

Оптимизация светотехнических параметров облучения при светокультуре салатно-зеленных растений с использованием светодиодных излучателей

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 завершающей фазы фотобиологических исследований по продуктивности салата и базилика, выращиваемых в условиях фитотрона при облучении излучением с разным соотношением долей в синем-красном и сине-зелёно-красном диапазонах области ФАР¹.

Установлены спектральные варианты ФАР, обеспечивающие максимальную или предельно близкую к ней продуктивность указанных культур.

Указано на сложный и неоднозначный характер влияния основных спектральных диапазонов ФАР на фотоэнергетические и фоторегуляторные процессы у растений, обеспечивающие их продуктивность, что делает невозможным определение общих унифицированных требований к оптимальным параметрам искусственного облучения для выращивания растений. Эти требования должны определяться на основе прямых фотобиологических экспериментов с основными видами сельскохозяйственных растений и являться важнейшим элементом общей макротехнологии светокультуры.

Рассмотрены общие принципы реализации установленных требований к спектрам ФАР фитооблучателей, в том числе с учётом создания нормальных зрительных условий для персонала теплиц и других сооружений защищённого грунта.

Ключевые слова: фотобиологические исследования, светокультура, фитооблучатель со светодиодами, фотосинтетически активная радиация (ФАР), спектр действия, фотосинтетический поток фотонов, фотосинтетическая фотонная облучённость,

фотосинтетическая фотонная эффективность.

Введение

Возможности получения прямых экспериментальных данных о влиянии излучения отдельных диапазонов ФАР на продуктивность конкретных видов растений с использованием светодиодных (СД) излучателей стимулируют фотобиологические исследования (ФБИ) во всём мире. На проходившем 16–20 июня в Анже (Франция) крупном международном симпозиуме по передовым технологиям и управлению инновационными теплицами «GreenSys 2019» указанное направление подтвердило свою приоритетность.

В настоящее время проблемы использования СД в выращивании растений переходят в практическую плоскость, в частности, в связи с быстрым ростом масштабов использования установок вертикального многоярусного выращивания салатно-зеленных растений под названием «City Farm».

Салатно-зеленные культуры – третья по распространённости группа

овощных растений, выращиваемых в теплицах России (рис. 1), и в связи с тем, что потребность населения страны в свежей, богатой витаминами зеленой продукции в холодное время года удовлетворяется не более чем на 20–30 %, потенциал развития производства здесь велик и научные достижения активно востребованы.

В статье [1] представлены результаты первой фазы ФБИ, проводимых авторами в условиях фитотрона по светокультуре салата и базилика (в РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева) с использованием созданных специальных квазимонохроматических фитооблучателей с СД (ФО). Первые полученные данные в широком диапазоне варьируемых светотехнических параметров (спектр в области ФАР и уровень облучения) позволяют перейти к решению задачи оптимизации спектральных характеристик ФО для хозяйственного выращивания указанных культур.

Методика ФБИ и экспериментальная установка

По результатам первой фазы ФБИ [1] был установлен диапазон фотосинтетической фотонной облучённости (PPFD), 160–180 мкмоль/(с·м²), соответствующий максимальной продуктивности салата «Ландау» и базилика «Русский гигант». В дальнейшем все опыты с красно-синими (RB) и красно-зелёно-синими (RGB) ФО проводились при PPFD 170 ± 10 % мкмоль/(с·м²), что позволило сократить число дорогих и достаточно продолжительных вегетаций и соответствует положениям метода «суррогатной оптимизации», используемого в современной биологии при изучении эффектов воз-

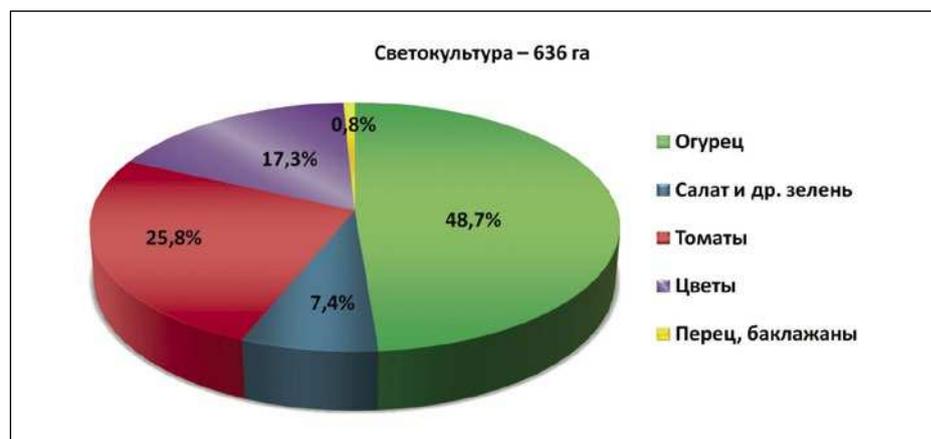


Рис. 1. Площади, занимаемые светокультурами овощей в теплицах России в 2019 г.

¹ См. также статью [1].

