

УДК 635.5:628.93

ВЛИЯНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ САЛАТА ЛИСТОВОГО

Т. В. НИКОНОВИЧ, М. М. ДОБРОДЬКИН

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: tvnikonovich@gmail.com

М. О. МОИСЕЕВА

УО «Витебская государственная академия ветеринарной медицины»,
г. Витебск, Республика Беларусь, 210026, e-mail: mariamo1986@mail.ru

А. В. КИЛЬЧЕВСКИЙ

Президиум НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, 220108

В. Л. ФИЛИПЕНЯ, О. В. ЧИЖИК

Лаборатория клеточной биотехнологии Центральный ботанический сад НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь, 220012

Ю. В. ТРОФИМОВ

РНПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220090

(Поступила в редакцию 03.04.2018)

Появление светодиодных светильников, постоянное повышение их световой отдачи и улучшение цветопередачи при малом энергопотреблении и значительном сроке службы показывает, что в ближайшие годы они могут стать одними из основных источников освещения в защищенном грунте. На основании результатов исследований впервые были выявлены спектральные характеристики света, при которых растения салата листового обладали наиболее высоким интегральным уровнем их питательной ценности и минимальным накоплением нитратов. Для получения растений салата с высоким содержанием сухого вещества, витамина С, растворимых углеводов и хлорофилла рекомендуется применение светодиодных светильников со спектральным соотношением красный/синий 13,2–20,7, при которых биохимические показатели растений были на уровне или выше контроля. Практическая значимость данной работы определяется возможностью расширения спектра использования светодиодных осветителей в условиях постоянной искусственной световой среды для получения качественной продукции. Приведена характеристика светодиодных светильников, обеспечивающих получение растений салата листового, а также влияние спектрального состава света на фотосинтетическую активность сортов салата листового. Анализ результатов исследований показал большую эффективность основного фотосинтетического запаса энергии и, следовательно, функционирования фотосинтетического аппарата у всех сортов салата листового при использовании светодиодных светильников с преобладанием красного и незначительным присутствием зеленого спектра в общем диапазоне, что и является, на наш взгляд, основным стимулом для активации аппарата фотосинтеза.

Ключевые слова: листовой салат, светодиодное освещение, фотосинтетическая активность, флуоресценция, хлорофилл.

The appearance of LED lamps, the constant increase in their light output and the improvement of color reproduction with low energy consumption and a significant service life show that in the coming years they can become one of the main sources of illumination in the protected ground. Based on the results of research, the spectral characteristics of light were first revealed in which the leaf lettuce plants had the highest integral level of their nutritional value and minimal accumulation of nitrates. To produce lettuce plants with a high content of dry matter, vitamin C, soluble carbohydrates and chlorophyll, it is recommended to use LED lamps with a spectral ratio of red / blue 13.2-20.7, at which biochemical indicators of plants were at or above the control level. The practical importance of this work is determined by the possibility of expanding the range of use of LED lighting in a constant artificial light environment for obtaining high-quality products. We have given the characteristic of LED lamps providing the production of leaf lettuce plants, as well as the influence of spectral composition of light on the photosynthetic activity of leaf lettuce varieties. The analysis of research results showed a greater efficiency of the main photosynthetic energy storage and, consequently, the functioning of photosynthetic apparatus in all leaf lettuce varieties with the use of LED lamps with a predominance of red and insignificant presence of a green spectrum in the general range, which in our opinion is the main stimulus for photosynthesis apparatus activation.

Key words: leaf lettuce, LED lighting, photosynthetic activity, fluorescence, chlorophyll.

