

Исследование влияния излучения в различных диапазонах области ФАР на продуктивность и биохимический состав биомассы салатно-зеленных культур

Л.Б. ПРИКУПЕЦ¹, Г.В. БООС², В.Г. ТЕРЕХОВ¹, И.Г. ТАРАКАНОВ³

¹ ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва

² НИУ «МЭИ», Москва

³ РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва

E-mail: prikup@vnisi.ru

Аннотация

Представлены результаты первой фазы фотобиологических исследований, конечной целью которых является оптимизация спектра фитооблучателей со светодиодами и уровня облучения при выращивании салатно-зеленных растений в теплицах и фабриках растений в условиях светокультуры. Они приведены в виде серии световых кривых продуктивности для салата и базилика при облучении квазимонохроматическим излучением в трёх диапазонах области ФАР: синем, зелёном и красном. В эксперименте в широких пределах варьировались уровни фотосинтетической фотонной облучённости (70–230 мкмоль/(с·м²), что эквивалентно облучённости 13–60 Вт/м²). Приведены «грубые» спектры действия оптического излучения, оценённые по продуктивности растений при разных уровнях облучённости, рассмотрены вопросы аддитивности действия разноспектральных излучений в обеспечении формирования растительной биомассы. Выполнены оценки эффективности разных диапазонов области ФАР для синтеза биохимических соединений, определяющих пищевую ценность исследуемых культур.

Ключевые слова: фотобиологические исследования, световая кривая продуктивности, фотосинтез, светокультура, фитооблучатель со светодиодами, ФАР, спектр действия, фотосинтетический поток фотонов (ФПФ), плотность фотосинтетического потока фотонов (ПФПФ), облучённость, фотонная облучённость.

1. Введение

Возможность создания на основе светодиодов (СД) квазимонохро-

матических излучателей в основных диапазонах области фотосинтетически активной радиации (ФАР), определяющих формирование биомассы, морфогенез и метаболизм растений, стимулируют соответствующие фотобиологические исследования (ФБИ) во всём мире. Известная кривая *K.J. McCree* [1], описывающая спектр действия фотосинтеза, полученная *in vitro* с использованием достаточно сложной оптики на отдельных листьях растений при низких уровнях облучённости и являвшаяся почти полвека своеобразным «Евангелием для фотобиологов», подвергается сомнениям [2]. Благодаря СД у фотобиологов появляется новый эффективный исследовательский инструмент, позволяющий проводить ФБИ влияния излучения различных диапазонов области ФАР на продуктивность и качество биомассы растений в широком диапазоне облучённостей, представляющих интерес для практической светокультуры. Именно такую задачу ставили перед собой авторы настоящей работы, выбрав в качестве объекта исследований группу зеленных овощных культур (на примере салата сорта Ландау и базилика сорта Русский гигант, которые относятся к растениям, представляющим перспективный интерес для хозяйственного выращивания в промышленных теплицах).

2. Краткая характеристика указанных культур

Салат имеет множество разновидностей. Самый распространённый – листовая салат. Он обладает богатым витаминно-минеральным составом, в котором присутствуют витамины групп В и С, а также кальций, бор, медь, йод, фосфор. Употребление салата в пищу обладает множеством по-

лезных эффектов влияния на организм человека.

Базилик – ценная пряно-вкусовая культура. Его польза для организма настолько велика, что её трудно переоценить. Большинство своих полезных свойств базилик обязан образованием в биомассе эфирных масел.

3. Методика ФБИ и экспериментальная установка

Исследовалась реакция растений – под которой понимается общий вес хозяйственно-полезной биомассы (продуктивность) – на действие квазимонохроматического излучения в отдельных диапазонах области ФАР при вариации в широких пределах уровня облучённости. В указанных условиях оценивалось содержание важнейших компонентов биохимического состава продукции, определяющих её пищевую ценность.

В результате ФБИ для каждого спектрального варианта предполагалось получить серию т.н. «световых кривых», на основе которых могут оцениваться реальная эффективность отдельных диапазонов области ФАР и определяться направление поиска оптимальных требований к спектру излучения фитооблучателей (ФО) и уровню облучённости от ОУ при выращивании растений по технологии светокультуры.

Специально для ФБИ в МСК «БЛ Групп» и ВНИСИ им. С.И. Вавилова была разработана и изготовлена (в КЭТЗ¹) серия квазимонохроматических ФО (рис. 1), характеристики которых представлены в таблице и на рис. 2.

Как видно из рис. 3, «синий», «зелёный» и «красный» ФО излучают в зонах чувствительности большинства пигментов-фотоприёмников растений.

В составе ФО использовались регулируемые управляющие устройства («драйверы») типа *OT180W/UNV1250C*. При этом регулировка тока в пределах 350–1300 мА позволяла менять мощность облучателей и облучённость от них на технологической площади.

Для оценки возможного диапазона регулирования облучённости предварительно для каждого типа ФО снималась относительная зависимость потока излучения от тока (рис. 4).

¹ КЭТЗ входит в МСК «БЛ Групп».