Основные параметры цветных (*R, G, B*) светодиодов, использованных в ФБИ

№	Тип СД (фирма-производитель)	Пиковая длина волны, нм	Спектральный диа- пазон излучения, нм, (по уровню 0,5)	Диапазон регулирова- ния по току, мА
1	<i>XPEEPR-L1-0000-00901</i> , <i>XPE HE Photo Red Light Emitting Diode (CREE)</i>	656	645–666	350–800
2	<i>XPEBGR-L1-0000-00F01</i> , <i>XLamp XP-E Light Emitting Diode Green (CREE)</i>	517	500–540	500–1100
3	<i>XTEARY-00-0000-000000Q01</i> , <i>XLamp XT-E Light Emitting Diode Royal Blue (CREE)</i>	447	435–458	500–1200

Таблица 2

Результаты «бинарной оптимизации»

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип спектра	<i>R</i> 100 % <i>B</i> 0 %	<i>R</i> 90 % <i>B</i> 10 %	<i>R</i> 80 % <i>B</i> 20 %	<i>R</i> 0 % <i>B</i> 40 %	<i>R</i> 50 % <i>B</i> 50 %	<i>R</i> 40 % <i>B</i> 60 %	<i>R</i> 32 % <i>B</i> 68 %	<i>R</i> 0 % <i>B</i> 100 %
Вес (салат), г	92,5 ± 13,2	71,5 ± 5,2	98,7 ± 10,5	56,7 ± 13,9	76,9 ± 7,6	59,0 ± 12,2	66,6 ± 14,8	69,3 ± 3,5
Вес (базилик), г	25,8 ± 5,7	55,1 ± 12,3	65,9 ± 14,7	51,2 ± 6,9	58,2 ± 5,0	65,9 ± 5,7	30,5 ± 7,8	18,7 ± 8,5

действия на растения внешних факторов [2–4].

Задачей второй фазы ФБИ, которые также проводились в фитотроне РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, было исследование эффектов совместного воздействия излучения основных диапазонов ФАР.

Эксперимент был построен так, что вначале исследовалось влияние на продуктивность салата и базилика разного соотношения уровней излучения в красном (*R*) и синем (*B*) диапазонах (*RB* – «бинарная оптимизация»), а затем к ним добавлялись разные доли излучения зелёного диапазона ФАР (*RGB* – «триадная оптимизация»).

В соответствии с этим на АО «КЭТЗ» по заданию ВНИСИ были изготовлены две группы ФО, *RB* и *RGB* типов, с параллельным включением СД указанных цветов и возможностью независимого управления токами и фотосинтетическим фотонным потоком (*PPF*), соответственно, по двум или трём цветовым каналам.

В ФО, как и в первой фазе ФБИ, использовались *R, G* и *B* мощные СД фирмы *CREE* (табл. 1). Изменением тока в каждом из каналов (предварительно снималась зависимость *PPF* от тока) можно было варьировать долю каждого диапазона в суммарной облучённости от 0 до 100 %. Устройством регулирования тока ФО служили

управляющее устройство («драйвер») *OT180W/UNV1250C* и программатор *Optotronic OT programmer* фирмы *OSRAM* (рис. 2).

Измерения спектра излучения ФО проводились с помощью спектрометра *PC100N* фирмы *UPRtek* (Тайвань) с программным обеспечением фирмы «Интех-Лайтинг» (РФ), *PPFD* в каждом диапазоне и суммарная *PPFD* определялись с помощью измерителя уровня освещённости *Li-250A* с квантовым датчиком *Li-190R* (фирма *LI-COR*, США).

Остальные условия эксперимента соответствовали требованиям принятой в указанном фитотроне технологии выращивания салатно-зеленных культур:

• Эксперименты проводились при постоянном 18-ч фотопериоде при температурах воздуха днём и ночью 22 и 18 °С соответственно. Растения выращивались в вегетационных сосудах с питательной смесью «Агробалт С» по 3 (салат) или 5 (базилик) штук. Субстрат – верховой нейтральный 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.

Рис. 2. Блок-схема регулирования параметров фитооблучателей со светодиодами в ФБИ



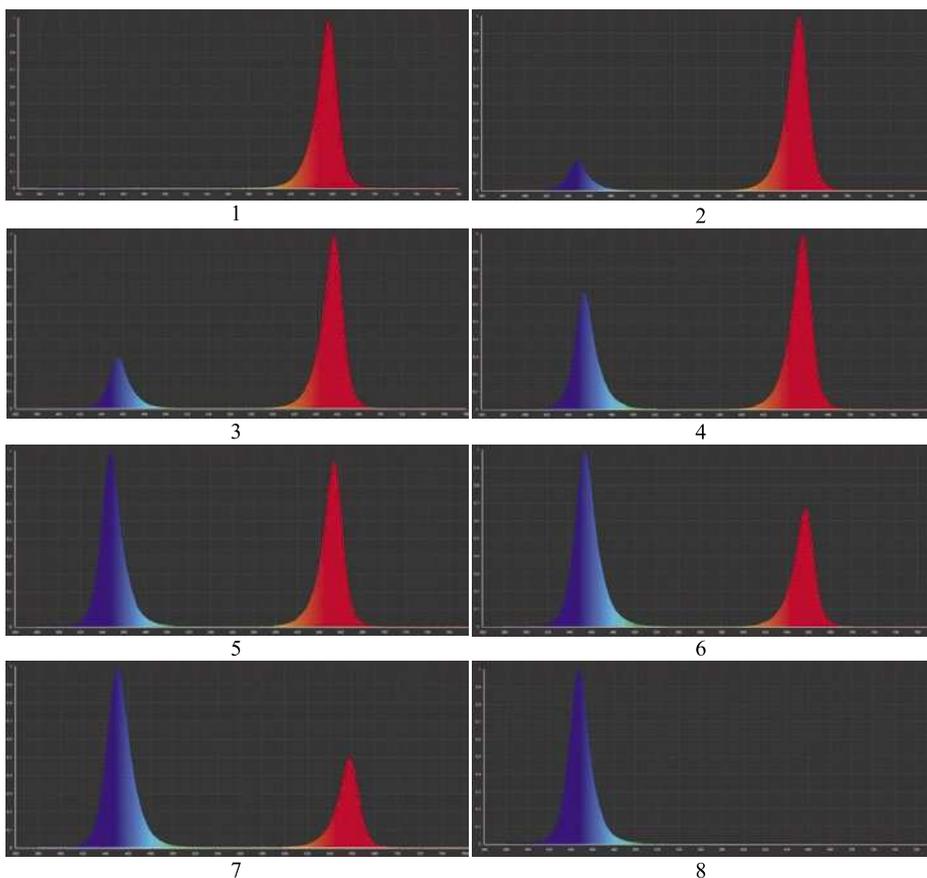


Рис. 3. Варианты спектров при «бинарной оптимизации»: 1–100 % R , 0 % B ; 2–90 % R , 10 % B ; 3–80 % R , 20 % B ; 4–60 % R , 40 % B ; 5–50 % R , 50 % B ; 6–40 % R , 60 % B ; 7–32 % R , 68 % B ; 8–0 % R , 100 % B