Введение

Салат листовой – наиболее скороспелое овощное растение. В настоящее время выращивается большое количество разновидностей салата: салат айсберг, салат-латук, салат лоло-россо, фриссе, дуболистный салат, салат батавия и салат ромен. Всё большую популярность набирают различные типы салата и листовой зелени, которые убираются на очень ранней стадии, так называемые мелколистковые салаты (*baby leaf*). Мелколистковой салат

(Бэби-лиф) – это особый вид овощной продукции, молодые мелкие листья салатов и других листовых овощей, а также их смеси. Для культуры бэби-лиф предпочтительны виды и сорта, формирующие компактную розетку, которая при срезке распадается на некрупные отдельные листочки, образуя меньше отходов. Для получения продукции высокого санитарно-гигиенического качества поливают бэби-лиф только водой питьевого качества [3].

Первые работы по исследованию воздействия светодиодного освещения на рост и развитие растений салата проводили в 80-е годы прошлого века при освещении узкополосным красным светом с пиком излучения 660 нм с добавлением 30 мкмоль/(м²с) синего света от флуоресцентных ламп (общая плотность потока фотонов составила 325 мкмоль/(м²с)). Поскольку в те годы синие светодиоды не были широко доступны, в качестве альтернативы использовали другие источники освещения [5]. Сообщалось, что опытные растения не уступали контрольным, выращенным в искусственной световой среде на основе холодных флуоресцентных ламп или ламп накаливания. В работе Son and Oh по исследованию воздействия узкополосного красно-синего освещения на краснолистный и зеленолистный сорта салата было выявлено, что наибольший урожай сырой и сухой биомассы и наибольшая площадь листьев достигается при освещении только красным светом [6]. Однако при этом листья растений вытягивались и приобретали атипичную форму, неестественную окраску, а содержание полифенолов и антиоксидантов резко снижались. В целом была показана эффективность узкополосного красно-синего светодиодного освещения при выращивании ряда культур [7, 8]. В работе Yorio et al. урожай сухой массы салата, выращенного в искусственной световой среде на основе красных светодиодов с пиком излучения 660 нм с добавлением 10 % по плотности потока фотонов синего света от флуоресцентных ламп, достоверно не отличался от контроля, выращенного под холодными флуоресцентными лампами. Однако сухая биомасса редиса и шпината в опыте была значительно ниже, чем в контроле, хотя измерения фотосинтеза листа и не выявили достоверных различий. Таким образом, было показано, что выращивание данных культур при узкополосном красно-синем освещении возможно, однако получение адекватного урожая в таких условиях не всегда обеспечивается [9].

В искусственных условиях, когда естественное облучение отсутствует, обеспечение наиболее благоприятного сочетания вышеперечисленных спектральных диапазонов в светильниках является достаточно проблематичным и представляет закономерный научный интерес. Поэтому необходимо изучение спектрального состава света, излучаемого искусственными источниками света применительно к конкретной культуре и условиям культивации растений [1].

Целью нашего исследования являлось выявление условий светодиодного освещения способствующего получению качественного листового салата.

Основная часть

Исследования выполнялись в условиях биотехнологической лаборатории кафедры сельскохозяйственной биотехнологии, экологии и радиологии Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. Семена салата высевались в стаканчики 10x10 см, заполненные ионообменным субстратом Триона. Полив осуществлялся специально приготовленной водопроводной водой. Температура культивирования салата составляла +24 °С, фотопериод 16 часов. В качестве источников света применялись светодиодные осветители с различным спектральным распределением излучения в диапазоне 380–780 нм и цветовой температурой от 2400 до 6500К. Всего 11 вариантов освещения (варианты 11–21). Варианты 12–21 – это модельный ряд светодиодных светильников серии «Светодар» производства Государственного предприятия «ЦСОТ НАН Беларуси». В этих светильниках отношение ППФ (плотность потока фотонов в диапазоне 400–700 нм) оранжево-красно полосы (607–694 нм) к ППФ синей полосы (400–495 нм) варьировалось от 1 до 20. При этом доля ППФ в диапазоне 580–607нм (желтый) составляла от 13 до 22 %, а доля фотонов в диапазоне 495–580 нм (зеленый) – от 18 до 38 %. Вариант 11 – это светодиодный светильник, в качестве основных источников света, содержащий два типа светодиодов: синий, красный и дополнительный – зеленый. Доля зеленого света около 2 % от ППФ в диапазоне ФАР. Контрольным источником света были люминесцентные лампы с цветовой температурой 5700К (вариант 22).

