

«СВЕТОДИОДНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ» И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОКУЛЬТУРЫ РАСТЕНИЙ

Георгий Валентинович Боос^{1,2}, кандидат технических наук

Леонид Борисович Прикупец³, кандидат технических наук

Владимир Иванович Трухачёв⁴, академик РАН

Иван Германович Тараканов⁴, доктор биологических наук, профессор

Владислав Геннадьевич Терехов³, кандидат технических наук

¹НИИ «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия

²ООО МСК «БЛ ГРУПП», г. Москва, Россия

³Всесоюзный научно-исследовательский светотехнический институт имени С.И. Вавилова, г. Москва, Россия

⁴Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

E-mail: ivatar@yandex.ru

Аннотация. В статье приведен анализ радикальных преобразований в секторе растениеводства защищенного грунта агропрома России, связанных не только с резким увеличением масштабов использования технологий светокультуры растений, но и возрастающим применением фитооблучателей на основе светодиодов. Показано, что внедрение последних привело к трансформации основных представлений о возможностях искусственного освещения при светокультуре в промышленных теплицах и во многом способствовало созданию принципиально новых многоярусных автоматизированных систем управляемого выращивания растений. С использованием возможностей светодиодов на основе детальных фотобиологических исследований практического направления, выполненных авторами, впервые сформулированы обоснованные требования к оптимальным светотехническим характеристикам облучательных установок для светокультуры салата и базилика. Апробированная оригинальная методика может помочь в решении аналогичных задач оптимального выращивания других видов растений. В статье приводятся материалы о созданной нормативной и метрологической базе для светодиодного фитоосвещения, предлагаются необходимые меры для ускорения массового внедрения светодиодных систем в современные теплицы со светокulturой растений.

Ключевые слова: теплицы, растениеводство защищенного грунта, светокультура, светодиоды, облучательные установки, натриевые лампы высокого давления, фитооблучатели, вертикальные теплицы

“LED REVOLUTION” AND NEW OPPORTUNITIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF PLANT LIGHT CULTURE

G.V. Boos^{1,2}, PhD in Engineering Sciences

L.B. Prikupets³, PhD in Engineering Sciences

V.I. Trukhachev⁴, Academician of the RAS

I.G. Tarakanov⁴, Grand PhD in Biological Sciences, Professor

V.G. Terekhov³, PhD in Engineering Sciences

¹NRU «Moscow Energy Institute», Moscow, Russia

²LLC MSK “BL GROUP”, Moscow, Russia

³S.I. Vavilov All-Union Scientific Research Lighting Engineering Institute, Moscow, Russia

⁴Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

E-mail: ivatar@yandex.ru

Abstract. An analysis of radical developments in the greenhouse crop production in Russia is presented; it is based both on the increase of horticultural lighting technologies application and LED systems implementation. The latter resulted in the transformation of our basic ideas about the possibilities of artificial lighting in the industrial greenhouses and triggered creation of the new generation of vertical farming systems for the controlled environment agriculture. The advantages of LEDs application were studied in the series of photobiological experiments; as the result, the light protocols for the lettuce and sweet basil plants production were developed for the first time. The approved original methodology of such studies can be used to solve similar problems of optimal cultivation in other crops. The article also reports on the development of metrological base for LED plant artificial lighting. The necessary measures to accelerate the mass implementation of LED systems in modern greenhouses with horticultural lighting are suggested.

Keywords: greenhouses, crop production, protected soil, horticultural lighting, LEDs, irradiation installations, sodium lamps, phytoemitters, vertical farms

Динамичное развитие светодиодных систем освещения, получившее название «светодиодная революция», привело в последнее десятилетие к быстрой замене традиционных световых приборов с лампами накаливания и газоразрядными лампами на новые с твердотельными источниками света. Световые при-

боры со светодиодами (СД) значительно энергоэффективнее своих предшественников, имеют срок службы, исчисляемый десятками тысяч часов, обладают высоким экологическим качеством.

Современное растениеводство защищенного грунта, базирующееся на использовании искусственного

освещения (светокультура) — одна из приоритетных областей применения светодиодных облучателей.