ФБИ проводились в условиях фитотрона Лаборатории искусственного климата РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева на созданном исследовательском комплексе в составе шести унифицированных модульных установок с отражающими экранами из зеркальной плёнки (рис. 5)². Диапазон возможного изменения уровня ПФПФ в СД-модулях составлял 60–300 мкмоль/(с·м²), для получения данных для построения световой кривой с фиксированными значениями облучённости для конкретного спектрального варианта проводилось не менее 4-х вегетаций. Выбор площади рабочей зоны (зона размещения растений на посадочной площади) определялся требованием обеспечения облучения с отклонением от среднего уровня облучённости ≤ 10 %; в зависимости от условий конкретного опыта она составляла 0,25–0,35 м². Установка уровня облучённости производилась по блок-схеме на рис 6 с помощью программатора и компьютера с установленным ПО. Для измерений спектра излучения ФО, облучённости и фотосинтетической фотонной облучённости в области ФАР использовался прибор для интегральных измерений ПФПФ модели *Li-250A* с квантовым датчиком модели *Li-190R* (фирма *Li-COR*, США) и спектрометр *MK 350S* (фирма *UPRtek*, Тайвань). По просьбе авторов компанией «ИНТЕХ Лайтинг» (Санкт-Петербург), по согласованию с фирмой *UPRtek*, прибор *MK 350S* был снабжён дополнительной опцией, позволяющей проводить измерения облучённости в области ФАР в энергетических единицах (Вт/м²). (Процесс выбора приборов явился неординарной задачей и был связан с внедрением разработанных во ВНИСИ им. С.И. Вавилова национальных стандартов ГОСТ Р 57671–2017 и ПНСТ 211–2017 [3–5].)

Остальные условия эксперимента соответствовали требованиям фитотронной технологии выращивания салатно-зеленных культур и кратко описаны ниже.

Эксперименты проводились при постоянном фотопериоде в 18 ч. Температура воздуха днём – 22 °С, ночью – 18 °С. Растения выращивались в вегетационных сосудах с питатель-

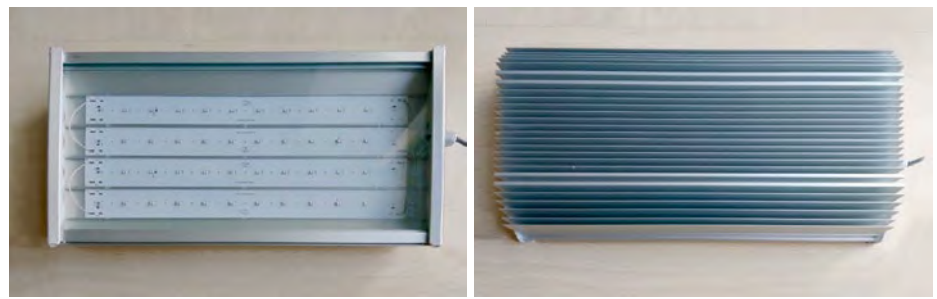


Рис. 1. Внешний вид квазимонохроматических фитооблучателей

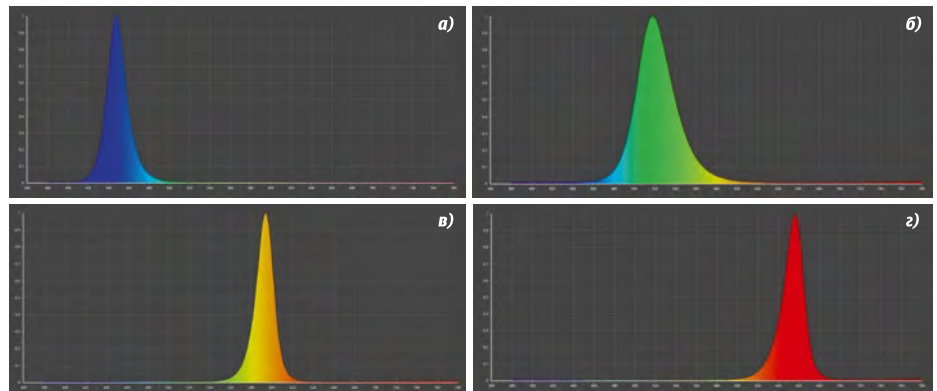
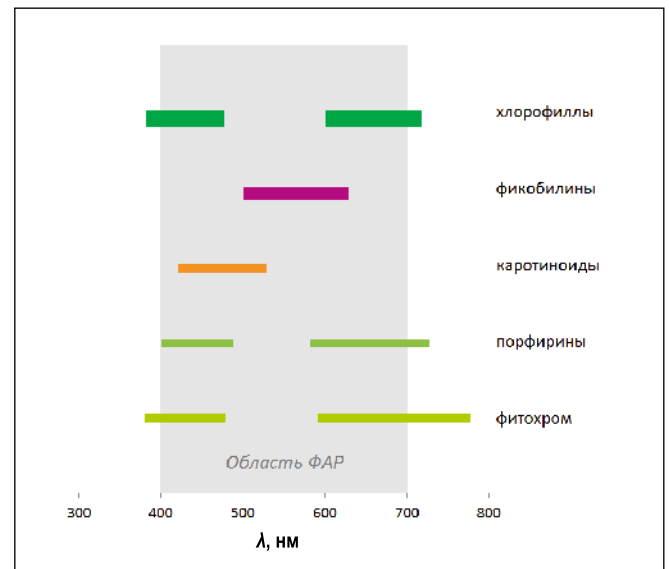


