

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА МОРФОГЕНЕЗ И ПРОДУКЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС РАСТЕНИЙ ТОМАТА

Д.А. Товстыко, А.А. Голубев, О.С. Яковлева, И.Г. Тараканов

*Российский государственный аграрный университет - Московская
сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева*

Поступила в редакцию 17.11.2023 г.

Аннотация. Томат является важной сельскохозяйственной культурой, которая представляет особый интерес для систем интенсивного культивирования растений (СИКР). Использование таких систем позволяет контролировать рост и развитие сельскохозяйственных культур, продукционный процесс, количество и качество урожая. Применение светоизлучающих диодов в СИКР (в теплицах, на сити-фермах) открывает новые возможности для точного регулирования интенсивности и спектрального состава света наряду со значительным снижением энергопотребления.

Целью работы было изучение физиологических реакций и продукционного процесса томата при выращивании в условиях разных световых режимов.

Растения детерминантного скороспелого томата сорта Минибел выращивали на торфяном субстрате в вегетационных сосудах. В экспериментах изучали воздействие оптического излучения на растения, при различных комбинациях красного ($\lambda_{\max} = 660$ нм) и дальнего красного ($\lambda_{\max} = 730$ нм) света в спектре излучения при одинаковом фоновом облучении синим ($\lambda_{\max} = 460$ нм) и коротковолновым красным ($\lambda_{\max} = 640$ нм) светом.

Выявлена специфичность в формировании вегетативной биомассы и продуктивности растений в зависимости от варианта освещения. Было отмечено, что наиболее высокие растения были получены при повышенной доле дальнего красного (ДК = 70 и 100%) и пониженной красного света (К = 0 и 30%) в спектре. В условиях режима К/ДК = 30/70 наблюдали увеличение в 2-3 раза скорости роста рассады томата, сырой биомассы и выхода сухого вещества с одного растения на 40 % и более, в сравнении с режимами К/ДК = 70/30 и 100/0. Повышение красного света до 70% (режим К/ДК=70/30) задерживало переход томата в генеративные фазы развития на 7-10 дней. А также высокое соотношение К/ДК ингибировало рост и накопление вегетативной массы. Пониженное соотношение К/ДК (режим 0/100) способствовало значительному увеличению энергии плодообразования томата и продуктивности. Наилучшую адаптацию детерминантного томата к условиям облучения и наиболее эффективное использование световой энергии наблюдали на режимах с соотношением К/ДК = 0/100 и 30/70.

Ключевые слова: светокультура, спектральный состав света, светодиоды, фотоморфогенез, дальний красный свет, томат.

Применение светоизлучающих диодов (СД) в системах интенсивного культивирования (в теплицах, на сити-фермах) открывает новые возможности для точного регулирования интенсивности и спектрального состава света наряду со значительным снижением энергопотребления [1]. Многими исследователями было показано, что узкополосное светодиодное освещение определенным спектром является прогрессивным направлением

при выращивании растений в защищенном грунте [2-4]. СД-облучатели положительно влияют на урожайность, накопление питательных веществ, и следовательно, могут повышать пищевую ценность сельскохозяйственной продукции. Разработка специфических световых протоколов для выращивания растений является важным этапом в повышении стабильности систем выращивания в закрытых помещениях, улучшения качества урожая и увеличения продуктивности растений [5,6].

Роль спектрального состава света в контроле морфогенеза растений хорошо известна. Измене-

ния в спектральной среде освещения влияют на скорость роста, формирование ассимиляционной поверхности, побегов, направление метаболических процессов [6,7]. Фотоморфогенез растений в большей степени зависит от соотношения потоков синих, красных и дальних красных фотонов [8]. Облучение с.-х. культур красным диапазоном спектра значительно влияет на их рост и развитие, стимулирует процессы фотосинтеза и накопление питательных веществ в растительной продукции [9,10]. Синие лучи спектра участвуют в фототропизме и фотоморфогенезе растений. СС способствует выработке и аккумуляции пигментов фотосинтеза, а также влияет на раскрытие устьиц [10]. Было замечено, что красная и синяя длины волн более благоприятны для фотосинтеза, а их сочетание в определенных случаях может привести к синергетическим эффектам при накоплении биомассы [8-10].

Следует также отметить важное значение фитохромной системы растений. Согласно эффекту Эмерсона красные (К) и дальне-красные (ДК) полосы спектра вносят значительный вклад в процесс фотосинтеза. Считается, что отдельный КС (длина волны 700 нм и более) малоэффективен в фотосинтетической активности растений. При совместном использовании ДК света (700-730 нм) с более коротковолновыми лучами (630-650 нм) в освещении культур, наблюдается эффект усиления действия [11]. Пониженное соотношение К и ДК света благодаря участию фитохромов может вызывать у растений реакцию избегания затенения [12,13]. Увеличенная доля ДК излучения (700-800 нм) по сравнению с фотосинтетически активным излучением (ФАР, 400-700 нм) индуцирует удлинение стебля и рост листовой пластинки, что может оптимизировать поглощение света, и ДК будет более эффективным в сочетании с ФАР [14,15]. Повышенная скорость роста в ответ на ДК свет также увеличивает потребность в ассимиля-

ции и приводит к повышению фотосинтетической активности. Таким образом, дополнительное облучение дальними красными СД обычно увеличивает размер растения и общий урожай [16-20].

Наши фотобиологические исследования были направлены на разработку эффективных методов регулирования морфогенеза и продукционного процесса детерминантного томата в условиях светокультуры.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили в Лаборатории искусственного климата РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева (Москва). Объектом исследования служил детерминантный томат (*Solanum lycopersicum L.*) сорта Минибел. Сорт характеризуется скороспелостью (89-96 дней созревания) и образованием компактного куста (высотой 30-40 см). Плоды сладкие с небольшой кислинкой, массой 15-25 г. Ценность сорта: неприхотливость и выносливость к недостаточному освещению. Также данный сорт удобен для использования в системах интенсивного культивирования растений (на сити-фермах) благодаря низкорослости и быстрому созреванию плодов. Оригинатором сорта является компания "СеДеК", Россия.

