

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ КРАСНОГО И ДАЛЬНЕКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАССАДЫ ТОМАТА (*SOLANUM LYCOPERSICUM*)

¹Ракутько С.А., ¹Ракутько Е.Н., ²Васькин А.Н.

¹ФГБНУ «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства» (ИАЭП), Санкт-Петербург, e-mail: sergej1964@yandex.ru;

²ФГБОУ «Брянский государственный аграрный университет», Брянск

Представлены результаты исследований роста и развития растений томата (*Solanum Lycopersicum*) сорта Пиноккио. Исследования проводили в лабораторном помещении без естественного освещения. Растения выращивали под светодиодными облучателями Ледел и Агро при облученности 140 мкмоль м⁻²с⁻¹. Установлена зависимость интенсивности роста растений от соотношения потоков в красном (R) и дальнекрасном (FR) диапазоне спектра излучения. В течение 48 суток прирост высоты растения за сутки под облучателями Агро почти в три раза превышал прирост под облучателями Ледел (9,6 мм против 3,6 мм). По сравнению с растениями под облучателем Ледел, растения под Агро имели меньшую долю массы листьев (на 10,2%) и корня (на 1,8%), но, соответственно, большую (на 12%) массу стебля. Проведенные эксперименты показали, что при уменьшении соотношения R:FR с 15 до 2 скорость роста рассады томата увеличивается в 2,4 раза, сырая масса растения увеличивается на 23%.

Ключевые слова: светокультура, спектр, светодиоды, рассада, томат, рост, фотоморфогенез

THE IMPACT OF RED AND FAR RED RATIO ON GROWTH AND DEVELOPMENT OF TOMATO (*SOLANUM LYCOPERSICUM*) TRANSPLANTS

¹Rakutko S.A., ¹Rakutko E.N., ²Vaskin A.N.

¹Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP),

St. Petersburg, e-mail: sergej1964@yandex.ru;

²Bryansk State Agrarian University, Bryansk

The experimental data on growth and photomorphogenesis of tomato transplants (*Solanum Lycopersicum* var. Pinocchio) are presented. Investigations were carried out in a laboratory room without natural light. Plants were grown under LED emitters Ledel and Agro with irradiance 140 μmol m⁻² s⁻¹. The dependence of the growth rate from the red (R) and far red (FR) ratio is stated. Within 48 days the day's increment of height under Agro was almost three times the increment under Ledel (9.6 mm vs. 3.6 mm). In comparison with the Ledel, plants under Agro had less leaves (10.2%) and root (1.8%), but, correspondingly, a large (12%) of the stem weight fraction. Experiments have shown that decreasing the ratio R: FR from 2 to 15 the growth rate of the tomato transplants is increased by 2.4 times, the plant wet weight is increased by 23%.

Keywords: indoor plant lighting, light quality, LEDs, transplant, tomato, growth, photomorphogenesis

Энергия потока оптического излучения (ОИ) в области фотосинтетически активной радиации (photosynthetically active radiation, PAR) с длиной волны от 400 до 700 нм оказывает большое влияние на рост, развитие и физиологию растений. В этой области принято выделять следующие диапазоны: синий (B – blue) 400-500 нм, зеленый (G – green) 500-600 нм, красный (R – red) 600-700 нм. Важно также наличие излучения в дальнекрасном диапазоне (FR – far red) 700-800 нм. Свет является важнейшим фактором, влияющим на рост растений и производство биомассы. Естественным источником излучения служит солнце. Фотоны более коротких длин волн имеют значительную энергию и могли бы оказать повреждающее действие на биологические объекты (растения), однако они задерживаются озоновым слоем стратосферы. Фотоны более длинноволнового излучения не имеют до-

статочной энергии, чтобы инициировать реакции фотосинтеза.

В настоящее время на первый план при производстве продукции растениеводства выходят вопросы экологии. Для управления ростом растений применяются химические вещества различной природы (удобрения, ретарданты и т.д.). Альтернативой является использование оптического излучения определенного спектрального состава от искусственных источников света (ИС).