В настоящее время в стране продолжается период активного строительства новых теплиц, оснащенных современным оборудованием и технологиями. На начало 2021 года общая площадь теплиц в России достигла 3,0 тыс. га, а доля новых теплиц выросла до 60%. [10] Особенность происходящих радикальных преобразований в тепличном секторе — постепенное нарастание доли теплиц со светокультурой в новых объектах до 100%.

Тенденция перехода к круглогодичному выращиванию овощей в теплицах в условиях светокультуры характерна для всего мира. С 2016 до 2022 года глобальный рынок тепличного освещения должен увеличиться на 30%. [11] В России площади теплиц со светокультурой за неполный указанный период по нашим оценкам выросли более чем в три раза (рис. 1). Пропорционально быстрому увеличению площадей со светокультурой становится больше облучателей в теплицах (световые точки) и растет потребление электроэнергии. Количество фитооблучателей с натриевыми лампами высокого давления (НЛВД) мощностью 600 и 1000 Вт с 2016 по 2020 год в стране удвоилось и превысило 2 млн шт.

Промышленное растениеводство в России представляет собой самый энергоемкий и энергоэффективный сектор применения светотехнического оборудования. Основные характеристики современной светокультуры растений: удельная электрическая мощность (P_e) облучательных установок (ОУ) с НЛВД — до 250 Вт/м², уровень освещенности (облученность) — $E = 10...30$ клк (плотность потока фотонов — 130...400 мкмоль/м²·с), среднегодовой расход электроэнергии на 1 кг продукции до 15 кВт·ч, время работы ОУ в год — до 5000 ч. Количество электроэнергии, потребляемой на технологическое освещение теплиц с 2010 года к началу 2021 увеличилось не менее чем в три раза до уровня 6,0 млрд кВт·ч/год. Чтобы подчеркнуть уникальность энергоемкости светокультуры в масштабе всей страны отметим, что на площади сооружений защищенного грунта 3,7×3,7 км² расходуется электроэнергия почти столько же, сколько в наружном освещении городов России.

Светодиодное фитоосвещение и новые возможности светокультуры растений.

Радикальные изменения на рынке тепличного освещения происходят на фоне быстрого развития СД-источников излучения и постепенного замещения ими облучателей с НЛВД в теплицах. [6] Данные рисунка 2 характеризуют динамику роста эффективности представляющих интерес для светокультуры цветных (R — красный, G — зеленый и B — синий), а также белых СД ведущих зарубежных фирм. В нашей стране начато серийное производство первых отечественных СД для фитооблучателей в ООО МСК «БЛ ГРУПП». По эффективности светодиодные облучатели значительно превосходят традиционные с НЛВД, замена которых в ОУ теплиц способна обеспечить экономию электроэнергии на 40...50% (рис. 3), что в масштабе всего сектора теплиц России может составить 2,5...3,0 млрд кВт·ч/год.

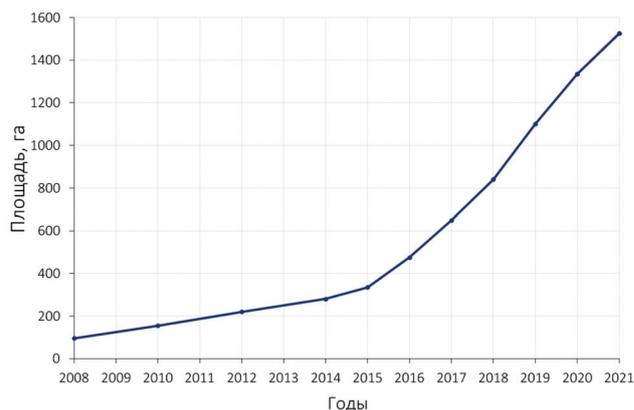


Рис. 1. Динамика роста площади теплиц со светокультурой в России.

СД-фитооблучатели отличаются высоким сроком службы (до 50 000 ч) и стабильностью излучательных характеристик. В результате продолжающихся во ВНИСИ имени С.И. Вавилова испытаний установлено, что спад фотосинтетического фотонного потока (PPF) красно-синих (R — B) облучателей к 30 тыс. ч горения не превысил 10%.