Растения выращивали на экспериментальных установках закрытого типа (Urbangrower 150, Китай) с контролируемым микроклиматом. Семена высевали в вегетационные сосуды объемом 5 литров. Субстрат - верховой сфагновый нейтрализованный торф низкой степени разложения «Агробалт С», содержащий полный набор питательных элементов. На световых установках поддерживалась постоянная температура 20-22°C днем и 18-20°C ночью. Обеспечивался оптимальный полив растений (70% полной влагоемкости).

В световом блоке (рис.1) использовали узкополосные светодиоды Estar Technology (Китай)

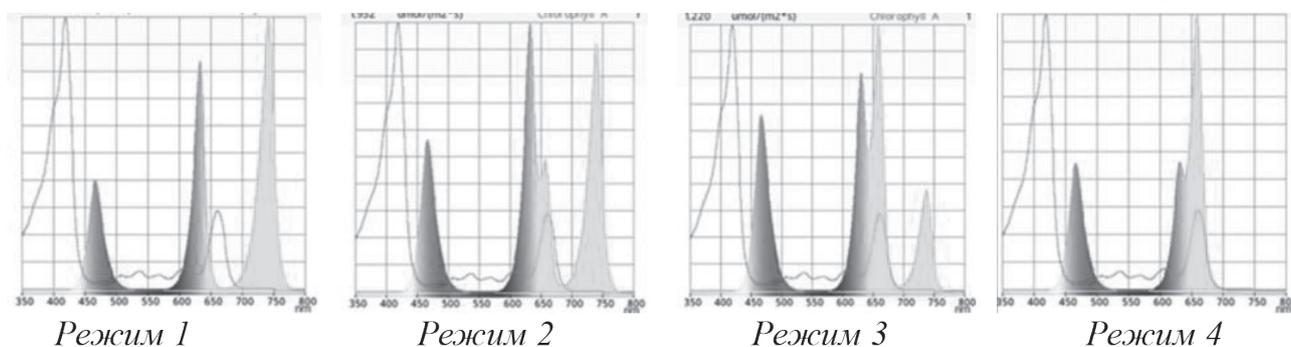


Рис. 1. Спектры облучения растений. Относительная доля красного, $\lambda_{max} = 660$ нм (К660), и дальнего красного, $\lambda_{max} = 730$ нм (ДК 730); их комбинации (слева направо): 1) 0% К₆₆₀ + 100% ДК₇₃₀; 2) 30% К₆₆₀ + 70% ДК₇₃₀; 3) 70% К₆₆₀ + 30% ДК₇₃₀; 4) 100% К₆₆₀ + 0% ДК₇₃₀.

мощностью 3Вт. Светильники содержали в спектре синий 460 нм (C_{460}), коротковолновой красный 640 нм (K_{640}), длинноволновой красный 660 нм (K_{660}) и дальний красный свет 730 нм (DK_{730}). На всех режимах фотопериод и интенсивность облучения составляли – 18 ч и 75 мкмоль/м²·с соответственно. Синий и коротковолновой красный составляли в сумме $50 \pm 5\%$ от общего спектра ($20 \pm 5\% C_{460}$, $30 \pm 5\% K_{640}$) и были стационарны на всех режимах. Варианты освещения различались между собой по соотношению K_{660} и DK_{730} спектральных диапазонов света (рис.1).

В течение вегетационного периода проводили фенологические наблюдения за морфогенезом растений томата, учитывали динамику накопления биомассы. Измеряли высоту растений, общее количество листьев и пасынков, сырую и сухую биомассу надземной части растений. Площадь листьев измеряли на фотопланиметре LI-3100, Li-Cor (Линкольн, Небраска США) [21]. Удельную поверхностную плотность листьев (УППЛ) определяли расчетным методом [22]. Учитывали содержание пигментов в листьях среднего яруса в ацетоновой вытяжке из растительного материала. Концентрацию пигментов определяли по оптической плотности на спектрофотометре СФ-104 (длина волны 662, 644 и 440,5 нм) [23, 24]. По завершению эксперимента проводили учет продуктивности растений. Оценку проводили по таким показателям как: средняя масса плода; общее количество плодов, собранных с растения; средняя продуктивность (суммарная масса плодов с растения). Энергию плодообразования рассчитывали, как процент нормальных плодов от количества цветковых почек.

Биологическая повторность в опыте была четырехкратной. Статистическую обработку результатов эксперимента проводили с использованием языка программирования R. Данные представлены в таблицах с указанием средних значений

и стандартных отклонений и на графиках "Box plot". Нормальность распределения результатов эксперимента проверяли с помощью теста Шапиро-Уилка. Статистически значимые различия между группами выявляли с помощью однофакторного дисперсионного анализа с тестом Тьюки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Различия в соотношении красного (К) и дальнего красного (ДК) света в спектре при фоновом облучении синим (С) и коротковолновым (КК) красным светом влияли на рост и морфологию растений. По скорости развития томата можно выделить режим К/ДК=30/70 с преобладанием дальнего красного света в спектре (70 %), который способствовал ускоренному переходу в фазы цветения и плодообразования. Наоборот, увеличение красного света до 70% (режим К/ДК=70/30) задерживало переход томата в генеративные фазы на 7-10 дней.

Наблюдала прямую зависимость между увеличением доли ДК в спектре (от 0 до 100%) и удлинением стебля растения в процессе вегетации. Аналогичную тенденцию наблюдали и по таким морфолого-физиологическим показателям как количество и площадь листьев (табл.1). Фенотипически увеличение данных параметров можно связать с реакцией роста на избегание тени.

