, А. В. Михеева*, Ю. Н. Кульчин**

*Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
просп. 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022 Россия

**Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток Россия

@E-mail: markelova@biosoil.ru

Поступила в редакцию 12.05.2022 г.

После доработки 13.07.2022 г.

Принята к публикации 07.11.2022 г.

Исследовано влияние 5 спектров светодиодных (СД) светильников на растения *L. sativa* сорта “Афицион”, выращиваемых в условиях закрытого почвогрунта. Для контроля использовали теплый белый свет WW (соотношение долей синего, зеленого и красного света – 14% : 48% : 38%). Максимальные значения размеров листьев и сырой массы надземной части выявлены у группы RGB (сине-зеленый-красный – 32% : 19% : 49%), по значениям сухой массы и золы – у группы FS (сине-зеленый-красный 27% : 11% : 62%). Плотность распределения устьиц и их размер на нижней стороне листа была максимальной у растений SB (сине-зеленый-красный 33% : 41% : 38%). Это наиболее эффективное сочетание параметров в плане архитектоники листа. Увеличение доли красного света в спектре при снижении доли зеленого света положительно влияет на развитие растений *L. sativa*, в то же время увеличение доли зеленого света в спектре положительно отражается на формировании устьичного аппарата.

Ключевые слова: *Lactuca sativa*, спектр света, устьичный аппарат, светодиоды

DOI: 10.31857/S1026347022600406, **EDN:** MIAMUV

Интенсивность и спектральный состав света являются факторами, регулируемыми как ростовые, так и фотосинтетические реакции в системе целого растения (Протасова, 1987; Frąszczak, Kula–Maximenko, 2021). Понимание процессов передачи сигналов и формирование адаптационного ответа позволит выработать механизмы управления потенциалом развития растений. Интерес к тематике возрастает при выращивании сельскохозяйственных культур. Одной из них является салат (*Lactuca sativa* L.). В растении присутствуют полиненасыщенные жирные кислоты, которые важны для здоровья человека (Kaur *et al.*, 2014). Основными жирными кислотами в салате являются α -линоленовая кислота и линолевая кислота, составляющие 60 и 20% от общего количества жирных кислот, соответственно (Le Guedard *et al.*, 2008). Кроме того, в листьях содержатся такие элементы как Na, K, Ca, Mg, Zn, Fe (Kawashima, Soares, 2003; Моц, 2005; Koudela and Petříková, 2008; Baslam *et al.*, 2013), витамин С, Е, В₉ (Kim *et al.*, 2016), каротиноиды (Моц, 2005) и др. Наличие

клетчатки в растениях салата при употреблении в пищу способствует снижению риска сердечно-сосудистых заболеваний, диабета, развития рака толстой кишки (Kim *et al.*, 2016; Shimokawa *et al.*, 2014).

Исследования влияния спектров света и интенсивности на разные сорта салата начались в конце прошлого столетия. К настоящему времени механизмы воздействия света изучены более чем на 40 сортах. Было определено, что в зависимости от сорта реакция растений на разный спектр не всегда была одинаковой – изменялся синтез веществ или параметры роста (Hunter, Burritt, 2004; Caldwell, Britz, 2006; Stutte *et al.*, 2009; Shimokawa *et al.*, 2014; Bantis *et al.*, 2016).

При изучении влияния красного света (R, 660 нм) на развитие проростков салата выявлено сильное вытягивание растений. Добавление синих фотонов (B, 435–470 нм) к красному спектру привело к минимальному удлинению гипокотилей и черешков листьев (Hoenecke *et al.*, 1992). Инги-

бирующее действие на рост побегов салата при использовании синего света и стимулирующее процессы развития у красного света подтверждено позднее (Hunter, Burritt, 2004). При постоянном воздействии увеличение доли синего света способствует изменению фотосинтетических характеристик и росту из-за стимулирования морфологических и физиологических реакций (Wang *et al.*, 2016). Синие светодиоды (440 нм) регулируют метаболические пути, ведущие к увеличению концентрации антиоксидантов в тканях листьев салата (Stutte *et al.*, 2009).

Определенное влияние на развитие растений оказывает ультрафиолет. Показано, что дополнительное УФ-облучение увеличивало концентрацию каротиноидов и хлорофилла в зеленом листовом салате, одновременно снижая уровни этих соединений в красном листовом салате (Caldwell, Britz, 2006). Добавление 1% ультрафиолета привело к увеличению показателей общей массы, соотношению корень/побег и общему содержанию фенола (Han *et al.*, 2017).

Исследовано сочетание спектров света разных длин волн. Так, чередование красного и синего света значительно ускоряло рост растений салата и увеличивало накопление сырой массы в 1.6 раза, чем при одновременном облучении, и почти в два раза – при флуоресцентном освещении (Shimokawa *et al.*, 2014). Аналогичные результаты были получены при использовании четырех режимов освещения с различными интервалами свечения красного (R) и синего (B) света (Chen *et al.*, 2017). Было показано, что спектры R/B (8 ч) и R/B (1 ч) привели к более высокой урожайности, в то время как R/B (4 ч) и R/B (2 ч) дали более высокую питательную ценность по сравнению с растениями, выращенными под постоянным RB светом (Chen *et al.*, 2017).