Рис. 2. Спектры излучения квазимонохроматических фитооблучателей: а – «синий», б – «зелёный», в – «янтарный», з – «красный»

Рис. 3. Спектральные диапазоны эффективного поглощения основных фотопигментов растений



ной смесью «Агробалт С» по 3 (салат) или 5 (базилик) штук. Субстрат – верховой нейтрализованный сфагновый торф низкой степени разложения, с влажностью не более 65 %, содержащий известняковую (доломитовую) муку и комплексное удобрение ($N_{\text{общ}} - 150$ мг/л, $P_2O_5 - 150$ мг/л, $K_2O - 250$ мг/л, $Mg - 30$ мг/л, $Ca - 120$ мг/л, микроэлементы), pH 5,5–6,6. Полив

проводился по весу, поддерживалась влажность 70 % ПВ, повторность – четырёхкратная.

Учёт биомассы урожая и другие определения проводились через 35 дней от всходов, учитывалась общая биомасса на сосуд.

Содержание витамина С (аскорбиновая кислота) в тканях растений определялось по методу, основанному на реакции Тильманса с обесцвечиванием 2,6-дихлорфенолиндофенола. Нитраты определялись после экстрагирования с алюмокалиевыми квас-

² Параллельно с исследованием воздействия квазимонохроматических излучений проводились эксперименты с источниками излучения с непрерывным спектром в области ФАР. Результаты будут приведены в отдельной статье.

Рис. 4. Зависимость фотосинтетического потока фотонов (ФПФ) фитооблучателей от тока

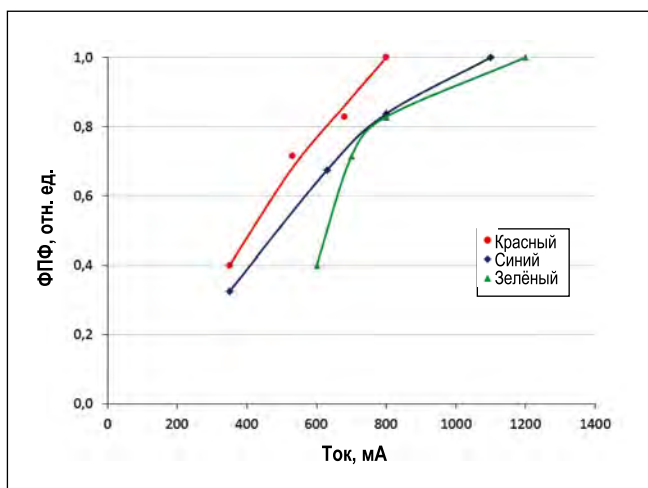


Рис. 5. Общий вид установок для фотобиологических исследований

Рис. 6. Блок-схема регулирования мощности и ФПФ квази-монохроматических фитооблучателей



цами с помощью ион-селективного электрода. Для определения количественного и качественного составов накопления биологически активных ароматических компонентов, входящих в состав эфирного масла базилика, использовалась газовая хроматография с масс-селективным пламенно-ионизационным детектированием, а идентификация компонентов эфир-

ных масел проводилась по библиотекам масс-спектров.

4. Анализ результатов исследований

На сегодня несомненен тот факт, что фотосинтез – процесс квантовый, квантовый выход (или интенсивность фотосинтеза) в котором определяется

числом поглощённых фотонов в области ФАР. На этой основе базируется система фотосинтетических фотонных величин, в настоящее время активно внедряемая в практику измерений излучения в сооружениях защищённого грунта, в первую очередь в теплицах со светокulturой растений.

Однако не стоит забывать, что фотосинтез в реальном растении как фотобиологической системе имеет вероятностный характер. В теоретической фотобиологии показано, что на одну молекулу производимого органического вещества или O_2 приходится от 8 до 12 фотонов ФАР [6]. Поэтому даже для фотосинтеза, не говоря уже о синтезе растительной биомассы, новая эффективная система величин – не более чем удобная модель, позволяющая вести расчёты, носящие условный характер.

В связи с указанным и учётом новых метрологических возможностей представляется целесообразным не отказываться от весьма популярной в прошлом веке в ФБИ и даже в практической светокulturе растений энергетической системы величин для области ФАР³. Достаточно заметна единая энергетическая «нить», связывающая в светокulturе растений потребляемую лампой мощность, долю её излучения в области ФАР, КПД ФО и коэффициент использования ФАР в ОУ с облучённостью на технологической площади, удельной потребляемой мощностью ОУ и даже энергетическим эквивалентом произведённой биомассы.

