

Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры

Сергей Анатольевич Ракутько¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Елена Николаевна Ракутько¹,
научный сотрудник, e-mail: elena.rakutko@mail.ru;
Медведев Геннадий Валерьевич²,
доктор технических наук, e-mail: genatswaly@mail.ru

¹Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Отметим междисциплинарность светокультуры как области знания, необходимость привлечения различных разделов технических наук в практических приемах выращивания растений в искусственных условиях. Показали, что на современном этапе целесообразно говорить об энергоэкологии светокультуры как комплексном научном направлении, основанном на учете потоков субстанции, формирующих энергетические и экологические показатели искусственной агроэкосистемы. (*Цель исследования*) Разработать экспериментальный лабораторный фитотрон, предназначенный для исследований по энергоэкологии светокультуры, провести его биологическое тестирование. (*Материалы и методы*) С позиции логико-семантического подхода обосновали суть термина «энергоэкологичность» как конъюнкции его составляющих – энергоэффективности и экологичности. Изложили теоретические основы энергоэкологического подхода в светокультуре, определяющие особенности проведения экспериментальных исследований. Сформулировали требования, предъявляемые к техническим средствам проведения экспериментов. Описали устройство фитотрона и принципы его работы. Биологическое тестирование проводили на растениях томата (*Lycopersicon Esculentum Mill.*) сорта Благовест F_1 в рассадной фазе развития. Определяли отклик растений на изменение факторов световой среды: фотопериода (нормальный и удлиненный), спектра (с добавкой синего и контрольный) и уровня облученности (низкий, средний и высокий). (*Результаты и обсуждение*) В варьируемых условиях световой среды энергоэкологичность изменялась в диапазоне от 0,075 грамма на моль (при контрольном спектре, удлиненном фотопериоде и высокой облученности) до 0,138 грамма на моль (при спектре с добавкой синего, нормальном фотопериоде и средней облученности). (*Выводы*) Разработали экспериментальный лабораторный фитотрон для изучения энергоэкологии светокультуры. Реализовали возможность управлять облучением в зависимости массы растений. Установка обеспечивает удобный доступ к растениям, компактна, эргономична и обладает повышенной функциональностью.

Ключевые слова: светокультура, энергоэффективность, экологичность, энергоэкологичность, спектр, облученность, фотопериод, фитотрон.

■ **Для цитирования:** Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 40-48. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48. EDN EOJDHP.

Development of an Experimental Phytotron and its Application in the Research on the Energy-ecological Efficiency of Indoor Plant Lighting

Sergey A. Rakutko¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Elena N. Rakutko¹,
researcher, e-mail: elena.rakutko@mail.ru;
Gennadiy V. Medvedev²,
Dr.Sc.(Eng.), e-mail: genatswaly@mail.ru

¹Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russian Federation;

²Saint-Petersburg State Agrarian University (SPbSAU), Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The study of indoor plant lighting is noted to be an interdisciplinary research area. Thus, there is a need to integrate various technical sciences and practical methods in growing plants under artificial conditions. Nowadays, it is reasonable to

treat energy-ecological efficiency of indoor plant lighting as a complex scientific direction that takes into account substance flow forming the energy and environmental indicators of an artificial agroecosystem. (*Research purpose*) To develop an experimental laboratory phytotron intended for research on the energy-ecology efficiency of indoor plant lighting, and to conduct its biological testing. (*Materials and methods*) From the standpoint of the logical-semantic approach, the term "energy-ecological efficiency" was interpreted as a conjunction of its components - energy efficiency and environmental compatibility. The paper outlines the theoretical fundamentals of the energy-ecological efficiency approach to indoor plant lighting, which determine the experimental research features. The requirements for the techniques of conducting experiments are formulated. The phytotron design and its operation principles are described. Biological testing was carried out on Blagovest F1 tomato plants (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) in the seedling phase of plant development. The plant response to changes in the lighting factors was determined: photoperiod (normal and extended), spectrum (a blue-enhanced spectrum and a control one), and irradiance level (low, medium, and high). (*Results and discussion*) Under the varied lighting conditions, energy-ecology efficiency varied from 0.075 grams per mole (with the control spectrum, an extended photoperiod and high irradiance) to 0.138 grams per mole (with the blue-enhanced spectrum, a normal photoperiod and medium irradiance). (*Conclusions*) An experimental laboratory phytotron was developed to study the energy-ecology efficiency of indoor plant lighting. The ability to control irradiance was achieved depending on the mass of plants. The phytotron unit provides easy access to plants, it is compact, ergonomic and has improved functional capacity

Keywords: indoor plant lighting, energy efficiency, environmental compatibility, energy-ecology efficiency, spectrum, irradiance, photoperiod, phytotron.

■ For citation: Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Razrabotka eksperimental'nogo fitotrona i ego primeneniye v issledovaniyakh po energoekologii svetokul'tury [Development of an experimental phytotron and its application in the research on the energy-ecological efficiency of indoor plant lighting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 17. N2. 40-48 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48. EDN EOJDHP.

Энергия оптического излучения – важный фактор в светокультуре. Ее основные параметры – спектральный состав излучения, интенсивность (создаваемая облученность) и продолжительность облучения в течение суток (фотопериод) – оказывают большое влияние на функциональное состояние растений. Технологии светокультуры соответствует определенная область научных знаний, синтезирующая отдельные направления естественных, биологических и технических наук, чтобы найти отклик растений на изменения факторов внешней среды. Влияние оптического излучения с различными параметрами на физиологию и рост растений изучено достаточно хорошо [1]. Интенсивность формирования биомассы определяет потенциально пригодная для фотосинтеза часть энергии оптического излучения (эксергия излучения) [2].