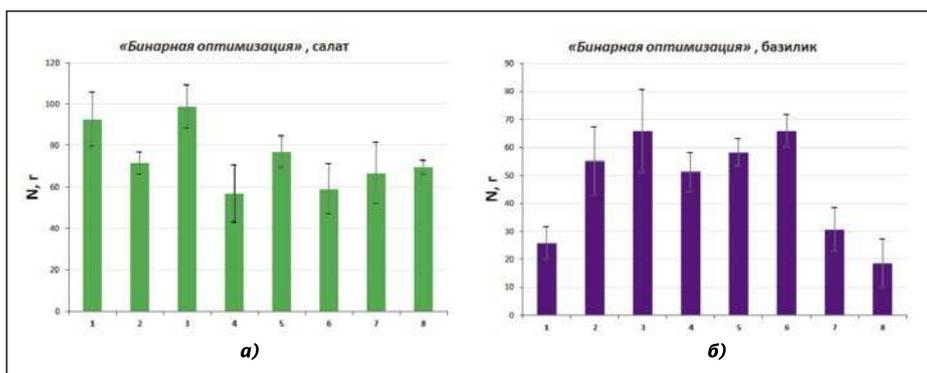


Рис. 4. Диаграммы продуктивности салата (а) и базилика (б) при «бинарной оптимизации»

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

Результаты ФБИ и их обсуждение

• «Бинарная оптимизация»

Спектры реализованных восьми R - B комбинаций и соответствующие им доли $PPFD_R$ и $PPFD_B$ в суммарной облучённости $PPFD_{R+B}$ приведены на рис. 3 и в табл. 2. Там же представлены полученные при этих условиях

результаты вегетаций – продуктивность N .

Сразу отметим, что зависимости N от соотношения R и B долей излучения для салата и базилика существенно различны (рис. 4). Представив множество значений N салата в функции этого соотношения с помощью линейной аппроксимации (рис. 5), можно увидеть, что роль и влияние R диапазона ФАР на синтез биомассы – однозначно определяющие. При этом с ростом R доли излучения N салата растёт, так же как она падает с ростом B доли излучения. В отличие от сала-

та зависимость N базилика от соотношения долей R и B может быть представлена кривой с максимумом, соответствующим R доле 50–80 % и доле B , соответственно, 50–20 %. Объединяющим обе культуры требованием, является достаточность B доли излучения (в области ФАР) – на уровне порядка 20 %.

• «Триадная оптимизация»

Исследование зависимости N салата и базилика от соотношения R , G , B долей излучения (рис. 6) явилось следующей, завершающей стадией «суррогатной оптимизации» спектра для указанных культур.

В табл. 3 и на рис. 7 приведены данные по восьми реализованным вегетациям с разными соотношениями указанных R , G , B долей и соответствующим результатам по N салата и базилика, а на рис. 8 представлена трёхмерная визуализация зависимости N (полезная биомасса, г) от R и B долей излучения (учитывая, что $G = 100 - (R + B)$), выполненная с помощью программы «Wolfram Mathematica» на трёхмерной сетке с использованием линейной интерполяции. Окраска поверхности графической модели соответствует реальному цвету спектра в заданном диапазоне R и B по осям координат.

Наглядность приведённых 3D-моделей позволяет высказать следующие качественные оценки совместного действия R , G , B долей ФАР:

• В зоне максимальной продуктивности для обеих культур очевидно приоритетное влияние R («красного») излучения, причём для салата в большей степени.

• Преобладающая доля B («синего») излучения однозначно резко снижает N . Из табл. 2–3 и рис. 4, а и 7, а видно, что максимальные N салата были достигнуты при полностью R излучении ($R_{100\%}$), а также при вариантах $R_{80\%}:B_{20\%}$ и $R_{75,2\%}:G_{13\%}:B_{11,8\%}$. Снижение N до 40 % и ниже соответствовало существенному преобладанию B излучения. Присутствие G («зелёного») излучения в области ФАР не является обязательным, но допустимо.

Соответствующие данные по базилику – табл. 2–3 и рис. 4, б и 7, б – указывают на сложный характер совместного влияния RGB излучения на эту культуру; лучшие результаты по весу биомассы (N) были зафиксированы в вегетации с триадной комбинацией $R_{62,4\%}:G_{17,7\%}:B_{19,9\%}$, причём

Результаты «триадной оптимизации»

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип спектра	R 77 % G 12 % B 11 %	R 75,2 % G 13,0 % B 11,8 %	R 62,4 % G 17,7 % B 19,9 %	R 49,0 % G 36,0 % B 15,0 %	R 43,6 % G 21,5 % B 34,9 %	R 30,0 % G 50,0 % B 20,0 %	R 27,0 % G 31,1 % B 41,9 %	R 17,2 % G 13,7 % B 69,1 %
Вес (салат), г	78,9 ± 14,4	84,7 ± 14,8	72,8 ± 4,0	62,5 ± 3,8	67,5 ± 12,4	76,5 ± 14,8	68,6 ± 11,9	50,8 ± 6,4
Вес (базилик), г	49,8 ± 8,6	45,9 ± 11,1	73,1 ± 8,1	54,7 ± 15,7	26,6 ± 4,8	54,7 ± 5,0	37,0 ± 6,4	43,7 ± 8,5

ближайшие по N результаты были получены для бинарных R - B комбинаций $R_{80}\%: B_{20}\%$ и $R_{40}\%: B_{60}\%$.