Существует три направления конструирования СД-фитооблучателей и эксплуатации ОУ светокультуры растений в сооружениях защищенного грунта: для традиционного верхнего (top), междурядного (interlighting) освещения и освещения многоярусных фитоустановок (вертикальные теплицы). Все три типа СД-фитооблучателей с параметрами соответствующими мировому уровню разработаны ВНИСИ имени С.И. Вавилова совместно с МСК «БЛ ГРУПП» и внедрены в серийное производство.

Многоярусная автоматизированная фитоустановка (МАФУ).

Появление и быстрое распространение МАФУ (вертикальная ферма или сити-ферма) связано с СД-излучателями, не имеющими конкуренции в таких установках. Ртутьсодержащие люминесцентные лампы нельзя использовать в МАФУ по экологическим соображениям, а НЛВД — из-за большой концентрации мощности и высокой температуры на колбе лампы.

Как прообраз будущих полностью автоматизированных фабрик растений, МАФУ разрабатывают с учетом последних достижений в светофизиологии растений и светотехники. Возможности создания особого спектра в области ФАР при высоком энергетическом уровне излучения, простое и эффективное регулирование спектра и управления уровнем облученности в ОУ обеспечивают хорошие перспективы для инновационных систем выращивания растений. Применение МАФУ помогло максимально приблизить продукцию к потребителю. Вначале на них выращивали салатные растения, позднее стали осваивать производство ягодных культур, томатов, огурцов, перцев, баклажанов, лекарственных растений и даже саженцев древесных культур. Кроме крупных сельскохозяйственных предприятий принцип вертикального земледелия (локальные МАФУ) используют в супермаркетах, ресторанах,

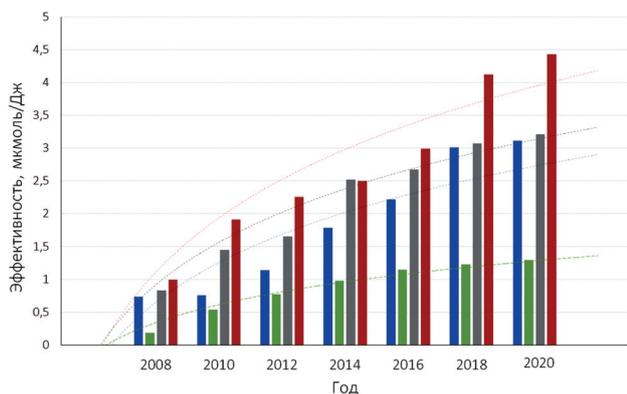


Рис. 2. Динамика роста эффективности цветных и белых светодиодов ведущих мировых производителей (2008–2020 годы). Серый столбец – белые СД.

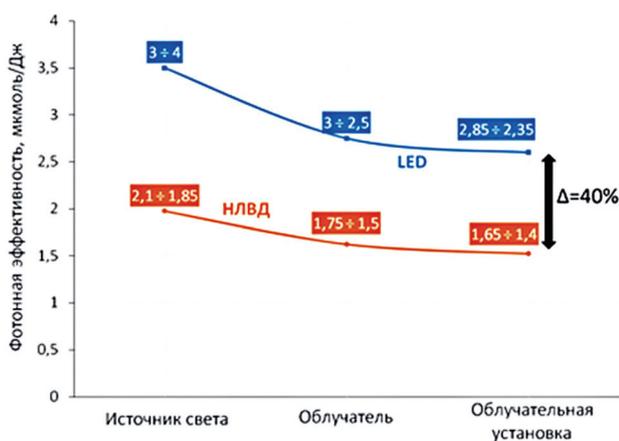
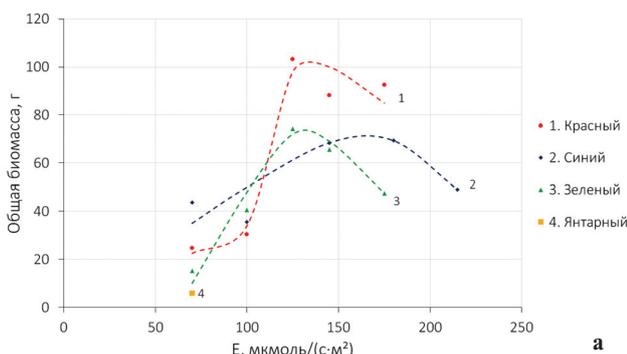


Рис. 3. Эффективность искусственного освещения при светокультуре растений.