Изучение влияния зеленого света на рост растений салата рассмотрено в нескольких работах (Kim *et al.*, 2004a, 2004b, 2004c, 2005, 2006; Johkan *et al.*, 2012; Мишанов и др., 2015). Авторы использовали зеленые светодиоды с разной длиной волны (G510, G520, G530) и интенсивности (плотность потока фотонов в видимом спектре (ППФ) – 100 и 300). Развитие растений, культивируемых под G510 при ППФ 300, было самым интенсивным (Johkan *et al.*, 2012). Изменение доли зеленого света в спектре может влиять на морфометрические показатели в растениях салата (Kim *et al.*, 2004a, 2004b, 2004c; Мишанов и др., 2015).

Несмотря на разнообразные исследования по влиянию спектров на развитие салата, формирование адаптационных реакций у растений остается в полной мере не изучено. Кроме того оптимизация режимов освещения для получения максимальных

морфометрических показателей растений при сохранении качества продукции актуальна. Цель данной работы – выявление морфофизиологического отклика растений салата (*Lactuca sativa*) сорта “Афицион” при их развитии в условиях применения светодиодных источников полихромных спектров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали салат (*Lactuca sativa*) сорта “Афицион”. Семена для эксперимента предоставлены ФГУП “Дальневосточное” Суражским тепличным комбинатом. Для культивирования растений использовали пластиковые контейнеры объемом 10 см³ и почвогрунт “Универсальный” с содержанием элементов: азот – 160–240 мг/л, фосфор – 145–215 мг/л, калий – 180–290 мг/л, магний – 135 мг/л, гуминовые вещества – 35 мг/л, pH водного раствора – 5.5–7 (ООО “Терра мастер”, Новосибирск).

Через 3 дня после посева пластиковые контейнеры (КВ9М 0.5 л, ООО “Джетта”, Россия) с проросшими семенами поместили в боксы экспериментальной установки, расположенной в Лазерном центре Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ЛЦ ИАПУ ДВО РАН). Установка представляла собой 5 боксов, обтянутых внутри светоотражающим материалом, в верхней части которых располагали светодиодные (СД) светильники с разными спектрами освещения (рис. 1, табл. 1). Специализированные источники света были сконструированы и изготовлены в ИАПУ ДВО РАН. В источниках света применялись матрицы с набором светодиодов фирмы Chanzon (China) мощностью 3 Вт и силой тока 700 мА каждый. Светильник со спектром теплого белого света с цветовой температурой 3500К (WW) использовали как контроль. ППФ составляла 150 мкмоль/с м². Для создания одинакового уровня освещенности подбирали мощность излучения каждого светильника с помощью световых драйверов (EUM-150S105DG, Китай). Уровень освещенности контролировали спектрофотометром “ТКА-Спектр” (НТП “ТКА”, Россия). В боксах поддерживали температуру 21°C днем и 18°C ночью, влажность воздуха 75%, световой режим 16/8. Продолжительность экспериментов составила 35 сут. Эксперимент проводили в трех повторностях.

По завершению эксперимента у 20 растений из каждого бокса измерены: число листьев, длина и ширина первых трех листьев в розетке, сырая и сухая массы надземной части растения и корней. Для определения процента золы (зольности) использовали общую навеску из всех исследованных растений в каждом эксперименте. После сушки в

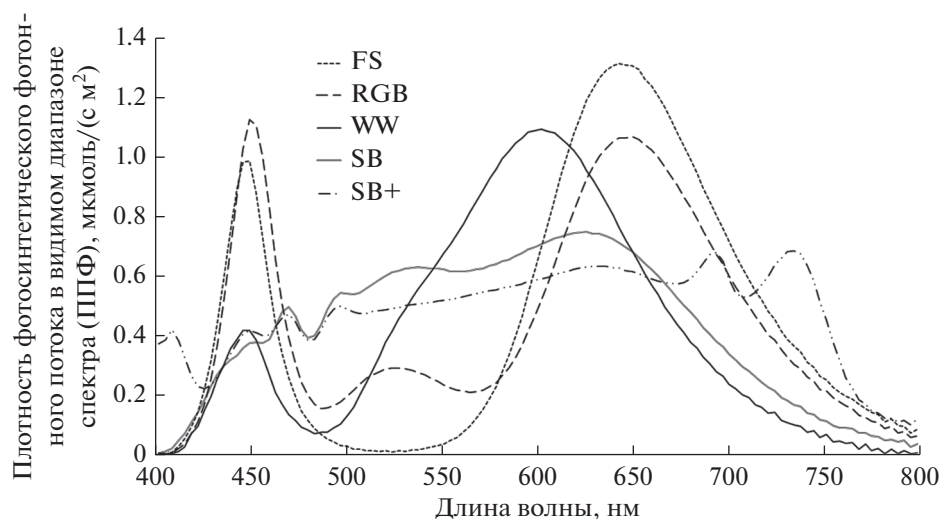


Рис. 1. Сводные спектры излучения источников света с одинаковой облученностью 150 мкмоль/с м².