В качестве объектов исследований использовались сорта салата листового с различными морфобиологическими признаками: Бионда Триест (сорт 1), Дубовый лист красный (сорт 2), Московский парниковый (сорт 3), Одесский кучерявый (сорт 4).

В свежих усредненных пробах определялось содержание: сухих веществ – по ГОСТ 27548-97; аскорбиновой кислоты (витамин С) – методом Мурри со ссылкой на ГОСТ 24556-89; растворимых углеводов (сахаров) – по ГОСТ 26176-91 (метод Бертрана); хлорофилла – фотометрическим методом со ссылкой на ГОСТ 21802-84; нитратов – МУ 5048-89 извлечением 1 % раствором алюмокалиевых квасцов с последующим измерением концентрации в полученной вытяжке с помощью ионоселективного электрода на нитратометре типа рNO₃-07.

Анализ фотосинтетической активности в процессе выращивания растений тестируемых сортов салата в разных условиях освещения проводили с использованием переносного импульсного флуориметра ПАМ-2100 (Heinz Walz GmbH), руководствуясь инструкцией производителя и работами [2, 4]. Для оценки состояния фотосинтетического аппарата определяли значение показателей Fv /Fm (максимально возможный для испытуемых растений квантовый выход фотосистемы II (ФС II)) и Y (реальный квантовый выход ФС II у испытуемых растений).

Таблица 1. Параметры, определяемые с помощью метода индуцированной флуоресценции хлорофилла

Параметр	Физиологический смысл	Формула
Максимальный (потенциальный) квантовый выход фотосистемы II (Fv /Fm)	Величина квантового выхода всех комплексов ФС II в растении, отражает количество активных комплексов, способных улавливать кванты света	$F_v / F_m = (F_m - F_o) / F_m$
Реальный квантовый выход (Y)	Доля световой энергии, используемой активными комплексами ФС II в процессе электронного транспорта. Чем больше значение реального квантового выхода, тем больший процент энергии улавливается растениями для фотосинтеза	$Y = (F_m' - F_t') / F_m'$

Все аналитические определения выполнялись в 3-кратной биологической повторности. Данные статистически обрабатывались с использованием программы *Excel*.

Спектральный состав света значительно влиял на процессы роста и развития растений салата листового (табл. 2).

Таблица 2. Биометрические показатели и содержание нитратов в образцах салата листового при различном светодиодном освещении

Свет (В)	Сорт (А)	Площадь листовой пластинки, см ²	Высота растения, см	Масса растения, г	Количество листьев, шт.	Нитраты, мг/кг
22	1	74,10	22,5	2,50	6	1680,0
	2	51,75	28,5	3,15	7	127,0
	3	55,44	27,3	2,44	8	1280,0
	4	44,62	16,4	3,32	6	71,4
21	1	19,03	9,4	1,31	5	353,0
	2	16,24	9,2	1,83	7	277,0
	3	35,89	15,1	2,10	8	426,0
	4	21,75	11,7	1,17	6	1086,0
20	1	17,64	11,2	1,00	6	420,0
	2	35,88	10,7	1,32	8	720,0
	3	51,60	13,7	2,15	8	341,0
	4	35,89	19,4	1,61	6	460,0
19	1	14,31	5,3	0,67	4	70,1
	2	14,28	6,3	0,71	8	122,0
	3	26,98	7,1	1,10	9	72,7
	4	27,88	8,2	1,53	6	66,5
18	1	35,28	11,8	1,80	8	83,2
	2	79,50	16,2	2,94	10	208,0
	3	58,75	14,7	3,44	10	120,0
	4	32,19	15,8	2,46	8	104,0
17	1	44,50	19,4	3,87	6	73,0
	2	49,49	12,8	1,88	8	226,0
	3	36,00	15,5	3,30	10	224,0
	4	16,20	13,4	2,40	7	446,0
16	1	8,60	7,2	1,30	6	780,0
	2	12,00	6,5	1,00	6	647,0
	3	25,53	10,7	2,80	8	900,0
	4	12,72	10,2	1,10	7	878,0
15	1	11,44	8,2	1,30	5	790,0
	2	12,24	9,6	1,27	8	744,0
	3	36,54	13,7	2,20	8	927,0
	4	14,04	8,2	1,27	6	856,0
14	1	7,68	3,7	0,75	4	1810,0
	2	23,76	9,1	2,40	14	2180,0
	3	23,20	6,2	2,43	10	531,0
	4	15,64	7,4	1,80	6	180,0
13	1	10,08	7,6	1,61	6	63,8
	2	12,96	10,7	1,20	6	88,0
	3	18,60	9,3	2,30	10	103,0
	4	16,20	9,8	2,10	6	399,0

