

Особенности влияния спектра излучения на продуктивность и биохимический состав тестовых плодовых и листовых овощных культур

© Т.Э. Кулешова,¹ О.Р. Удалова,¹ И.Т. Балашова,² Л.М. Аникина,¹ П.Ю. Конончук,¹ Г.В. Мирская,¹ В.И. Дубовицкая,¹ В.Е. Вертебный,¹ Ю.В. Хомяков,¹ Г.Г. Панова¹

¹ Агрофизический научно-исследовательский институт, 195220 Санкт-Петербург, Россия

² Федеральный научный центр овощеводства, 140153 Верея, Московская обл., Россия
e-mail: www.piter.ru@bk.ru

Поступило в Редакцию 30 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 5 марта 2022 г.

Принято к публикации 15 марта 2022 г.

Исследовано влияние спектральных характеристик фотосинтетически активной радиации на продуктивность и качество растений листового салата и карликового томата, адаптированных для защищенного грунта. В качестве тестируемых вариантов для освещения растений использованы натриевые лампы и светодиодные светильники, излучающие желтый, розовый и приближенный к солнечному свет. Овощные культуры выращивали в регулируемых условиях интенсивной светокультуры методом тонкослойной панопоники, во всех вариантах была реализована одинаковая величина облученности. Использование источника света, имитирующего солнечный свет, с плотностью фотосинтетического потока фотонов $76 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ в области 400–500 nm, $130 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ в 500–600 nm и $133 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ в 600–700 nm позволило получить увеличение продуктивности на 10% для салата и на 23% для томата, а также привело к повышению содержания магния и железа в листьях салата и более высокому содержанию углеводов, витамина С, сырой золы в плодах томата по сравнению с эталонными натриевыми лампами.

Ключевые слова: светодиоды, томат, салат, светокультура, растительная продукция, качество, фотосинтетический поток фотонов.

DOI: 10.21883/JTF.2022.07.52663.343-21

Введение

Овощи являются важнейшим источником витаминов, антиоксидантов и других биологически активных веществ. В условиях защищенного грунта возможно создание эффективных условий выращивания, позволяющих управлять биохимическим составом, количеством и качеством питательных веществ, продукционным потенциалом растительной продукции. Оптимизация свойств световой среды остается весьма актуальной областью в растениеводстве. Перспективным является развитие возможностей использования света разного спектрального состава в организации направленного биосинтеза биологически ценных соединений различного назначения [1]. Совершенствованию производства сельскохозяйственной продукции в условиях защищенного грунта способствует развитие светодиодных технологий, принимающая во внимание сложную систему ответа растений на многокомпонентный свет [2].

Свет регулирует ряд процессов в растениях, таких как фотосинтез, морфогенез, метаболизм, транспирация и др., через рецепторные системы фитохромов, криптохромов и фототропинов, взаимодействующих с фотонами определенных спектральных диапазонов фотосинтетически активной радиации (ФАР) [2]. Спектраль-

ный состав света является одним из важнейших регуляторных факторов морфогенеза растений, влияющим на интенсивность ростовых процессов, побегообразование, корнеобразование, направленность метаболических процессов и др. [3]. Считается, что основное действие на процессы фотоморфогенеза оказывает излучение синего ($\sim 400\text{--}500\text{ nm}$), красного ($\sim 600\text{--}700\text{ nm}$) и дальнего красного ($\sim 700\text{--}800\text{ nm}$) диапазонов длин волн, поглощаемое фоточувствительными пигментами, а добавление зеленой ($\sim 500\text{--}600\text{ nm}$) части спектра приводит к повышению эффективности их действия [4]. Синий свет воздействует на рост растения в целом, разрастание листьев, открытие устьиц, накопление пигментов [5–7]. Зеленый свет увеличивает антиоксидантный потенциал, способствует созреванию плодов [8]. Красный свет имеет самую высокую относительную квантовую эффективность фотосинтеза, он вызывает прибавку сухой массы, разрастание корневой системы, удлинение стеблей, увеличение площади листовой поверхности, контролирует продолжительность цветения [9], влияет на функции хлоропластов, развитие репродуктивной системы растения [10]. Дальний красный свет может существенно повлиять на рост и морфологию растений [11], способствуя при кратковременном воздействии увеличению

биомассы, что связывается с работой фитохромов и гормональными перестройками, которые также влияют на циркадный ритм, устьичную проводимость и дыхание растений [12].

В дополнение к выявленным эффектам влияния качества света на развитие растений существуют значительные видовые и сортовые различия в реакции растений на спектральный состав световой среды, а также широкое варьирование биохимического состава в зависимости от условий световой среды. Сниженное содержание синего света (менее 20%) в спектре облучения может приводить к повышению содержания натрия у салата на 70%, что может стать причиной нарушения солевого баланса и, как следствие, изменения структуры листа [13]. Монохроматический зеленый способствует увеличению размеров микропобегов и повышению коэффициента размножения у растений малины, однако не дает такого эффекта у растений ежевики [14]. Для растений перца, выращиваемых под красным светом, наблюдается максимальная высота, однако добавление 5% от общей интенсивности синего света приводит к увеличению числа плодов, 9% к повышению содержанию общего хлорофилла и антиоксидантов, а 17% к максимальной концентрации каротиноидов [15]. Кратковременные ночные включения красного света [16] приводят к наращиванию активной формы фитохромов, возрастанию уровня содержания антиоксидантов, увеличению размера плодов у томата [17], отсутствию или уменьшению размера корнеплодов у короткодневных сортов редиса [18]. При хранении урожая, красный свет может замедлять синтез этилена и способствовать снижению концентрации аскорбатов (связанных с пожелтением и старением) в кочане брокколи [19]. Присутствие в излучении дальней красной составляющей не менее 15% способствует увеличению длины цветоносов ремонтантной садовой земляники, что упрощает сбор ягоды [20]. Соотношение красного к синему свету в пределах 1.3–4.2 наиболее полно приводит к реализации механизма антиоксидантной защиты у растений винограда, меньшее соотношение приводит к повышению активности пероксидазы [21]. У растений земляники садовой, выращенных при досвечивании светодиодными облучателями с соотношением спектрального состава красного к синему свету 2 к 1, содержание сахаров на 10–20% выше, чем при освещении с большей долей красной составляющей [22]. А выращивание сои под светодиодными облучателями с увеличенной долей излучения в красной области спектра и с отсутствием излучения в зеленой области привело к растяжению междоузлий без увеличения массы растений [23].

