

СТАТЬЯ

УДК 635.52:621.321
DOI 10.17513/use.38242

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫРАЩИВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ САЛАТА

¹Долгих П.П., ²Трепуз С.В., ¹Град Э.Я., ¹Солохина Е.Ю., ³Сенкевич О.В., ⁴Хусенов Г.Н.

¹ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»,
Ачинский филиал, Ачинск, e-mail: dpp10@yandex.ru;

²ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», Красноярск, e-mail: strepuz@mhd.center;

³ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Красноярск, e-mail: senk-olesya@mail.ru;

⁴ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», Красноярск, e-mail: husenov1987@inbox.ru

Аннотация. В статье представлены технические решения по повышению эффективности выращивания растений в компактных установках с использованием искусственного облучения. Рассматривается регуляторная роль излучения в области фотосинтетически активной радиации, осуществляемая через воздействие на систему пигментов путем управления спектральными характеристиками облучателя. Целью исследований являлась разработка технологии светодиодной досветки с различным спектральным составом излучения для выращивания салата в вегетационных установках. Были применены методы моделирования светодиодных модулей путем привязки их к спектру поглощения хлорофиллов А и В, к функции спектральной чувствительности растений по К.Д. МакКри, к функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения. Для оценки накопления макро- и микроэлементов в зависимости от спектрального состава излучения были применены методики биохимического анализа. Получены результаты фотобиологических исследований по продуктивности салата, выращенного в условиях вегетационной установки с облучением светодиодными излучающими модулями, созданными по технологии «синий + красный» спектр в комбинации со светодиодами белого света в различном соотношении. Было установлено, что применение облучателей с более ровным спектром излучения, с приблизительным процентным соотношением синий – 30, белый – 30, красный – 40 дает значительное увеличение урожайности (8–15%) для салатов сортов Крилда и Ауфона, по сравнению с другими технологиями. Определена реакция растений по показателям накопления макро- и микроэлементов в зависимости от сорта, позволившая установить в качестве оптимальных технологических параметров светодиодной досветки излучение в функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения, при норме облученности 160 мкмоль/(м²·с) и комбинации фотопериода свет/темнота – 16/8 ч.

Ключевые слова: вегетационная установка, технологии облучения, светодиодные облучатели, спектральный состав излучения, урожайность, качество растениеводческой продукции

Исследование выполнено при финансовой поддержке Краевого фонда науки в рамках научного проекта «Разработка системы автоматизированного управления процессом выращивания растений в защищенном грунте для северных территорий».

INFLUENCE OF ELECTROTECHNOLOGICAL IRRADIATION PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF GROWING DIFFERENT VARIETIES OF LETTUCES

¹Dolgikh P.P., ²Trepuz S.V., ¹Grad E.Ya., ¹Solokhina E.Yu., ³Senkevich O.V., ⁴Khusenov G.N.

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, Achinsk branch, Achinsk, e-mail: dpp10@yandex.ru;

²LLC RPC Magnetic Hydrodynamics, Krasnoyarsk, e-mail: strepuz@mhd.center;

³Krasnoyarsk State Medical University of Ministry of Health Care of the Russian Federation, Krasnoyarsk, e-mail: senk-olesya@mail.ru;

⁴Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, e-mail: husenov1987@inbox.ru

Annotation. The paper presents technical solutions to increase the efficiency of growing plants in compact installations using artificial irradiation. The regulatory role of radiation in the field of photosynthetically active radiation carried out through the effect on the pigment system by controlling the spectral characteristics of the irradiator was considered. The purpose of the research was to develop a technology of LED illumination with different spectral composition of radiation for growing lettuce in vegetation plants. Methods of modeling LED modules were applied by linking them to the absorption spectrum of chlorophylls A and B, the spectral sensitivity function of plants according to K. J. McCree, and the spectral distribution function of the intensity of scattered solar radiation. To assess the accumulation of macro- and microelements depending on the spectral composition of radiation, methods of biochemical analysis were applied. We conducted photobiological studies on the productivity of lettuce grown in an installation with irradiation involving LED emitting modules created using the “blue+red” spectrum technology in combination with white light LEDs in different ratios. As a result, we found that the use of irradiators with a more even radiation spectrum with an approximate percentage ratio of blue – 30, white – 30,