В лаборатории энергоэффективных электротехнологий ИАЭП (Санкт-Петербург) на стыке физиологии растений, физики (светотехники) и экологии разработаны основы нового комплексного научного направления – энергоэкологии светокультуры [1]. На основе полученных теоретических представлений предложены практические приемы проектирования и оценки эффективности отдельных энергосберегающих

мероприятий [2, 3], обоснованы энергоэкологичные режимы работы облучательных установок и алгоритмы управления их энергоэффективностью и экологичностью [4, 5]. В качестве энергоэкологичности светокультуры предложена количественная оценка взаимосвязи потока энергии ОИ и потоков продуктов фотосинтеза, образуемых в растениях.

Применение дополнительных ИС, излучающих в области PAR, способствует интенсификации процесса роста рассады и получению более ранних урожаев от взрослых растений. Использование для этих целей светодиодов (СД) допускает возможность управления спектром излучения, воздействующего на растения.

Фитохром (важнейший фоторецептор, с помощью которого растения воспринимают спектральный состав излучения), отвечает за физиологические реакции от излучения R и FR диапазонов. Молекула фитохрома существует в двух состояниях P_{FR} и P_R , переключаемых излучением. Излучение с высоким уровнем энергии в FR увеличивает долю молекул фитохрома в состоянии P_R , в то время как высокий уровень энергии в R увеличивает долю формы P_{FR} . Таким образом, спектральный состав света определяет равновесие этих форм, от которого непосредственно зависит морфология растения [8].

Влиянию R и FR излучения на растения посвящено множество исследований. Установлено, что различные виды и сорта растений требуют различного спектрального состава излучения. Для нормального фотоморфогенеза различных растений имеет важное значение соотношение B, R и FR диапазонов. Красный свет способствует удлинению гипокотыля и увеличению площади листьев. Уменьшение отношения R:FR увеличивает вытягивание стебля [9]. Синий свет препятствует увеличению площади листа у рассады томата [10]. Степень соответствия спектрального состава излучения заданным значениям определяет энергоэффективность светокультуры в целом [6]. Исследованиями выявлено, что эффективность применяемых ИС зависит от энергоемкости фотосинтеза [7]. Известно, что недостаточная интенсивность света или его неудовлетворительный спектральный состав ухудшает рост и развитие рассады томата, особенно в период развития первого соцветия, что снижает качество рассады.

Цель работы – исследование особенностей в росте и развитии рассады томата под СД излучением с различным соотношением R и FR излучения.

Материалы и методы исследования

Для экспериментов был взят томат среднераннего детерминантного сорта Пиноккио, образующий компактный, низкорослый куст высотой 20–35 см. Плоды томата данного сорта плоскоокруглые, красные, массой 20–30 г, имеют отличные товарные и вкусовые качества. Томат относится к светолюбивым растениям, при недостатке света цветочная кисть не закладывается. Томат весьма требователен к теплу, которое является одним из главных факторов и в значительной степени определяет темпы роста, созревания и урожайность томата. Несколько меньшее значение имеет влажность почвы. Большое влияние на развитие томата оказывает влажность воздуха, которая не должна превышать 50–60% (в первые 10–12 недель она должна быть в пределах 60–65%).

Исследования проводили в лабораторном помещении без естественного освещения площадью 18 м² с температурой воздуха +22–+24 °С, которую поддерживали с помощью совместного действия системы отопления и системы вентилирования помещения уличным воздухом. Влажность воздуха внутри помещения составляла 55–60%, подвижность 0,05–0,25 м/с. Влажность субстрата в контейнерах поддерживали дозированным поливом водой с температурой 20–25 °С два раза в неделю, обильно смачивая торф и избегая попадания воды на листья. В качестве субстрата использовали верховой торф, нейтрализованный мелом до pH 6,0. Подкормку рассады проводили 0,1–0,15% растворами удобрений KH_2PO_4 , $MgSO_4$ и KNO_3 .