С этих позиций нам представилось особенно интересным в данных ФБИ рассмотреть результаты по синтезу биомассы как функции фотонной облучённости E_{ϕ} , так и («энергетической») облучённости E , связь между которыми определяется как

$$E_{\phi} = K_{\phi} \cdot E,$$

где

$$K_{\phi} = (hcN_A)^{-1} \int_{400}^{700} e(\lambda)\lambda d\lambda / \int_{400}^{700} e(\lambda)d\lambda$$

³ Отметим, что предпочтение энергетическим величинам отдаёт ряд ведущих светофизиологов растений, в частности проф. А.А. Тихомиров [7].

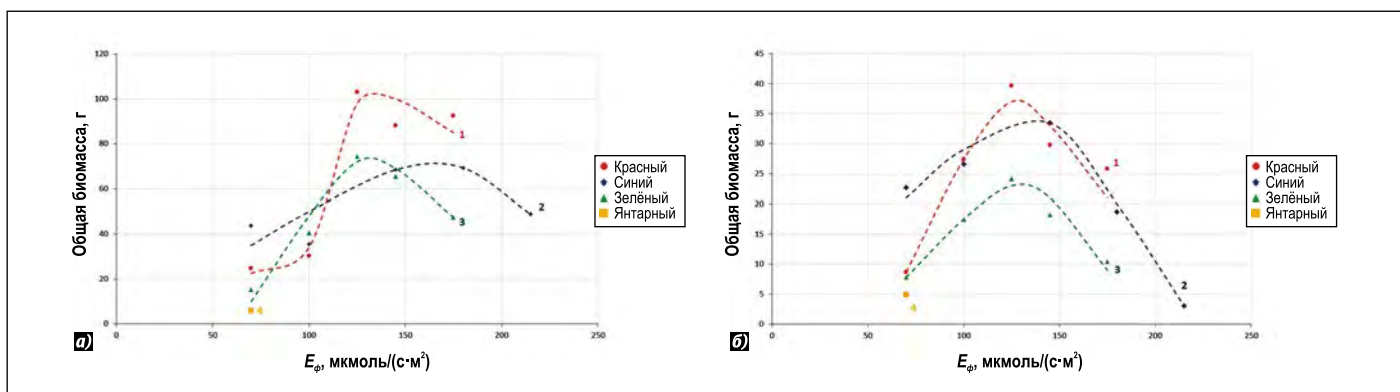


Рис. 7. Серия световых кривых продуктивности для салата (а) и базилика (б) в фотосинтетической фотонной системе величин

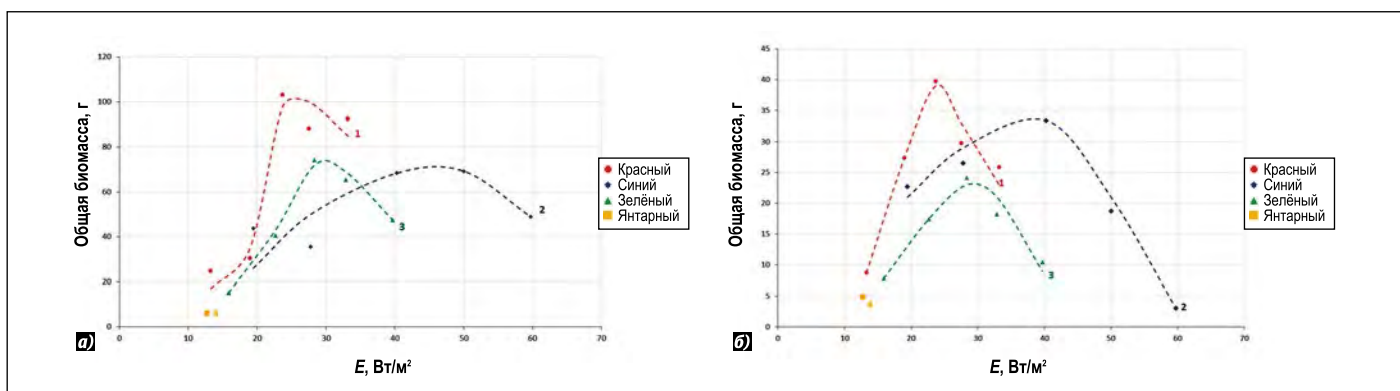


Рис. 8. Серия световых кривых продуктивности для салата (а) и базилика (б) в энергетической системе величин

(мкмоль/Дж); $e(\lambda)$ – спектральная плотность облучённости ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$); λ – длина волны излучения (нм); h – постоянная Планка (Дж·с); c – скорость света (м/с); N_A – число Авогадро (мкмоль^{-1}).

Переход от E к E_ϕ или наоборот возможен расчётным путём или с использованием соответствующих приборов, что, собственно, и было сделано в настоящей работе.

Основные результаты ФБИ, представленные в виде световых кривых продуктивности для салата и базилика, приведены на рис. 7 и 8. Для показанных значений продуктивности средние среднеквадратичные отклонения составили $\pm 10,3\%$ (салат) и $\pm 18,5\%$ (базилик).

Отметим, что выращивание растений под квазимонохроматическим излучением, т.е. в световом режиме, в котором на протяжении всей вегетации «задействована» лишь часть спектра действия фотосинтеза, позволяет не только получать прямые данные об эффективности того или иного диапазона области ФАР, но и оценивать возможности растения как саморегулирующейся системы.