red – 40 gives a significant increase in yield (8%–5%) for salads of Krylda and Auvona varieties, compared with other technologies. The reaction of plants according to the indicators of accumulation of macro-and microelements depending on the variety was determined to establish radiation as a function of the spectral distribution of the intensity of scattered solar radiation as optimal technological parameters of supplementary LED lighting, with an irradiation rate of 160 mmol/(m²·s) and a combination of light/dark photoperiod – 16/8 hours.

Keywords: vegetation plant, irradiation technologies, LED irradiators, spectral composition of radiation, yield, quality of plant products

The research was carried out with the financial support of the Regional Science Foundation within the framework of the scientific project “Development of an automated control system for the process of growing plants in protected soil for the northern territories”.

Тепличная промышленность постоянно разрабатывает новые стратегии и технологии для увеличения урожайности, снижения любого связанного с этим негативного воздействия на окружающую среду и адаптации к новым требованиям рынка. Поэтому технологии беспочвенного выращивания, автоматический контроль над факторами, которые составляют микроклимат внутри теплицы, создание вертикальных агроэкосистем, которые могут быть расположены в городской среде, и другие перспективные направления находятся в постоянном развитии. Основным оборудованием в данных технологиях являются облучательные установки с высокой эффективностью в области фотосинтетически активной радиации (ФАР) и возможностью динамического регулирования характеристик [1].

На сегодня технологии управления спектром с помощью светодиодных облучателей учитывают в основном низкоэнергетическую реакцию вспомогательных фотопигментов растений [2]. Притом за основу принимаются две основные стратегии формирования спектра фитосветильника: учет целевого спектра поглощения хлорофиллов А и В [3, 4] или использование в качестве целевой функции спектральной чувствительности растений по К.Дж. МакКри [5]. Затем в результате фотобиологических исследований получают световые кривые по накоплению хозяйственно полезной биомассы фитоценозами.

Авторами была разработана технология светодиодной досветки зеленных культур, в которой устранены указанные недостатки. Основные отличия заключаются в том, что первоначально моделируются в программном приложении светодиодные модули с различным спектром излучения, привязывая их к спектру поглощения хлорофиллов А и В, к функции спектральной чувствительности растений по К.Дж. МакКри, к функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения. Затем на их базе создаются облу-

чатели с определенным фотосинтетическим потоком фотонов; после этого в результате фотобиологического эксперимента определяются целевые технологические параметры выращивания и наконец формируются требования к спектру источников ОИ для конкретного сорта растения [6].

Цель исследования – разработка технологии светодиодной досветки с различным спектральным составом излучения для выращивания салата в вегетационных установках.

Материалы и методы исследования

Для начала, на основе анализа энергетических и биологических основ светодиодной досветки, оценивались существующие стратегии формирования спектра фитосветильников. Затем разрабатывался программный продукт, и на его основе, применяя методы моделирования, формировался ряд светодиодных модулей путем привязки к спектру поглощения хлорофиллов А и В, к функции спектральной чувствительности растений по К.Дж. МакКри, к функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения [6]. Далее эмпирическим путем выявлялись, с учетом видовых особенностей растений, существенные различия в их реакции на спектральный состав воздействующего излучения [1]. В конечном итоге разрабатывались практические рекомендации по применению результатов исследования и описывались перспективы дальнейших исследований.

Авторами был разработан в приложении Excel калькулятор, позволяющий моделировать светодиодные модули. Калькулятор содержит три основных окна (рис. 1).

Работа калькулятора происходит по следующей схеме. Сначала задается световой поток, например 3666 лм, который с помощью встроенной функции фотосинтезного потока переводит его в поток ФАР. Если излучение белого цвета, то значение потока будет равно 11,8 Вт. На рис. 1, б, будет отображена кривая, показывающая спектр данного излучения.