В светокультуре даже малое воздействие излучением в физиологически активных спектральных диапазонах влияет на рост и развитие растений и позволяет добиться энергоэффективности. Такое фотонное управление дает возможность использовать тонкие квантовые эффекты взаимодействия оптического излучения с биообъектами [3]. Благодаря системному подходу с учетом современных методов биофотоники можно управлять светокультурой на ее отдельных иерархических уровнях, повышая экологичность выращиваемой продукции. Комплексный подход к оптимизации светокультуры с точки зрения повышения как энергоэффективности, так и экологичности отражает суть энергоэкологии светокультуры как научного междисциплинарного направления [4, 5]. Яркий

пример – оценка эффективности использования топлива с единых термодинамических позиций [6]. Коэффициент энергоэкологичности, учитывающий экономическую и экологическую целесообразность, используется при выборе источников энергоснабжения [7].

Эксперименты по применению оптического излучения при выращивании растений имеют давнюю историю. В работе Бэйли (1891 г.) упомянуто применение дуговых электрических ламп при выращивании растений в теплице [8]. Научно-исследовательские работы по светокультуре немыслимы без стабильности факторов окружающей среды при варьировании других параметров: светового режима (фотопериод, спектр излучения, его интенсивность), микроклимата (полив, подкормки, температура и т.д.). Многофакторные эксперименты необходимы для оптимизации светокультуры и выработки конкретных рекомендаций к режимам выращивания в производственных условиях.

Процессы, происходящие в растениях, запускаются фоторецепторами по сигналам об окружающей среде, адаптируя морфологию и физиологию органов растений к меняющимся внешним условиям [9]. Поэтому условия окружающей среды напрямую влияют на производство биомассы, углеродный метаболизм, эффективность фотосинтеза [10]. В контролируемых производственных условиях (теплицы, сити-фермы) дополнительное облучение – необходимое условие рентабельного производства [11].

Воспроизводимость результатов экспериментов по светокультуре можно обеспечить только при фикс-

сации условий выращивания растений [12].

Для формирования технологий выращивания растений применяют климатические камеры различных типов, в том числе и фитотроны [13, 14]. Тем не менее остается актуальной разработка новых технологий и современных установок [15].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – разработка и тестирование экспериментального лабораторного фитотрона, предназначенного для изучения энергоэкологии светокультуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Энергоэкологический подход в рассмотрении взаимодействия растения с окружающей средой искусственной агроэкосистемы заключается прежде всего в изучении закономерностей целенаправленно формируемых потоков субстанций (вещества и энергии) в целях оптимизации светокультуры по заданным критериям [16]. Его суть может быть раскрыта с привлечением аппарата логико-семантического моделирования. При этом объект описывают в терминах и определениях соответствующей предметной области знания. Анализ таких моделей осуществляется средствами логики предикатов [17].

В соответствии с законами образования понятий в естественном языке, термин «энергоэкологичность» как интегральный показатель включает в себя два предиката (p_1, p_2), имеющие смысловой вес одного порядка – «энергоэффективность» и «экологичность». Согласно символическому методу логической алгебры, исходные предикаты в математическом выражении должны объединяться конъюнкцией, или логическим умножением. Эта операция выполняет функцию союза «и» в естественном языке и имеет смысл «и p_1 , и p_2 », что логически соответствует реальности: процесс называют энергоэкологичным, если он и энергоэффективен, и экологичен. В вычислительных процедурах численное значение показателя энергоэкологичности (пока без учета размерности величин) будет определяться как произведение численных значений показателей энергоэффективности и экологичности.

$$\text{ЭЭ} = \text{Эн} \cdot \text{Эк}, \quad (1)$$

где ЭЭ – энергоэкологичность;

Эн – энергоэффективность;

Эк – экологичность.

Рассмотрим методы определения составляющих введенного интегрального показателя. При энергоэкологическом подходе моделью светокультуры будет процесс образования органического вещества (фотосинтез) под действием потока энергии излучения при прочих заданных параметрах окружающей среды. Входной величиной станет энергия оптического излучения, характеризующаяся дозой H , полезным выходом – масса продуктов фотосинтеза $M_{\text{вых}}$. В качестве показателя энергоэффективности в рамках данной модели примем величину, обратную дозе излу-

чения, затрачиваемой на синтез единицы сухого вещества растения, $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$:

$$\text{Эн} = \frac{M_{\text{вых}}}{H}, \quad (2)$$

где $M_{\text{вых}}$ – масса синтезированного сухого вещества, г;
 H – доза излучения, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2}$.

Повышение энергоэффективности означает увеличение выхода продуктов фотосинтеза (числитель) при меньших затратах энергии на облучение (знаменатель) в результате снижения энергетических и материальных потерь.

Если рассматривать линейную модель динамики изменения площади листьев растения, поглощающих поток оптического излучения и накопления сухого вещества, то выражение для энергоэффективности можно представить в виде:

$$\text{Эн} = \frac{M_{\text{л}} \cdot v_{\text{л}} / 100}{3600 \cdot E \cdot T \cdot \Phi\Pi \cdot S_0}, \quad (3)$$

где $M_{\text{л}}$ – сырая масса листьев, г;

$v_{\text{л}}$ – содержание сухого вещества в листьях, %;

E – фотонная облученность, $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

T – время выращивания растений, сут.;

$\Phi\Pi$ – фотопериод, ч;

S_0 – площадь листьев кроны, м^2 .