Нарастание вегетативной массы происходило активнее при содержании 70% ДК в спектре (табл.1). Под влиянием режима К/ДК=30/70 наблюдали большое накопление сырой биомассы за счет активного нарастания метамеров (листьев и пасынков). Режимы освещения, содержащие как 100%ДК (0/100=К/ДК), так и 100% К свет (100/0=К/ДК) способствовали значительному сокращению образования новых боковых побегов и нарастания сырой биомассы. При этом сухая биомасса надземной части возрастала при увеличении доли ДК света в спектре (табл.1).

Таблица 1

Морфометрические параметры томата при выращивании на режимах с разным соотношением K_{660}/DK_{730} в спектре (50-ый день от всходов)

Режим облучения (соотношение K_{660}/DK_{730} , %)	Показатели						
	Высота растений, см	Общее кол-во листьев на растении, шт	Число листьев до 1-ой кисти, шт	Число пасынков на растении, шт	Площадь листьев, см ²	Общая биомасса надземной части растения, г	
						Сырая	Сухая
0/100	54,3±0,8 ^{ab}	12,1±0,2 ^{ab}	10,4±0,4 ^{abc}	1,5±0,5 ^{abc}	675± 25 ^{ab}	45,7±0,3 ^{ab}	8,4±0,6 ^{ab}
30/70	52,2±1,3 ^{cc}	10,9±0,9 ^{cc}	9,2±0,3 ^{bdc}	6,7±0,7 ^{bdf}	718± 13 ^{cc}	62±2,0 ^{bcc}	7,8±1,2 ^{cc}
70/30	41,9±1,9 ^{bde}	9,8±0,8 ^{bde}	8,1±0,2 ^{cc}	5,2±0,3 ^{ccf}	372± 60 ^{bde}	43,6±2,1 ^{de}	5,5±0,7 ^{bde}
100/0	28,3±2,1 ^{acd}	9,2±0,2 ^{acd}	8,2±0,2 ^{ad}	3,3±0,1 ^{ade}	221± 10 ^{acd}	19,5±3,5 ^{acd}	3,2±0,2 ^{acd}

Примечание. – В таблице приведены средние значения и стандартные отклонения. Одинаковыми буквенными индексами отмечены статистически значимые различия по показателям между режимами облучения ($p < 0,05$).

Как известно, фитохром имеет две взаимопревращающиеся формы: неактивную (Φ_K) и активную (Φ_{DK}). Результаты превращений фитохрома можно связать с синтезом и расщеплением гормонов растительной клетки, что может быть следствием прямого ферментативного действия форм фитохрома на активность синтетических или гидролитических ферментов. Воздействие гормонов в местах их функционирования могло бы происходить в результате модификации активной формой фитохрома Φ_{DK} . Вероятно, что в нашем исследовании содержание гормонов в тканях растений изменяется под влиянием соотношения КС и ДКС в спектре. Влияние КС на гибберелины, цитокинины и этилен можно снять путём воздействия ДКС. Фоторецептором для этих эффектов служит фитохром. Возможно, что в нашем эксперименте активное нарастание биомассы под воздействием высокой доли ДК в спектре связано с изменением активности фитогормонов в растении. Фитохром Φ_{DK} повышает уровень гибберелинов и цитокининов и снижает содержание ауксина, этилена и абсцизовой кислоты [25].

Продуктивность определяется не только морфогенезом целого растения, но и на более низких уровнях его организации (клеточном, тканевом и др.). Важным является изучение мезоструктуры листа, которая весьма чувствительна к регуляции параметров освещения с.-х. культур. Это можно описать ростовыми характеристиками и клеточной дифференцировкой ткани листа. УППЛ – один из оценочных показателей мезоструктуры листа, который отражает инвестиции растения

при накоплении сухой биомассы в расчете на единицу площади листьев.

Для измерения УППЛ отбирали листья среднего яруса (3-ий сверху). Важно отметить, что данный показатель был достаточно низкий на начальных этапах онтогенеза растений (рис.2). Такую реакцию можно было бы объяснить адаптацией растения к невысокому уровню облучения в эксперименте. В период цветения – начало плодообразования (на 50-ый день от всходов) показатель значительно вырос при повышении доли K_{660} света в спектре (режимы 70/30 и 100/0). Наоборот, увеличение соотношения К/ДК в сторону ДК₇₃₀ (режимы 0/100 и 30/70) понижало значения УППЛ в 1,4-1,6 раз при сравнении с режимом К/ДК= 70/30 (рис.2), что может свидетельствовать о перераспределении пластических веществ для инвестирования в увеличение площади листьев (табл.1) за счет экономии на толщине листовых пластинок.

Содержание пигментов в листьях томата (рис.3) сильно варьировало в зависимости от режима облучения в пределах 6,3 – 16,2 (хлорофилл а), 2,1 – 8,7(хлорофилл b), 9,4 – 24,9 (сумма хлорофиллов), 1,7 – 3,8 (каротиноиды) и 1,8 – 4,2 мг/г сух вещ-ва (соотношение хлорофиллов). При завязывании плодов наибольшее количество пигментов наблюдали при облучении растений 100% красным светом и отсутствии ДК в спектре. Данный вариант (К/ДК=100/0) способствовал накоплению хлорофиллов и каротиноидов в 2-4 раза больше в сравнении с воздействием других вариантов облучения (рис.3).