Отметим, что для базилика, по-видимому, присутствие в полихроматическом спектре R излучения даже в минимальных долях совершенно необходимо. При этом при полностью B излучении N составляла лишь 25 % от возможного максимума. Однако весьма неблагоприятно также облучение базилика одним лишь R излучением (порядка 35 % от максимума N).

На рис. 9 представлены спектральные комбинации, обеспечивающие максимальную или близкую к ней продуктивность для салата и базилика. Очевидно, что в фотосинтетической фотонной и энергетической системах величин эти данные будут различаться. Связь между значениями долей излучения в исследуемых диапазонах определяется с помощью выражения $PPFD = K \cdot E_e$, где E_e – облучённость, Вт·м⁻²;

$$K = (h \cdot c \cdot N_A)^{-1} \times \int_{400}^{700} e(\lambda) \lambda d\lambda / \int_{400}^{700} e(\lambda) d\lambda,$$

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

Укажем также на весьма важное для практики обстоятельство: при использовании спектра ФАР RB или RGB типов при доле R излучения менее 75 % для салата и менее 50 % для базилика обеспечение высокой N этих культур не удаётся.

В последние годы в ряде зарубежных стран выполнено несколько интересных работ, в которых содержатся результаты ФБИ по N салатно-зеленных растений при вариации спектра ФАР. Представляет интерес кратко со-

Рис. 5. Графическая интерпретация результатов «бинарной оптимизации»

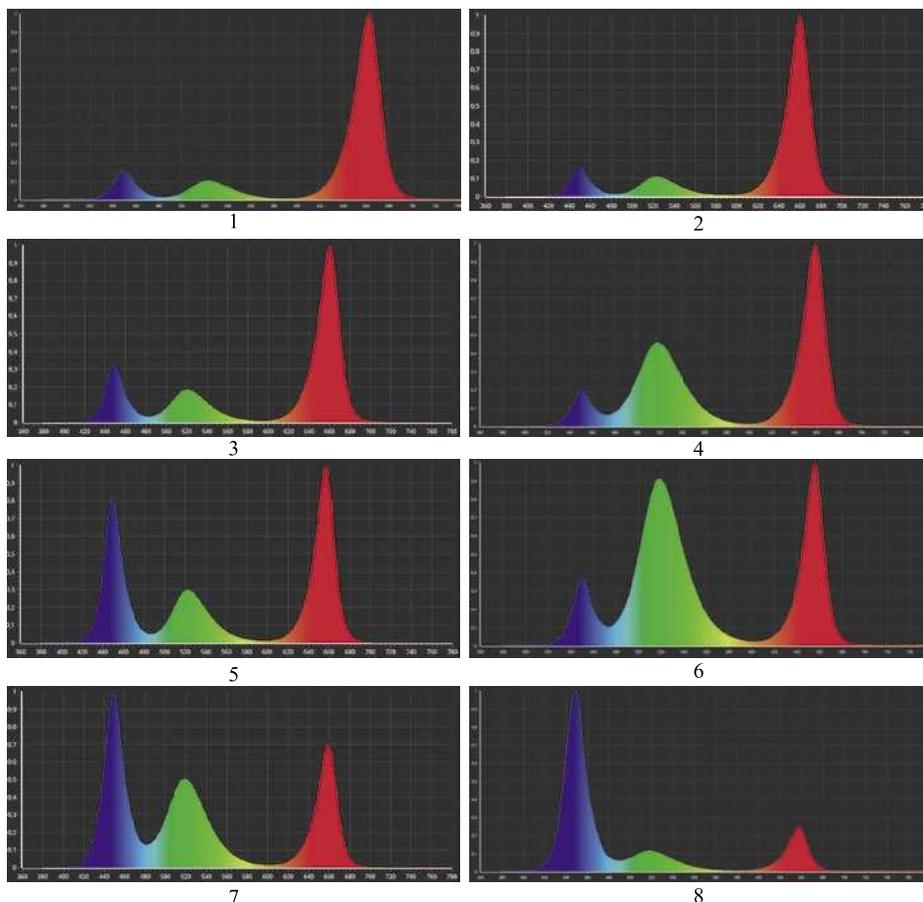
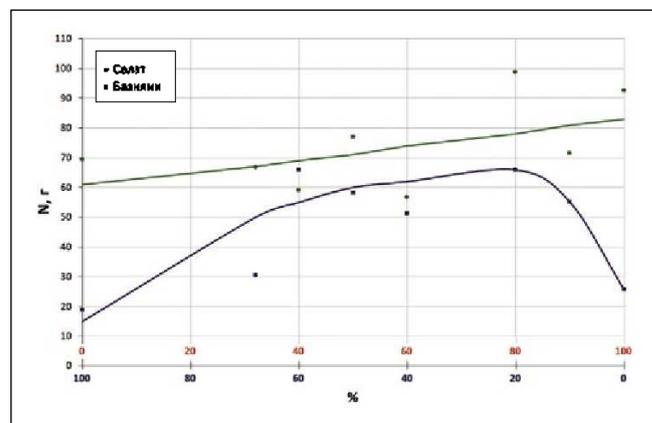


Рис. 6. Варианты спектров при «триадной оптимизации»:

1–77 % R, 12 % G, 11 % B; 2–75,2 % R, 13 % G, 11,8 % B; 3–62,4 % R, 17,7 % G, 19,9 % B; 4–49 % R, 36 % G, 15,0 % B; 5–43,6 % R, 21,5 % G, 34,9 % B; 6–30 % R, 50 % G, 20 % B; 7–27 % R, 31,1 % G, 41,9 % B; 8–17,2 % R, 13,7 % G, 69,1 % B