Для компактности перепишем формулу (3) с учетом группировки отдельных показателей.

Энергия, генерируемая источниками излучения в сутки (*day light integral*), $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$:

$$DLI = 3600 \cdot E \cdot \Phi\Pi. \quad (4)$$

Энергия, генерируемая источниками излучения за время выращивания (доза), $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2}$:

$$H = DLI \cdot T. \quad (5)$$

Удельная площадь листьев (*specific leaf area*), $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$:

$$SLA = \frac{S_0}{M_{\text{л}} \cdot v_{\text{л}}} \cdot 100. \quad (6)$$

Удельную площадь листьев SLA широко используют в исследованиях экологической направленности [18].

Получаем компактное выражение энергоэффективности:

$$\text{Эн} = \frac{1}{H \cdot SLA}. \quad (7)$$

Численная оценка экологичности представляет собой более сложную методическую задачу. К определению термина «экологичность» в литературе практикуются различные подходы [19]. В рамках данного исследования предлагается в качестве параметра экологичности принять показатель, связанный с биометрией выращиваемого растения, характеризующей гармоничность его развития, степень раскрытия генетического потенциала. Из ряда различных показателей физиологии растения, на наш взгляд, для этих целей можно воспользоваться соотношением массы

(по сухому веществу) подземной и надземной частей (*root mass fraction, RMF*), отн. ед.:

$$RMF = \frac{m_k}{m_k + m_c + m_l}, \quad (8)$$

где m_k, m_c, m_l – соответственно, масса корней, стебля и листьев растения, г.

Этот показатель отражает особенности индивидуального развития растений в процессе роста. Увеличение доли наземной части показывает, что она имеет более высокий приоритет для накопления фотосинтезирующих веществ. Возрастание доли подземной части означает, что растение больше поглощает питательных веществ из почвы. Таким образом, *RMF* отражает влияние на растение факторов окружающей среды. Его величина для каждого вида и сорта как правило генетически предопределена. Любые отклонения от этого значения свидетельствуют об изменении состояния растения.

Запишем выражение для экологичности, отн. ед.:

$$\mathcal{E}_k = 1 - |RMF - RMF_0|, \quad (9)$$

где RMF_0 – генетически предопределенное оптимальное значение показателя.

Структура формулы учитывает, что любые отклонения *RMF* от оптимального значения RMF_0 снижают показатель экологичности относительно максимального единичного значения.

Итоговое выражение для энергоэкологичности, г·моль⁻¹:

$$\mathcal{E}\mathcal{E} = \frac{1 - |RMF - RMF_0|}{H \cdot SLA}. \quad (10)$$

Рассмотрим графическую иллюстрацию предложенной модели (рис. 1).

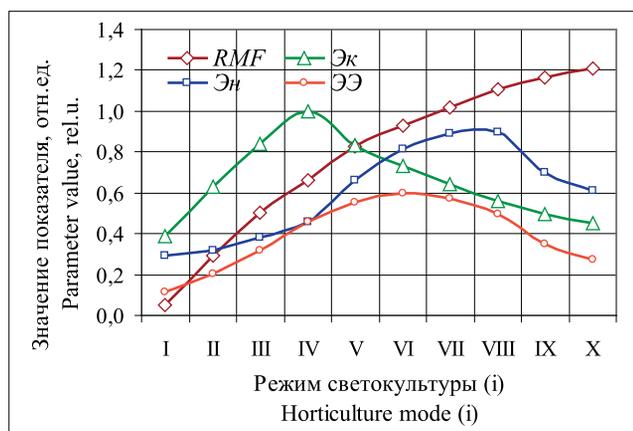


Рис. 1. Модель энергоэкологичности светокультуры: *RMF* – соотношением массы по сухому веществу подземной и надземной частей растения; *Эн* – энергоэффективность; *Эк* – экологичность; *ЭЭ* – энергоэкологичность

Fig. 1. Model of horticulture energoecology: 1. Model for energy-ecological efficiency of indoor plant lighting: *RMF* – the ratio of the mass of dry matter of the plant underground and aboveground parts; *Эн* – energy efficiency; *Эк* – ecological compatibility; *ЭЭ* – energy-ecological efficiency

Допустим, в светокультуре поддерживают различные режимы, отличающиеся параметрами световой среды, и горизонтальная координата соответствует номеру каждого режима (рис. 1). Режимы представлены в таком порядке, что соотношение подземной и надземной частей растения $RMF(i)$ монотонно увеличивается. Физиологические процессы, протекающие в растении при различных режимах выращивания, формируют различные сочетания площади, массы листьев и содержания в них сухого вещества, что определяет ход кривой $\mathcal{E}_k(i)$. Практика показывает, что эта кривая имеет экстремальный характер, то есть при некоторых сочетаниях значений параметров световой среды наблюдается максимум энергоэффективности.

Один из режимов (в рассматриваемом примере это IV) может быть принят за оптимальный по некоторым соображениям, вплоть до учета качественных показателей растений. Тогда кривая $\mathcal{E}_k(i)$, симбатно следуя за кривой $RMF(i)$ вплоть до номера этого режима, далее приобретает падающий характер, формируя максимум показателя экологичности. Такие закономерности определяют экстремальный характер кривой $\mathcal{E}\mathcal{E}(i)$, что ставит задачу оптимизации режимов светокультуры по критерию максимизации ее энергоэкологичности.