12	1	6,82	4,5	1,10	5	261,0
	2	8,40	4,8	0,80	6	450,0
	3	27,36	8,4	2,00	10	327,0
	4	7,80	10,2	1,50	7	645,0
11	1	39,56	16,2	1,80	6	3860,0
	2	18,60	20,4	0,60	6	3920,0
	3	10,78	13,7	0,90	8	4780,0
	4	21,42	32,4	2,00	8	3790,0
HCP _{0,5} (A)		0,26	0,21	0,08	0,41	1,41
HCP _{0,5} (B)		0,45	0,37	0,14	0,71	2,44
HCP _{0,5} (A+B)		0,90	0,74	0,28	1,41	4,89

Сравнительное исследование биометрических показателей и биохимического состава растений выявило широкие диапазоны варьирования их характеристик по сортам при различных светодиодных осветителях. Так, при 17 и 18 вариантах освещения с оптимизированным соотношением красного и синего спектра, а также при контрольном люминесцентном освещении, скорость роста, оцениваемая по формированию надземной биомассы (масса 1 растения, высота растения), оказалась наибольшей. Эти же варианты светодиодных светильников способствовали формированию растений с большей листовой пластинкой. Максимальная площадь листовой пластинки была сформирована растениями сорта Дубовый лист красный (сорт 2) и составила 79,5 см². Минимальная листовая пластинка определена у трех сортов при 12 варианте освещения при высоком уровне потока фотонов (73,0) из диапазона фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Стабильно высокое количество листьев на растении 8–10 шт. отмечено у сортов салата при 18 варианте, где соотношение по спектрам красный/синий составляет 3,06 и является достаточно оптимизированным по сравнению с другими вариантами (15, 19, 20, 21) освещения, где это соотношение лежит в пределах от 7,8 до 20,7 относительных единиц. Наименьшее количество листьев 4–6 шт. сформировали растения салата сорта Бионда Триест (сорт 1) при всех вариантах светодиодных осветителей, только при 18 варианте освещения количество листьев достигло 8 шт. Наибольшим 14 шт. этот показатель был у сорта Дубовый лист красный (сорт 2) при 14 варианте светодиодного освещения с уровнем потока фотонов 70,1 мк моль/с.

На основании результатов биохимических исследований тестируемых сортов были выявлены варианты освещения, при которых у растений наблюдалось наибольшее и соответственно наименьшее количество ценных биологических соединений (рис. 1–3)

При этом установлено, что максимальное содержание сухого вещества отмечено у сорта Бионда Триест (сорт 1) при 21 и 12 вариантах освещения, у сорта Дубовый лист красный (сорт 2) при 20 и 21 вариантах освещения, у сорта Московский парниковый (сорт 3) также при 20 и 21 вариантах освещения, а у сорта Одесский кучерявый (сорт 4) салата листового при 20 и 12 вариантах освещения. Вариантами освещения, при которых увеличивалось содержание сухого вещества для четырех сортов салата, были 12, 21, 20, которые имели уровень потока фотонов 67,9–73,0. Образцы, полученные при данном освещении, содержали в 3–4 раза больше сухого вещества в сравнении с контрольным освещением (22 вариант). Соответственно наименьшее количество сухого вещества у растений исследуемых сортов выявлено при 11 варианте светодиодного освещения, содержащем два основных типа светодиодов: синий, красный, и при контрольном источнике света. При 16 варианте освещения и соотношении красного и синего спектра 6,9 у растений наблюдалось стабильно высокое по сортам (более 20 %) накопление сухого вещества (рис. 1).