Фенологические учеты и наблюдения за ростом и развитием растений проводили через каждые 3–4 дня. Фиксировали высоту растений, количество листьев, диаметр шейки ствола. Содержание сухого вещества в конце выращивания определяли высушиванием образцов в сушильном шкафу при 105 °С. Содержание хлорофилла (в относительных единицах) в листьях растений в процессе их выращивания оценивали по индексу CCI (chlorophyll content index) с помощью прибора ССМ 200. Измерения проводили на одном и том же листочке третьего листа каждого растения томата.

Сравнительный эксперимент проводили в двух зонах помещения, разделенных светонепроницаемой ширмой. Рассаду томата на рабочих столах под облучателями располагали на площади, неравномерность облучения по которой составляла не более 20%. Первоначально было размещено по 16 контейнеров с растениями. В процессе эксперимента в каждой зоне поддерживали одинаковый уровень фотонной облученности PAR+FR (140 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) изменением высоты подвеса облучателей над верхушками растений.

В первой зоне использовали облучатель «Оптолюкс-Спэйс-Агро» фирмы «ЛЕД-Энергосервис» (далее – Агро) мощностью 140 Вт, размещенный на высоте 1,13 м. Во второй зоне использовали пять облучателей L-fito фирмы «Ледел» (далее – Ледел) мощностью 60 Вт, прикрепленных к раме с шагом 0,3 м, размещенной на высоте 0,6 м.

Спектральную плотность фотонной облученности PAR (photosynthetic photon flux density, PPF) измеряли прибором ТКА ВД/04. Спектры излучения имеют характерный для СД вид с двумя пиками, в синей и красной областях. Излучение в зеленом диапазоне практически отсутствует у обоих облучателей. Состав потока излучения характеризовали процентным соотношением количества фотонов в отдельных спектральных поддиапазонах (табл. 1).

При не значительно отличающихся соотношениях R:В (2,8:1 у Ледел и 3.1:1 у Агро), за счет широко-го красного пика облучатель Агро имеет существенно большую долю (26,6% против 4,4% у Ледел) потока в FR области, что обеспечивает малое соотношение R:FR = 2:1 (против 15:1 у Ледел). По зрительному ощущению уровень освещенности растений под обоими облучателями примерно одинаков (3,2 и 3,4 кЛк). Практически одинаковы также фотонная и энергетическая облученность во всем диапазоне излучения PAR+FR. Однако при этом энергетическая и фотонная облученности, рассчитанные по области PAR, у облучателей Агро существенно меньше (соответственно 20,9 против 27,8 Втм⁻² и 103 против 135 мкмоль·м⁻²·с⁻¹).

Для проведения эксперимента семена томата были посеяны в торфогрунт 15.03.2016 г. На свет под натриевую лампу сеянцы были выставлены 18.03.2016 г., после появления 60% всходов и 30.03.2016 г. распикированы в контейнеры объемом 633 см³. Далее растения были выставлены под облучение с фотопериодом 15 ч. (с 6.00 до 21.00). Массовое появление третьего листа наблюдалось

05.04.2016 г. Регулярные наблюдения над рассадой начали 11.04.2016 г., в возрасте 25 дней. Растения были разделены на две группы по 16 растений в каждой группе, которые были выставлены под облучатели Агро и Ледел на 8 суток (с 11.04 по 18.04). Затем каждая группа растений (в возрасте 33 суток) была поделена на две части: первую часть продолжили облучать под тем же облучателем, а вторую – переставили под другой облучатель. Облучение производили еще 15 суток (с 19.04 по 4.05) Таким образом, получили четыре группы растений в возрасте 48 суток, облучаемые по различным схемам.

Результаты исследования и их обсуждение

С самого начала облучения выявилась разница в размерах и качестве рассады томатов под различными источниками. Растения под Агро были более высокими за счет увеличенных междоузлий. Растения под Ледел существенно отставали в росте (рис. 1).

Таблица 1

Параметры радиационной среды растений

Показатель	Ледел	Агро
Освещенность, кЛк	3,4	3,2
Облученность PAR, Втм ⁻²	27,8	20,9
Облученность PAR+FR, Втм ⁻²	28,7	27,0
Фотонная облученность PAR, мкмоль·м ⁻² ·с ⁻¹	135	103
Спектральный состав потока (B; G; R; FR), %	22,7; 8,1; 64,9; 4,3	16,4; 6,5; 50,5; 26,6
Соотношения потоков R:FR; R:B, отн.ед.	15; 2,8	2; 3,1

Таблица 2

Аппроксимационные выражения

Группа	Высота растения Н, мм	Содержание хлорофилла СС1, отн.ед.
Агро	$H = 9,6T - 182,5; (R^2 = 0,997)$	$CCI = -0,46T + 35,97; (R^2 = 0,930)$
Ледел	$H = 3,6T - 55,5; (R^2 = 0,980)$	$CCI = 0,11T + 41,73; (R^2 = 0,033)$
Агро-Ледел	$H = 3,4T + 8,7; (R^2 0,965)$	$CCI = 0,14T + 17,72; (R^2 = 0,044)$
Ледел-Агро	$H = 8,5T - 208,7; (R^2 = 0,999)$	$CCI = -1,08T + 74,69; (R^2 = 0,973)$

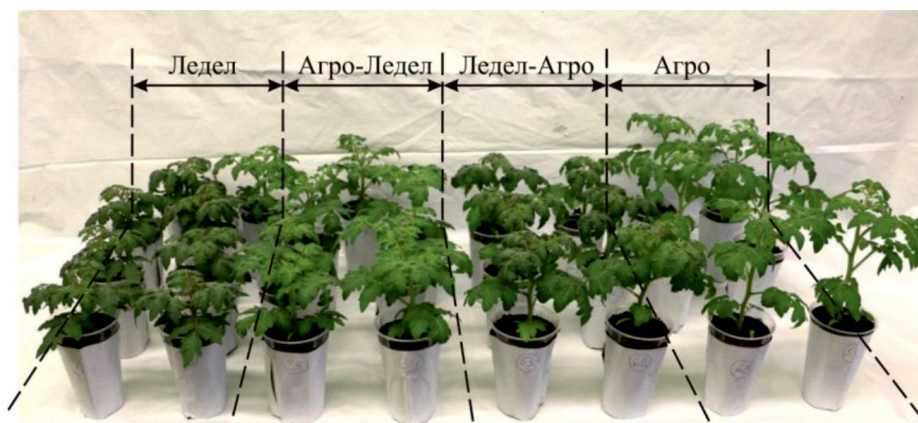


Рис. 1. Внешний вид растений различных групп в возрасте 39 сут.

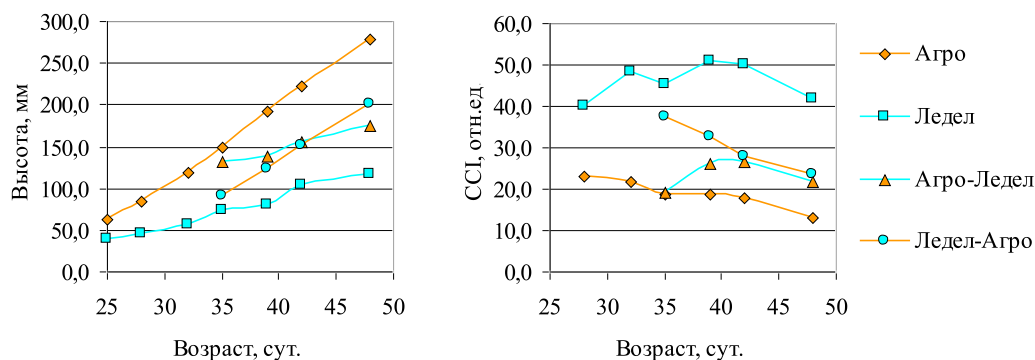


Рис. 2. Динамика роста растений (слева) и динамика содержания хлорофилла (справа)

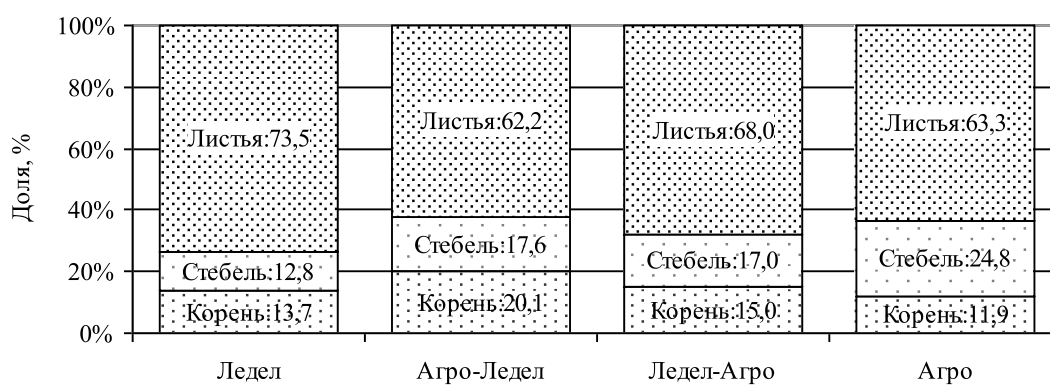


Рис. 3. Пропорции сырой массы между частями растения различных групп

На рис. 2 показана динамика роста растений и динамика содержания хлорофилла для растений различных групп.

Зависимости высоты растения H , мм и содержания хлорофилла CCI , отн.ед. от возраста растения T , сут. аппроксимированы линейными выражениями, коэффициенты которых приведены в табл. 2. Численное значение коэффициента при переменной T представляет собой суточный прирост изменения соответствующего показателя.

В диапазоне времени до 48 суток прирост высоты растения за сутки под облучателями Агро почти в три раза превышал прирост под облучателями Ледел (9,6 мм против 3,6 мм). Переставленные с одного облучателя под другой растения демонстрируют практически такой же суточный прирост, как и растения, изначально выращиваемые под этим облучателем.

Листья томата под Ледел были насыщенного зеленого цвета, что объясняется повышенным содержанием хлорофилла. На 48-е сутки значения CCI у растений под Ледел было почти в два раза больше, чем

у растений под Агро. Для переставленных растений по содержанию хлорофилла наблюдалась та же тенденция, что и для высоты растения: содержание хлорофилла в их листьях обнаруживало ту же динамику изменения, что и у растений, изначально выращиваемых под данным облучателем.

Для растений в возрасте 48 дня были определены пропорции сырой массы между частями растения (рис. 3).

По сравнению с растениями под облучателем Ледел, растения под Агро имели меньшую долю массы листьев (на 10,2%) и корня (на 1,8%), но, соответственно, большую (на 12%) массу стебля.

Переставленные с Агро под Ледел растения снизили долю массы листьев (на 1,1%) и стебля (на 7,2%), но увеличили долю массы корня (на 8,3%).

Переставленные с Ледел под Агро растения снизили долю массы листьев (на 5,5%), но увеличили долю массы стебля (на 4,2%) и корня (на 1,3%).

Биометрические показатели растений томата представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики 48-дневных растений томата

	Ледел	Агро-Ледел	Ледел-Агро	Агро
Высота растения, см	117,5 ± 4,23	174,2 ± 4,0	200,6 ± 3,2	278,0 ± 7,5
Кол-во листьев, шт.	9,3 ± 0,2	9,7 ± 0,2	10,0 ± 0,1	10,2 ± 0,2
Кол-во кистей, шт	3,7 ± 0,2	4,0 ± 0,3	3,9 ± 0,1	3,4 ± 0,2
Кол-во цвета, шт	2,2 ± 0,2	2,3 ± 0,2	2,4 ± 0,2	2,4 ± 0,2
Диаметр стебля, мм	6,2 ± 0,2	6,2 ± 0,1	6,1 ± 0,1	6,0 ± 0,2
CCI, отн.ед.	41,7 ± 1,9	21,8 ± 1,8	23,7 ± 3,0	13,0 ± 0,5
Сырая масса*, г	19,1 ± 1,4	17,5 ± 1,3	23,9 ± 1,8	23,5 ± 2,1
Сухое вещество**, %	10,2 ± 0,3	10,2 ± 0,3	7,9 ± 0,2	7,8 ± 0,2

Примечания. * наземной части растений, ** среднее значение для всех листьев растения.

На 48-е сутки высота растений томата под Агро превышала высоту растений под Ледел в 2,4 раза при превышении сырой массы в 1,23 раза. Это означает, что различие в спектре применяемых СД облучателей в меньшей мере влияет на продуктивность фотосинтеза нежели на изменение пропорций растения, т.е. его вытягивание растения.

Заключение

В результате экспериментов выявлено, что низкое соотношение R:FR в потоке излучения (при использовании облучателя Агро) приводит к реакции синдрома избегания затенения в облучаемых растениях томата сорта Пиноккио, которая заключается в вытягивании гипокотыля. Найденные пропорции свидетельствуют, что опережающий рост биомассы под облучателями Агро происходит за счет стебля.

Использование облучателя Ледел с высоким соотношением R:FR вызывает физиологические реакции, приводящие к компактной кроне растений. Проведенные эксперименты показали, что при уменьшении соотношения R:FR с 15 до 2 высота растений томата увеличивается в 2,4 раза, сырая масса растения увеличивается на 23 %.

Список литературы

1. Ракутько С.А. Научные основы энергоэкологии светокультуры / Сб. статей межд. науч.-практ. конф. «Вавилонские чтения – 2015». – Саратов, Буква, 2015. – С. 228–229.
2. Ракутько С.А., Судаченко В.Н., Маркова А.Е. Оценка эффективности применения оптического излучения в светокультуре по величине энергоёмкости // Плодоводство и ягодоводство России. – 2012. – Т. 33. – С. 270–278.
3. Ракутько С.А. Энергосберегающая система управления энерготехнологическими процессами в АПК // В сб.: Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского. Сборник материалов III Межд. научно-практ. конф. Саратов, 2008. – С. 228–229.
4. Патент РФ 2115293. Способ эксплуатации газоразрядных ламп в теплице / Карпов В.Н., Ракутько С.А., Шарупич В.П., Немцев Г.Г. // № 92015195/13; заявл. 28.12.92; опубл. 20.07.98.
5. Патент РФ 2357342. Способ энергосбережения в энерготехнологических процессах / Карпов В.Н., Ракутько С.А. // № 2008115845(017799); заявл. 21.04.08., опубл. 25.05.2009.
6. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Метод оценки энергоэффективности фотосинтеза в светокультуре с позиций прикладной теории энергосбережения // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2015. – № 86. – С. 169–183.
7. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Сравнительная оценка эффективности источников излучения по энергоёмкости фотосинтеза // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – № 2 (12). – С. 50–54.
8. Holmes M.G. and H. Smith. 1977. The function of phytochrome in the natural environment—I. Characterization of daylight for studies in photomorphogenesis and photoperiodism. Photochem. Photobiol. 25:533–538.
9. Mortensen, L.M. and E. Stromme. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops. Scientia Hort. 33:27–36.
10. Nanya K., Ishigami Y., Hikosaka S., Goto E. Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings. Acta Horticulturae. – 2012. – v. 956. – P. 261–266.