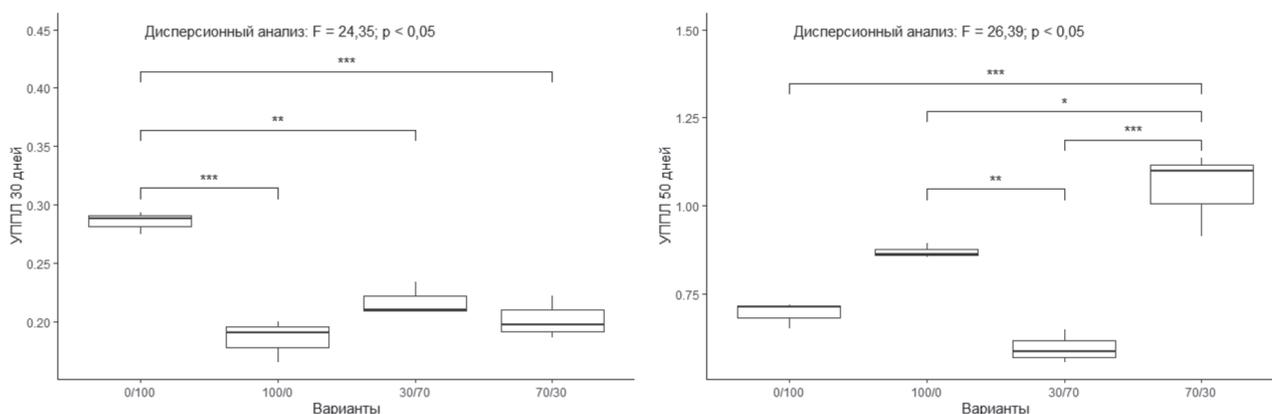


Рис. 2. Удельная поверхностная плотность листа (УППЛ) в зависимости от соотношения K_{660}/DK_{730} света в спектре облучения, г/дм². Представлены значения на 30-ый (слева) и 50-ый (справа) день от всходов. На рисунках изображены графики "Box plot", отмечены статистически значимые различия между разными режимами облучения, где * — p < 0,05, ** — p < 0,01, *** — p < 0,001.

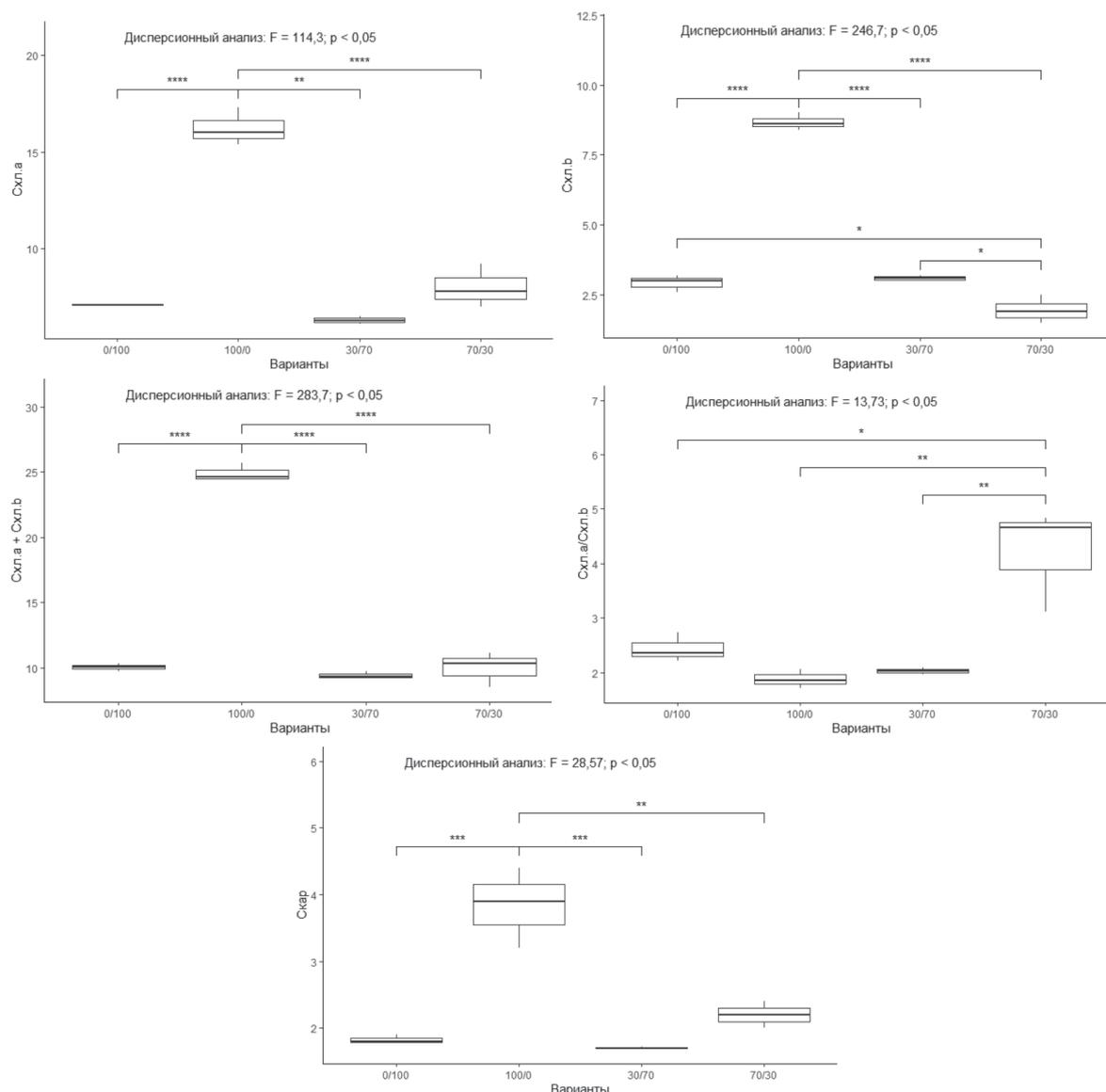


Рис. 3. Содержание пигментов в листьях томата в зависимости от разного соотношения K_{660}/DK_{730} в спектре, мг/г сух. вещества. Содержание хлорофилла а (С.хл.а), хлорофилла b (С.хл.б), каротиноидов (С. Кар), сумма хлорофиллов (Схл.а.+Схл.б), соотношение хлорофиллов (С.хл.а/Схл.б). На рисунках изображены графики "Box plot", отмечены статистически значимые различия между разными режимами облучения, где * — $p < 0,05$, ** — $p < 0,01$, *** — $p < 0,001$

Растения способны гибко перестраивать фотосинтетический аппарат при изменении условий освещения. Режим 100% К свет стимулировал повышенный синтез пигментов в зеленой биомассе при низкой ассимиляционной поверхности, тогда как 70% и 100% ДК вызывал значительное увеличение листовой пластинки, а содержание пигментов не увеличивалось.