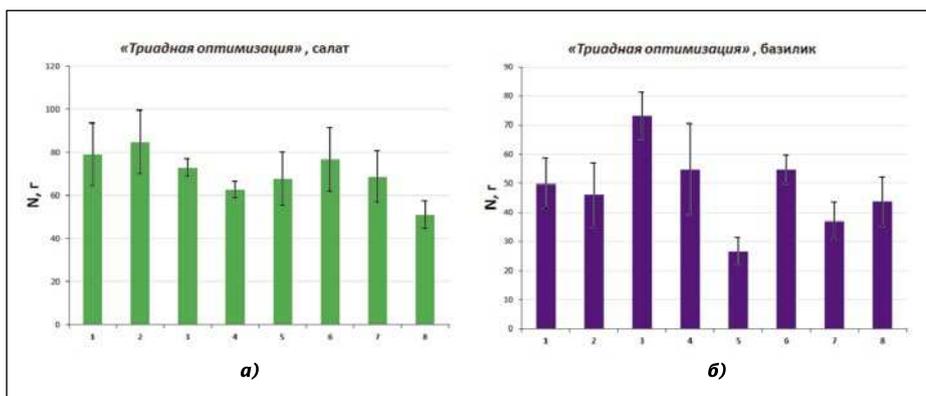


Рис. 7. Диаграммы продуктивности салата (а) и базилика (б) при «триадной оптимизации»

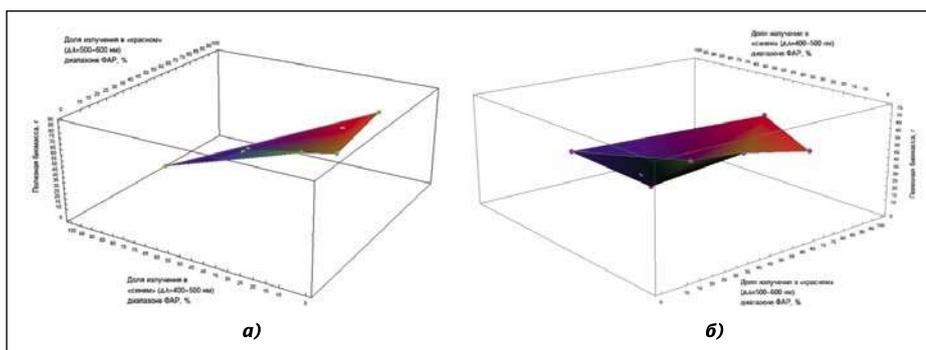


Рис. 8. 3D модели продуктивности салата (а) и базилика (б) при «триадной оптимизации»

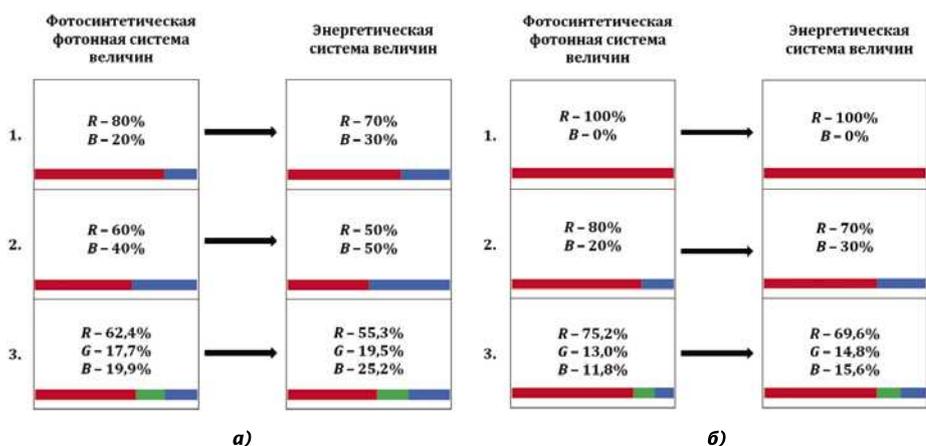


Рис. 9. Наиболее благоприятные спектральные характеристики в области ФАР для салата (а) и базилика (б)

поставить их данные с представленными в данной статье.

В одной из первых серьёзных работ, связанных с использованием ФО с СД, [5], отмечалось, что добавление к RB излучению G излучения (с помощью зелёных ЛЛ с достаточно широким спектром) при G доле в 24 % повышало N салата почти в 1,5 раза, а рост этой доли до 51 % влиял на N отрицательно.

В публикации [6] указано, что данные многих исследований о влиянии G излучения на N салатно-зеленных

растений весьма неоднозначны и колеблются от «вредное» до «весьма полезное».

В работе, выполненной специалистами Тайваньского национального университета в условиях фитотрона, салат сорта «*Boston lettuce*» выращивался при $PPFD$ 210 мкмоль/(с·м²) с фотопериодом 16 ч в течение 35 дней при облучении ФО с СД с RB и RWB (добавка белого, W) спектрами, а также под ЛЛ холодно-белого света [7]. Максимум N соответствовал RWB комбинации, ва-

риант с ЛЛ оказался на 10 % ниже, а RB комбинация показала результат на 17 % ниже максимального.

Упомянем ещё о небольшом эксперименте, проведённом в Республике Корея фирмой *Samsung* в сотрудничестве с Сеульским национальным университетом [8–9]. Салат и базилик выращивались при значении $PPFD$ 160 мкмоль/(с·м²), близком к принятому в наших ФБИ, при использовании ФО с разными вариантами спектров: $R_{44,5}G_{44,5}B_{11}$; $R_{40}G_{40}B_{20}$; $R_{79}G_{14}B_7$ и $R_{80}B_{20}$. Для салата лучшим по N оказался первый из них (с равными R и G долями и минимальной B долей, а худший результат (с на 56 % уменьшенной N) показала бинарная комбинация $R_{80}B_{20}$. При этом для базилика различия в эффективности указанных вариантов спектра излучения не превышали 15 %.