медицинских станциях, дошкольных учреждениях и так далее.

Во ВНИСИ на МАФУ с 2019 года средняя урожайность салата составила 0,15 кг/м² в день или 55 кг/м² в год, что на 30% выше, чем в теплице. При этом затраты электроэнергии на 1 кг – 9,6 кВт·ч.

С учетом достижимой в условиях фитотрона продуктивности пшеницы 150 кг/м² в год [3], весь ее годовой урожай в России (90 млн т) может быть выращен на фабрике с десятью технологическими ярусами на площади основания в виде условного квадрата со стороной 15 км. [8]



Во всем мире МАФУ рассматривается как интеллектуальная инновация, на платформе которой возможно апробировать роботизированное сельскохозяйственное производство будущего с компьютерным управлением IoT (интернет вещей), сбором данных в условиях реального времени о состоянии растений и параметрах среды, передачей их в «центральный облачный мозг» и после соответствующей обработки обеспечением оптимизации процесса выращивания растений с помощью «искусственного интеллекта».

СД–фитооблучатели в теплицах.

Несмотря на заметные объемы внедрения СД в тепличные ОУ (с 2017 года в отечественных теплицах эксплуатируется около 400 тыс. СД-облучателей) этот процесс находится в начальной стадии. СД-облучатели установлены на части площадей лишь в десяти крупных тепличных комбинатах страны. Основной сдерживающий фактор – их высокая стоимость по сравнению с натриевыми светильниками. Техничко-экономический анализ показывает, что окупаемость затрат на ОУ с СД-облучателями возможна не ранее шести-семи лет эксплуатации. [9]

Для продвижения СД в теплице можно рассмотреть гибридные (НЛВД + СД) облучательные установки, при этом СД-облучатели чаще используют для междурядного освещения растений. С учетом преимуществ по энергоэффективности СД-решений возможны два основных принципа конструирования указанных гибридных ОУ: 1) обеспечение прямой экономии электроэнергии на уровне 30...50% при постоянной и соответствующей ОУ с НЛВД облученности; 2) сохранение постоянными и соответствующими ОУ с НЛВД затрат на электроэнергию при увеличении уровня облученности и продуктивности растений.

С учетом того, что массовое использование СД-облучателей в промышленных теплицах помогает решать задачи крупномасштабного энергосбережения важно разработать эффективные меры стимулирования процесса замены натриевых облучателей на светодиодные.

Вопросы стандартизации и фотометрии в СД-освещении.

Для развития светокультуры и СД-освещения необходима соответствующая нормативная база.

В связи с созданием и появлением в теплицах и других культивационных сооружениях разноспек-

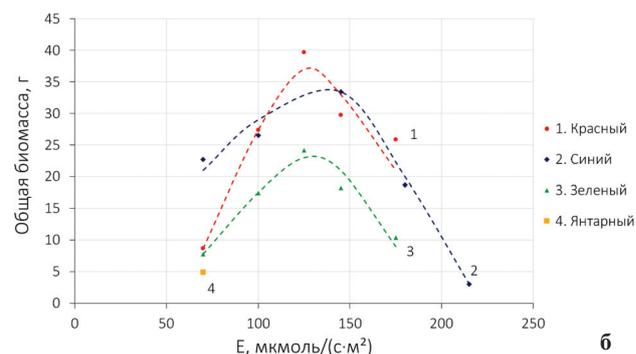


Рис. 4. «Световые кривые» продуктивности для растений салата *Ландау* (а) и базилика *Русский гигант* (б).