Высокую энергию плодообразования и продуктивность растений наблюдали при увеличении доли ДК света в спектре (режимы 0/100 и 30/70, табл.2). При этом средняя масса плода была 18 – 20 г и образовывалось 12 и более плодов на растении.

Тогда как на режимах с увеличенной долей K_{660} света в спектре наблюдали обратную корреляцию – меньшее количество плодов с более крупной массой. Под воздействием режима $K/ДК=100/0$ значительно снижалась энергия плодообразования. В этом варианте получили примерно половину (56%) плодов от сформированных цветков.

Существенные различия по показателю продуктивности растений наблюдали между режимами $K/ДК = 0/100$ и 100/0. При облучении растений 100% ДК светом и отсутствии K_{660} в спектре средняя продуктивность томата увеличилась практически в 3 раза (табл.2), в сравне-

Таблица 2

Продуктивность томата в зависимости от разного соотношения K_{660}/DK_{730} в спектре облучения

Режим облучения (соотношение K_{660}/DK_{730} , %)	Показатели продуктивности томата			
	Энергия плодообразования, %	Средняя масса плода, г	Кол-во плодов с растения, шт	Средняя продуктивность, г
0/100	80	19,7±2,0 ^{ab}	11,9±0,8 ^{abc}	234±23
30/70	67	18,7±1,7 ^{cd}	9,9±1,4 ^{bdf}	185±15
70/30	58	26,6±2,2 ^{bd}	7,2±0,9 ^{cef}	192±10
100/0	56	24,8±1,9 ^{ac}	5,1±0,7 ^{ade}	127±17

Примечание. – В таблице приведены средние значения и стандартные отклонения. Одинаковыми буквенными индексами отмечены статистически значимые различия по показателям между режимами облучения ($p < 0,05$).

нии с режимом $K/DK = 100/0$. Это может быть связано с сортовыми особенностями детерминантного томата Минибел.

Проводили органолептическую и дегустационную оценки продукции. На режимах с увеличенной долей DK света образовались кисло-сладкие плоды с ярко-выраженным вкусом. Наоборот, увеличение доли K света способствовало образованию более кислых и сочных плодов с менее выраженным вкусом.

Как известно красный спектр ответственен за синтез углеводов. В исследованиях многих авторов показано, что освещение с преобладающим красным светом лучше стимулирует синтез сахарозы, т.е. углевода [26,27]. Вероятно, в нашем эксперименте различие во вкусовых характеристиках плодов обусловлено разными синтетическими процессами растительной клетки, приводящими к накоплению сахаров (в случае преобладания K) и органических кислот (в случае преобладания DK в спектре облучения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали, что низкое соотношение K/DK света в потоке излучения (режимы 30/70 и 0/100) приводит к значительному вытягиванию стеблей томата. В данном случае наблюдали проявление реакции синдрома избегания затенения у растений. Облучение же высоким соотношением K/DK (режимы 70/30 и 100/0) способствует образованию компактного габитуса растений, что особенно ценно для условий интенсивного культивирования томата (на сити-фермах).

При увеличении доли DK в спектре до 70% (режим $K/DK=30/70$) скорость роста рассады томата увеличивается в 2-3 раза, сырая биомасса и выход сухого вещества с одного растения увеличивается на 40 % и более, в сравнении с пониженным содержанием DK в спектральной составляющей (режимы $K/DK=70/30$ и 100/0).

Наиболее эффективную работу фотосинтетиче-

ского аппарата растений наблюдали при облучении светом с пониженной долей DK в спектре (режимы $K/DK= 70/30$ и 100/0). Показатель УППЛ значительно возрастал в данных вариантах освещения, что демонстрирует хорошую адаптацию растения, направленную на формирование структуры листового аппарата. Более высокое содержание хлорофилла в листовых пластинках под воздействием режимов $K/DK= 70/30$ и 100/0 обеспечивает лучшие условия для повышенного поглощения света листьями. Тем не менее, данные анализы проводили на уровне листа, а в пределах целого растения интегральные эффекты могут отличаться.

Пониженное соотношение K/DK (режим 0/100) способствовало значительному увеличению энергии плодообразования томата и продуктивности. Наилучшую адаптацию детерминантного томата к условиям облучения и наиболее эффективное использование световой энергии наблюдали на режимах с соотношением $K/DK = 0/100$ и 30/70 при наличии в спектре синего и коротковолнового красного света.

Выявленные закономерности действия спектров освещения на метаболизм и продукционный процесс детерминантного томата могут быть использованы для получения высококачественной томатной продукции в условиях сити-фермерства и фабриках растений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2022-317 от 20 апреля 2022 г. о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bian Z. Uncovering LED light effects on plant growth: New angles and perspectives-LED light for improving plant growth, nutrition and energy-use efficiency / Z. Bian, N. Jiang, S. Grundy, C. Lu // Acta Hort. – 2017. – V. 1227. – P. 491–498.
2. Аверчева О.В. Физиологические эффекты узкополосного красно-синего освещения рас-

тений (на примере китайской капусты *Brassica chinensis* L.): специальность 03.01.05 «Физиология и биохимия растений»: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата биологических наук / Аверчева Ольга Владимировна; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. – Москва, 2010. – 25 с

3. Шепелова О.В. Использование узкополосного спектра фотосинтетически активной радиации при выгонке тюльпанов и их защите от болезней / О.В. Шепелова, В.В. Кондратьева, И.Н. Калембет, Т.В. Воронкова, М.В. Семенова, О.О. Белошапкина, Л.Г. Серая // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – № 9 (32). – С. 70–73.

4. Яковцева М.Н. Технология выращивания растений земляники садовой *Fragaria ananassa* Duch. на основе использования узкополосного спектра фотосинтетически активной радиации / М.Н. Яковцева, И.Г. Тараканов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 2. – С. 177–180.