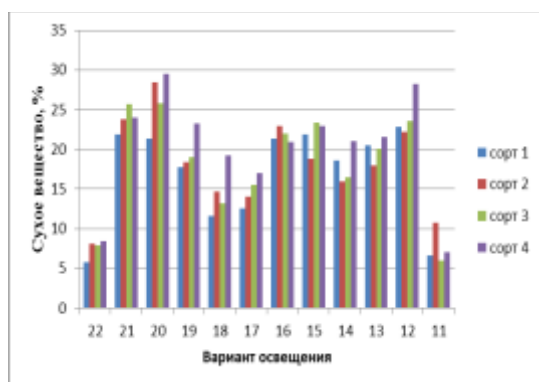


Рис. 1. Количество сухого вещества в листьях салата, %

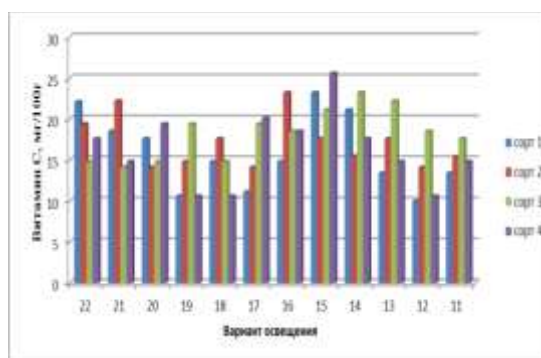


Рис. 2. Содержание витамина С в листьях салата, мг/100г

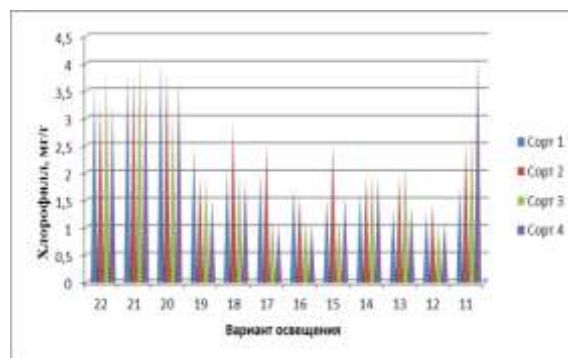


Рис. 3. Содержание хлорофилла в листьях салата, мг/г

Анализ содержания витамина С в образцах салата показал, что максимальные значения по сортам отмечались при 16, 15, 14, 22, 21 и 20 вариантах освещения (рис. 2). Полученные данные свидетельствуют, что светодиодное освещение не снижает качество получаемой продукции, а в некоторых вариантах (15 и 16 варианты) способствует еще более высокому накоплению витамина С в листьях салата по сравнению с контрольным источником света.

Оценка содержания хлорофилла в полученных образцах показала значительную вариабельность признака по вариантам освещения и между исследуемыми сортами салата (рис. 3). Следует отметить наименьшее содержание хлорофилла в растениях, полученных при 19, 18, 17, 16, 15, 14, 13 и 12 вариантах освещения. Максимальные значения хлорофилла выявлены при 21 и 20 вариантах освещения (с преобладанием красного и незначительным присутствием зеленого спектра в общем диапазоне). Они были на уровне или значительно выше контрольного варианта.

Анализ растворимых углеводов показал большую разницу их содержания в растениях, выращенных при различных вариантах освещения. Этот показатель изменялся в широких пределах от 0,6 % до 11 %, в зависимости от спектра освещения и конкретного сорта. Так, минимальное значение растворимых углеводов выявлено у растений салата, выращенных при контрольном освещении (0,6–1,8 %). Максимальное и стабильное по сортам количество растворимых сахаров установлено при 21 и 20 вариантах освещения и составило 8,3–10,2 % и 8,8–11 % соответственно.

Одной из важнейших характеристик физиологического состояния растений и их жизненного потенциала является оценка функционирования органов, отвечающих за ассимиляцию (поглощение света и фотосинтез). Во время роста и развития растений в работе фотосистемы II происходят изменения. Флуоресценция хлорофилла в настоящее время является единственным показателем, который позволяет исследовать процесс протекания фотохимических реакций в живых растительных объектах и фиксировать эти изменения. В зависимости от состояния фотосинтетического аппарата, на которое оказывают влияние стадия вегетации растения, условия выращивания и другие факторы, интенсивность флуоресценции хлорофилла может изменяться в значительных пределах. Именно этот метод используют как метод экспресс-диагностики, который позволяет быстро оценить изменение клеточного метаболизма в зависимости от условий выращивания [2, 4]. В ходе опыта были установлены значения показателей максимальный (F_v / F_m) и реальный (эффективный) (Y) фотохимический выход ФСП у растений салата при различных условиях освещения. Спектральный состав света оказал значительное влияние на функциональную активность фотосинтетического аппарата тестируемых сортов. У растений сортов Бионда Триест (сорт 1) и Московский парниковый (сорт 3) наиболее высокие значения показателя эффективный квантовый выход были получены при 20 варианте освещения (больше по сравнению с контрольным вариантом на 19 % и 13 %, соответственно), у сортов Дубовый лист красный (сорт 2) и Одесский кучерявый (сорт 4) – при контрольном варианте освещения. Отметим, что при 20 и 21 вариантах освещения у сортов Дубовый лист красный (сорт 2) и Одесский кучерявый (сорт 4) значение этого показателя было также высоким (различия между вариантами 20, 21 и контрольным вариантом освещения недостоверны). Для растений всех сортов салата характерно достоверное снижение значения Y при всех остальных вариантах светодиодных осветителей. Такая же тенденция зафиксирована при измерении максимального квантового выхода (F_v / F_m). Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать вывод о большей эффективности основного фотосинтетического запаса энергии и, следовательно, функционирования фотосинтетического аппарата у всех сортов салата листового при использовании светодиодных светильников вариантов 20 и 21 с незначительным количеством зеленого спектра в общем диапазоне, что и является, на наш взгляд, основным стимулом для активации аппарата фотосинтеза.

При получении экологически чистой продукции в контролируемых условиях при светодиодном освещении необходима оценка качества растений на наличие в них токсических веществ. Нами проводилось определение нитратов в анализируемых образцах салата листового (табл. 2). Согласно РДУ для зеленных культур, содержание нитратов не должно превышать 2000 мг/кг. Вариантом освещения, вызывающим избыточное накопление нитратов, следует считать 11, так как все изучаемые сорта при этом варианте освещения имели превышения по данному показателю (3790–4780 мг/кг). Превышение РДУ по нитратам выявлено также при 14 варианте освещения у сорта Дубовый лист красный (2180 мг/кг).

Для выявления зависимостей проявления качественных показателей растений салата от спектрального состава света выполнены расчеты коэффициентов корреляции Пирсона между абсолютными величинами признаков (сухое вещество, витамин С, нитраты, хлорофилл) и плотностью потока фотонов (ППФ) в пяти условных спектральных диапазонах: 400–495 нм (синий), 495–580 нм (зеленый), 580–607 нм (желтый), 607–636 нм (оранжевый), 636–694 нм (красный), 694–750 нм (дальний красный). ППФ – плотность потока фотонов измерена в диапазоне 400–700 нм.