электрошкафу (СНОЛ–3,5.5.3,5/3,5–И5, Россия) образцы измельчали в лабораторной зерновой мельнице (ЛЗМ–1, Россия) и озоляли в муфельной печи (ЭКПС–10, Россия) при 450°C в течение 8 ч.

Изучение устьиц листьев проводилось на препаратах, приготовленных согласно общепринятым методикам с некоторыми модификациями применительно к данному объекту (Khrolenko *et al.*, 2012). Слепки эпидермы просматривали и фотографировали под микроскопом AxioScope-40 с помощью встроенной видеокамеры AxioCam HRC (Zeiss,

Germany). Длину замыкающих клеток устьиц и их число на условную единицу площади (1 см²) на обеих сторонах листовой пластинки определяли в 50-кратной повторности для каждого экземпляра, выращенного при различных световых режимах. Подсчет проводили на микрофотографиях, полученных с препаратов слепков эпидермы листа, при помощи программы Axio Vision версии 4.8.3. (для регистрации, обработки и анализа изображений). Область подсчета числа устьиц ограничивали площадью круга $S = \pi r^2$ с радиусом $r = 178.46 \mu\text{m}$.

Таблица 1. Спектральные характеристики источников света

Параметр	Единица измерения	Тип светильника				
		WW	SB	RGB	FS	SB+
Максимальная облученность в диапазоне длин волн	$E_{e\max}$ (мВт/м ²)	219	145	301	264	123
Общая ФАР облученность (400–700 нм)	E_e (PAR) (Вт/м ²)	31	33	32	32	33
	PPFD (мкмоль/с м ²)	150	155	153	154	152
	%	100	100	100	100	100
Спектральная облученность / PPFD						
Синий (400–500 нм)	E_e (PAR) (Вт/м ²)	5	8	10	9	10
	PPFD (мкмоль/с м ²)	17	33	39	32	38
	%	14	25	32	27	31
Зеленый (500–600 нм)	E_e (PAR) (Вт/м ²)	15	14	6	3	11
	PPFD (мкмоль/с м ²)	70	63	29	16	53
	%	48	41	19	11	35
Красный (600–700 нм)	E_e (PAR) (Вт/м ²)	12	11	16	20	11
	PPFD (мкмоль/с м ²)	63	59	86	107	61
	%	38	33	49	62	34

Таблица 2. Морфометрические параметры растений *Lactuca sativa*, выращенного при разных условиях светодиодного освещения

	WW	SB	RGB	FS	SB+
Число листьев, шт	6.24 ± 0.20	6.41 ± 0.33	6.61 ± 0.30	6.29 ± 0.34	5.5 ± 0.15**
Сырая масса надземной части, г	1.98 ± 0.24	2.54 ± 0.33	3.73 ± 0.59*	3.47 ± 0.45**	1.88 ± 0.21
Сырая масса корней, г	0.49 ± 0.36	0.36 ± 0.07	0.36 ± 0.07	0.41 ± 0.08	0.13 ± 0.02
Соотношение корней к общей массе растения, %	8.18 ± 0.48	16.12 ± 1.27	9.51 ± 0.57	11.44 ± 1.07	7.54 ± 0.49
Сухая масса надземной части, г	0.08 ± 0.01	0.12 ± 0.02*	0.15 ± 0.02**	0.19 ± 0.03**	0.07 ± 0.01
Сухая масса корней, г	0.01 ± 0.001	0.02 ± 0.004**	0.02 ± 0.003**	0.02 ± 0.004**	0.01 ± 0.001
Зола, %	82.713	84.530	82.739	89.583	82.217

Примечание. * – достоверность $P < 0.05$ по отношению к контролю; ** – достоверность $P < 0.01$ по отношению к контролю.

При заданных условиях значения равнялись $n \times 10^3/\text{см}^2$.

Все полученные результаты обработаны статистически с использованием пакета “Statistica” версии 13.3. Диаграммы построены на основе средних арифметических значений измеренных параметров со стандартной ошибкой. Сравнение средних данных для растений разных вариантов с контролем проводили попарно, используя t -критерий Стьюдента. Критический уровень значимости принимали равным 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Внешний вид растений и значения морфометрических параметров растений приведены в табл. 2 и на рис. 2 и 3. При анализе полученных результатов выявлена тенденция к увеличению размеров и числа листьев в розетках у растений группы RGB. Наименьшее значение числа листьев отмечено в группе SB+. Первый лист был достоверно длиннее у растений групп RGB, FS и SB+, по длине и шире – у групп SB, RGB и FS (рис. 3). По длине второго и третьего листа достоверных отличий нет. По ширине второго листа значимые различия вы-

явлены у растений RGB и FS групп по сравнению с контролем (рис. 3). Достоверно меньше была ширина третьего листа у растений группы SB+ (рис. 3).