5. Loconsole D. Optimization of LED Lighting and Quality Evaluation of Romaine Lettuce Grown in an Indoor Cultivation System / D. Loconsole, G. Cocetta, P. Santoro, A. Ferrante // Sustainability. – 2019. – V. 11(3). – P. 841.

6. Tarakanov I. Light-emitting diodes: On the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production / I. Tarakanov, O. Yakovleva, I. Konovalova, G. Paliutina, A. Anisimov // Acta Hort. – 2012. – V. 956. – P. 171–178.

7. Tarakanov I.G. Effects of Light Spectral Quality on Photosynthetic Activity, Biomass Production, and Carbon Isotope Fractionation in Lettuce, *Lactuca sativa* L., Plants. / I.G. Tarakanov, D.A. Tovstyko, M.P. Lomakin, A.S. Shmakov, N.N. Sleptsov, A.N. Shmarev, V.A. Litvinskiy, A.A. Ivlev // Plants. – 2022. – V. 11(3). – P. 441.

8. Chen X.L. Growth and nutritional properties of lettuce affected by different alternating intervals of red and blue LED irradiation / X.L. Chen, Q.C. Yang, W.P. Song, L.C. Wang, W.Z. Guo, X.Z. Xue // Sci. Hort. – 2017. – V. 223. – P. 44–52.

9. Мартиросян Л.Ю. О влиянии различных источников света на фотосинтетические параметры продукционного процесса у *CUCUMIS SATIVUS* L. (гибрид Тристан F1) в условиях aeropонного фитотрона / Л.Ю. Мартиросян, А.А. Кособрюхов, В.В. Мартиросян, Ю.Ц. Мартиросян // Сельскохозяйственная биология. – 2021. – Т. 56. – № 5. – С. 934–947

10. Nanya K. Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings /

K. Nanya, Y. Ishigami, S. Hikosaka, E. Goto // Acta Hort. – 2012. – V. 956. – P. 261–266.

11. Emerson R. Some factors influencing the long-wave limit of photosynthesis/ R. Emerson, R. Chalmers, C. Cederstrand, // Proc. Natl. Acad. Sci. U S A. – 1957. – V. 43. – P. 133–143.

12. Paucek I. Supplementary LED Interlighting Improves Yield and Precocity of Greenhouse Tomatoes in the Mediterranean/ I. Paucek, G. Pennisi, A. Pistillo, E. Appolloni, A. Crepaldi, B. Calegari, F. Spinelli, A. Cellini, X. Gabarrell, F. Orsini, G. Gianquinto // Agronomy. – 2020. – V. 10. – P. 1002

13. Park Y. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation / Y. Park, E.S. Runkle // Environmental and Experimental Botany. – 2017. – V. 136. – P. 41–49.

14. De Keyser, E. LED light quality intensifies leaf pigmentation in ornamental pot plants / E. De Keyser, E. Dhooghe, A. Christiaens, M.-C. Van Labeke, J. Van Huylenbroeck // Sci. Hort. – 2019. – V. 253. – P. 270–275.

15. Jin W. Adding far-red to red-blue light-emitting diode light promotes yield of lettuce at different planting densities / W. Jin, J.L. Urbina, E. Heuvelink, L.F.M. Marcelis // Front. Plant Sci. – 2021. – V. 11. – P. 1–9.

16. Ракутько Е.Н. Выращивание рассады томата под излучением светодиодов с различным соотношением красного и дальнекрасного потоков / Е.Н. Ракутько, С.А. Ракутько // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2016. – № 8 (ч. 2). – С.281–287.

17. Ракутько С.А. Влияние соотношения красного и дальнекрасного излучения на рост и развитие рассады томата (*Solanum lycopersicum*) / С.А. Ракутько, Е.Н. Ракутько, А.Н. Васькин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 8 (ч. 2) – С. 136–140

18. Tarakanov I.G. Effects of Light Spectral Quality on the Micropropagated Raspberry Plants during Ex Vitro Adaptation / I.G. Tarakanov, A.A. Kosobryukhov, D.A. Tovstyko, A.A. Anisimov, A.A. Shulgina, N.N. Sleptsov, E.A. Kalashnikova, A.V. Vassilev, R.N. Kirakosyan // Plants. – 2021. – V. 10. – P. 2071.

19. Щёголев А.С. Влияние красного света на содержание углеводов в листьях томатов / А.С. Щёголев, В.В. Жмурко // «Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. Серія: біологія». – 2008. – Вып 7. – №814. – С.205–210.

20. Савина О. В. Использование красного света для активации прорастания семян томата с истекшим сроком годности / О. В. Савина, Л. Ф. Ильичев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2021. – Т. 13, № 4. – С. 104-111.
21. Solhaug K.A. Influence of photoperiod and temperature on dry matter production and chlorophyll content in temperate grasses // Norwegian Journal of Agricultural Sciences. – 1991. – V. 5. – P. 365-383.
22. Мокроносов А.Т. Онтогенетический аспект фотосинтеза. – Москва: Наука, 1981. – 193 с.
23. Wellburn A. R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution // Plant Physiology. – 1994. – V. 144(3). – P. 307–313.
24. Naboudane D. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture/ D. Naboudane, R. John, J.R. Miller, N. Tremblay, P.J. Zarco Tejada, L. Dextraze // Remote Sensing of Environment. – 2002. – V. 81(2). – P. 416-426.
25. Гэлстон А.Ю., Девис П., Сэттер Р. Жизнь зеленого растения: Пер.с англ. –Москва: Мир, 1983. – 549 с.
26. Ajdanian L. Investigation of photosynthetic effects, carbohydrate and starch content in cress (*Lepidium sativum*) under the influence of blue and red spectrum / L. Ajdanian, M. Babaei, H. Aroiee // Heliyon. – 2020. – V. 6 (12). – P. 2-8
27. Мартиросян Л. Ю. Влияние спектрального состава света на морфофизиологические параметры и активность фотосинтетического аппарата растений кок-сагыза / Л. Ю. Мартиросян, В. М. Гольдберг, Ю. Ц. Мартиросян, А. А. Кособрюхов // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. – 2018. – № 13. – С. 297-300.