С учетом изложенных теоретических положений, сформулированы следующие требования к созданию лабораторного фитотрона, учитывающие особенности проведения экспериментальных исследований по энергоэкологии светокультуры:

- возможность регулирования уровня основных параметров световой среды: спектра излучения, облученности, фотопериода;
- наличие достаточного числа отсеков с возможностью задания различных режимов выращивания растений;
- возможность поддержания параметров микроклимата на протяжении всего времени выращивания растений с учетом их суточного изменения;
- возможность измерения в динамике массы растения и площади листовой поверхности;
- конструкция фитотрона должна допускать удобный доступ к растениям для их извлечения при периодических измерениях биометрических параметров.

Кроме того, предпочтителен дизайн установки, обеспечивающий, помимо функциональности, простоту изготовления и наладки, компактность, эргономичность, удобство при проведении экспериментов.

Для выполнения сформулированных требований предложено техническое решение, обладающее изобретательским уровнем (Пакутько С.А., Пакутько Е.Н., Мишанов А.П., Маркова А.Е. Фитотрон. Патент на полезную модель 210111, 29.03.2022. Заявка № 2022100085 от 10.01.2022).

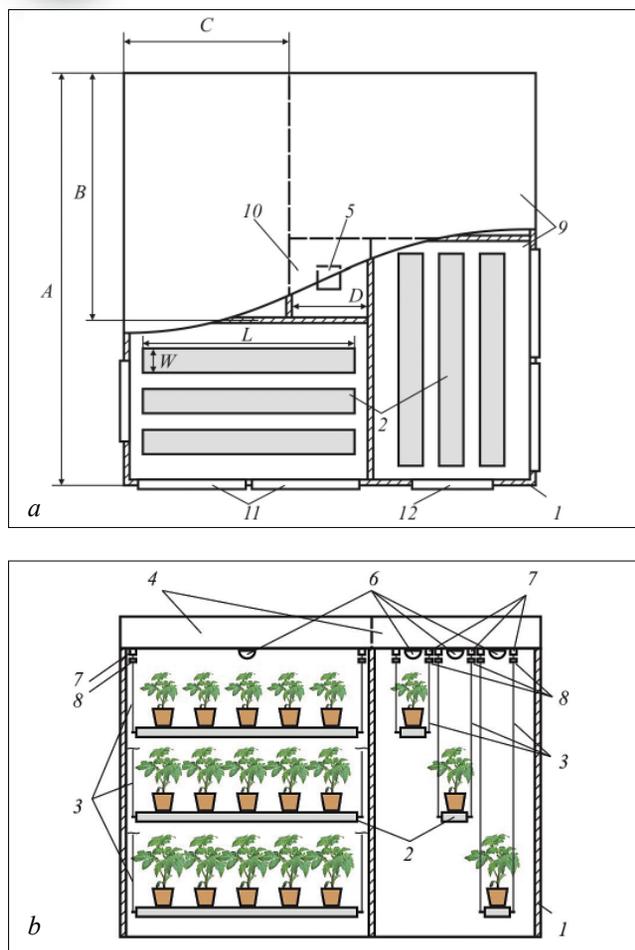


Рис. 2. Устройство фитотрона: а – вид сверху; б – вид сбоку: 1 – каркас; 2 – лотки; 3 – тросы; 4 – светильники; 5 – устройство регулирования параметров микроклимата; 6 – датчики расстояния; 7 – регуляторы высоты подвеса лотков; 8 – тензометрические датчики массы растений; 9 – экспериментальные отсеки; 10 – технологический отсек; 11 – дверцы; 12 – смотровое окно

Fig. 2. Phytotron design: a – top view; b – side view: 1 – frame, 2 – trays, 3 – cables, 4 – lamps, 5 – device for regulating microclimate parameters, 6 – distance sensors, 7 – height regulators for hanging trays, 8 – strain gauges for plant mass, 9 – experimental compartments, 10 – technological compartment, 11 – doors, 12 – viewing window

Фитотрон содержит общий силовой каркас, выполненный из металлического профиля, который служит основой для монтирования всех его элементов (рис. 2). В плане фитотрон имеет форму квадрата со стороной A . Его внутреннее пространство разделено светонепроницаемыми перегородками на четыре прямоугольных экспериментальных отсека. Одна из меньших сторон каждого отсека (длиной C) состыкована с большей стороной соседнего отсека (длиной B), а другая меньшая сторона вместе с большей стороной соседнего отсека выходят наружу и образуют внешнюю поверхность фитотрона. С внутренней стороны перегородки экспериментальных отсеков покрыты белым диффузно отражающим материалом. Экспе-

риментально найдено соотношение сторон, обеспечивающее эргономичность и оптимальную функциональность устройства: $B/C = 1,4-1,6$. В плане технологический отсек имеет форму квадрата с длиной стороны $D = B - C$.

Управление оборудованием осуществляется от программируемого устройства на основе микропроцессора *Arduino*.

Лотки в каждом экспериментальном отсеке служат для размещения растений. Экспериментально найдено, что длина лотка должна соответствовать условию: $L < 0,8B$. В этом случае удовлетворяется требование обеспечения достаточной равномерности облученности по всей поверхности каждого лотка ($E_{\max}/E_{\text{ср}} \leq 1,2$ отн. ед.). Ширина лотка должна соответствовать условию $W < 0,2C$, чтобы исключить затенение растений кронами вышележащих ярусов. Светильники 4 закреплены в верхней части каркаса и закрыты диффузно пропускающей пластиной.