В наиболее серьёзном исследовании по воздействию на салат разноспектральных излучений в области ФАР [10] также указано на противоречивость данных разных авторов о спектральной эффективности ФАР в плане урожайности. В первую очередь это касается влияния G доли излучения. Указано также на негативное влияние на рост и развитие овощных растений уменьшения соотношения R и B долей ($R : B$) в области ФАР. В собственных ФБИ, по оригинальной методике, салат двух сортов – «*Rex*» и «*Rouxai*» – выращивался в условиях фитотрона сначала 10 дней под ФО белого света с $T_{ккл}$ 2700 К ($FR : R : G : B = 10,1 \% : 54,5 \% : 28,85 \% : 6,5 \%$) при $PPFD$ 180 мкмоль/(с·м²)². Далее растения пересаживались в ОУ с 10-ю разными спектральными вариантами (рис. 10). Отметим, что R доля излучения оставалась постоянной в абсолютном выражении – $PPFD_R$ 120 мкмоль/(с·м²), что составляло 66,7 % от полного излучения ($PPFD_{ФАР}$ и $PPFD_{ФАР+ИК}$). В последних двух вариантах использовались «тёплые» (WW) и «холодные» (EQW) ФО с полным ($FR-R-G-B$) спектром.

Результаты этих ФБИ приведены на рис. 11. Максимальная N салата «*Rex*» была достигнута в вариантах с RG (!) излучением ($R : G = 66,7 \% : 33,3 \%$), а – салата «*Rouxai*» –

² Как видим, помимо влияния ФАР оценивалось влияние на N салата ИК излучения в спектральном диапазоне 760÷800 нм (FR излучение).

при $FR-R$ излучении ($FR : R = 33 \% : 66,7 \%$).

Повышенная эффективность G излучения, установленная автором рассматриваемой статьи, позволила ему высказать предположение, что влияние G диапазона области ФАР на N салата сопоставимо с таковым для B диапазона и составляет примерно 50 % от эффективности R излучения. Кроме того в ряде случаев, при существенно различных спектральных характеристиках ФО им были получены одинаковые или предельно близкие результаты по N обоим сортам салата.

Подводя итог обсуждению собственных результатов и сравнению их с результатами зарубежных исследований по N салатно-зеленым растениям, отметим следующее:

- Результаты наших исследований и достаточно большой объём данных в цитируемых работах позволяют утверждать, что оценка совместного действия разных спектральных диапазонов ФАР на N растений, на примере салатно-зеленных культур, осложнена синергетическими (суперрадитивными) или, наоборот, антагонистическими эффектами взаимодействия, видимо, характерными для растений как сложных приёмников излучения с большим количеством фотопигментов. Иначе говоря, понятие «оптимальный спектр излучения для выращивания растений» – достаточно абстрактно и неопределённо. Даже для растений одного вида требования к благоприятному спектру, обеспечивающему максимум N , могут заметно различаться.

- Сложный характер взаимодействия фотоэнергетических и фоторегуляторных процессов у растений может приводить к получению одинаковых или близких эффектов действия (N) для существенно различающихся по спектру излучения в областях ФАР и ближней ИК. Об этом свидетельствуют данные наших ФБИ с салатом и базиликом и результаты работ других исследователей. Поэтому мы можем высказать предположение о применимости к воздействию излучения на растения понятия о **эквивифиальности**, сформированного в 1960-е гг. австрийским биологом Л. Бергаланфи. Эффект фотоэквивифиальности, как свойство саморегулирующейся системы, каковой является высшее растение, безусловно, может быть предметом дальнейших исследований.

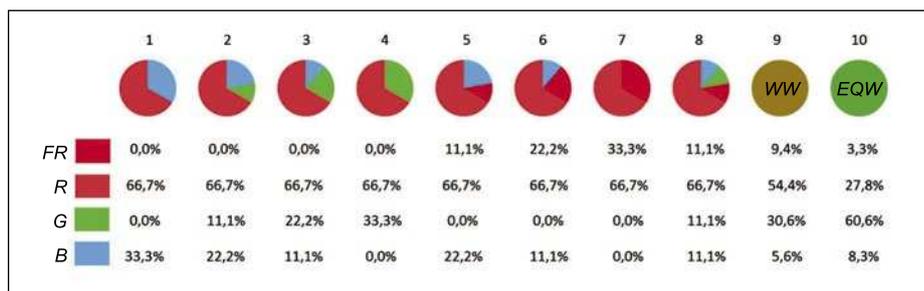


Рис. 10. Варианты опытов в работе [10] при разных спектральных комбинациях ФАР и ближней ИК области