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им.К.А.Тимирязева

* Товстыко Дарья Андреевна, аспирант кафедры физиологии растений
E-mail: tov.dasha@mail.ru

Голубев Алексей Алексеевич, аспирант кафедры управления качеством и товароведение продукции
E-mail: alex.golubev@rgau-msha.ru

Яковлева Ольга Сергеевна, к.б.н., доцент кафедры физиологии растений
E-mail: o_s_yakovleva@rgau-msha.ru

Тараканов Иван Германович, д.б.н., профессор, заведующий кафедрой физиологии растений
E-mail: plantphys@rgau-msha.ru

RSAU-MTAA

*Tovstyko Daria A., postgraduate student of Plant Physiology Department
E-mail: tov.dasha@mail.ru

Golubev Alexey A., postgraduate student of quality management and product merchandising Department
E-mail: alex.golubev@rgau-msha.ru

Yakovleva Olga S., PhD., associate professor of Plant Physiology Department
E-mail: o_s_yakovleva@rgau-msha.ru

Tarakanov Ivan G., PhD., DSci., Full Professor, head of the Plant Physiology Department
E-mail: plantphys@rgau-msha.ru

EFFECTS OF LIGHT SPECTRAL QUALITY ON MORPHOGENESIS AND PRODUCTION PROCESS OF TOMATO PLANTS

D. A. Tovstyko, A. A. Golubev, O. S. Yakovleva, I. G. Tarakanov

Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Abstract. Tomato is an important agricultural crop, which is of particular interest for intensive plant cultivation systems (IPCS). The use of such systems allows the control of the growth and development of crops, the production process, the quantity and quality of the crop. The use of light-emitting diodes in IPCS (in greenhouses, on city farms) opens up new opportunities for precise regulation of the intensity and light spectral composition, along with a significant reduction in energy consumption.

The aim of the work was to study the physiological reactions and the production process of tomatoes grown under different light conditions.

Plants of the determinant precocious tomato of the Minibel variety were grown on a peat substrate in vegetative vessels. In experiments, the optical radiation effect on plants with various combinations of red ($\lambda_{\max} = 660$ nm) and far red ($\lambda_{\max} = 730$ nm) light in the radiation spectrum with the same background irradiation with blue ($\lambda_{\max} = 460$ nm) and short-wave red ($\lambda_{\max} = 640$ nm) light was studied.

The specificity in the formation of vegetative biomass and plant productivity depending on the lighting option was revealed. It was noted that the highest plants were obtained with an increased proportion of far red (FR = 70 and 100%) and reduced red light (R = 0 and 30%) in the spectrum. In the conditions of the R/FR = 30/70 regime the increase of the growth rate in 2-3 times of tomato seedlings, raw biomass and the yield of dry matter from one plant by 40% or more was observed, in comparison with the R/FR = 70/30 and 100/0 regimes. The increase in red light to 70% (R/FR mode = 70/30) delayed the transition of tomato into the generative phases of development for 7-10 days. High R/FR ratio inhibited the growth and accumulation of vegetative mass. The reduced R/FR ratio (0/100 mode) led to a significant increase in the energy of tomato fruit formation and productivity. The best adaptation of the determinant tomato to irradiation conditions and the most efficient use of light energy were observed in modes with a ratio of R/FR = 0/100 and 30/70.

Keywords: light culture, light spectral composition, LEDs, photomorphogenesis, far red light, tomato.

REFERENCES

1. Bian Z. Uncovering LED light effects on plant growth: New angles and perspectives-LED light for improving plant growth, nutrition and energy-use efficiency / Z. Bian, N. Jiang, S. Grundy, C. Lu // *Acta Hort.* – 2017. – V. 1227. – P. 491–498.
2. Avercheva O.V. Fiziologicheskie efekty uzkopolosnogo krasno-sinego osveshcheniya rastenii (na primere kitaiskoi kapusty Brassica chinensis L.): spetsial'nost' 03.01.05 «Fiziologiya i biokhimiya rastenii»: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata biologicheskikh nauk / Avercheva Ol'ga Vladimirovna; Moskovskii gosudarstvennyi universitet im. M. V. Lomonosova. – Moskva, 2010. – 25s.
3. Shepelova O.V. Ispol'zovanie uzkopolosnogo spektra fotosinteticheski aktivnoi radiatsii pri vygonke tyul'panov i ikh zashchite ot boleznei / O.V. Shepelova, V.V. Kondrat'eva, I.N. Kalemбет, T.V. Voronkova, M.V. Semenova, O.O. Beloshapkina, L.G. Seraya // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK.* – 2018. – № 9 (32). – S. 70–73.
4. Yakovtseva M.N. Tekhnologiya vyrashchivaniya rastenii zemlyaniki sadovoi Fragaria ananassa Duch. na osnove ispol'zovaniya uzkopolosnogo spektra fotosinteticheski aktivnoi radiatsii / M.N. Yakovtseva, I.G. Tarakanov // *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal.* – 2014. – № 2. – S. 177–180.
5. Loconsole D. Optimization of LED Lighting and Quality Evaluation of Romaine Lettuce Grown in an Indoor Cultivation System / D. Loconsole, G. Cocetta, P. Santoro, A. Ferrante // *Sustainability.* – 2019. – V. 11(3). – P. 841.
6. Tarakanov I. Light-emitting diodes: On the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production / I. Tarakanov, O. Yakovleva, I. Konovalova, G. Paliutina, A. Anisimov // *Acta Hort.* – 2012. – V. 956. – P. 171–178.
7. Tarakanov I.G. Effects of Light Spectral Quality on Photosynthetic Activity, Biomass Production, and Carbon Isotope Fractionation in Lettuce, *Lactuca sativa* L., Plants. / I.G. Tarakanov, D.A. Tovstyko, M.P. Lomakin, A.S. Shmakov, N.N. Sleptsov, A.N. Shmarev, V.A. Litvinskiy, A.A. Ivlev // *Plants.* – 2022. – V. 11(3). – P. 441.
8. Chen X.L. Growth and nutritional properties of lettuce affected by different alternating intervals of red and blue LED irradiation / X.L. Chen, Q.C. Yang, W.P. Song, L.C. Wang, W.Z. Guo, X.Z. Xue // *Sci. Hort.* – 2017. – V. 223. – P. 44–52.
9. Martirosyan L.Yu. O vliyaniy razlichnykh istochnikov sveta na fotosinteticheskie parametry produktsionnogo protsessa u CUCUMIS SATIVUS L. (gibrid Tristan F1) v usloviyakh aeroponnogo fitotrona / L.Yu. Martirosyan, A.A. Kosobryukhov, V.V. Martirosyan, Yu.Ts. Martirosyan // *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya.* – 2021. – T. 56. – № 5. – S. 934-947.
10. Nanya K. Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings / K. Nanya, Y. Ishigami, S. Hikosaka, E. Goto // *Acta Hort.* – 2012. – V. 956. – P. 261-266.
11. Emerson R. Some factors influencing the long-wave limit of photosynthesis/ R. Emerson, R. Chalmers, C. Cederstrand, // *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* – 1957. – V. 43. – P. 133–143.