Анализ зависимости продуктивности салата сорта Ландау от уровня

ПФПФ указывает на достаточно резкую реакцию растений на низкоэнергетические кванты красного излучения, которое при небольших ПФПФ (E_ϕ) уступает по эффективности синему излучению, при средних (100 мкмоль/(с·м²)) незначительно уступает синему и даже зелёному, но в области более высоких ПФПФ, порядка 130–140 мкмоль/(с·м²), показало максимум продуктивности для всей серии опытов.

Протяжённость «восходящего участка» световой кривой наиболее велика для синего излучения, максимальные значения продуктивности достигаются в этом случае при ПФПФ 170–180 мкмоль/(с·м²), что подтверждает ранее полученные данные [8] и, на наш взгляд, указывает на бесперспективность обеспечения высокой доли излучения в синем диапазоне спектра излучения ФО с СД для хозяйственного выращивания салатных культур.

Результаты настоящих ФБИ наглядно показывают, что зелёный диапазон спектра при выращивании салата – отнюдь не «изгой», обеспечивает при ПФПФ порядка 100 мкмоль/(с·м²) большую продуктивность, чем красное и синее излучение.

Прямым подтверждением предположения о низкой эффективности жёлто-оранжевого диапазона области ФАР, излучение в котором поглощается практически только каротиноидами и фикобилинами, является опыт с использованием специально изготовленного «жёлто-оранжевого (янтарного)» ФО с СД при $E_\phi = 70$ мкмоль/(с·м²). В дальнейших экспериментах данный облучатель не использовался.

Как уже указывалось, в данных ФБИ благодаря новым «аппаратурным» возможностям нам впервые удалось дополнительно рассмотреть влияние излучения в разных диапазонах области ФАР на продуктивность для салата, перейдя от шкалы ПФПФ (или E_ϕ) к шкале E (рис. 8, а). Инверсия шкал, естественно, несколько изменила взаимное расположение световых кривых, существенно расширив диапазон эксперимента и представив данные в более привычном для светотехников и фотобиологов виде.

Отметим, что световая кривая для синего диапазона области ФАР в энергетической системе величин имеет наиболее пологий характер и достигает при достаточно высоких уровнях E (40–50 Вт/м²) максимума продуктивности, значительно уступающего оп-

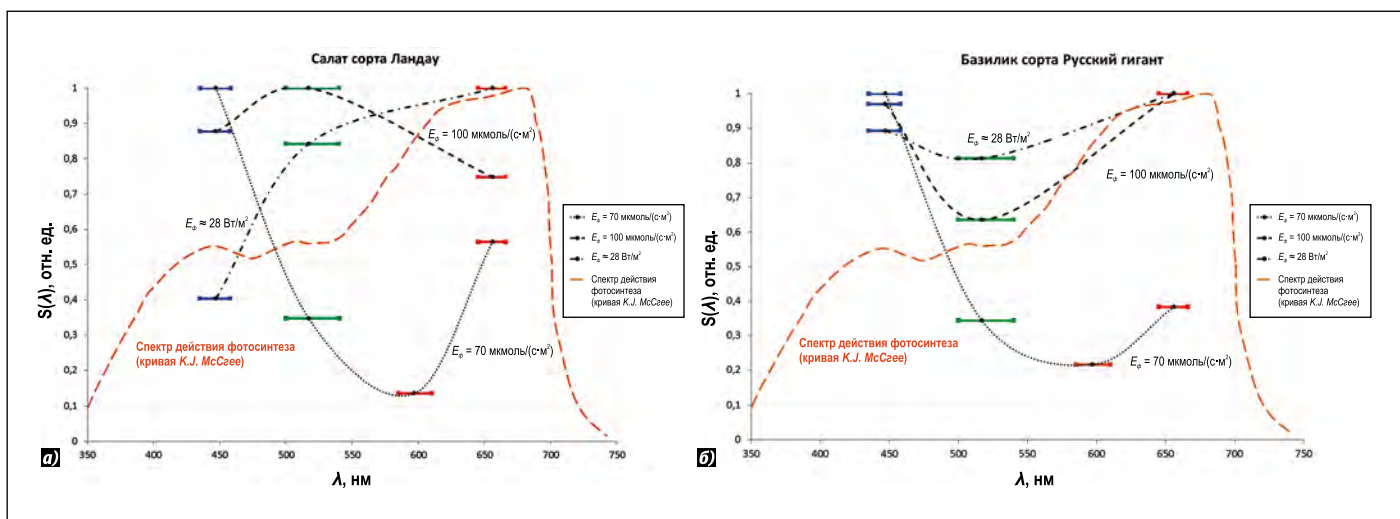


Рис. 9. «Грубые» спектры действия для синтеза биомассы салата (а) и базилика (б)