Изготовленный нами макетный образец фитотрона имел размеры: $A = 2,5$ м, $B = 1,5$ м, $C = 1,0$ м, $D = 0,5$ м, размеры лотков – $L = 1,0$ м, $W = 0,15$ м.



Рис. 3. Фрагмент подвесной системы лотков с выращиваемыми растениями томата

Fig. 3. Fragment of a suspension tray system with cultivated tomato plants

Площадь фитотрона в плане составляет $6,25 \text{ м}^2$, суммарная площадь экспериментальных отсеков $6,0 \text{ м}^2$ (коэффициент полезного использования площади 96%). В эксперименте на каждом лотке изначально размещали по шесть растений в контейнерах с торфом (рис. 3).

Фитооблучатели имеют алюминиевые профили со светодиодами разного цвета. Для плавного регулирования потока от 10% до максимального значения использовали диммеры *MU 320H105AQ CP*.

Для наглядного представления спектрального состава в общем потоке Φ_{AP} вычисляли доли потока в отдельных спектральных поддиапазонах, %: синем B , зеленом G , красном R и дальнекрасном FR (рис. 4).

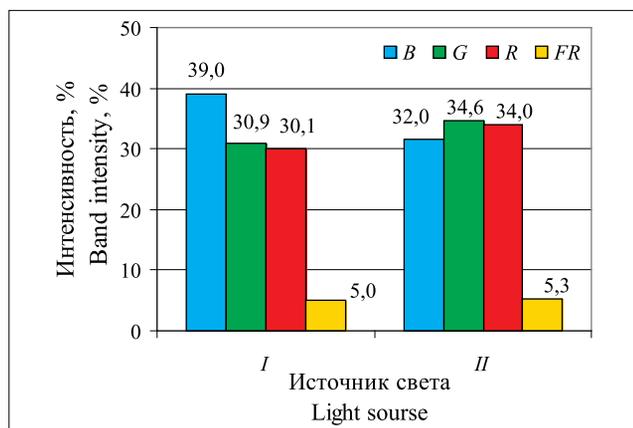


Рис. 4. Спектры источников света: B – синий; G – зеленый; R – красный; FR – дальнекрасный

Fig. 4. Spectra of light sources: B – blue; G – green; R – red; FR – far red

Для облучателя с дополнительными светодиодами B:G:R:FR = 39,0:30,9:30,1:5,0 (далее SpI), для контрольных условий B:G:R:FR = 32,0:34,6:34,0:5,3 (далее SpII).

Фитотрон использовали для исследования влияния параметров светового режима на энергоэкологичность выращивания растения томата сорта Благовест F₁ в течение 39 суток после всходов. Уровень облученности и спектральный состав контролировали с помощью спектроколориметра ТКА ВД/04, фотопериод задавали таймером. Температура воздуха составляла 21,0±1,0°C, влажность – 65-70%, скорость движения воздуха – 0,2-0,3 м·с⁻¹. Оптические свойства листьев определяли денситометром ДП-1М, содержание хлорофилла – прибором ССМ-200.

План исследований заключался в определении биометрических параметров рассады при различном сочетании параметров:

Показатели / Indicators		Спектр / Spectrum	ФП, ч / PP, h	Облученность, мкмоль·с ⁻¹ ·м ⁻² Irradiance, μmol·s ⁻¹ ·m ⁻²		
				100	170	240
Суточный интеграл радиации, моль·м ⁻² ·сут ⁻¹ Day light integral DLI, mol·m ⁻² ·d ⁻¹	I, II		16	5,76	9,79	13,82
			22	7,92	13,46	19,01
Доза H, моль·м ⁻² Doze H, mol·m ⁻²	I, II		16	224,64	381,89	539,14
			22	308,88	525,10	741,31
Площадь листьев S ₀ , см ² Leaf area S ₀ , cm ²	I		16	926	1018	993
			22	121	184	199
	II		16	981	1123	1029
			22	164	221	229
Доля подземной части, отн. ед. Root mass fraction RMF, rel.u.	I		16	0,135	0,156	0,234
			22	0,082	0,053	0,074
	II		16	0,112	0,139	0,147
			22	0,119	0,081	0,063
Удельная площадь листьев, м ² ·г ⁻¹ Specific leaf area SLA, m ² ·g ⁻¹	I		16	0,033	0,019	0,016
			22	0,027	0,018	0,013
	II		16	0,034	0,020	0,016
			22	0,031	0,021	0,017
Энергоэффективность Э _н , г·моль ⁻¹ Energy efficiency Э _н , g·mol ⁻¹	I		16	0,136	0,140	0,113
			22	0,119	0,108	0,103
	II		16	0,130	0,130	0,119
			22	0,104	0,091	0,081
Экологичность Э _к , отн. ед. Ecological compatibility Э _к , rel.u.	I		16	0,996	0,983	0,905
			22	0,943	0,914	0,935
	II		16	0,973	1,000	0,992
			22	0,980	0,942	0,924
Энергоэкологичность ЭЭ, г·моль ⁻¹ Energy-ecological efficiency ЭЭ, g·mol ⁻¹	I		16	0,136	0,138	0,103
			22	0,112	0,099	0,096
	II		16	0,126	0,130	0,118
			22	0,102	0,086	0,075

- двух фотопериодов (нормального – 16 ч и удлиненного – 22 ч);
 - двух спектров: *SpI* – с добавкой синего и *SpII* – контроль;
 - трех уровней облученности: 100; 170 и 240 $\text{мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.

Всего 12 вариантов за один цикл выращивания.

Каждое растение, выращенное при различном сочетании факторов радиационной среды (фотопериода *ФП*, спектра *SP* и уровня облученности *E*) разделяли на листья, стебель и корень, который тщательно отмывали от субстрата. Для определения показателя *RMF* весовым способом находили сырую массу частей растения. Высушиванием навесок определяли содержание сухого вещества [20].

Результаты эксперимента обрабатывали с применением методов математической статистики ($p < 0,05$) в пакетах программ *Excel 2003* и *Statistica 6.0*. Значимость различий определяли процедурой дисперсионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Показатели светокультуры томата зависят от спектра, фотопериода, облученности и их сочетания (таблица).

Суточный интеграл радиации *DLI* не зависит от типа спектра и возрастает с увеличением облученности и фотопериода. Это входные величины модели энергоэкологичности, количественно характеризующие энергетическое воздействие на растения.

Площадь листовой поверхности была меньше под источниками с дополнительным синим излучением. Она расширялась с увеличением облученности и уменьшалась при удлинении фотопериода.

Доля корней *RMF* при обоих видах спектра и фотопериода 16 ч равномерно растет при повышении облученности. Этот показатель минимален при удлиненном фотопериода, наличии дополнительного синего и среднем уровне облученности. В качестве оптимального значения приняли $RMF_0 = 0,139$ отн. ед. Это соответствует режиму, при котором площадь листовой поверхности максимальна $S_0 = 1123 \text{ см}^2$.

В эксперименте величина удельной площади листьев *SLA* падает при увеличении облученности для обоих типов спектра и величины фотопериода.

Энергоэффективность светокультуры снижается при повышении уровня облученности при обоих типах спектра и фотопериода. Однако при спектре *SpI* она немного больше.

Экологичность во всех вариантах достаточно высока, приближаясь к единице. Она достигает максимума при условии: *SpII*, *ФП* = 16 ч, $E = 170 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Минимальное значение отмечено при сочетании: *SpI*, *ФП* = 16 ч, $E = 240 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.

Энергоэкологичность изменяется в диапазоне от минимального значения $\mathcal{E}\mathcal{E}_{\min} = 0,075 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ (*SpII*, *ФП* = 22 ч, $E = 240 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) до максимального $\mathcal{E}\mathcal{E}_{\max} = 0,138 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ (*SpI*, *ФП* = 16 ч, $E = 170 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) (рис. 5).

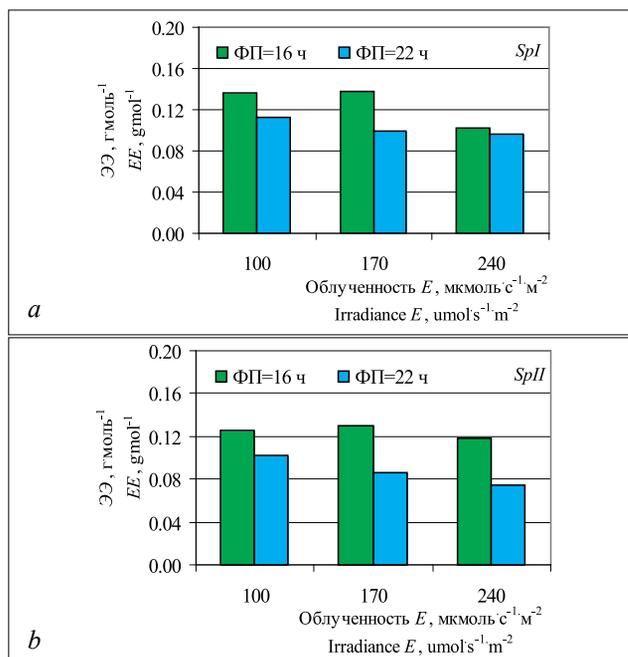


Рис. 5. Энергоэкологичность светокультуры в зависимости от уровня облученности при различном спектре и фотопериоде: а – *SpI*; б – *SpII*

Fig. 5. Energy-ecological efficiency of indoor plant lighting depending on the level of irradiance at different spectrum and photoperiods: a – *SpI*; b – *SpII*

В светокультуре важно выявить факт соблюдения закона взаимозаменяемости (Бунзена – Роско), в соответствии с которым эффект, оцененный по некоторому показателю, пропорционален дозе излучения, вне зависимости от соотношения ее составляющих (облученности *E* и фотопериода *ФП*) [21]. В эксперименте при $E = 240 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ и *ФП* = 22 ч обеспеченная доза составляет $H = 525,10 \text{ mol} \cdot \text{м}^{-2}$, что практически совпадает (отклонение $\Delta = 2,7\%$) с дозой при $E = 170 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ и *ФП* = 16 ч ($H = 539,14 \text{ mol} \cdot \text{м}^{-2}$). В таблице эти и другие попарно сравниваемые показатели выделены жирным шрифтом.

Эксперимент показал, что закон взаимозаменяемости соблюдается (в пределах $\Delta = 10\%$) по всем показателям таблицы при спектре *SpI*. При спектре *SpII* отклонения от закона в пределах $\Delta = 25-37\%$ соответствуют показателям: удельная площадь листьев *SLA*, энергоэффективность $\mathcal{E}\eta$ и энергоэкологичность $\mathcal{E}\mathcal{E}$. Значительное несоответствие (в разы) наблюдается по показателям: площадь листьев S_0 и массовая доля подземной части *RMF*.