12. Paucek I. Supplementary LED Interlighting Improves Yield and Precocity of Greenhouse Tomatoes in the Mediterranean/ I. Paucek, G. Pennisi, A. Pistillo, E. Appolloni, A. Crepaldi, B. Calegari, F. Spinelli, A. Cellini, X. Gabarrell, F. Orsini, G. Gianquinto // *Agronomy*. – 2020. – V. 10. – P. 1002
13. Park Y. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation / Y. Park, E.S. Runkle // *Environmental and Experimental Botany*. – 2017. – V. 136. – P. 41–49.
14. De Keyser, E. LED light quality intensifies leaf pigmentation in ornamental pot plants / E. De Keyser, E. Dhooche, A. Christiaens, M.-C. Van Labeke, J. Van Huylenbroeck // *Sci. Hortic*. – 2019. – V. 253. – P. 270–275.
15. Jin W. Adding far-red to red-blue light-emitting diode light promotes yield of lettuce at different planting densities / W. Jin, J.L. Urbina, E. Heuvelink, L.F.M. Marcelis // *Front. Plant Sci*. – 2021. – V. 11. – P. 1-9.
16. Rakut'ko E.N. Vyrashchivanie rassady tomata pod izlucheniem svetodiodov s razlichnym sootnosheniem krasnogo i dal'nekrasnogo potokov / E.N. Rakut'ko, S.A. Rakut'ko // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2016. – № 8 (ch. 2). – S.281-287.
17. Rakut'ko S.A. Vliyaniye sootnosheniya krasnogo i dal'nekrasnogo izlucheniya na rost i razvitie rassady tomata (*Solanum lycopersicum*) / S.A. Rakut'ko, E.N. Rakut'ko, A.N. Vas'kin // *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. – 2016. – № 8 (ch. 2) – S. 136-140.
18. Tarakanov I.G. Effects of Light Spectral Quality on the Micropropagated Raspberry Plants during Ex Vitro Adaptation / I.G. Tarakanov, A.A. Kosobryukhov, D.A. Tovstyko, A.A. Anisimov, A.A. Shulgina, N.N. Sleptsov, E.A. Kalashnikova, A.V. Vassilev, R.N. Kirakosyan // *Plants*. – 2021. – V. 10. – P. 2071.
19. Shchegolev A.S. Vliyanie krasnogo sveta na sodержanie uglevodov v list'yakh tomatov / A.S. Shchegolev, V.V. Zhmurko // «*Visnik Kharkivskogo natsional'nogo universitetu imeni V.N.Karazina. Seriya: biologiya*». – 2008. – Vyp 7. – №814. – S.205-210.
20. Savina O. V. Ispol'zovanie krasnogo sveta dlya aktivatsii prorstaniya semyan tomata s istekshim srokom godnosti / O. V. Savina, L. F. Il'ichev // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. – 2021. – T. 13, № 4. – S. 104-111.
21. Solhaug K.A. Influence of photoperiod and temperature on dry matter production and chlorophyll content in temperate grasses // *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*. – 1991. – V. 5. – P. 365-383.
22. Mokronosov A.T. Ontogeneticheskii aspekt fotosinteza. – Moskva: Nauka, 1981. – 193 s.
23. Wellburn A. R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution // *Plant Physiology*. – 1994. – V. 144(3). – P. 307–313.
24. Haboudane D. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture/ D. Haboudane, R. John, J.R. Miller, N. Tremblay, P.J. Zarco Tejada, L. Dextraze // *Remote Sensing of Environment*. – 2002. – V. 81(2). – P. 416-426.
25. Gelston A.Yu., Devis P., Setter R. Zhizn' zelenogo rasteniya: Per.s angl. – Moskva: Mir, 1983. – 549 s.
26. Ajdanian L. Investigation of photosynthetic effects, carbohydrate and starch content in cress (*Lepidium sativum*) under the influence of blue and red spectrum / L. Ajdanian, M. Babaei, H. Aroiee // *Heliyon*. – 2020. – V. 6 (12). – P. 2-8
27. Martirosyan L. Yu. Vliyanie spektral'nogo sostava sveta na morfofiziologicheskie parametry i aktivnost' fotosinteticheskogo apparata rastenii kok-sagyza / L. Yu. Martirosyan, V. M. Gol'dberg, Yu. Ts. Martirosyan, A. A. Kosobryukhov // *Novye i netraditsionnye rasteniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya*. – 2018. – № 13. – S. 297-300.