Максимальные значения показателей сырой массы надземной части отмечены у растений группы RGB (табл. 2), минимальные – у растений SB+ и контрольной (WW) групп. В то же время сырая масса корней больше у растений контроля, однако, значимых отличий от растений других групп не выявлено. Растения группы FS характеризовались близкими к максимальным значениями сырой массы надземной части, и максимальными значениями сухой массы надземной части и корней, золы. Минимальные значения параметров отмечены у растений групп SB+ и WW (контроль).

Установлено, что листья *L. sativa* дорзовентральные, амфистоматные, тип устьиц аномоцитный. Крупноклеточная нижняя эпидерма однослойная, с извилистыми антиклинальными стенками (рис. 4). Количественные показатели устьичного аппарата листа растений салата, выращенных при разных режимах полихроматического светодиодного освещения, представлены на рис. 5.

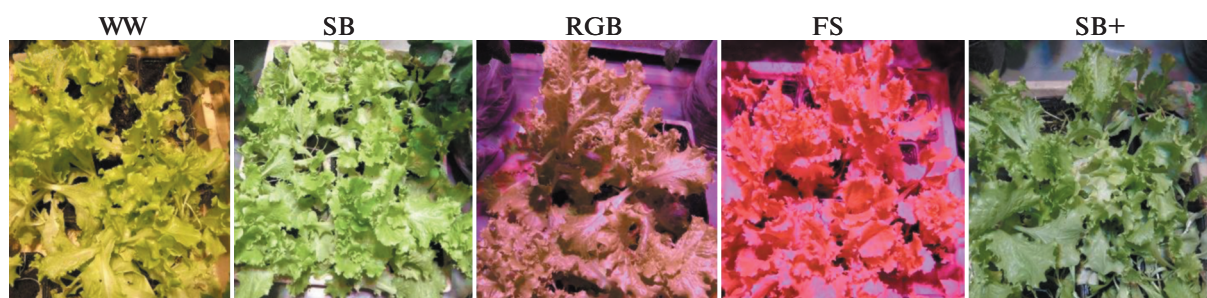


Рис. 2. Растения *Lactuca sativa* сорт “Афицион” после 35 дней роста при разном освещении.

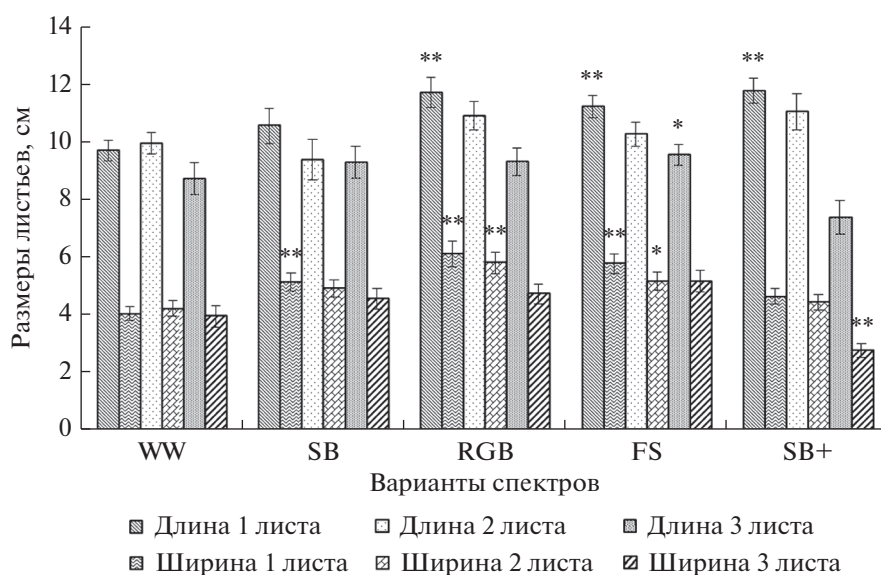


Рис. 3. Размеры листьев растений *Lactuca sativa*, выращенного при разных условиях светодиодного освещения. * – достоверность $P < 0.05$ по отношению к контролю; ** – достоверность $P < 0.01$ по отношению к контролю.