Выводы. Путем логико-семантического анализа обосновано базовое понятие энергоэкологического подхода – энергоэкологичность светокультуры как композиция показателей ее энергоэффективности и экологичности, определяемых через непосредственно экспериментально измеряемые параметры. Разработанный экспериментальный лабораторный фитотрон позволяет проводить опыты по энергоэкологии свето-

культуры, варьируя параметрами создаваемой внутренней среды. Светотехническое оборудование обеспечивает суточный интеграл радиации от 5,76 до 19,01

моль·м⁻²·сут⁻¹. Стало возможным выращивание растений в условиях изменения показателя энергоэкологичности светокультуры от 0,075 до 0,138 г·моль⁻¹.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meiramkulova K., Tanybayeva Z., Kydyrbekova A., Turbekova A., Aytkhozhin S., Zhantasov S., Taukenov A. The efficiency of led irradiation for cultivating high-quality tomato seedlings. *Sustainability*. 2021. N13. 9426.
2. Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Результаты исследований влияния биоэнергетических факторов на повышение урожайности в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N2. С. 19-25.
3. Кульчин Ю.Н., Булгаков В.П., Гольцова Д.О., Субботин Е.П. Оптогенетика растений – светорегуляция генетического и эпигенетического механизмов управления онтогенезом // *Вестник ДВО РАН*. 2020. N1. с.5-25.
4. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N3. С. 11-17.
5. Белозеров Д.А., Денисова Н.Н., Закирова А.Н. и др. Энергоэкология как основа устойчивого развития России: опыт, методология и перспективы: Монография. Дубна: Государственный университет «Дубна». 2017. 202 с.
6. Сорока Б.С. Использование топлива и загрязнение окружающей среды // Часть 1. Энергоэкология использования топлива и нормирование вредных выбросов. Энергетика. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2007. N2. С. 39-52.
7. Субботин И.А. Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве // *Инженерные технологии и системы*. 2019. Т. 29. N3. С. 366-382.
8. Janick J. The origins of horticultural technology and science. *Acta Hort.* 2007. 759. 41-60.
9. Paik I., Huq E. Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks. *Seminars in Cell and Developmental Biology*. 2019. 92. 114-121.
10. Yang D., Seaton D.D., Kraemer J, Halliday K.J. 2016. Photoreceptor effects on plant biomass, resource allocation, and metabolic state. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. 113. 7667-7672.
11. Gómez C., Currey C. J., Dickson R. W., Kim H.-J., Hernández R., Sabeh N. C., Raudales R. E., Brumfield R. G., Lau-ry-Shaw A., Wilke A.K., Lopez R.G., Burnett S.E. 2019. Controlled Environment Food Production for Urban Agriculture. *HortScience*. 2019. 54. 1448-1458.
12. Кулешова Т.Э., Блащенко М.Н., Кулешов Д.О., Галль Н.Р. Разработка лабораторного фитотрона с возможностью варьирования спектра излучения и длительности суточной экспозиции и его биологическое тестирование // *Научное приборостроение*. 2016. Т. 26. N3. С. 35-43.
13. Семенова Н.А., Гришин А.А., Дорохов А.А. Аналитический обзор климатических камер для выращивания овощных культур // *Вестник НГИЭИ*. 2020. N1(104). С. 5-15.
14. Измайлов А.Ю., Гришин А.А., Гришин А.П. Аэропонный модуль для фитотронов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2013. N5. С. 20-22.
15. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55.
16. Ракутько С.А. Концептуальные основы энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N6. С. 38-44.
17. Wang Y., Wei Yu, Seligman J. Quantifier-free epistemic term-modal logic with assignment operator. *Annals of Pure and Applied Logic*. 2022. 173(3). 103071.
18. Anderson C.G., Bond-Lamberty B., Stegen J.C. Active layer depth and soil properties impact specific leaf area variation and ecosystem productivity in a boreal forest. *PLoS ONE*. 2020. 15(12). e0232506.
19. Ракутько Е.Н., Васькин А.В., Мишанов А.П., Маркова А.Е. Модели, методы и средства контроля энергоэкологичности в светокультуре: аналитический обзор // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. N1(106). С. 25-50.
20. Pandey R., Paul V., Das M., Meena M., Meena R.C. 2017. Plant growth analysis. Physiological techniques analyze the impact climate change on crop plants. Indian Agricultural Research Institute (IARI): New Delhi, India. 103.
21. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Экспериментальная проверка закона взаимозаменяемости в светокультуре салата // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. N1(26). С. 22-27.

REFERENCES

1. Meiramkulova K., Tanybayeva Z., Kydyrbekova A., Turbekova A., Aytkhozhin S., Zhantasov S., Taukenov A. The efficiency of led irradiation for cultivating high-quality tomato seedlings. *Sustainability*. 2021. N13. 9426 (In English).
2. Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Rezul'taty issledovaniy vliyaniya bioenergeticheskikh faktorov na povyshe-nie urozhaynosti v rastenievodstve [Research results of bioenergetics factors influence on crop production yields increase]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N2. 19-25 (In Russian).
3. Kul'chin Yu.N., Bulgakov V.P., Goltsova D.O., Subbotin E.P. Optogenetika rasteniy – svetoregulyatsiya geneticheskogo i epigenicheskogo mekhanizmov upravleniya ontogene-zom [Plant optogenetics – photoregulation of genetic and epigenetic mechanisms of ontogenesis control]. *Vestnik DVO RAN*. 2020. N1. 5-25 (In Russian).
4. Rakut'ko S.A., Rakut'ko E.N. Modelirovanie i chislennyy analiz energoekologichnosti svetokul'tury [Simulation and

- numerical analysis of energy-and-ecological compatibility of indoor plant lighting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N3. 11-17 (In Russian).
5. Belozеров D.A., Denisova N.N., Zakirova A.N., et al. Energoekologiya kak osnova ustoychivogo razvitiya Rossii: opyt, metodologiya i perspektivy: Monografiya [Energy ecology as a basis for Russia's sustainable development: background, methodology and prospects: Monograph]. Dubna: Gosudarstvennyy universitet «Dubna». 2017. 202 (In Russian).
 6. Soroka B.S. Ispol'zovanie topliva i zagryaznenie okruzhayushchey sredy Chast' I. Energoekologiya ispol'zovaniya topliva i normirovanie vrednykh vybrosov. Energetika [Fuel use and environmental pollution. Part I. Energy ecology of fuel use and regulation of harmful emissions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG*. 2007. N2. 39-52 (In Russian).
 7. Subbotin I.A. Energoekologicheskaya otsenka ispol'zovaniya razlichnykh generiruyushchikh istochnikov v sel'skom khozyaystve [Energy and environment assessment of agricultural application of power generating sources]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*. 2019. Vol. 29. N3. 366-382 (In Russian).
 8. Janick J. The origins of horticultural technology and science. *Acta Hort.* 2007. 759. 41-60 (In English).
 9. Paik I., Huq E. Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks. *Seminars in Cell and Developmental Biology*. 2019. 92. 114-121 (In English).
 10. Yang D., Seaton D.D., Krahmer J., Halliday K.J. 2016. Photoreceptor effects on plant biomass, resource allocation, and metabolic state. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. 113. 7667-7672 (In English).
 11. Gómez C., Currey C.J., Dickson R.W., Kim H.-J., Hernández R., Sabeh N.C., Raudales R.E., Brumfield R.G., Lairy-Shaw A., Wilke A.K., Lopez R.G., Burnett S.E. 2019. Controlled Environment Food Production for Urban Agriculture. *HortScience*. 2019. 54. 1448-1458 (In English).
 12. Kuleshova T.E., Blashenkov M.N., Kuleshov D.O., Gall' N.R. Razrabotka laboratornogo fitotrona s vozmozhnost'yu var'irovaniya spektra izlucheniya i dlitel'nosti sutochnoy ekspozitsii i ego biologicheskoe testirovanie [Development and biological testing of the laboratory phytotron with possibility of varying the emission spectra and the daily exposure]. *Nauchnoe priboroostroenie*. 2016. Vol. 26. N3. 35-43 (In Russian).
 13. Semenova N.A., Grishin A.A., Dorokhov A.A. Analiticheskiy obzor klimaticheskikh kamer dlya vyrashchivaniya ovoshchnykh kul'tur [Analytical review of climatic chambers for vegetable crops growing]. *Vestnik NGIEI*. 2020. N1(104). 5-15 (In Russian).
 14. Izmaylov A.Yu., Grishin A.A., Grishin A.P. Aeroponnyy modul' dlya fitotronov [Aeroponic module for phytotrons]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2013. N5. 20-22 (In Russian).
 15. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozдание i razvitie sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Creation and development of machine systems and technologies for complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55 (In Russian).
 16. Rakut'ko S.A. Kontseptual'nye osnovy energoekologii svetokul'tury [Conceptual framework of energy-and-ecology of indoor plant lighting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N6. 38-44 (In Russian).
 17. Wang Y., Wei Yu, Seligman J. Quantifier-free epistemic term-modal logic with assignment operator. *Annals of Pure and Applied Logic*. 2022. 173(3). 103071 (In English).
 18. Anderson C.G., Bond-Lamberty B., Stegen J.C. Active layer depth and soil properties impact specific leaf area variation and ecosystem productivity in a boreal forest. *PLoS ONE*. 2020. 15(12). e0232506 (In English).
 19. Rakut'ko E.N., Vas'kin A.V., Mishanov A.P., Markova A.E. Modeli, metody i sredstva kontrolya energoekologichnosti v svetokul'ture: analiticheskiy obzor [Models, methods and tools for energy and ecological control in greenhouse horticulture: review]. *AgroEkoInzheneriya*. 2021. N1(106). 25-50 (In Russian).
 20. Pandey R., Paul V., Das M., Meena M., Meena R.C. 2017. Plant growth analysis. Physiological techniques analyze the impact climate change on crop plants. Indian Agricultural Research Institute (IARI): New Delhi, India. 103 (In English).
 21. Rakut'ko S.A., Rakut'ko E.N. Eksperimental'naya proverka zakona vzaimozamestivosti v svetokul'ture salata [The verification of reciprocity law in lettuce growing]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2018. N1(26). 22-27 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Ракутько С.А. – научное руководство, первичная подготовка статьи;

Ракутько Е.Н. – анализ научных источников, обработка результатов измерений, окончательный текст статьи;

Медведев Г.В. – статистический анализ, обсуждение.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Rakutko S.A. – academic supervision, draft manuscript;

Rakutko E.N. – literature review, result processing and calculating, finalizing the manuscript;

Medvedev G.V. – statistical analysis, discussion.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

15.12.2022

10.02.2023