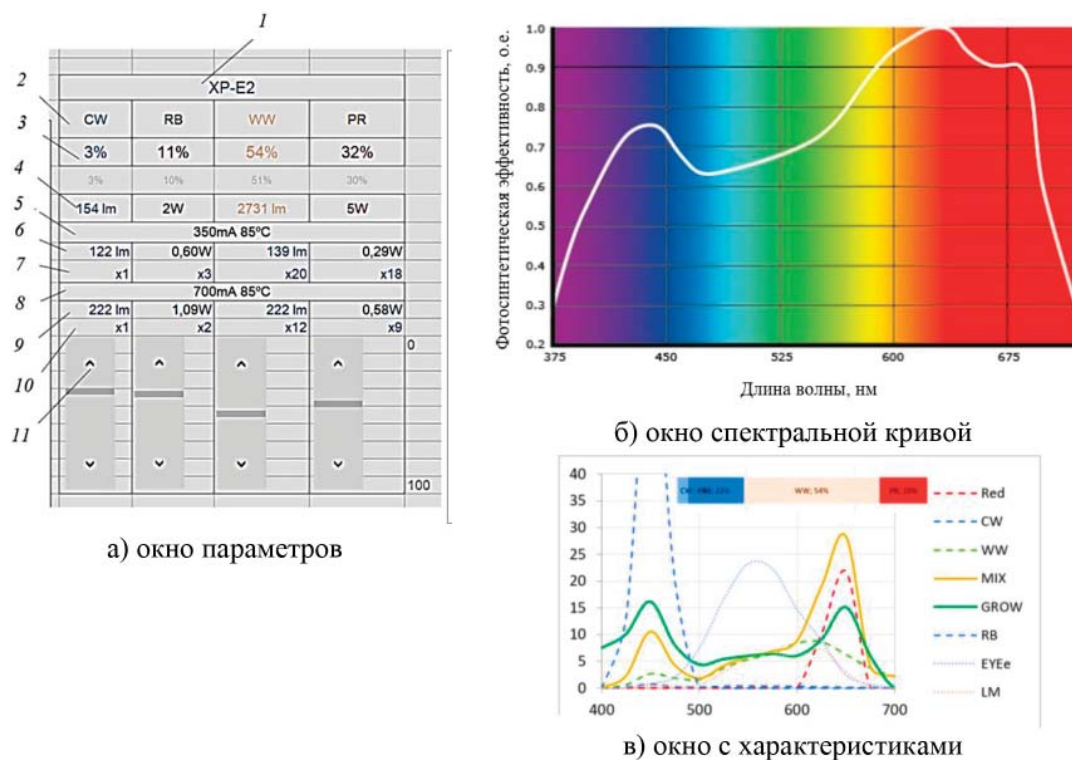


Рис. 1. Рабочие окна калькулятора светодиодного облучателя: 1 – марка светодиода; 2 – цвет излучения; 3 – процент в общем излучении; 4 – поток по бину; 5 – ток 350 мА; 6 – значение потока при токе 350 мА; 7 – количество светодиодов в бине при токе 350 мА; 8 – ток 700 мА; 9 – значение потока при токе 700 мА; 10 – количество светодиодов в бине при токе 700 мА; 11 – ползунок для регулирования параметров

На рис. 1, в, кривые «синего» и «красно-го» излучений не будут иметь явных пиков, а будут показывать только содержание синей и красной составляющей в белом излучении. Поток по бину 4 будет показывать значение 3666 лм. Чтобы промоделировать излучение, близкое по своему спектральному составу, например, к кривой синтеза хлорофилла, необходимо, управляя ползунками 11, отслеживать по рис. 1, б, профиль этой кривой, приближая его к стандартному значению. При этом в позициях 3, 4, 6, 7, 9, 10 (рис. 1, а) будут отображаться все составляющие потока излучения, а также характеристики модуля. При этом видно, что управлять потоками излучения можно, регулируя ток на светодиодных платах. Данные характеристики показаны наглядно на рис. 1, в, отображая отдельно «синий» и «красный» пики, кривую спектральной чувствительности глаза человека, кривую спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения, общую спектральную характеристику излучающего модуля.