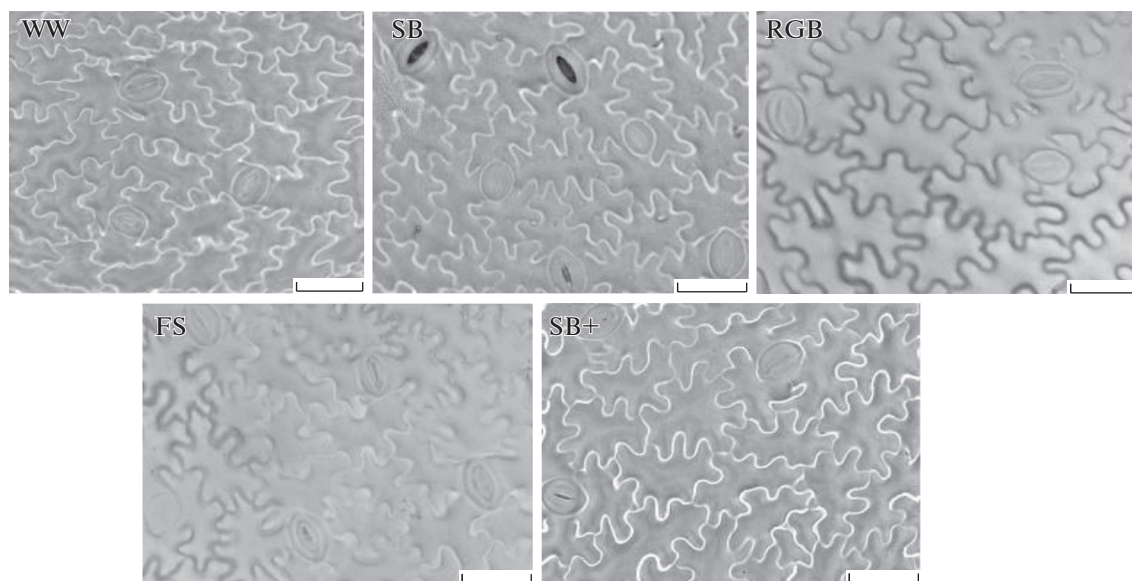


Рис. 4. Строение нижнего эпидермиса *Lactuca sativa*, выращенного при разных условиях светодиодного освещения. Масштабная линейка 50 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Спектры света, при которых у растений наблюдали наибольшие значения исследованных морфометрических показателей (число, длина и ширина листьев, сырая и сухая массы надземной части и корней), содержат наибольшую долю красного света (49% у RGB спектра, 62% – у FS) и наименьшую долю зеленого света (19% у RGB спектра, 11% у FS). Минимальные значения морфометрических параметров отмечены у растений

групп SB+ и WW (контроль). Форма спектра светильника SB+ способствовала вытягиванию листьев растений, что в свою очередь повлияло на минимальное накопление массы у растений *L. sativa* и меньший процент золы, полученный с данной экспериментальной пробы. У спектров SB+ и WW доли красного света меньше, чем у RGB и FS, и составляют (34% у SB+, 38% у WW), а доли зеленого света выше – 35 и 48% соответственно. Так, для выращивания растений салата сорта “Афици-

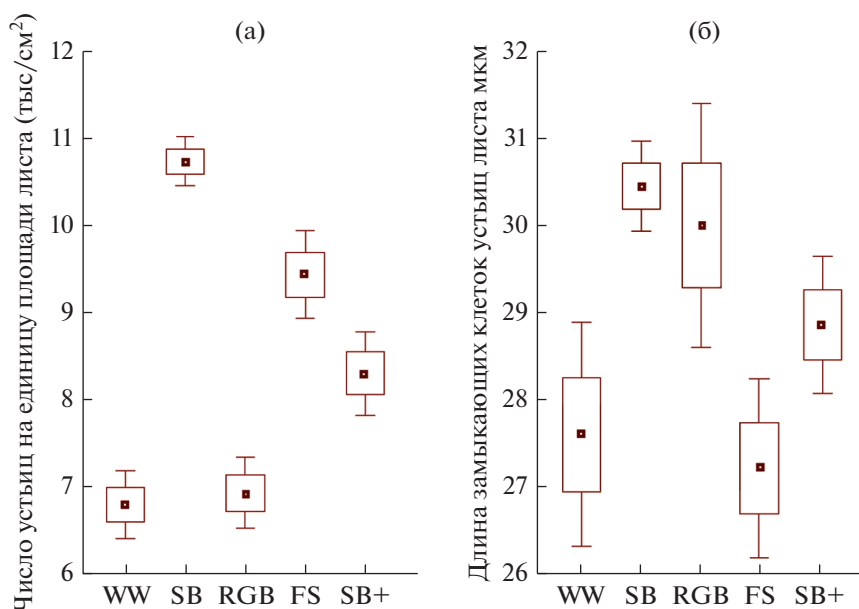


Рис. 5. Изменение количественных параметров устьиц нижнего эпидермиса *Lactuca sativa*, выращенного при разных условиях светодиодного освещения: а – число устьиц на единицу площади листа (тыс./см²); б – длина замыкающих клеток устьиц листа, мкм; □ – среднее значение; □ – среднее значение ± SE; I – среднее значение ± 1.96 SE. Варианты освещения: WW – теплый белый; SB – солнечный спектр; RGB – красный-зеленый-синий; FS – красно-синий, SB+ – измененный солнечный спектр.

он” доля зеленого в спектре, вероятно, должна быть до 20%, а доля красного в два раза больше.