Возможность узкополосного излучения от светодиодов позволяет оценить роль конкретных длин волн на морфологию и развитие растений, однако все большее количество исследований показывают, что растениям необходим полный спектр излучения в видимой области для реализации своего продукционного потенциала. Например, по сравнению с белым светом отдельное

действие синего, зеленого и красного приводит к снижению накопления биомассы картофеля сорта Агрия соответственно на 50, 76 и 68%, кроме того, облучение белым светом приводило к максимальной скорости карбоксилирования [24]. В то же время применение спектра излучения, характеризуемого равными долями энергии в отдельных спектральных диапазонах ФАР, привело к формированию большего количества листьев в розетке растений петрушки, большей сырой массе листьев и большему содержанию сухого вещества, а при облучении спектром, приближенным к относительной спектральной эффективности фотосинтеза, было отмечено увеличение общей длины листьев за счет вытягивания черешка при сохранении пропорций оставшейся части листа [25]. Общее увеличение доли ФАР и УФ-А способствует росту содержания хлорофиллов *a* и *b*, углеводов в листьях растений салата, ускоряет развитие побега за счет увеличения числа междоузлий и массы стебля [26]. Освещение лука репчатого комбинацией красных, синих, оранжевых и белых светодиодов приводило к большему накоплению витамина С по сравнению с другими вариантами [27].

Тем не менее применение светодиодов может приводить и к негативным эффектам — например, накоплению нитратов. Было отмечено, что эффективность экстракции микроэлементов листьями томата и салата из питательного раствора выше при облучении светом натриевых ламп на 10–20%, чем при освещении светодиодными светильниками, при этом эффективность экстракции макроэлементов салатом не зависит от спектра облучения, а у томата при облучении натриевыми лампами она на 30% выше, чем под светодиодными источниками света [28].

Таким образом, в современной светокультуре все больше внимания уделяется влиянию спектрального состава излучения не только на протекание фотосинтетических реакций и содержание фоточувствительных пигментов, но и на биохимический состав, характеризующий качество выращиваемой растительной продукции. Недостаток определенных длин волн может вызывать у растений физиологические нарушения, которые не наблюдаются при культивировании в условиях широкого спектра ФАР [2] — это связано с индукцией светом сигнальных путей, запускающих накопление вторичных метаболитов, например, флавоноидов, ассоциированных с иммунным ответом растений на биотические стрессы [29,30]. В связи с этим все чаще при производстве культурных растений используют источники света, включающие не только пики поглощения хлорофилла, а все диапазоны ФАР [31], роль и механизм влияния которых еще только предстоит выяснить.

Цель настоящей работы заключалась в выявлении особенностей влияния полноспектрального состава световой среды с различными интенсивностями излучения в значимых областях ФАР на продуктивность и качество, характеризующее биохимическим составом, листовых и

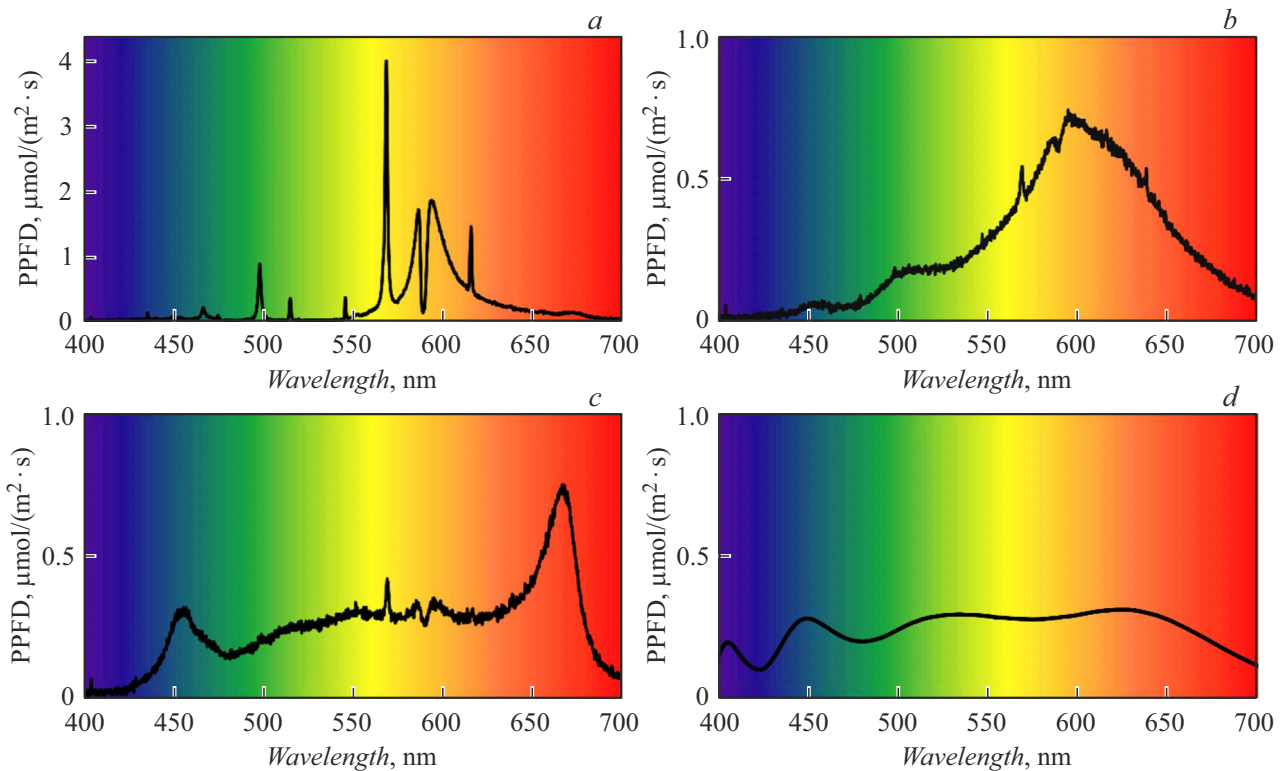


Рис. 1. Спектры излучения источников света: *a* — ДНаЗ, *b* — СД1 (желтый свет), *c* — СД2 (розовый свет), *d* — СД3 (приближенный к солнечному свету).

плодовых культурных растений в условиях интенсивной светокультуры.

1. Использованные источники света

В настоящее время можно выделить три основных подхода к формированию спектра освещения на основе светодиодных технологий [13]: 1) применение преимущественно красных и синих светодиодов, дающих спектр, имеющий высокий коэффициент корреляции со спектром поглощения хлорофиллов *a* и *b*; 2) использование спектральной чувствительности растений по McCree [32]; 3) моделирование спектра естественного солнечного света.

Исходя из этого, нами были выбраны четыре различных спектра излучения, реализованные в следующих источниках света: 1) ДНаЗ — дуговые натриевые зеркальные лампы производства ООО „РЕФЛАКС“ (Россия) мощностью 400 W, наиболее распространенные в растениеводстве защищенного грунта и принятые за эталон (рис. 1, *a*); 2) СД1 — светодиодные светильники, излучающие желтый свет со спектром, приближенным к спектру натриевых ламп и учитывающий усредненный спектральный квантовый выход фотосинтеза [32] (рис. 1, *b*); 3) СД2 — светодиодные светильники, излучающие розовый свет, содержащий пики в красной и синей областях, соответствующие максимумам поглоще-

ния хлорофилла (рис. 1, *c*); 4) СД3 — светодиодные светильники со спектральным составом в видимой области, приближенным к солнечному свету (рис. 1, *d*). Светодиодные светильники СД1, СД2 и СД3 были изготовлены промышленными партнерами ФГБНУ АФИ на основе составленных нами рекомендаций и рассчитанных интенсивностей и спектров излучения, учитывающих потребности растений и включающих физиологически значимые диапазоны. СД1 содержит белый, янтарный и голубой (циан) светодиоды, СД2 комбинацию из красного и белого светодиодов, а СД3 включает белые светодиоды с модифицированной вторичной оптикой с использованием полимера-люминофора (ноу-хау).

Интенсивность фотосинтеза определяется числом поглощенных фотонов в области ФАР, т.е. он является квантовым процессом. В связи с этим в настоящее время в практику культивирования растений в условиях защищенного грунта вместо энергетической системы светотехнических величин для области ФАР активно внедряются фотосинтетические фотонные величины [33], характеризующие плотностью фотосинтетического потока фотонов PPFD (photosynthetic photon flux density). Переход от энергетических единиц к фотонным возможен либо расчетным путем на основе измеренных спектров излучения источников света [34], либо с использованием соответствующих приборов, включающих алгоритм пересчета. В настоящем исследовании спектры излучения получены с использованием обоих подходов:

Таблица 1. Распределение величины PPFD по диапазонам излучения для использованных источников света

Источник света	PPFD в области 400–700 nm, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	PPFD в области 400–500 nm		PPFD в области 500–600 nm		PPFD в области 600–700 nm	
		$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	% от общего PPFD	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	% от общего PPFD	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	% от общего PPFD
ДНаЗ	341 ± 24	29	9	185	54	127	37
Светодиодный светильник СД1	342 ± 24	23	7	156	46	163	47
Светодиодный светильник СД2	332 ± 23	61	18	123	37	148	45
Светодиодный светильник СД3	339 ± 21	76	22	130	38	133	40

для ДНаЗ, СД1 и СД2 спектры измерены в относительных единицах с помощью интегрирующей сферы и ПЗС-спектрометра CCS200 производства Thorlabs (США), усреднены по всей поверхности выращивания и относительные единицы переведены в PPFD, а для получения спектральных параметров источника СД3 использован спектральный ФАР-метр PG200N фирмы UPRtek (Тайвань) со встроенным алгоритмом пересчета Wm^{-2} в единицы $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. На основе полученных данных источники света располагались в вегетационных установках таким образом, чтобы величина фотосинтетически активного потока фотонов была для всех вариантов одинаковой и составляла $340 \pm 25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (оптимальное значение для светолюбивых культур [35]) для исключения влияния величины интенсивности излучения на растительные культуры. В табл. 1 представлено основное различие в спектральных характеристиках использованных источников — распределение величин PPFD по диапазонам — синему, зеленому и красному. Наиболее равномерное соотношение количества фотонов в каждом диапазоне характерно для светильника СД3 со спектром, приближенным к солнечному свету.

2. Биохимический анализ

Биохимический состав получаемой растительной продукции определяли в аккредитованной Испытательной лаборатории ФГБНУ АФИ в соответствии с требованиями нормативных документов (табл. 2). Сырую золу, углеводы, азот, фосфор, калий, кальций, магний определяли в % от абсолютно сухого вещества (% DW), витамин С в mg на 100 g натуральной влаги (mg/100g FW), нитраты в mg на kg натуральной влаги (mg/kg FW), тяжелые металлы и микроэлементы в mg на kg сухого вещества (mg kg⁻¹ DW). Дисперсионный и регрессионный анализы, а также другая статистическая обработка обобщаемых данных выполнены с помощью программного обеспечения MS Excel 2010. В тексте и таблицах приведены средние арифметические значения

параметров и их доверительные интервалы при 95%-ом уровне вероятности по *t*-критерию.

3. Экспериментальные условия выращивания растений салата

Объектом исследования служили растения листового салата (*Lactuca sativa* L.) сорта Тайфун производства ООО „Сортсеменовощ“ (Россия). Листовой салат обладает богатым витаминно-минеральным составом, включающим витамины групп В и С, а также кальций, бор, медь, йод, фосфор. Среди широкого разнообразия сортов типов листового салата Тайфун характеризуется быстрым ростом, крупной открытой розеткой листьев и способностью давать стабильный урожай даже при недостаточной освещенности.

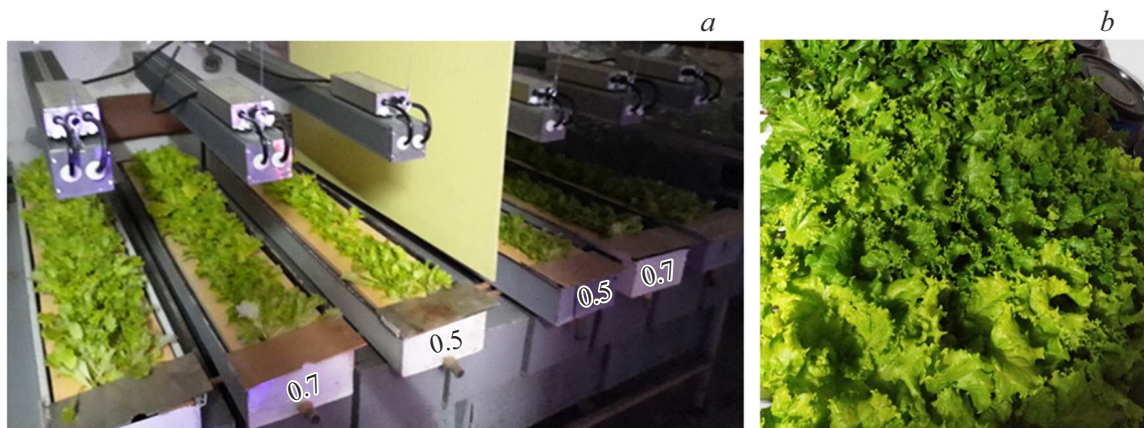
В эксперименте растения салата выращивали методом тонкослойной панопоники [40] в автоматизированных вегетационных светоустановках, оборудованных источниками света с различными спектральными характеристиками (рис. 2). Продолжительность светового периода составляла 14 h в сутки. Температура воздуха поддерживалась в пределах 18–20°C днем и 16–18°C ночью, относительная влажность воздуха — 65–70% [41,42]. Для полива в течение вегетации применяли питательный раствор Кнопа в концентрации 0.8 N. На 1 m² вегетационной светоустановки формировали ценоз из расчета 30 растений салата (повторность). Вегетационный эксперимент проводили дважды. Уборку осуществляли на 28 сутки от посева семян. При уборке учитывали сырую массу растений с пересчетом на 1 m², т. е. продуктивность культуры, площадь листьев и высоту растений.

4. Влияние спектра излучения на продуктивность салата

Исследование влияния спектра излучения на растения салата интересно в первую очередь в связи с тем, что па-

Таблица 2. Методы измерения биохимического состава исследуемых растительных культур

Измеряемое вещество или параметр	Метод	Ссылка
Влажность	Воздушно-тепловой сушики	[36]
Сырая зола	Сухого озоления	
Углеводы (сахара)	Титрометрический метод (определение сахаров по Бертрану)	
Азот	Фотометрический индофенольный метод определения азота	[37]
Фосфор	Фотометрический метод определения содержания фосфора	
Калий	Пламенно-фотометрический	
Кальций	Пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии	
Магний	Пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии	
Витамин С	Титрометрический	[38]
Нитраты	Ионометрический	
Тяжелые металлы и микроэлементы (Fe, Mn, Cu, Co, Zn, Ni, Pb, Cd)	Пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии	[39]

**Рис. 2.** Общий вид экспериментальных вегетационных светоустановок с растениями салата: *a* — под светодиодными светильниками, *b* — под лампами ДНаЗ.

раметры фотосинтезирующих органов (листьев) салата напрямую связаны с продуктивностью и характеризуют выход продукции [43].

В ходе изучения действия полноспектрального излучения с различным соотношением фотонов в синей, красной и зеленой областях ФАР получено, что наибольшая продуктивность наблюдается для варианта облучения светодиодными светильниками СД3, с более выравненным распределением фотонов по энергиям. В то же время, для источников света СД1 и СД2 характерно снижение величины получаемого урожая на 42 и 44% соответственно. Вероятно, это связано с формированием меньшей площади фотосинтезирующих органов [44] — для растений, освещаемых СД1, площадь листа была меньше на 27%, а при облучении СД2 — на 24%, чем при использовании ламп ДНаЗ. Кроме того, общая высота растений была ниже на 13 и 17% по сравнению

с контролем под СД1 и СД2 соответственно. При этом средняя площадь листа при освещении лампами ДНаЗ и светильниками СД1 практически не отличалась и составляла около 100 cm^2 , а высота растений достигала 21 см.

Можно сделать вывод, что большая доля фотонов в красном диапазоне не привела к желаемому увеличению продуктивности, тогда как решающую роль, вероятно, имело именно соотношение PPFD между областями спектра излучения. Для варианта СД3 с наибольшей продуктивностью оно составило 1:1.7:1.8 (синий:зеленый:красный). При этом высокая урожайность для растений салата, освещаемых ДНаЗ, по-видимому, связана с наличием излучения в дальнем красном и ИК-диапазонах (дополнительно $72 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ в области 700–1000 nm).

Таблица 3. Биохимический состав растений салата, выращенных под источниками света с различным спектральным составом

Параметр	Источник света			
	ДНаЗ	СД1	СД2	СД3
Сухое вещество, %	4.7	4*	4.3*	4.55
Азот, % DW	3.46	3.88*	3.69*	3.94*
Фосфор, % DW	0.58	0.79*	0.63*	0.66*
Калий, % DW	7.87	9.46*	7.14*	6.53*
Кальций, % DW	2.09	2.03	2.08	2.05
Магний, % DW	0.432	0.4*	0.484*	0.55*
Железо, % DW	109.8	95.6*	101.6*	118.7*
Сумма сахаров, % DW	16.43	12.45*	13.61*	12.34*
Витамин С, mg/100 g FW	16.69	15.35*	16.17	16.04
Нитраты, mg/kg FW	1490	1597*	1423	1551

Примечание: * — значение достоверно отличается от контроля (вариант с лампами ДНаЗ) на 5%-ом уровне значимости.

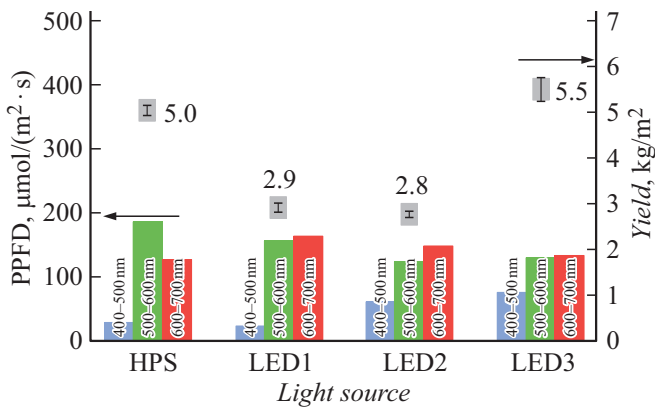


Рис. 3. Продуктивность растений салата, выращенных под источниками света с различным спектральным составом.

5. Влияние спектра излучения на биохимический состав салата

Результаты анализа данных биохимического состава растений салата (табл. 3) показали отсутствие достоверных различий в накоплении сухого вещества листьями салата при его выращивании под лампами ДНаЗ, СД2 и СД3 (слабая тенденция снижения на 3–9%) и достоверно более низкое его содержание на 15% под СД1, что свидетельствует об увеличении оводненности тканей и росте их осмотического потенциала, обусловленном накоплением минеральных элементов. Так, установлено достоверное или в виде тенденции увеличение содержания азота (на 7–14%) и фосфора (на 9–36%) под светодиодными светильниками по сравнению с лампа-

ми ДНаЗ. В то же время в отношении содержания калия достоверный рост (на 20%) отмечается только в варианте применения СД1. При этом установлена тенденция его снижения (на 9%) в варианте СД2 и достоверное снижение в варианте СД3. Более высокое содержание указанных макроэлементов в листьях салата под СД1 и СД2 при падении показателей роста и продуктивности по сравнению с таковыми под лампами ДНаЗ позволяет предположить более низкую интенсивность физиологических процессов использования и трансформации данных соединений, а также расходования пластических веществ растений на адаптацию к условиям световой среды. Вместе с тем не установлено достоверных отличий в содержании кальция под всеми светодиодными источниками света и магния под СД1 по сравнению с лампами ДНаЗ и достоверное или в виде тенденции увеличение количества магния под СД2 и СД3 на 12–27%. Следует отметить достоверное снижение содержания углеводов (на 17–25%) и тенденцию снижения витамина С (на 3–8%) под светодиодными источниками света. При этом наблюдалась тенденция снижения содержания железа на 7–13% под СД1 и СД2 и его увеличение на 8% под СД3 по сравнению с таковым под лампами ДНаЗ. Вероятно, стимуляция роста растений салата в варианте применения СД3 преимущественно обусловлена увеличением содержания магния и железа, а также усилением процессов первичного метаболизма, связанного с каталитическими свойствами ионов железа, как кофактора множества ферментов, задействованных в большом количестве метаболических процессов, происходящих в растениях. Достоверно более высокое содержание углеводов, задействованных в фотосинтезе и окислительно-восстановительных процессах в листьях салата при его выращивании под лампами ДНаЗ, свидетельствовало о достаточно высоком уровне ассимиляционной работы листьев (увеличение площади листьев, сухого вещества).

6. Экспериментальные условия выращивания растений томата

Объектом исследований служили растения томата сорта Наташа селекции ФГБНУ „Федеральный научный центр овощеводства“ (Россия). Растения карликового типа развития, компактные, не требуют пасынкования и подвязки, подходящие для выращивания гидропонным методом в узкостеллажных и многоярусных установках, в том числе при искусственном освещении.

В эксперименте томаты выращивали методом тонкослойной панопоники [40] в вегетационных светоустановках, оснащенных источниками света с различным спектром излучения (рис. 4). Для минерального питания использовали раствор Кнопа. В растительных длиной 1 м размещали по 5 растений, формируя фитоценоз 20 штук на m² (повторность). Температура воздуха поддерживалась в пределах 22–24°С днем и 18–20°С



Рис. 4. Общий вид экспериментальных вегетационных светоустановок с растениями томата: *a* — под светодиодными светильниками, *b* — под лампами ДНаЗ.

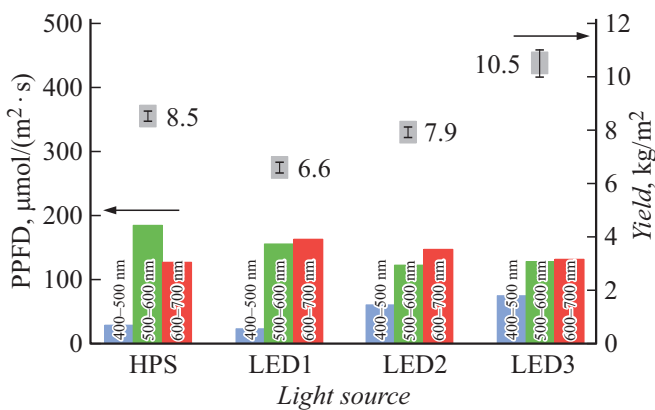


Рис. 5. Продуктивность растений томата, выращенных под источниками света с различным спектральным составом.

ночью, относительная влажность воздуха составляла 75–80% [41,42]. Уборку растений проводили на 90-е сутки от посева семян. При уборке учитывали продуктивность растений в пересчете на 1 м² полезной площади вегетационной светоустановки, а также определяли биохимический состав плодов. Вегетационные эксперименты проводили дважды.

7. Влияние спектра излучения на продуктивность томатов

Проведенные испытания по исследованию влияния световой среды с различными спектральными характеристиками на развитие растений томата сорта Наташа в интенсивной светокультуре показали, что лучшие результаты по продуктивности растительной продукции достигнуты при использовании источников света СД3 со спектром, максимально приближенным к солнечному (рис. 5). При выращивании растений томата полученная урожайность с использованием светодиодных светильников СД3 была выше на 20% по сравнению с растениями

контрольного варианта, выращенных под лампами ДНаЗ. Использование светодиодных светильников СД1 и СД2, наоборот, привело к снижению продуктивности на 22 и 7% соответственно. Интересно отметить, что средняя высота растений была схожа для всех вариантов освещения с применением светодиодов — 28.7 ± 4.1 см для СД1, 27.3 ± 5.2 см для СД2, 29.5 ± 4 см для СД3 соответственно, а при облучении лампами ДНаЗ растения достигали 38.3 ± 2.0 см. При этом при примерно одинаковом количестве плодов на растениях (46 ± 2) во всех вариантах наблюдались значительные различия в массе одного плода — 7.1 ± 0.5 г для ДНаЗ, 5.6 ± 0.5 г для СД1, 7.0 ± 1.0 г для СД2, 9.5 ± 0.9 г для СД3. Повышенная почти на 34% масса плода при использовании светильников СД3 по сравнению с контрольными лампами ДНаЗ говорит о высокой эффективности подобранного спектра излучения в этом варианте. Установленное увеличение продуктивности растений томата под лампами СД3, вероятно, обусловлено усилением процессов корневого питания и перераспределения пластических веществ (аттракции) из вегетативных органов в плоды [45].

Таким образом, можно выделить преимущество использования светодиодного освещения со спектром, близким к солнечному в области ФАР, для применения в защищенном грунте, которое заключается в возможности стеллажного многоярусного размещения томатов за счет снижения высоты растений при увеличении массы получаемых плодов и отсутствия тепловых ожогов при близком расположении растений рядом с источником света.

8. Влияние спектра излучения на биохимический состав томатов

Сравнительная оценка биохимического состава плодов томата сортов Наташа показала высокое их качество под всеми тестируемыми источниками света (табл. 4). Так,

Таблица 4. Биохимический состав растений салата, выращенных под источниками света с различным спектральным составом

Параметр	Источник света			
	ДНаЗ	СД1	СД2	СД3
Влажность, %	93.1	94.5	94.1	93.8
Сухое вещество, %	6.9	5.5*	5.9*	6.2*
Сырая зола, % DW	10.1	10.8*	10.3	10.6*
Сумма сахаров, % DW	33.3	35.4*	45.8*	41.5*
Моносахара, % DW	31.0	35.1*	44.3*	36.2*
Дисахара, % DW	2.3	0.3*	1.5*	5.3*
Витамин С, mg/100 g HW	18.5	18.0	24.6*	27.5*
Нитрат, mg/kg HW	52.9	59.3*	69.7*	47.4*

Примечание: * — значение достоверно отличается от контроля (вариант с лампами ДНаЗ) на 5%-ом уровне значимости.

светодиодные светильники СД1 преимущественно не вызывали значимых изменений в биохимическом составе плодов, за исключением достоверного снижения содержания сухого вещества на 20% относительно такового под лампами ДНаЗ. В то же время светодиодные светильники СД2 привели к существенным изменениям в качественном состоянии плодов томата. В них отмечается достоверное увеличение содержания сахаров на 38%, в основном за счет моносахаров, а также витамина С на 33%, зольных элементов в виде тенденции на 2% по сравнению с вариантом применения ламп ДНаЗ. Под светодиодными светильниками СД3 также установлено изменение биохимического состава плодов, а именно наблюдалось достоверно более высокое содержание углеводов на 17%, в данном случае за счет дисахаров, витамина С на 49%, сырой золы в виде тенденции на 5% относительно данных в варианте облучения натриевыми лампами, при этом содержание нитратов имело тенденцию к снижению (на 10%). В вариантах применения светильников СД1 и СД2 содержание нитратов было больше, чем под лампами ДНаЗ на 12–32%, однако под всеми тестируемыми источниками света не превышало ПДК и соответствовало санитарно-гигиеническим нормативам РФ.

Заключение

В согласии с данными, полученными в других исследованиях, показано, что параметры световой среды, а именно спектральные характеристики излучения, играют важнейшую роль в развитии растений и влияют не только на морфологические показатели, но и на биохимический состав как листьев, так и плодов. Наилучшие результаты по продуктивности и качеству растительной продукции,

выращиваемой в условиях защищенного грунта, достигнуты при использовании источников света со спектром излучения, приближенным к естественному солнечному свету в области ФАР.

Применение полноспектрального источника света с наиболее выровненным из исследованных вариантов соотношением количества фотонов в синем, зеленом и красном (1:1.7:1.8) диапазонах спектра позволило получить увеличение продуктивности в виде тенденции на 10% для салата и достоверное на 23% для томатов по сравнению с эталонными натриевыми лампами. Кроме того, наблюдались и положительные изменения биохимического состава, характеризующие высокое качество получаемой растительной продукции — повышение содержания магния и железа в листьях салата и более высокое содержание углеводов, витамина С, сырой золы в плодах томата. Можно предположить, что увеличение продуктивности при выращивании под светильниками СД3 связано с изменением биохимического состава следующим образом: в листьях салата усиливаются процессы первичного метаболизма вследствие каталитических свойств железа, а в растениях томата — перераспределение пластических веществ из вегетативных органов в плоды.

Таким образом, показанное нами преимущество спектра излучения, приближенного к солнечному свету, говорит о решающей роли всего диапазона длин волн в видимой области спектра для жизнедеятельности растений как для осуществления фотосинтетических реакций, аккумуляции и преобразования энергии света, так и для регуляции метаболических процессов и формирования биомассы и биохимического состава растительной продукции.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г.Г. Панова, О.Р. Удалова, Е.В. Канащ, А.С. Галушко, А.А. Кочетов, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, И.Н. Черноусов. ЖТФ, **91** (10), 1633 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19 [G.G. Panova, O.R. Udalova, E.V. Kanash, A.S. Galushko, A.A. Kochetov, N.S. Priyatkin, M.V. Arkhipov, I.N. Chernousov. Tech. Phys., **65** (10), 1562 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220100163]
- [2] А.О. Закурин, А.В. Щенникова, А.М. Камионская. Физиология растений, **67** (3), 246 (2020). DOI: 10.31857/S0015330320030227 [A.O. Zakurin, A.V. Shchennikova, A.M. Kamionskaya. Russ. J. Plant Physiol., **67**, 413 (2020). DOI: 10.1134/S102144372003022X]
- [3] J.J. Bello-Bello, J.A. Perez-Sato, C.A. Cruz-Cruz, E. Martinez-Estrada. InTech, **6**, 92 (2017). DOI: 10.5772/67913
- [4] H.H. Kim, G.D. Goins, R.M. Wheeler, J.C. Sager. HortScience, **39** (7), 1617 (2004). DOI: 10.21273/HORTSCI.39.7.1617
- [5] C. Lin, M. Ahmad, A.R. Cashmore. Plant J., **10**, 893 (1996). DOI: 10.1046/j.1365-313X.1996.10050893.x

- [6] S.M. Assmann, K.I. Shimazaki. *Plant Physiol*, **119**, 809 (1999). DOI: 10.1104/pp.119.3.809
- [7] H. Li, Z. Xu, C. Tang. *Plant Cell, Tissue Organ Culture*, **103** (2), 155 (2010). DOI: 10.1007/s11240-010-9763-z
- [8] D. Kokalj, J. Hribar, B. Cigić, E. Zlatič, L. Demšar, L. Sinkovič, H. Šircelj, G. Bizjak, R. Vidrih. *Food Technol. Biotechnol.*, **54**, 228 (2016). DOI: 10.17113/ftb.54.02.16.4096
- [9] S. Eichhorn Bilodeau, B.S. Wu, A.S. Rufyikiri, S. MacPherson, M. Lefsrud. *Front. Plant Sci.*, **10**, 296 (2019). DOI: 10.3389/fpls.2019.00296
- [10] H. Li, C. Tang, Z. Xu, X. Liu, X.J. Han. *Agric. Sci.*, **4**, 262 (2012). DOI: 10.5539/jas.v4n4p262
- [11] S. Chinchilla, L.G. Izzo, E. van Santen, C. Gomez. *Horticulture*, **4**, 8 (2018). DOI: 10.3390/horticulturae4020008
- [12] E. Goto. *Environ. Control Biol.*, **41**, 21 (2003). DOI: 10.2525/ecb1963.41.121
- [13] П.П. Долгих, Г.Н. Хусенов. *Вестник Красноярского гос. аграрного ун-та*, **6**, 154 (2018).
- [14] Е.А. Калашникова, Л.А. Гудь, А.А. Анисимов, Р.Н. Киракосян, А. Василев, И.Г. Тараканов. *Известия Тимирязевской сельхоз. акад.*, **2**, 54 (2020). DOI: 10.26897/0021-342X-2020-2-54-63
- [15] M.T. Naznin, M. Lefsrud, V. Gravel, M.O.K. Azad. *Plants (Basel)*, **8** (4), 93 (2019). DOI: 10.3390/plants8040093
- [16] Y. Higuchi, K. Sumitomo, A. Oda, H. Shimizu, T. J. Hisamatsu. *Plant. Physiol.*, **169**, 1789 (2012). DOI: 10.1016/j.jplph.2012.07.003
- [17] K. Cao, L. Cui, L. Ye, X. Zhou, E. Bao, H. Zhao, Z. Zou. *Front. Plant Sci.*, **7**, 527 (2016). DOI: 10.3389/fpls.2016.00527
- [18] Е.Н. Зубкова, Т.А. Белова. *Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*, **25** (1), 50 (2017).
- [19] G. Ma, L. Zhang, C.K. Setiawan, K. Yamawaki, T. Asai, F. Nishikawa, S. Maezawa, H. Sato, N. Kanemitsu, M. Kato. *Postharvest Biol. Technol.*, **94**, 97 (2014). DOI: 10.1016/j.postharvbio.2014.03.010
- [20] А.А. Смирнов, Ю.А. Прошкин, А.В. Соколов. *Плодоводство и ягодоводство России*, **60** (1), 74 (2020). DOI: 10.31676/2073-4948-2020-60-74-80
- [21] Т.Г. Янчевская, Т.В. Никонович, Е.Н. Олешук, А.Н. Гриц. *Магарач. Виноградарство и виноделие*, **20** (3), 61 (2018).
- [22] М.Н. Яковцева, Г.Ф. Говорова, И.Г. Тараканов. *Известия ТСХА*, **3**, 25 (2015).
- [23] С.А. Ушакова, Я.А. Григоращенко, В.Н. Шихов, В.Е. Чернов, А.А. Тихомиров. *Вестник Красноярского гос. аграрного ун-та*, **7**, 28 (2016).
- [24] Ю.Ц. Мартиросян, Т.А. Диловарова, В.В. Мартиросян, В.Д. Креславский, А.А. Кособрюхов. *Сельскохозяйственная биология*, **51** (5), 680 (2016). DOI: 10.15389/agrobiology.2016.5.680rus
- [25] С.А. Ракутько, Е.Н. Ракутько. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*, **38**, 298 (2015).
- [26] И.Ф. Головацкая, Е.В. Бойко, А.Н. Видершпан, Н.И. Лаптев. *Сельхоз. биология*, **53** (5), 1025 (2018). DOI: 10.15389/agrobiology.2018.5.1025rus
- [27] И.В. Курьянова, С.И. Олонина. *Вестник НГИЭИ*, **7** (74), 35 (2017).
- [28] А.С. Холманский, А.А. Смирнов, Н.В. Зайцева. *Агрофизика*, **1**, 52 (2019). DOI: 10.25695/AGRPH.2019.01.07
- [29] I. Vanninen, D.M. Pinto, A.I. Nissinen, N.S. Johansen, L. Shipp. *Ann. Appl. Biol.*, **157**, 393 (2010). DOI: 10.1111/j.1744-7348.2010.00438.x
- [30] N.S. Johansen, I. Vanninen, D.M. Pinto, A.I. Nissinen, L. Shipp. *Ann. Appl. Biol.*, **159**, 1 (2011). DOI: 10.1111/j.1744-7348.2011.00483
- [31] L. Chen, C.C. Lin, C.W. Yeh, R.S. Liu. *Materials (Basel)*, **3**, 2172 (2010). DOI: 10.3390/ma3032172
- [32] K.J. McCree. *Agricultural Meteorology*, **9**, 191 (1971). DOI: 10.1016/0002-1571(71)90022-7
- [33] Л.Б. Прикупец, Г.В. Боос, В.Г. Терехов, И.Г. Тараканов. *Светотехника*, **5**, 6 (2018).
- [34] Т.Э. Кулешова, М.Н. Блашенков, Д.О. Кулешов, Н.Р. Галль. *Научное приборостроение*, **26** (3), 35 (2016).
- [35] X.X. Fan, Z.G. Xu, X.Y. Liu, C.M. Tang, L.W. Wang, X.L. Han. *Sci. Hortic. Amsterdam*, **153**, 50 (2013). DOI: 10.1016/j.scienta.2013.01.017
- [36] А.И. Ермакова. *Методы биохимического исследования растений* (Агропромиздат, Л., 1987)
- [37] И.М. Скурихин, В.А. Тутельян. *Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов* (Брандес, Медицина, М., 1998)
- [38] *Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства* (М., 1990)
- [39] *Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами* (ФБУ „ФЦАО“, 2011)
- [40] Г.Г. Панова, И.Н. Черноусов, О.Р. Удалова, А.В. Александров, И.В. Карманов, Л.М. Аникина, В.Л. Судаков, В.П. Якушев. *Докл. Росс. акад. сельхоз. наук*, **4**, 17 (2015).
- [41] Г.Г. Панова, В.А. Драгавцев, Ю.И. Желтов, В.Л. Судаков, И.Н. Черноусов, Е.В. Канаш, Л.М. Аникина, О.Р. Удалова. *Аграрная Россия*, **5**, 7 (2009). DOI: 10.30906/1999-5636-2009-5-7-10
- [42] А.Д. Цыдендамбаев, С.Ю. Нестеров, С.Н. Семенов. *Досвечивание овощных культур* (М., 2014)
- [43] Т.Э. Кулешова, И.Н. Черноусов, О.Р. Удалова, Л.М. Аникина, Ю.В. Хомяков, А.В. Александров, Г.Г. Панова. *Биофизика*, **65** (1), 112 (2020).
- [44] О.Р. Удалова, Л.М. Аникина, Ю.В. Хомяков, В.В. Вертебный, В.И. Дубовицкая, Г.Г. Панова. *Овощи России*, **1**, 33 (2021).
- [45] Т.Э. Кулешова, О.Р. Удалова, И.Т. Балашова, Л.М. Аникина, П.Ю. Конончук, Г.В. Мирская, Г.Г. Панова. *Овощи России*, **4**, 65 (2021).