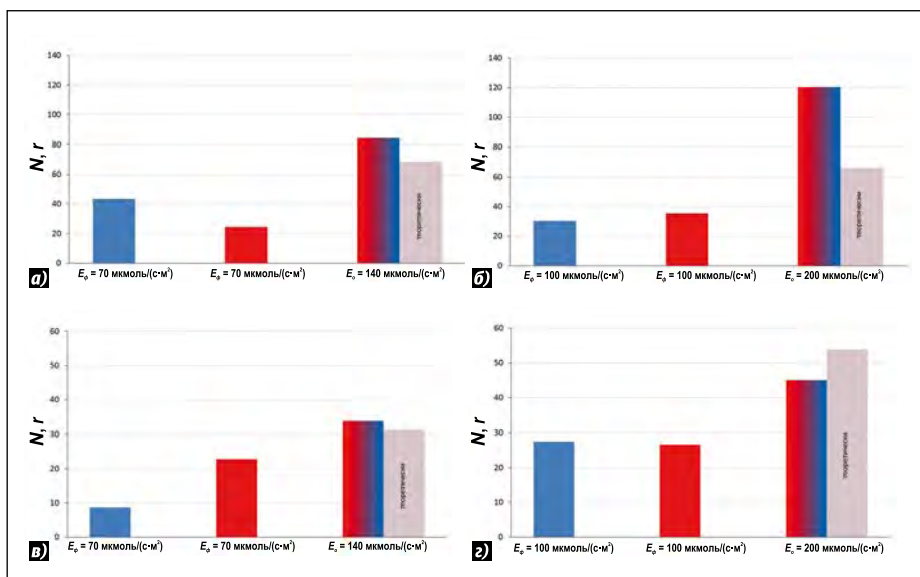


Рис. 10. Аддитивность действия разноспектральных излучений в области ФАР по синтезу полезной биомассы N

тимуму для красного излучения (при $E = 23\text{--}25 \text{ Вт/м}^2$).

Световые кривые для базилика сорта Русский гигант имеют определённые детали сходства и различия с таковыми для салата. Наиболее эффективным по продуктивности здесь также оказался красный диапазон области ФАР. Опыт с красным излучением при $E_\phi > 140 \text{ мкмоль/(с·м}^2\text{)}$ выявил трудно объяснимый эффект быстрого угнетения развития растений. В семействе этих кривых, $N(\text{ПФПФ})$, положения максимумов для всех диапазонов области ФАР весьма близки и соответствуют $E_\phi = 125\text{--}150 \text{ мкмоль/(с·м}^2\text{)}$.

По-видимому, для хозяйственного выращивания базилика оптимальным по спектру будет сочетание из-

лучений в красном и синем диапазонах области ФАР, поскольку зелёное излучение по эффективности им существенно уступает.

Инверсия шкал облучённостей привела для базилика к заметному изменению положения световых кривых, вероятно, связанному с разным энергетическим весом «красных», «зелёных» и «синих» фотонов (рис. 8, б).

Максимумы зависимостей в шкале E для красного и синего диапазонов области ФАР оказались сдвинутыми

примерно на 15 Вт/м^2 , что, бесспорно, обеспечивает красному излучению существенные преимущества по энергоэффективности.

Рассматриваемые данные дополнительно иллюстрируются с помощью так называемых «грубых» спектров действия⁴ синтеза для биомассы двух исследуемых культур (рис. 9)

Как видно из рис. 9, вид спектра действия сильно зависит от облучённости (E_ϕ или E), в зависимости от уровня которой эффективность того или иного диапазона для ФАР может резко меняться. Отсюда вполне понятна неоднозначность результатов многих ФБИ, проведённых при одном-реже, двух уровнях облучённости с противоречивыми данными, на что указывается, в частности, в [10].

Вкладывая в следующую часть наших ФБИ чисто методологическое содержание и рассматривая её как пролог к следующей фазе эксперимента, нами проведены опыты по оценке аддитивности действия излучения в синем и красном диапазонах области ФАР на синтез биомассы.

В общем случае под аддитивностью понимают свойство величин, состоящее в том, что значение величины, соответствующее целому объёму, равно сумме значений величин, соответствующих его частям. Так что любая произвольная функция f аддитивна, если

⁴ Под спектром действия здесь понимается реакция растений (продуктивность) на излучение в отдельных спектральных диапазонах при постоянном уровне облучённости (E_ϕ или E). Его знание позволяет определять влияние соответствующего типа фотопигмента на синтез биомассы.

Понятие «грубого» спектра действия введено А. Тохвером [9] и используется тогда, когда ширина выделенного спектрального диапазона составляет несколько десятков нм.

Основные параметры серии квазимонохроматических фитооблучателей для ФБИ

№ п/п	Тип ФО	U_c , В	Тип СД, фирма-производитель	Пиковая длина волны, нм	Спектральный диапазон излучения, нм (по уровню 0,5)	Диапазон регулирования по току, мА	Мощность (при токе 600 мА), Вт
1	GALAD Fito LED red	220	XPE HE Photo Red Light Emitting Diode, CREE	656	645–666	350–800	68
2	GALAD Fito LED blue		XLamp XT-E Light Emitting Diode Royal Blue, CREE	447	435–458	350–1100	84
3	GALAD Fito LED green		XLamp XP-E Light Emitting Diode Green, CREE	517	500–540	600–1200	84
4	GALAD Fito LED amber		XLamp XP-E Light Emitting Diode Amber, CREE	597	585–605	600	35

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2). \quad (1)$$

Если указанное равенство не выполняется и отношение левой части уравнения (1) к правой больше 1, то рассматриваемая функция f может быть названа супераддитивной, а если – меньше 1, то – субаддитивной.