Аналогичные результаты были получены ранее (Kim *et al.*, 2004a, 2004b, 2004c; Мишанов и др., 2015). Так при изучении влияния двух спектров выявлено, что изменение соотношения зеленого и красного света в спектре излучателя в сторону уменьшения зеленого ведет к увеличению накопления сухого и органического веществ в растениях *L. sativa* (Мишанов и др., 2015). Американскими учеными (Kim *et al.*, 2004a, 2004b, 2004c) при выращивании растений *L. sativa* “Waldmann’s Green” под светодиодами с красным, синим и зеленым светом было выявлено, что 24% зеленого света в спектре способствовали получению более высоких показателей сырой и сухой массы и большей площади листьев, чем у растений, выращенных под люминесцентными лампами со спектром холодного белого (CWF, 51% зеленого) или флуоресцентного синего (0% зеленого) света. Избыток (86%) зеленого света в спектре привел к получению наименьшей массы растений. Позднее те же авторы показали, что источники света, имеющие в спектре более 50% зеленого, вызывают снижение скорости роста растений, тогда как комбинации, включающие до 24% зеленого, ускоряют рост (Kim *et al.*, 2005, 2006).

Наиболее узкие листья отмечены в группе контроля (WW). В этом спектре доля синего света минимальна и составляет 14%, в то время как во всех

других спектрах его доля выше – 26–32% (табл. 1). Ранее при изучении влияния синего в сравнении с красным светом высокой интенсивности (500 и 1000 ммоль/с м²) выявлено, что изменение доли синего света (от 0 до 6%) способствовало увеличению площади листьев. Данный факт авторы объясняли увеличением размеров клеток в 3.1 раза и частоты деления клеток в 1.6 раза (Dougher, Bugbee, 2004).

Спектральный состав света влияет на фотосинтез и проводимость устьиц. Так было показано, что скорость фотосинтеза листьев и проводимость устьиц были выше у растений, выращенных под белыми флуоресцентными лампами (CWF), чем у растений, выращенных под красными светодиодами с дополнительным синим светом или без него (Yorio *et al.*, 2001).

В нашем эксперименте при исследовании устьичного аппарата листьев выявлено, что суммарная поверхностная плотность распределения устьиц на единицу площади листа находилась в пределах от 12 тыс./см² (SB+) до 19 тыс./см² (SB). Эти значения попадают в диапазон, характерный для сциофитных растений – типичных представителей подлеска. Это также встречается у мезофитных и хозяйственно-ценных видов растений, как нами было показано ранее (Наконечная и др., 2022).

В данной работе выявлено статистически достоверное ($p < 0.01$) увеличение поверхностной плотности распределения устьиц на нижней стороне листа у SB, SB+ и FS вариантов (рис. 5а). У растений RGB группы изменение по этому показателю статистически не достоверно по сравнению с контролем. Подобные результаты были получены китайскими авторами. При культивировании микрорастений картофеля под светом FL (Fluorescent white light) наблюдали увеличение плотности распределения устьиц на нижней стороне листа (Ma *et al.*, 2015). У листьев растений салата (*Lactuca sativa* L.), выращенных при соотношении красного и синего спектра (R/B = 1) значительно увеличилась поверхностная плотность распределения устьиц при небольшом уменьшении размеров самих устьиц и, как следствие, эти растения имели самую высокую скорость фотосинтеза (Wang *et al.*, 2016).

Размеры замыкающих клеток устьиц у групп SB+ и FS соответствовали контролю (различия не достоверны) или немного были выше такового. Интересен тот факт, что самые крупные устьица в опыте наблюдали у образцов SB варианта (различия с контролем достоверны $p < 0.01$) (рис. 5б) при наибольшей плотности распределения устьиц на листе. Это, вопреки ожидаемому, не подтверждает известную для растений закономерность — наличие отрицательной корреляции между длиной замыкающих клеток устьиц и их числом (Jones *et al.*, 1987). Однако сочетание параметров устьичного аппарата, как выявлено у группы растений SB, является наиболее эффективным с точки зрения архитектоники фотосинтезирующего листа.

Сопrotивление диффузии газа в лист складывается из устьичного и мезофильного сопротивлений. Устьичное сопротивление определяется такими факторами как степень открытия устьиц, число устьиц на единицу площади листа и др. Увеличение поверхностной плотности распределения устьиц должно позволить растениям в условиях достаточного увлажнения усилить проводимость газообмена листа и, таким образом, избежать ограничения фотосинтеза (Мокронос, Гавриленко, 1992). В литературе нет четких доказательств корреляции между определенными спектрами и параметрами устьиц растений. Так японские авторы установили, что под влиянием синего спектра увеличивается поверхностная плотность распределения устьиц микрорастений разных сортов винограда, а изменение размеров замыкающих клеток устьиц под этим спектром выявило сортовую специфичность (Poudel *et al.*, 2008). В то же время китайские авторы показали, что самая высокая плотность распределения устьиц на листе и самые крупные устьица у микрорасте-

ний хлопка были при обработке красным и синим спектром (Li *et al.*, 2010).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании влияния 5 спектров светодиодных светильников на морфологию растений *L. sativa* сорта “Афицион”, выращиваемых в условиях закрытого почвогрунта, выявлено, что доля света определенной длины волны, а также соотношение долей длин волн в спектре светильников, могут влиять на развитие растений. Для получения развитых растений *L. sativa* в спектре освещения доля зеленого света не должна быть выше 20%, доля красного — 50–60%, доля синего около — 30%. Увеличение доли зеленого и снижение доли синего света в спектре вызывает вытягивание растений. В результате проведенного исследования было выявлено, что влияние спектрального состава света SB+, SB и FS стимулировало образование устьиц. Закономерное уменьшение длины замыкающих клеток устьиц выявлено в тех же вариантах, за исключением SB, у которого наблюдали самые крупные устьица с максимальной плотностью распределения их на листе. Таким образом, полученные данные позволяют предположить, что растения вариантов SB+, SB и FS обладают наименьшей устьичной проводимостью, и, соответственно, потенциально более высоким уровнем фотосинтеза.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121031000144-5), поддержана грантом Российской академии наук № 20-16-00016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мишанов А.П., Маркова А.Е., Ракутько С.А., Бровцин В.Н., Ракутько Е.Н. Влияние соотношения долей зеленого и красного излучения на биометрические показатели салата // Сб. науч. трудов. ИАЭП. 2015. Вып. 87. С. 264–271.
- Мокронос А.Т., Гавриленко В.Ф. Фотосинтез. Физиолого-экологические и биохимические аспекты. М.: МГУ, 1992. 319 с.
- Наконечная О.В., Холин А.С., Субботин Е.П., Грищенко О.В., Бурковская Е.В., Хроленко Ю.А., Бурдуковский М.Л., Кульчин Ю.Н., Журавлев Ю.Н. Развитие растений томатов под светом различного спектрального состава // Физиол. раст. 2022. Т. 69. № 5. С. 472–479.
- Протасова Н.Н. Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений // Физиол. раст. 1987. Т. 34. № 4. С. 812–822.
- Bantis F., Ouzounis T., Radoglou K. Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects trans-plant success // Sci. Hortic. 2016. V. 198. P. 277–283.