Далее авторами был проведен эксперимент в вегетационной установке, конструк-

ция которой представлена на рис. 2. За основу была приняты разработанные и описанные в работах [7–10] технические решения.

Вегетационная установка имеет каркас с боковыми стенками, полки, образуя рабочие камеры для выращивания, в каждой из которых на полках зафиксированы источники облучения, соединенные посредством проводов со щитом управления. Также имеются стеллажи с помещенными на них растениями в горшках. К каждому стеллажу присоединены одним концом гибкие поливочные шланги, другой конец которых помещен в подающий трубопровод, соединенный с емкостью для питательного раствора. Рабочие камеры для выращивания имеют общий воздухопровод с вентилятором, закрепленный к каркасу.

Целью эксперимента было исследование влияния различных спектров светодиодной досветки на урожайность и показатели накопления макро- и микроэлементов салата сортов Крилда и Ауфона.

Содержание макро- и микроэлементов определено в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ ГЦАС «Красноярский» общепринятыми методиками.

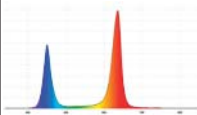
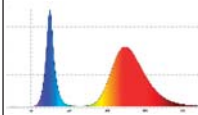
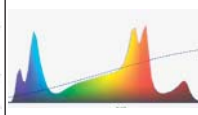
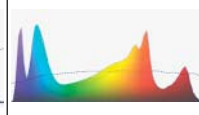
**Результаты исследования
и их обсуждение**

В таблице представлены результаты моделирования трех типов светодиодных модулей по технологии «синий + красный» спектр в комбинации со светодиодами белого света, на базе которых сконструированы облучатели. Облучатель 1 (с целевым спектром поглощения хлорофилла А), облучатель 2 (с излучением, совпадающим

с функцией спектральной чувствительности растений по К.Д. МсСтея), облучатель 3 (с функцией спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения) [2].

Из таблицы видно, что при сопоставимой мощности облучателей, но различном соотношении излучения в отдельных областях ФАР, величина фотосинтетического фотонного потока увеличивается при более равномерном заполнении спектра.

Характеристики светодиодных облучателей

Показатель	Облучатель 1	Облучатель 2	Облучатель 3	Облучатель 4
Фотосинтетический фотонный поток РРФ, мкмоль/с	106,47	105,6	153	151
Световой поток F, лм	3402	2320	6496	6065
Мощность P, Вт	92	110	92	94
Соотношение излучения в отдельных областях ФАР: синий, белый, красный, %	20–20–60	5–70–25	25–25–50	30–30–40
Спектр излучения				

Источник: составлено авторами.

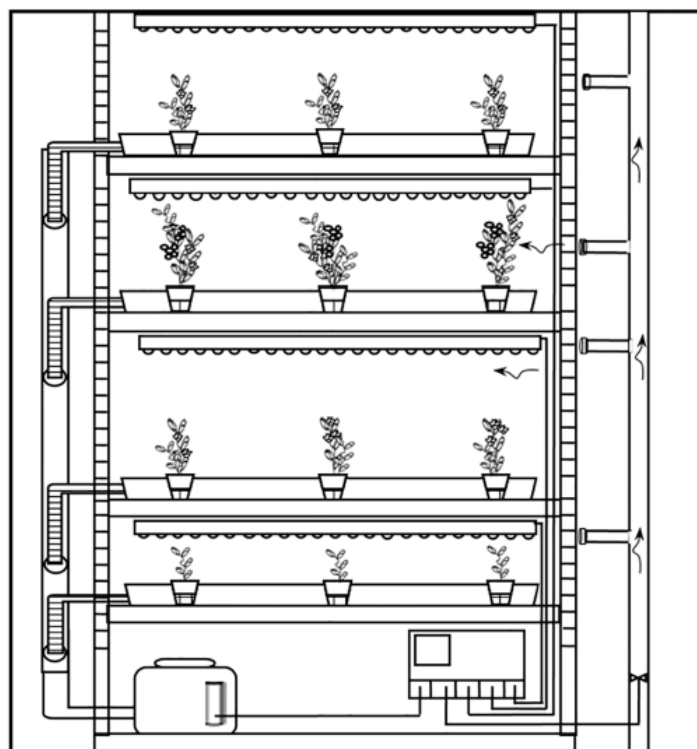


Рис. 2. Вегетационная установка

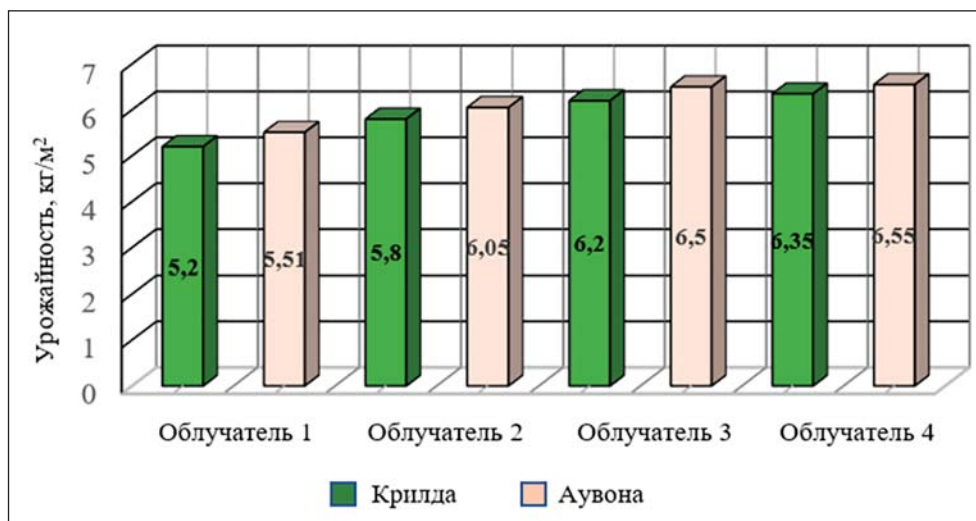


Рис. 3. Результаты по урожайности

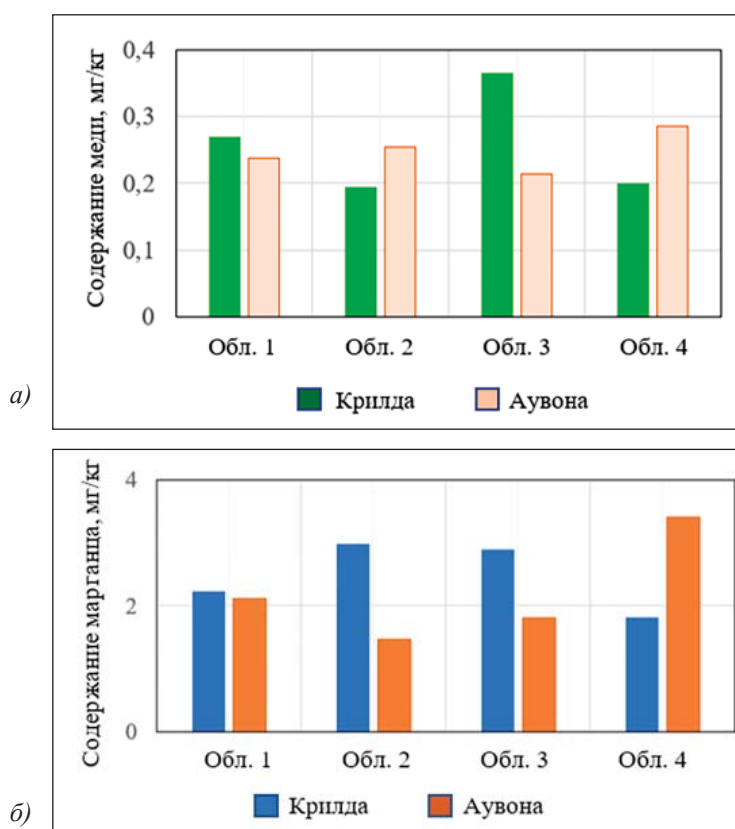


Рис. 4. Результаты биохимического анализа по показателям накопления: а) меди; б) марганца