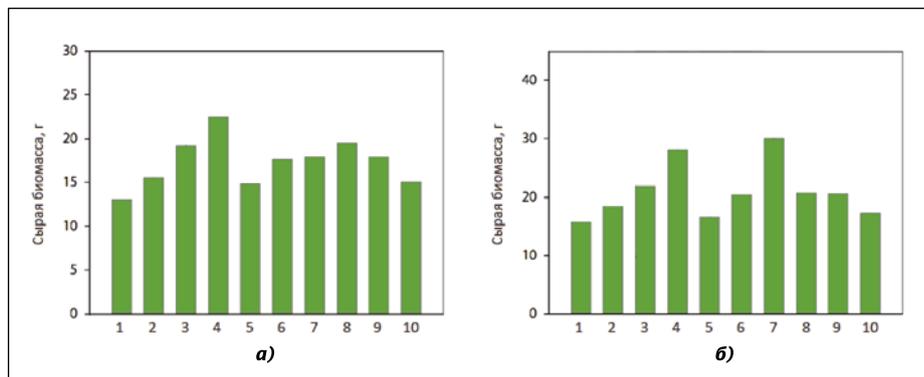
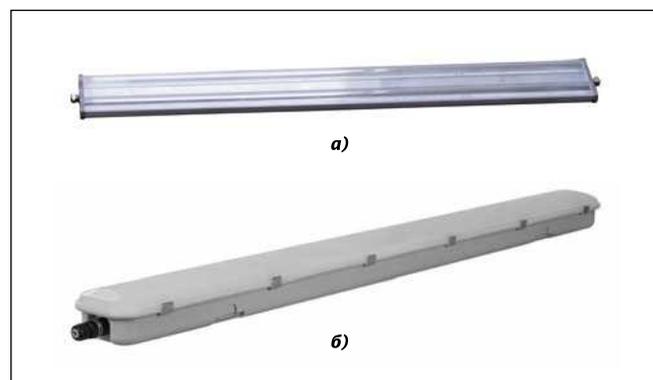


Рис. 11. Диаграммы продуктивности салатов «Rex» (а) и «Rouxi» (б) при разных спектральных комбинациях ФАР и ближней ИК области [10]

Рис. 12. Top-облучатель со светодиодами Galad «Топ Лайн Фито LED», мощность 230 Вт (а) и облучатель со светодиодами для многоярусных установок Galad «Арклайн Фито LED», мощность 30 и 60 Вт (б)



Практическая значимость результатов

В одном из основных докладов на симпозиуме «GreenSys 2019» [11] приветствовалось увеличение масштабов ФБИ растений с использованием СД техники, но при этом отмечалось, что существует некоторый разрыв между научными результатами и их использованием на практике. Отметим, что планируя настоящие ФБИ [1], мы назвали их главной задачей практическую направленность. Иначе говоря, требования к спектральным характеристикам ФО для традиционного верхнего (top) облучения салатно-зеленных растений в теплицах и для их выращивания в многоярусных вертикальных фитоустановках типа «City

Farm» должны составляться с учётом результатов настоящих ФБИ с салатом и базиликом.

Полученные нами на основе прямых экспериментов данные дают определённую «свободу выбора» разработчику облучательных приборов, позволяя определять спектральные характеристики последних не только из условия максимизации N растений, но и с учётом энергоэффективности СД, их ценовых параметров и, что совершенно необходимо, исключения вредного воздействия «синего» излучения на зрение обслуживающего персонала [12, 13]. В ряде случаев потребителем может выдвигаться ещё одно существенное для фитоустановок требование: необходимость правильного визуального восприятия зеленой про-

Основные параметры цветных светодиодов ведущих производителей

Производитель (страна)	Тип	Расчитанный минимальный <i>EPPF</i> , мкмоль/с	Доминантная длина волны, нм	Прямой ток, мА	Прямое напряжение, В	<i>EPPF</i> , мкмоль/Дж
CREE (США)	<i>XPEBPR-L1-0000-00D01</i> <i>XP-E2 Photo Red</i>	2,5	min 650 max 670	350	2,05	3,44
	<i>XPGRDY-L1-0000-00601</i> <i>XP-G3 Royal Blue</i>	2,8	min 450 max 465	350	2,82	2,83
	<i>XPEBGR-L1-0000-00F01</i> <i>XLamp XP-E Light Emitting Diode Green</i>	1,11	min 520 max 535	350	3,2	0,99
OSRAM Opto semiconductors (ФРГ)	<i>GH CSSRM3.24-V5V7-1</i> <i>Oslon Square Hyper Red</i>	5,27	min 646 max 666	700	2,1	3,52
	<i>GD CSSPM1.14-UO</i> <i>OSLON SSL 120 Deep Blue</i>	2,63	min 439 max 457	350	2,85	2,33
	<i>GD CSSRM2.14-ARAT-24-1</i> <i>Deep Blue</i>	5,25	min 444 max 457	700	2,9	2,59
Lumileds (Нидерланды)	<i>LUXEON SunPlus 20 Line</i> <i>Royal Blue</i> <i>LISP-RYL0002F00000</i>	2,25	min 445 max 455	350	2,5	2,3
	<i>LUXEON SunPlus 35 Line</i> <i>Deep Red</i> <i>LISP-DRD0002F00000</i>	2,08	min 655 max 670	350	1,95	2,9
Samsung (Республика Корея)	<i>LH351H Deep Red</i>	2,32	min 650 max 670	350	2,1	3,12
	<i>LH351H Blue</i>	2,8	min 440 max 460	350	2,86	2,8
	<i>LH351H Far Red</i>	1,96	min 720 max 740	350	1,9	2,91
Prolight Opto Technology Corporation (Тайвань)	<i>PK2N-3LDE-HSD-U Royal Blue</i>	2,84	min 448 max 458	350	2,9	2,8
	<i>PK2N-3LME-HSD-T Crimson</i>	2,64	min 650 max 670	350	2,05	3,83
	<i>PK2N-4LME-HSDL-X2 Crimson</i>	5,78	min 650 max 670	700	2,15	3,92

дукции («визуальная органолептика») с целью оценки её качества и товарного вида («окрашиваемость» листьев, отсутствие пятен, повреждений насекомыми-вредителями и т.п.).

С учётом всех этих обстоятельств проблема выбора между вариантами квазимонохроматического *R*, бинарного *RB* или *RGB* спектров может быть решена в пользу последнего как для салата, так и для базилика.

Практическая реализация основных на ФБИ требований к спектральным характеристикам ФО должна производиться с учётом уровня фотосинтетической фотонной эффективности (*EPPF*) используемых в них СД.

В табл. 4 представлены основные параметры цветных СД по собственным данным лидирующих производителей (по состоянию на середину 2019 г.).

EPPF СД имеет важнейшее значение и определяет их конкурентные преимущества перед фито-НЛВД, *EPPF* которых равен 1,8–2,1 мкмоль/Дж (у светильника с НЛВД – 1,55–1,8 мкмоль/Дж).

Из табл. видно, что ФО с квазимонохроматическими *R* СД может иметь *EPPF* до 3,3–3,4 мкмоль/Дж (с учётом электрических потерь в управляющем устройстве и оптических потерь, около 12 %), а ФО с бинарным *RB* спектром – 3,0–3,1 мкмоль/Дж.

При создании ФО с *RGB* спектром, с учётом низкой пока энергоэффективности зелёных СД (*EPPF* < 1 мкмоль/Дж) более целесообразно обеспечивать требуемую спектральную композицию ФАР с помощью комбинации синего СД с люминофором и красного СД.

Указанные подходы реализованы при создании совместно со специалистами ОАО «КЭТЗ» серии фитооблучателей для верхнего (*top*) облучения салатно-зеленных растений в традиционных теплицах, а также для выращивания тех же культур в многоярусных фитоустановках типа «City Farm» (рис. 12). Конструкция облу-

чателей позволяет реализовывать указанные выше спектральные комбинации с учётом особенностей и комплекса требований конкретного проекта.

Из выражения для критерия эффективности ОУ для фитоустановки

$EPPF_{\text{ОУ}} = PPFD_{\text{ср}} / P_1$, где $PPFD_{\text{ср}}$ – средняя $PPFD$ ценноза, мкмоль/(с·м²), и P_1 – удельная установленная электрическая мощность, Вт/м² [14], следует, что только за счёт более высокой $EPPF$ ФО достижимо снижение энергозатрат по сравнению с НЛВД не менее, чем на 40 %.

Заключение

Проведённые ФБИ определили требования к благоприятным спектрам излучения ФО с СД, обеспечивающим максимальную продуктивность салата и базилика. Существенное различие этих требований для данных культур показывает неизбежность использования экспериментального подхода к решению такого рода задач.

В связи с тем, что физические принципы СД техники позволяют выполнять выявленные данными ФБИ требования не только к благоприятному спектру, но, что не менее важно, и к уровню облучения [1], можно констатировать наличие возможности создания светотехнической технологии (как важнейшего элемента макротехнологии светокультуры конкретных растений) с компьютерным управлением хозяйственного выращивания растений («*cyber-agriculture*»).

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках проекта «Комплексные исследования в области светокультуры растений и создание высокоэффективных светодиодных фитооблучателей, обеспечивающих повышение энергоэффективности промышленных теплиц». Соглашение от 26.09.2017 г. № 14.576.21.0099 о предоставлении субсидии. Идентификатор Соглашения: 0000000007417PD20002. Уникальный идентификатор работ (проекта): RFMEFI57617X0099.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикупец Л.Б., Боос Г.В., Терехов В.Г., Тараканов И.Г. Исследование влияния излучения в различных диапазонах области ФАР на продуктивность и биохимический состав биомассы салатно-зеленых культур // Светотехника. – 2018. – № 5 – С. 6–12.

2. Arielle J. Johnson, Elliot Meyerson, John de la Parra, Timothy L. Savas, Risto Mikkulainen, Caleb B. Harper. Flavor-cyber-agriculture: Optimization of plant metabolites in an open-source control environment through surrogate modeling // PLOS ONE. – 2019. – April. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0213918> (дата обращения: 15.06.2019).

3. Koziel S., Ciaurri D.E., Leifsson L. Surrogate-Based Methods // Computational Optimization, Methods and Algorithms /Ed. by S. Koziel, Xin-She Yang. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – P. 33–59. DOI: 10.1007/978-3-642-20859-1_3 P. 33–59.

4. Shahriari B., Swersky K., Wang Z., Adams R.P., De Freitas N. Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization // Proc IEEE. – 2015. – Vol. 104, Is. 1. – P. 148–175. URL: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2494218> (дата обращения: 15.06.2019).

5. Kim H.H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red-and blue-light-emitting diodes // HortSci. – 2004. – Vol. 39. – P. 1617–1622.

6. Bugbee B. Towards an optimal spectral quality for plant growth and development: The importance of radiation capture / ActaHort 1134_1, 2016. – P. 1–12.

7. Kuan-Hung Lin, Meng-Yuan Huang, Wen-Dar Huang, Ming-Huang Hsu, Zhi-Wei Yang, Chi-Ming Yang. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata) // Scientia Horticulturae. – 2013. – Vol. 150. – P. 86–91.

8. Клейменов М. Разработки Samsung для освещения растений // Полупроводниковая светотехника. – 2019. – № 2 – С. 38–41.

9. URL: <https://e-neon.ru/novosti/razrabotki-samsung-dlja-osveshhenija-rastenij> (дата обращения: 15.06.2019).

10. Qingwu Meng. Spectral manipulation improves growth and quality attributes of leafy greens grown indoors / Phd dissertation. – Michigan State University, 2018.

11. Dieleman A., Weerheim K., Kruidhof M. Design of lighting strategies for sustainable horticulture / GreenSys 2019 – International symposium on advanced technologies and management for innovative greenhouse. URL: <https://www.greensys2019.org> (дата обращения: 05.07.2019).

12. URL: <http://www.cie.co.at/publications/position-statement-blue-light-hazard-april-23-2019> (дата обращения: 05.07.2019).

13. IEC62471:2006/CIE S009:2002 «Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes / Photobiological safety of lamps and lamp systems» (bilingual edition).

14. Прикупец Л.Б. Технологическое освещение в агропромышленном комплексе России // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 6–14



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 энергосберегающим 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