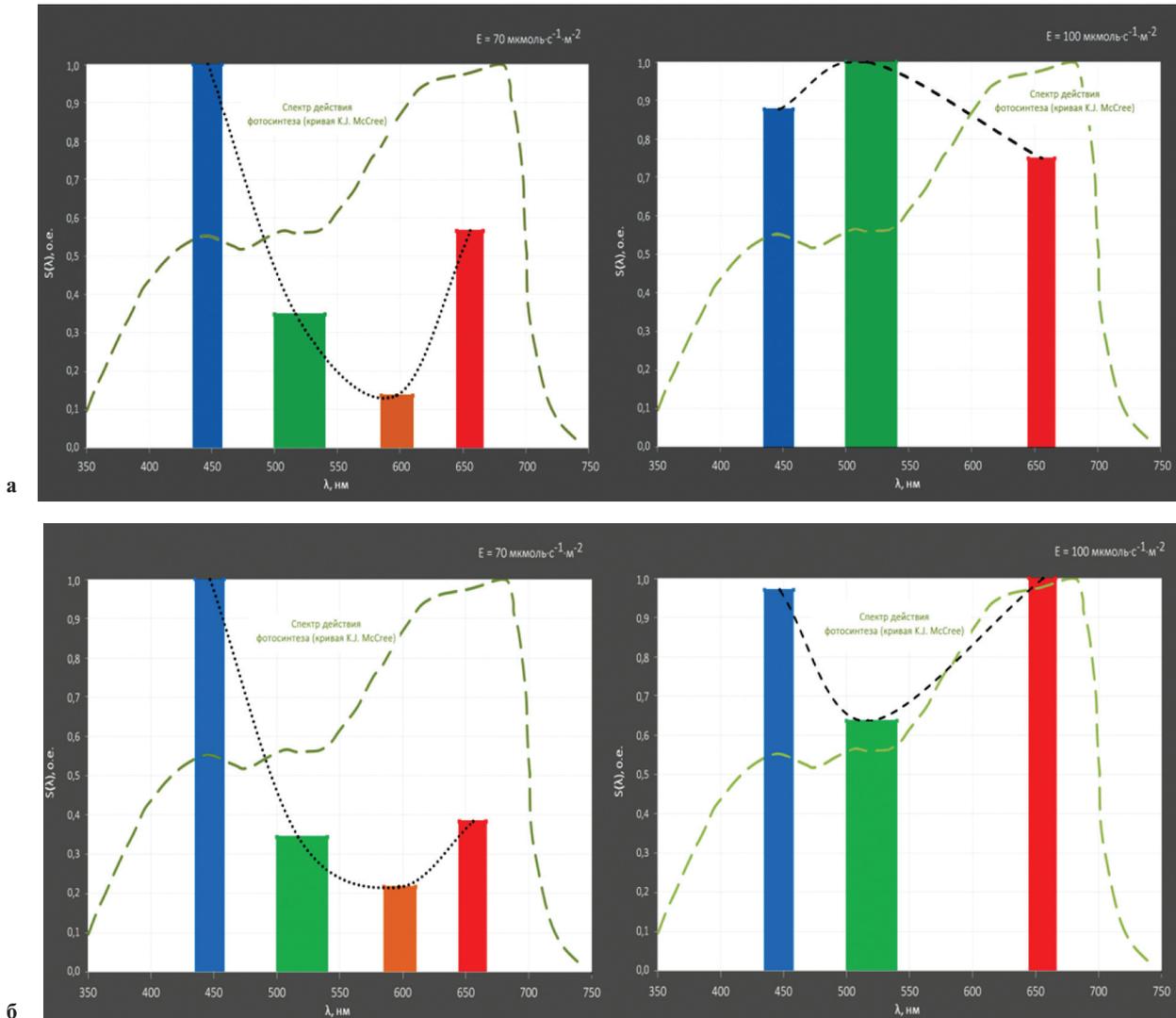


Рис. 5. «Грубые» спектры действия продуктивности для растений салата (а) и базилика (б).

тральных излучателей, действующих, в том числе, на границах видимого диапазона спектра, пользоваться системой световых величин для оценки эффективности СД-изделий стало невозможно.