Результаты фотобиологических исследований по урожайности представлены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что при равной облученности, создаваемой облучателями, максимальная урожайность достигается под облучателем, имеющим спектр, близкий к функции спектрального распределения интенсивности рас-

сеянного солнечного излучения и принимает значение для салата сорта Крилда $6,35 \text{ кг/м}^2$, для Аувона – $6,44 \text{ кг/м}^2$. На рис. 4 приводятся результаты биохимического анализа по показателям накопления меди и марганца; на рис. 5 – результаты по показателям накопления азота, фосфора, натрия и кальция.

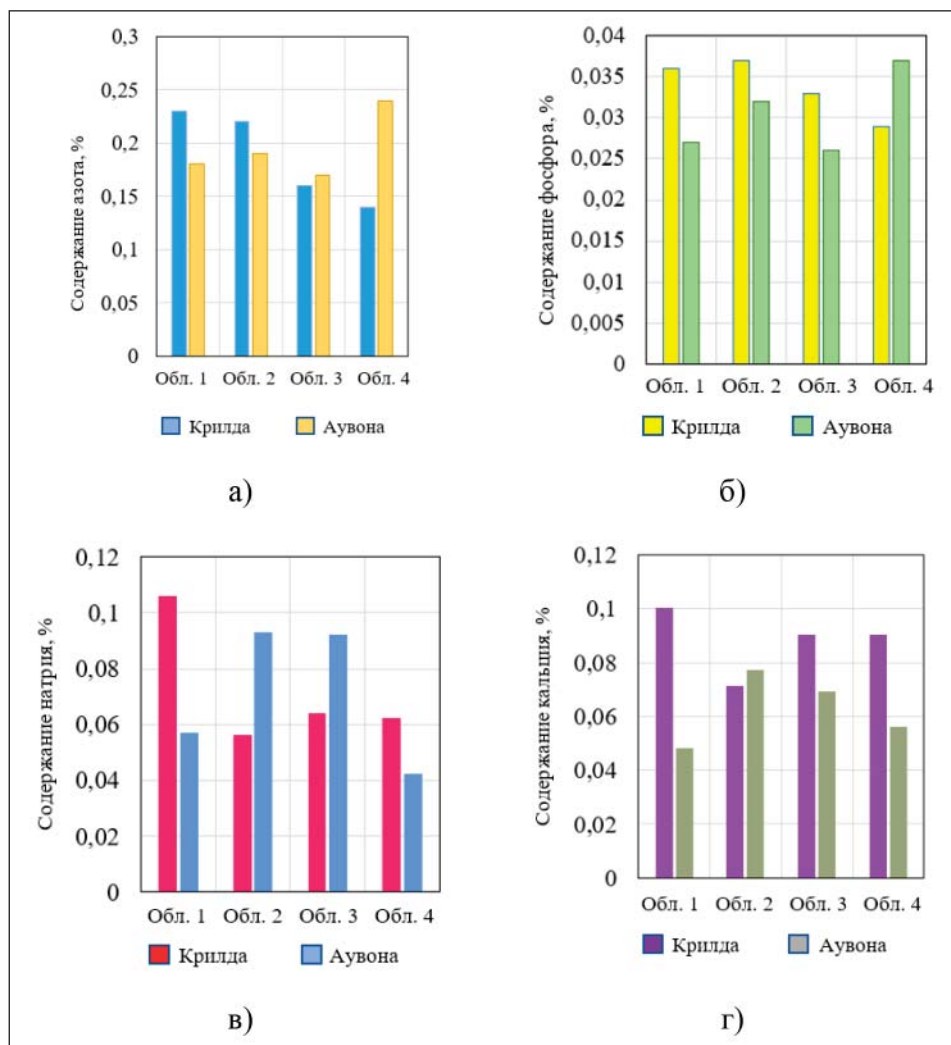


Рис. 5. Результаты биохимического анализа по показателям накопления; а) азота; б) фосфора; в) натрия; г) кальция