Для качественных показателей установлены следующие корреляции (значение коэффициента корреляции не менее 0,7 по модулю): сухое вещество – положительная корреляция с ППФ в диапазоне 580–694 нм (желтый-красный) у всех четырех сортов; нитраты – отрицательная корреляция с ППФ в диапазоне 580–607 нм (желтый) у сортов 1 и 3; нитраты – отрицательная корреляция с ППФ в диапазоне 495–580 нм (зеленый) у сорта 4. Для показателей витамин С и хлорофилл уверенных линейных корреляций с уровнем ППФ установить не удалось. Установленные корреляции свидетельствуют о том, что ППФ в «желтой» полосе существенно связана с величиной таких качественных показателей растения, как сухое вещество (%) и количество нитратов (мг/кг).

На абсолютное значение количества накопленных нитратов, кроме спектрального распределения, оказывает влияние и абсолютное значение ППФ в диапазоне ФАР (400–700 нм).

Если из пяти спектральных полос выделить три: сине-зеленую, желтую и оранжево-красную (включая дальний красный), то можно считать, что количество сухого вещества увеличивается при увеличении отношения ППФ оранжево-красной полосы (OR) к ППФ сине-зеленой полосы (BG). Максимальное значение количества сухого вещества, приведенного к единице ППФ в диапазоне ФАР, наблюдается для отношения OR/BG от 1,0 до 3,2 (варианты 20, 21) при условии, что в желтой полосе сосредоточено около 15–20 % ППФ, а в дальней красной – от 7 до 11 %.

Заключение

При возделывании салата листового применение светодиодных светильников обеспечивает возможность получать качественную продукцию. Для выращивания растений с высоким содержанием сухого вещества, витамина С, растворимых углеводов и хлорофилла рекомендуется применение светодиодных светильников со спектральным соотношением красный/синий 13,2–20,7, при которых биохимические показатели у растений были на уровне или выше контроля.

Растения салата листового с низким содержанием нитратов формируются при использовании светодиодных светильников с уровнем потока фотонов не менее 74 мкмоль/с.

Наиболее крупные растения с хорошо сформированной листовой пластинкой развивались при светодиодном освещении с оптимизированным соотношением красного и синего спектра 3,0–4,0.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никонович, Т. В. Получение листового салата при различном светодиодном освещении / Т. В. Никонович, М. О. Моисеева, В. И. Цвирко // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции: сб. ст. по материалам междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию Курганской области (19 марта 2018г.) / под общ. ред. Сухановой С.Ф.–Курган: Изд-во Курганской ГСХА, 2018. – С. 263–267.
2. Рубин, А. Б. Биофизика фотосинтеза и методы экологического мониторинга / А. Б. Рубин // Технология живых систем. – 2005. – Т. 2. – С. 47–68.
3. Тараканов, Г. И. Зеленные культуры / Г. И. Тараканов, В. Д. Мухин, К. А. Шуин // Овощеводство: учеб. для вузов. – М.: Колос, 2002. – 264–265 с.
4. Яцко, Я. Н. Пигментный аппарат вечнозеленых растений на севере: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. б. н. / Я. Н. Яцко. – СПб., 2010. – 21 с.

5. Dong C., Shao L., Liu G. et al. Photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield of wheat exposed to intermittent light irradiation with millisecond-scale period // *Journal of plant physiology*. – 2015b. – Vol. 184 – P. 28–36.
6. Son K-H, Oh M-M. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes // *Hortscience*. – 2013. – Vol. 48. – P. 988–95.
7. Szechynska-Hebda M., Karpinski S. Light intensity-dependent retrograde signaling in higher plants // *Journal of Plant Physiology*. – 2013 – Vol 170 – P. 1501-1516 Tamulaitis et al., 2005
8. Terashima, I., Fujita, T., Inoue, T. et al. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green // *Plant Cell Physiol*. – 2009 – Vol. 50 – P. 684–697.
9. Yorio N.C., Goins G.D., Kagi H.R., Wheeler R.M., Sager J.C. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *Hort. Sci.*, 2001, 36: 380–383.