За последние пять лет сотрудники ВНИСИ имени С.И. Вавилова разработали стандарты [1, 2, 4, 5], регламентирующие вопросы нормирования и контроля фотосинтетического потока фотонов при производстве СД-фитооблучателей и измерений облу-

ченности в теплицах и других фитоустановках. Необходимым элементом для дальнейшего продвижения СД-фитоосвещения стал стандарт по терминологии [2], как основа для подготовки аналогичных международных нормативных документов.

Впервые предпринята попытка с использованием данных собственных исследований предложить нормы искусственного освещения для зеленных культур. [5, 8]

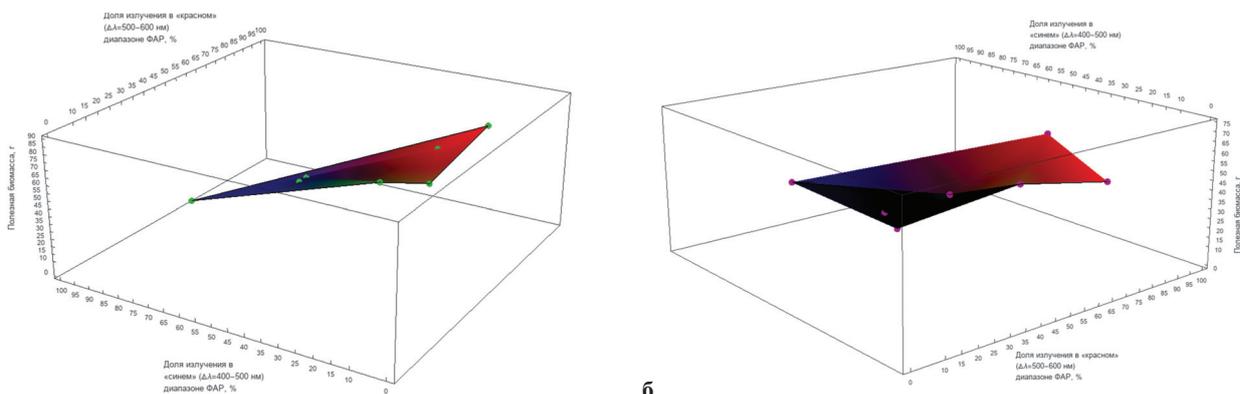


Рис. 6. 3D модели продуктивности растений салата (а) и базилика (б) при «триадной» оптимизации.

Благодаря стандартам [1, 2, 4, 5], в отечественную практику тепличного освещения введена новая система фотосинтетических фотонных величин, получены необходимые интегральные соотношения, устанавливающие связь между энергетическими, световыми и фотонными величинами при фотометрических измерениях в ОУ для светокультуры растений.

Фотобиологические исследования (ФБИ) с использованием СД-облучателей для оптимизации светотехнических параметров ОУ.

Широкие возможности вариации спектральных характеристик СД стимулировали ФБИ во всем мире. Уже получены интересные результаты о влиянии спектра ФАР, уровня облученности и фотопериода на продуктивность и синтез важнейших соединений химического состава у растений.

Представлены методика и результаты выполненных авторами настоящей статьи исследований на салатно-зеленных культурах в условиях фитотрона Лаборатории искусственного климата РГАУ-МСХА. [7] Для растений указанного класса (салат *Ландау* и базилик *Русский гигант*) в широком диапазоне облученности — 70...250 мкмоль/с·м² получены «световые кривые» продуктивности для излучения основных диапазонов ФАР, подтверждающие приоритетное значение красного диапазона (рис. 4).

Реакция растений (продуктивность) неаддитивно меняется от спектрального состава и облученности. Спектр действия продуктивности, даже для вегетативных растений, зависит от уровня облученности и должен оцениваться по двумерным шкалам (λ , E) (рис. 5). Инвариантного спектра действия продуктивности культур (аналогично спектру действия фотосинтеза по McCree [12]) не существует.

Большая часть проведенных ФБИ посвящена задаче определения оптимальной с точки зрения продуктивности растений спектральных RB (красно-синия) и RGB (красно-зелено-синия) комбинаций ФАР. [8] Результаты исследований на основе большого числа экспериментальных данных позволили определить по три спектральные комбинации для каждой культуры с однозначным приоритетом красного диапазона ФАР для салата и более сбалансированного спектрального распределения ФАР с обязательным добавлением синего и даже зеленого для базилика (рис. 6).

В связи с тем, что физические принципы СД-техники позволяют реализовать выявленные на основе детальных ФБИ требования не только к благоприятному спектру, но и уровню облученности [7], можно создавать светотехническую технологию, как важнейший элемент макротехнологии светокультуры конкретных растений, с компьютерным управлением их хозяйственного выращивания (cyber-agriculture). При этом подбор оптимальных световых режимов («световые рецепты») — одно из важнейших направлений исследований в области интеллектуальных технологий интенсивного выращивания растений.

Дальнейшее развитие систем СД-освещения связано с разработкой протоколов управления, обеспечивающих точную настройку и автоматиче-

скую коррекцию параметров освещения во время вегетации растений. Необходимы принципиально новые подходы, основанные на возможности эффективного регулирования их фотосинтетической активности и продукционного процесса, широком использовании современных цифровых технологий (компьютерное зрение и машинное обучение, искусственный интеллект, интернет вещей). Создание, практическое применение комплекса программно-аппаратных решений и роботизированных интеллектуальных подходов для выращивания сельскохозяйственных растений в закрытых системах («умные теплицы»), которые могут значительно снизить производственные затраты и повысить производительность труда, — одно из ключевых направлений в развитии передовых технологий растениеводства. В РГАУ-МСХА, НЦМУ «Агротехнологии будущего» в содружестве с ВНИСИ имени С.И. Вавилова, а также созданным на его базе НПЦ «Светокультура» проводятся исследования в рамках проекта «Разработка наукоемких технологий интенсивного культивирования растений («умная» сити-ферма). [13]

Продолжение исследований предполагает накопление данных по фенотипированию целевых культур на анализирующих фонах (световые режимы), а также разработку адаптированной к системам интенсивного культивирования программы изучения растений и посевов на основе методов анализа изображений с использованием подходов компьютерного зрения и машинного обучения (виртуальная сити-ферма, управляющая реальной).

Заключение. Для решения указанных задач важна поддержка междисциплинарного научно-технического сотрудничества, которая позволила авторам настоящей статьи апробировать новые методики, создать технические средства и получить результаты, имеющие фундаментальное, теоретическое и практическое значение.

Следующий этап после проведенных фотобиологических исследований в фитотроне — пилотные испытания СД-систем фитооблучения в теплицах.

С учетом большого потенциала и высокого экологического эффекта, достигаемого при замене существующих систем фитооблучения с НЛВД на светодиодные, необходимо рассмотреть на федеральном и региональном уровнях возможность стимуляции процесса перехода на светодиодное освещение в теплицах, в том числе, начиная с гибридных облучательных установок. Важное значение может иметь освоение производства отечественных фитосветодиодов, как основного фактора снижения себестоимости облучателей и импортозамещения зарубежных аналогов.