Как видно из рис. 4, спектральный состав излучения по-разному влияет на накопление меди и марганца. Заметно также, что накопление данных металлов зависит от сорта салата. Так, максимальное количество меди 0,37 мг/кг будут содержать растения салата сорта Крилда, выращенные под облучателем, с процентным соотношением излучения в отдельных областях ФАР, %: 25–25–50. Максимальное содержание марганца 3,4 мг/кг наблюдается у сорта Аувона под облучателем с ФАР, %: 30–30–40.

Из рис. 5 видно, что реакция растений на накопление представленных веществ неоднозначная. Максимальное накопление натрия происходит у растений салата сорта Крилда при облучении с целевым спектром поглощения хлорофилла А, тогда как максимальные показатели накопления азота

замечаются у сорта Аувона, при облучении спектром, близким к функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения.

Заключение

Были смоделированы четыре типа светодиодных модулей с различным соотношением излучения в отдельных областях спектра ФАР (с–з–к): для облучателя 1 (20–20–40), для облучателя 2 (5–70–25), для облучателя 3 (25–25–50), для облучателя 4 (30–30–40), что дало возможность провести разноплановый фотобиологический эксперимент.

В ходе проведенных исследований было установлено, что путем регулирования технологических параметров светодиодной досветки возможно не только обеспечить высокую продуктивность растений,

но и направленно влиять на качество продукции, в частности регулировать накопление макро- и микроэлементов в зеленых культурах.

Технология облучения, в которой используется излучение в функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения, может применяться при выращивании растений в компактных установках. В них требуется объединение световой среды человека и растения, и предпочтительным является излучение, обеспечивающее не только потребности растения, но и зрительный комфорт человека. Однако для других видов и сортов растений результаты могут отличаться.

Список литературы

1. Долгих П.П., Трепуз С.В., Ханипова В.А., Сенкевич О.В. Результаты фотобиологических исследований по выращиванию салата под разноспектральными источниками излучения // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 435–451.
2. 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.
3. Сарычев Г.С. Облучательные светотехнические установки. М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
4. Тихомиров А.А., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я. Спектральный состав света и продуктивность растений. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. 168 с.
5. McCree K.J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants // *Agricultural Meteorology*. 1972. 9. P. 191–216. DOI: 10.1016/0002-1571(71)90022-7.
6. Долгих П.П. Новые подходы к повышению энергетической эффективности облучательных установок в светокультуре // *Эпоха науки*. 2021. № 27. С. 23–26.
7. Амерханов Р.А., Григораш О.В., Кириченко А.С., Антонов В.И., Армаганян Э.Г., Дворный В.В. Апиш М.И. Гидропонная установка // Патент РФ № 2714242. Патентообладатель: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. 2020. Бюл. № 5.
8. Долгих П.П., Трепуз С.В. Устройство для выращивания растений // Патент РФ № 217964. Патентообладатель ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет». 2023. Бюл. № 12.
9. Сапрыкин Л.Г., Гайдуков Е.Н., Сапрыкин Д.Л. Фитотрон // Патент РФ № 2557572. Патентообладатель ООО Научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ». 2015. Бюл. № 21.
10. Ракутько С.А., Пацуков А.Э., Мишанов А.П. Климатическая установка // Патент РФ № 132309. Патентообладатель Государственное научное учреждение Северо-Западный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Россельхозакадемии. 2013. Бюл. № 26.