Отметим, что *K.J. McCree* в своих экспериментах по фотосинтезу для изолированного листа выражал сомнения в аддитивности действия разнеспектральных излучений [1]. В соответствии с (1) критерий аддитивности формально может быть выражен как

$$A = N(E_o) / \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2)$$

где $E_o = \sum_{i=1}^n E_{\Delta\lambda_i}$, $N(E_o)$ – продуктивность при совместном действии излучения в n спектральных диапазонах при общей облучённости E_o , N_i – продуктивность i -го квазимонохроматического облучателя, излучающего в диапазоне длин волн $\Delta\lambda_i$ и обеспечивающего фотонную облучённость $E_{\Delta\lambda_i}$.

Как указывалось выше, в наших ФБИ $n = 2$ и для каждого опыта $E_{\Delta\lambda_i} = const$. Отметим, что, проводя исследования аддитивности, целесообразно выбрать уровни на восходящих линейных участках соответствующих световых кривых. По этим соображениям, нами были выбраны $E_{\Delta\lambda_1}$ и $E_{\Delta\lambda_2}$, равными 70 и 100 мкмоль/(с·м²) соответственно.

Таким образом, для E_o в соответствии с (2) устанавливались два значения: 140 и 200 мкмоль/(с·м²).

Результаты для салата и базилика, представленные на рис. 10, логичны и объяснимы. Для первичного уровня $E_{\Delta\lambda_i}$, 70 мкмоль/(с·м²), для обе-

их культур полученный эффект может быть оценён как супераддитивный ($A > 1$) и указывает на перспективность дальнейших ФБИ по оптимизации спектра бинарных красно-синих ФО. Качественно аналогичный результат получен для растений салата и при более высоком первичном уровне $E_{\Delta\lambda_i}$, 100 мкмоль/(с·м²), с учётом

положности световых кривых при высоких уровнях ПФПФ. Эффект субаддитивности красно-синего излучения при $E_{\Delta\lambda_i} = 100$ мкмоль/(с·м²) у бази-

лика связан с более резким характером спада световых кривых уже при уровнях ПФПФ выше 150 мкмоль/(с·м²).

Хорошо известно о влиянии излучения в области ФАР на синтез у растений тех или иных биохимических соединений, определяющих пищевую ценность растительной продукции [11]. Сегодня этому вопросу уделяется большое внимание при выращивании продукции повышенного экологического качества в условиях светокультуры.

На данном этапе ФБИ мы стремились получить оценочные данные, предполагая уточнить и довести их до уровня технологических показателей на завершающей стадии исследований.

В качестве основных компонентов биохимического состава для салата Ландау была принята концентра-

ция витамина С (мг/100 г биомассы); а для базилика – содержание основного вида эфирного масла (эвгенол). Оценивалось также содержание в биомассе нитратов.

На рис. 11 приведена серия зависимостей от облучённости содержания витамина С в сырой биомассе у салата Ландау. В качестве общей особенности для всех трёх диапазонов ФАР отметим рост концентрации витамина с ростом облучённости, причём положение максимума для синего диапазона соответствовало более низким уровням облучённости, чем для световой кривой продуктивности. В диапазоне ПФПФ, представляющем интерес для практической светокультуры, содержание витамина С может быть на 20–40 % выше среднего уровня для салатных культур (10 мг/100 г).

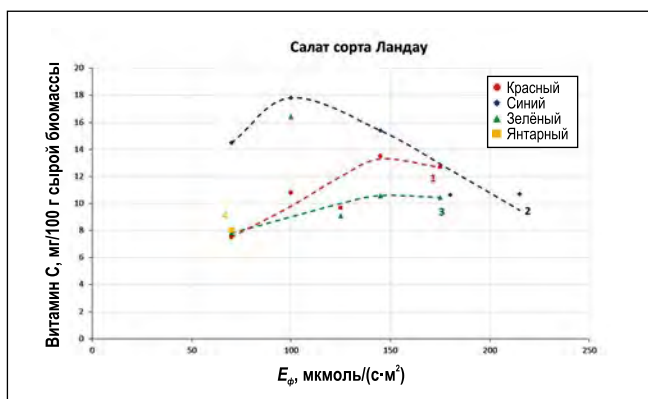
В ходе ФБИ устойчивого влияния спектра и уровня облучённости в области ФАР на биосинтез эвгенола в базилике выявить не удалось. Отметим, что высокие долевые показатели по содержанию эвгенола (50–55 %) были устойчиво выявлены при облучении красным светом с ПФПФ 125–150 мкмоль/(с·м²).

По содержанию нитратов разброс показателей оказался на уровне первого порядка величин, при этом оставаясь минимум в 2–3 раза ниже предельно допустимой концентрации (2500 мг/кг).