- Baslam M., Morales F., Garmendia I., Goicoechea N.* Nutritional quality of outer and inner leaves of green and red pigmented lettuces (*Lactuca sativa* L.) consumed as salads // *Sci. Hort.* 2013. V. 151. P. 103–111.
- Caldwell C.R., Britz S.J.* Effect of supplemental ultraviolet radiation on the carotenoid and chlorophyll composition of green house-grown leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars // *J. Food Compos. Anal.* 2006. V. 19. № 6–7. P. 637–644.
- Chen X.L., Yang Q.C., Song W.P., Wang L.C., Guo W.Z., Xue X.Z.* Growth and nutritional properties of lettuce affected by different alternating intervals of red and blue LED irradiation // *Sci. Hort.* 2017. V. 223. P. 44–52.
- Dougher T.A., Bugbee B.* Long-term blue light effects on the histology of lettuce and soybean leaves and stems // *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 2004. V. 129. № 4. P. 467–472.
- Frąszczak B., Kula-Maximenko M.* The preferences of different cultivars of lettuce seedlings (*Lactuca sativa* L.) for the spectral composition of light // *Agronomy.* 2021. V. 11. № 6. P. 1211.
- Han T., Vaganov V., Cao S., Li Q., Ling L., Cheng X., Peng L., Zhang C., Yakovlev A.N., Zhong Y., Tu M.* Improving “color rendering” of LED lighting for the growth of lettuce // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 45944.
- Hoenecke M.E., Bula R.J., Tibbitts T.W.* Importance of ‘blue’ photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes // *HortScience.* 1992. V. 27. № 5. P. 427–430.
- Hunter D.C., Burritt D.J.* Light quality influences adventitious shoot production from cotyledon explants of lettuce (*Lactuca sativa* L.) // *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant.* 2004. V. 40. № 2. P. 215–220.
- Johkan M., Shoji K., Goto F., Hahida S.N., Yoshihara T.* Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa* // *Environ. Exp. Bot.* 2012. V. 75. P. 128–133.
- Jones H.G., Farquar G.D., Cowan I.R.* Breeding for stomatal characters // *Stomatal function.* Eds. Zeiger E., Farquhar G.D. Cowan I.R. Stanford (CA): Stanford University Press. 1987. P. 431–443.
- Kaur N., Chugh V., Gupta A.K.* Essential fatty acids as functional components of foods – a review // *J. Food Sci. Technol.* 2014. V. 51. № 10. P. 2289–2303.
- Kawashima L.M., Soares L.M.V.* Mineral profile of raw and cooked leafy vegetables consumed in Southern Brazil // *J. Food Compos. Anal.* 2003. V. 16. № 5. P. 605–611.
- Kim H.H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C.* A comparison of growth and photosynthetic characteristics of lettuce grown under red and blue light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental green LEDs // *Acta Hort.* 2004a. V. 659. P. 467–475.
- Kim H.H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C.* Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and bluelight-emitting diodes // *HortScience.* 2004b. V. 39. P. 1617–1622.
- Kim H.H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C.* Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities // *Ann. Bot. (Lond.)* 2004c. V. 94. P. 691–697.
- Kim H.H., Wheeler R.M., Sager J.C., Gains G.D., Naikane J.H.* Evaluation of lettuce growth using supplemental green light with red and blue light-emitting diodes in a controlled environment—a review of research at Kennedy Space Center // *In V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture.* 2005. V. 711. P. 111–120.
- Kim H.H., Wheeler R.M., Sager J.C., Goins G.D., Norikane J.H.* Evaluation of lettuce growth using supplemental green light with red and blue light-emitting diodes in a controlled environment – A review of research at Kennedy Space Center // *Acta Hort.* 2006. V. 711. P. 111–119.
- Kim M.J., Moon Y., Tou J.C., Mou B., Waterland N.L.* Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.) // *J. Food Compos. Anal.* 2016. V. 49. P. 19–34.
- Khrolenko Yu.A., Burundukova O.L., Burkovskaya E.V., Zhuravlev Yu.N.* Mesophyll structure and chloroplast density in *Panax ginseng* leaves from the Sikhote-Alin Mts // *Acta Biol. Cracov., Ser. Bot.* 2012. V. 54. № 2. P. 54–60.
- Koudela M., Petříková K.* Nutrients content and yield in selected cultivars of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *crispa*) // *Hortic.Sci.* 2008. V. 35. № 3. P. 99–106.
- Le Guedard M., Schraauwers B., Larrieu I., Bessoule J.-J.* Development of a biomarker for metal bioavailability: the lettuce fatty acid composition // *Environ. Toxicol. Chem.* 2008. V. 27. № 5. P. 1147–1151.
- Li H., Xu Z., Tang C.* Effect of light-emitting diodes on growth and morphogenesis of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plantlets *in vitro* // *PCTOC.* 2010. V. 103. № 2. P. 155–163
- Ma X., Wang Y., Liu M., Xu J., Xu Z.* Effects of green and red lights on the growth and morphogenesis of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets *in vitro* // *Sci. Hort.* 2015. V. 190. P. 104–109.
- Mou B.* Genetic variation of beta-carotene and lutein contents in lettuce // *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 2005. V. 130. № 6. P. 870–876.
- Poudel P.R., Kataoka I., Mochioka R.* Effect of red-and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes // *Plant cell, tissue and organ culture.* 2008. V. 92. № 2. P. 147–153.
- Shimokawa A., Tonooka Y., Matsumoto M., Ara H., Suzuki H., Yamauchi N., Shigyo M.* Effect of alternating red and blue light irradiation generated by light emitting diodes on the growth of leaf lettuce // *bioRxiv.* 2014. P. 003103.
- Stutte G.W., Edney S., Skerritt T.* Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes // *HortScience.* 2009. V. 44. № 1. P. 79–82.
- Wang J., Lu W., Tong Y., Yang Q.* Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light // *Frontiers in Plant Science.* 2016. V. 7. P. 64–73.
- Yorio N.C., Goins G.D., Kagie H.R., Wheeler R.M., Sager J.C.* Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation // *HortScience.* 2001. V. 36. № 2. P. 380–383.

The Influence of LED Lights of Different Spectrum on the Development of *Lactuca sativa*

O. V. Nakonechnaya^{1, #}, A. S. Kholin², E. P. Subbotin², E. V. Burkovskaya¹, Yu. A. Khrolenko¹,
I. V. Gafitskaya¹, I. Yu. Orlovskaya¹, M. L. Burdukovsky¹, A. V. Mikheeva¹, and Yu. N. Kulchin²

¹ Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russia

² Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

[#]e-mail: markelova@biosoil.ru

The effect of light-emitting diode (LED) lamps with 5 different spectra on *L. sativa* plants (variety 'Aficion') grown in protected soil conditions was studied. Warm white light (WW) was used as a control (the ratio of blue, green and red portions in the spectrum was 14% : 48% : 38%). The maximum values of leaf size and fresh weight of the aerial parts were found in the RGB group (blue-green-red ratio 32% : 19% : 49%), highest values of dry weight and ash content – in the FS group (blue-green-red ratio 27% : 11% : 62%). Stomatal size and density on the abaxial leaf's side was the highest in SB plants (blue-green-red ratio 33% : 41% : 38%). This was the most effective combination of parameters in terms of leaf architectonics. An increase in the portion of red light in the spectrum with a decrease in the portion of green light had a positive effect on the development of *L. sativa* plants, while an increase in the portion of green light in the spectrum positively affected the stomatal apparatus formation.

Keywords: *Lactuca sativa*, light spectrum, stomatal apparatus, LEDs