На наш взгляд, комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по обеспечению инновационных междисциплинарных исследований, созданию высокоэффективных светотехнических средств для светокультуры растений и продвижению их на рынок отечественных сооружений защищенного грунта может найти отражение в Федеральной программе развития сельского хозяйства России на 2019–2025 годы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ Р 57671-2017. Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия. Введ. 2017-12-01. М.: Стандартинформ, 2017.
- ГОСТ Р 58461-2019. Освещение растений в сооружениях защищенного грунта. Термины и определения. Введ. 2020-01-01. М.: Стандартинформ, 2019.
- Лисовский Г.М., Долгушев В.А. Очерки частной светокультуры растений. Новосибирск: Изд. «Наука», 1986.
- ПНСТ 211-2017. Облучение растений светодиодными источниками света. Методы измерений. Введ. 2017-12-01. М.: Стандартинформ, 2017.
- ПНСТ 410-2020. Светокультура растений. Нормы искусственного освещения для зеленых культур. Введ. 2021-01-01. М.: Стандартинформ, 2020.
- Прикупец Л.Б. Светодиоды в тепличном освещении: возможности и реальность // Светотехника. 2019. Специальный выпуск. Тема номера: «Международная научно-техническая конференция по применению светодиодных фитооблучателей». С. 8–12.
- 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-зеленных культур // Светотехника. 2018. № 5. С. 6–12.
- Прикупец Л.Б., Боос Г.В., Терехов В.Г., Тараканов И.Г. Оптимизация светотехнических параметров при светокультуре салатно-зеленных растений с использованием светодиодных излучателей // Светотехника. 2019. № 4. С. 6–13.
- Пчелин В.М., Макарова И.Е. Оценка состояния и перспектив развития систем облучения в современных тепличных комплексах // Светотехника. 2018. № 1. С. 23–27.
- Ситников А.В. Основные итоги и перспективы развития защищенного грунта // Теплицы России. 2021. № 1. С. 9–13.
- Smallwood P. Tracking the Horticulture SSL Market and Technology // Horticultural Lightning Conference – USA. Denver, Colorado. 2017.
- McCree K.J. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants // Agric. Meteorology. 1972. P. 192–216.
- Tarakanov I.G., Tovstyko D.A., Lomakin M.P. et al. Effects of light spectral quality on the photosynthetic activity, biomass production, and carbon isotope fractionation in lettuce, *Lactuca sativa* L., plants. // Plants. 2021. 10/x. <https://doi.org/10.3390/>

REFERENCES

- GOST R 57671-2017. Pribory obluchatel'nye so svetodiodnymi istochnikami sveta dlya teplic. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Vved. 2017-12-01. M.: Standartinform, 2017.
- GOST R 58461-2019. Osveshchenie rastenij v sooruzheniyah zashchishchennogo grunta. Terminy i opredeleniya. Vved. 2020-01-01. – M.: Standartinform, 2019.
- Lisovskij G.M., Dolgushev V.A. Ocherki chastnoj svetokul'tury rastenij. Novosibirsk: Izd. «Nauka», 1986.
- PNST 211-2017. Obluchenie rastenij svetodiodnymi istochnikami sveta. Metody izmerenij. Vved. 2017-12-01. M.: Standartinform, 2017.
- PNST 410-2020. Svetokul'tura rastenij. Normy iskusstvennogo osveshcheniya dlya zelenykh kul'tur. Vved. 2021-01-01. M.: Standartinform, 2020.
- Prikupets L.B. Svetodiody v teplichnom osveshchenii: vozmozhnosti i real'nost' // Svetotekhnika. 2019. Special'nyj vypusk. Tema nomera: «Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya po primeneniyu svetodiodnykh fitoobluchatelej». S. 8–12.
- Prikupets L.B., Boos G.V., Terekhov V.G., Tarakanov I.G. Issledovanie vliyaniya izlucheniya v razlichnykh diapazonah oblasti FAR na produktivnost' i biokhimicheskij sostav biomassy salatno-zelennykh kul'tur // Svetotekhnika. 2018. № 5. S. 6–12.
- Prikupets L.B., Boos G.V., Terekhov V.G., Tarakanov I.G. Optimizaciya svetotekhnicheskikh parametrov pri svetokul'ture salatno-zelennykh rastenij s ispol'zovaniem svetodiodnykh izluchatelej // Svetotekhnika. 2019. № 4. S. 6–13.
- Pchelin V.M., Makarova I.E. Ocenka sostoyaniya i perspektiv razvitiya sistem oblucheniya v sovremennykh teplichnykh kompleksah // Svetotekhnika. 2018. № 1. S. 23–27.
- Sitnikov A.V. Osnovnye itogi i perspektivy razvitiya zashchishchennogo grunta // Teplicy Rossii. 2021. № 1. S. 9–13.
- Smallwood P. Tracking the Horticulture SSL Market and Technology // Horticultural Lightning Conference – USA. Denver, Colorado. 2017.
- McCree K.J. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants // Agric. Meteorology. 1972. P. 192–216.
- Tarakanov I.G., Tovstyko D.A., Lomakin M.P. et al. Effects of light spectral quality on the photosynthetic activity, biomass production, and carbon isotope fractionation in lettuce, *Lactuca sativa* L., plants. // Plants. 2021. 10/x. <https://doi.org/10.3390/>