Заключение

Представленные ФБИ, выполненные с использованием последних достижений светотехники актуальны и показывают большие возможности СД-излучателей в решении задачи вы-

Рис. 11. Зависимость содержания витамина С для салата Ландау от ПФПФ (или E_{ϕ})



работки обоснованных требований к системам фитооблучения для светокультуры растений разных видов.

В работе для двух видов вегетативных растений в широком диапазоне облучённости (E_{ϕ} или E) получены данные о значении для продуктивности основных спектральных диапазонов области ФАР и подтверждено наибольшее значение красного диапазона.

Результаты ФБИ, приведённые в статье, убедительно показывают, что реакция растений (продуктивность) неаддитивно зависит от спектрального состава и облучённости, а поиски универсальных спектров действия продуктивности растений сомнительны. Спектр действия для продуктивности даже для вегетативных растений зависит от облучённости и, в принципе, должен оцениваться по двумерным шкалам (λ , E). Резюмируя сказанное, заметим, что альтернативы экспериментальному методу оптимизации основных светотехнических параметров для светокультуры растений пока не существует.

Наряду с научной и практической значимостью, исследования физиологической эффективности отдельных диапазонов области ФАР носят методический характер и могут применяться в учебных курсах для студентов специальностей «Светотехника» и «Физиология растений».

Данная статья написана в рамках проекта финансовой поддержки прикладных научных исследований Минобрнауки РФ, тема «Комплексные исследования в области светокультуры растений и создание высокоэффективных светодиодных фитооблучателей, обеспечивающих повышение энергоэффективности промышленных теплиц» (соглашение о предоставлении субсидии № 14.576.21.0099 от 26.09.2017. Уникальный идентификатор: RFMEFI57617X0099).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McCree K.J. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants // *Agric. Meteorology*.— 1972. — P. 192–216.
2. URL: <http://www.hortibiz.com/item/news/research-redefining-the-mccree-curve/> (дата обращения: 31.08.2018).
3. Прикупец Л.Б. Технологическое освещение в агропромышленном комплексе России // *Светотехника*.— 2017.— № 6. — С. 6–14; Prikupets L.B. Technological Lighting for Agro-Industrial Installation in Russia // *Light & Engineering*.— 2018. — Vol. 26.— № 4. — P. 7–17
4. Боос Г.В., Прикупец Л.Б., Розовский Е.И., Столяревская Р.И. Стандартизация светотехнических приборов и установок для теплиц // *Светотехника*.— 2017.— № 6. — С. 69–74; Boos G.V., Prikupets L.B., Rozovsky E.I., Stolyarevskaya R.I. Standardization of Lighting Fixtures and Installations for Greenhouses // *Light & Engineering*.— 2018. — Vol. 26, No. 4. — P. 18–24.
5. Bartsev A., Prikupets L., Shakhparunyan A. Measurements of photosynthetic photon flux (PPF) and flux density (PPFD) for greenhouse LED irradiators / Proc. CIE2018 «Topical Conference on Smart Lighting», 2018. — P. 564–569.
6. Конев С.В., Волотовский И.Д. Фотобиология. — Минск: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1979.— 384 с.
7. Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.— 202 с.
8. Тихомиров А.А., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я. Спектральный состав света и продуктивность растений. — Новосибирск: Наука СО, 1991. —168 с.
9. Тохвер А.К. Фитохром, его основные формы и их свойства / Фоторегуляция метаболизма и морфогенеза растений. — М.: Наука, 1975. — С. 56–65.
10. Bugbee B. Towards an optimal spectral quality for plant growth and development: The importance of radiation capture / *Plants, Soils, and Climate Faculty Publications* (2016). URL: https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1765&context=psc_fac-pub (дата обращения: 31.08.2018).

11. Berkovich Yu.A., Konovalova I.O., Smolyanina S.O., Erokhin A.N., Avercheva O.V., Bassarskaya E.M., Kochetova G.V., Zhigalova T.V., Yakovleva O.S., Tarakanov I.G. LED crop illumination inside space greenhouses // *REACH – Reviews in Human Space Exploration*.— 2017. — Vol. 6. — P. 11–24.



Прикупец Леонид Борисович, кандидат техн. наук. Окончил с отличием в 1970 г. МЭИ. Зав. лабораторией ВНИСИ им. С.И. Вавилова. Член редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»



Боос Георгий Валентинович, кандидат техн. наук, доцент. Окончил в 1986 г. МЭИ. Президент и член Совета директоров МСК «БЛ Групп». Зав. кафедрой светотехники НИУ

«МЭИ». Лауреат Государственной премии РФ. Председатель редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»



Терехов Владислав Геннадьевич, инженер. Окончил с отличием Московский государственный университет экономики, статистики и информатики по

специальности «Прикладная информатика в экономике». Руководитель департамента по продвижению МСК «БЛ Групп» и научный сотрудник ВНИСИ им. С.И. Вавилова. Член оргкомитета Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия. Структуры и приборы» и эксперт по энергоэффективным технологиям в освещении Российского союза строителей



Тараканов Иван Германович, доктор биол. наук, профессор. Окончил в 1978 г. МСХА им. К.А. Тимирязева. Зав. кафедрой «Физиология растений» РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева