УДК 628.979:581.035 CC BY DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-6-38-44

Концептуальные основы энергоэкологии светокультуры

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

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

Реферат. Для повышения эффективности тепличного производства широкое применение находит технология выращивания растений при искусственном облучении, то есть светокультура. Предложили расширить круг рассматриваемых в этой области вопросов и выделить энергоэкологию светокультуры как научное направление, расположенное на стыке энергетических и технических дисциплин, физиологии растений и экологии. (*Цель исследования*) Разработать концептуальные основы энергоэкологии светокультуры как отдельного научного направления. (*Материалы и методы*) Объектом исследования служила искусственная биоэнергетическая система светокультуры, то есть совокупность живых организмов и технологического оборудования в культивационном сооружении. Математическое описание закономерностей переноса субстанции в светокультуре провели на основе иерархической модели искусственной биоэнергетической системы светокультуры. Предметом изучения энергоэкологии светокультуры стали закономерности преобразования потоков вещества и энергии. (*Результаты и обсуждение*) Определили частные показатели энергоэкологичности. Получили выражение для определения коэффициента энергоэкологичности светокультуры через ее технологические показатели. Предложили трактовку термина «энергоэкологичность светокультуры» как свойство технологического процесса выращивания растений в искусственно созданных условиях соответствовать требованиям энергоэффективности и экологичности. Показали, что к светокультуре может быть применен подход, опирающийся на концепцию наилучших доступных технологий. Получили выражение для количественной оценки свойства энергоэкологичности по степени близости траекторий развития искусственной биоэнергетической системы светокультуры в пространстве состояний. Предложили алгоритм формирования наилучших доступных технологий светокультуры. (*Выводы*) Впервые поставили вопрос о разработке структурных элементов алгоритма формирования доступных технологий светокультуры по энергоэкологичности как системному интегративному критерию оптимальности. Разработали методики энергоаудита для оптимизации процесса выращивания растений по критерию минимальных отклонений энергоэкологичности путем варьирования параметров облучения, условий окружающей среды и других факторов. Подчеркнули, что комплексная реализация энергоэкологичных технологий светокультуры позволит увеличить эффективность, повысить качество продукции, снизить энергоемкость и обеспечить экологичность производства.
Ключевые слова: тепличное производство, культивационные сооружения, светокультура, энергоэффективность, экологичность, интегративный критерий оптимальности.

Для цитирования: Ракутько С.А. Концептуальные основы энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2018. Т. 12. N6. С. 38-44. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-6-38-44.

Conceptual Framework of Energy-and-Ecology of Indoor Plant Lighting

Sergei A. Rakut'ko,
Dr.Sc.(Eng.), key research engineer,
e-mail: sergej1964@yandex.ru

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – Branch of Federal Agroengineering Centre VIM, St.-Petersburg, the Russian Federation

Abstract. To increase the efficiency of horticulture, the technology of plant cultivation under artificial lighting, i.e. indoor plant lighting, is widely used. The author proposes to expand the range of issues considered in this field and highlight the energy-and-ecology of horticulture (EEH) as a scientific area located at the junction of power engineering and technical

subjects, plant physiology, and ecology. (*Research purpose*) To develop a conceptual framework of the energy-and-ecology of horticulture. (*Materials and methods*) The object of EEH research is an artificial bioenergetic system of horticulture (ABSH), i.e. a combination of living organisms and technological equipment in a plant growing facility. A mathematical description of the regularities of transferring a substance in horticulture is produced on the basis of a hierarchical model of ABSH. The subject of the EEH study is the regularities of the transformation of matter and energy flows in ABSH. (*Results and discussion*) The author has determined some specific indicators of energy-ecological compatibility and obtained an expression for determining the energy-ecological coefficient of horticulture through its technological indicators. The paper offers an interpretation of the term "energy-and-ecology of horticulture" as a property of the technological process of plant growing in artificial conditions to meet the requirements of energy efficiency and environmental friendliness. It is shown that an approach based on the concept of best available technologies (BAT) can be applied to the indoor plant lighting. An expression for the quantitative assessment of the energy-ecological parameter in terms of the proximity of the development trajectories of ABSH in a state-space has been obtained. The author proposes an algorithm for BAT forming to be applied in indoor plant lighting. (*Conclusions*) For the first time, the author raises a question about the development of structural elements of the BAT formation algorithm in lighting horticulture in terms of energy-ecological indicators as an integrative optimality criterion of the system. The author has developed energy audit techniques to optimize the process of plant growing according to the criterion of minimal deviations of energy-ecological performance by varying the lighting parameters, environmental conditions and other factors. Complex implementation of energy- and ecological technologies of indoor plant lighting will allow increasing the efficiency of the production process, reducing the energy intensity while improving the quality of products and ensuring the environmental friendliness of production.

Keywords: horticulture, plant growing facilities, indoor plant lighting, energy efficiency, ecological compatibility, best available technologies

For citation: Rakut'ko S.A. Kontseptual'nyye 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. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-6-38-44 (In Russian).

Современные тенденции развития аграрного производства ориентированы на сохранение природы и экологической устойчивости при минимизации затрат энергетических и других ресурсов на производство продукции [1]. Тепличному направлению, как и аграрной отрасли в целом, в государственных программах развития сельского хозяйства уделяется большое внимание. Благодаря господдержке аграрии строят современные тепличные комплексы и реконструируют существующие.

Инновационное развитие производства продукции закрытого грунта продиктовано стремлением агробизнеса к достижению максимальной рентабельности и требует разработки соответствующего научного обеспечения. В частности, в тепличных комплексах широко применяют технологию выращивания растений при искусственном облучении, то есть светокультуру. Искусственные источники света позволяют добиться оптимального сочетания параметров световой среды: интенсивности и продолжительности освещения нужного спектрального состава.

В последнее время все больше внимания уделяется взаимосвязи обеспечения энергосбережения и повышения экологичности как для предприятий АПК в целом, так и отдельных технологических процессов. Задача энергоресурсосбережения сопряжена с повышением энергоэффективности, снижением энергоемкости технологических процессов в теплицах, которые становятся крупными потребителями энергоресурсов. Причем необходимо учитывать их воздействие на окружающую среду. Решение данной проблемы на фундаментальном уровне обеспечит прорыв в отдельных методиках анализа и синтеза технологии светокультуры.

К настоящему времени вопросы количественного описания физических, физико-химических и биологических процессов в агроэкосистемах, раскрытие эколого-генетических и физиологических механизмов регуляции продукционного процесса выращиваемых растений в оптимальных и стрессовых условиях разработаны недостаточно.

В НИЛЭЭС филиала ВИМ ИАЭП предложили выделить энергоэкологию светокультуры в качестве самостоятельного научного направления. Данное направление конкретизирует междисциплинарные исследования, проводимые в ИАЭП по интегрированию отдельных технических и технологических решений в систему и по разработке алгоритмов управления этой системой, формированию наиболее современных технологий с точки зрения энергетических и экологических критериев, по моделированию основных производственных процессов АПК в области получения продукции растениеводства в контролируемых условиях.

Цель исследования – разработать концептуальные основы энергоэкологии светокультуры как от-

дельного научного направления.

Материалы и методы. Под термином «*светокультура*» принято понимать теоретические основы и практические методы выращивания растений с применением искусственного облучения. Эта междисциплинарная наука включает отдельные положения растениеводства, агрономии, светотехники, фотометрии, электротехники и автоматики. Традиционный подход в исследованиях по светокультуре заключается прежде всего в изучении реакции определенных параметров растения (биомассы, высоты стебля и так далее) на изменения условий окружающей среды.

Светокультура служит частным случаем оптических электротехнологий, в которых энергетическое воздействие осуществляется оптическим излучением и основано на эффекте чувствительности растений к изменению световой среды. Влияние энергии излучения в отдельных спектральных диапазонах на рост и развитие различных видов растений изучено достаточно хорошо. Менее исследовано комплексное влияние световой среды и других факторов выращивания растений в искусственных условиях на энергоэффективность и экологичность светокультуры. Основным источником энергии, обеспечивающим формирование биомассы, в том числе урожая, служит энергия оптического излучения, а именно та ее часть, которая потенциально пригодна для фотосинтеза, – эксергия излучения. Полнота использования ее растениями в процессе фотосинтеза и формирования продуктивности урожая во многом зависит от динамики изменения различных факторов и их благоприятных сочетаний во времени. Каждому виду растений присуща своя восприимчивость воздействия внешних факторов [2].

Высокая экономичность тепличного производства продукции достигается путем его интенсификации. Однако это сопряжено с особыми экологическими угрозами. Для северного типа теплиц с дополнительным обогревом и другим высокотехнологичным оборудованием характерен высокий уровень выбросов CO_2, что связано с использованием газа для отопления и повышения концентрации углекислоты в теплице. На них же приходится основная доля потребляемой энергии. Так, в Голландии на тепличные хозяйства приходится 79% всей потребляемой энергии [3]. Повышение энергоэкологичности тепличного производства – важная задача, решение которой существенно снизит материальные затраты.

Оптимизация процесса получения продукции растениеводства в условиях светокультуры подразумевает снижение нерационального расхода потоков используемых субстанций (вещества и энергии) на разных стадиях технологического процесса. В силу различной природы процессов, протекающих в разных технологических установках, в настоящее время отсутствует единый подход к анализу и оптимизации экологичности и энергоэффективности светокультуры (ЭЭС).

Объект исследования ЭЭС как нового научного направления – искусственная биоэнергетическая система светокультуры (ИБЭСС), то есть совокупность биологических организмов (растений) и технологического оборудования (облучательных установок, устройств обеспечения параметров микроклимата и питания растений) в культивационном сооружении (теплице, сити-ферме, фитоустановке). Закономерности переноса субстанции в продукционном процессе светокультуры математически описываются на основе иерархической модели ИБЭСС. Системным интегративным критерием оптимальности служит энергоэкологичность, сохраняющая свой статус в ходе декомпозиции в локальных критериях оптимальности при решении задач оптимизации отдельных иерархических уровней.

Предмет изучения ЭЭС – закономерности преобразования потоков вещества и энергии в ИБЭСС, которые определяют как энергоэффективность получения урожая (задача энергосбережения), так и повышение качества продукции, снижения количества нитратов, влияния на окружающую среду (обеспечения экологичности).

ЭЭС как научное направление находится на стыке традиционных наук (*рис. 1*):

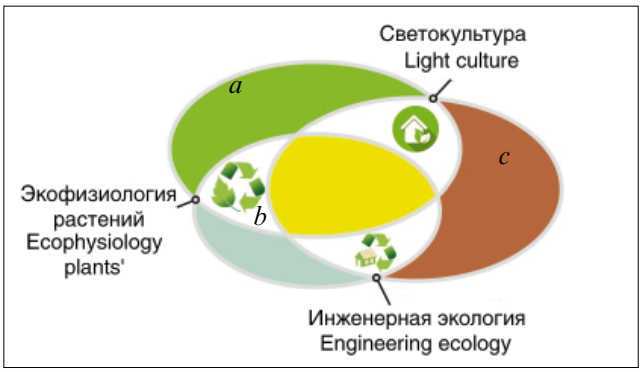

Рис. 1. Структура ЭЭС как научного направления: a – физиология растений; b – экология; c – энергетика
Fig. 1. Structure of the EEC as a scientific direction: a – plant physiology; b – ecology; c – power engineering

- энергетических и технических дисциплин, в рамках которых рассматриваются физические принципы, вопросы конструирования и эксплуатации источников света, облучательного и другого оборудования на базе энергосберегающих технических решений;

- физиологии растений, изучающей интенсивность и продуктивность фотосинтеза в зависимости от экологических факторов, прежде всего, оп-

тического излучения, которое определяет количественные и качественные параметры фотосинтеза на всех уровнях его формирования – организменном, органном, тканевом, клеточном и молекулярном, а также способы адаптации растений к условиям среды;

- экологии, важнейшей концепцией которой стала идея о структуре и направленности потоков субстанции в живых системах, организованных в надорганизменные системы различных уровней – популяции, биоценозов; взаимоотношения организмов между собой и с окружающей средой.

Теоретические исследования базировались на моделировании структурных уровней ИБЭСС. Экспериментальные исследования показателей энергоэкологичности светокультуры проводили на лабораторных установках и в производственных культивационных сооружениях.

Результаты и обсуждение. Разработанная иерархическая информационная модель ИБЭСС позволяет оценить энергоэффективность производства и его экологичность [4]. Модель основана на учете входных потоков вещества и энергии. Выходные потоки формируются из полезной продукции, потерь вещества (отходы, выбросы, сбросы) и энергетических потерь.

Научной основой модели служит прикладная теория энергосбережения в энерготехнологических процессах (ПТЭЭТП), описывающая энергетику ИБЭСС с учетом ее многоуровневости и закономерностей взаимодействия сельскохозяйственных биологических объектов с искусственной средой обитания [5, 6].

Процессы, протекающие в сложных сельскохозяйственных ИБЭСС, можно свести к определенному набору типовых процессов преобразования энергии и переноса вещества, происходящих в отдельных объектах системы. Иерархичность информационной модели системы определяется многоуровневостью ИБЭСС.

Модель позволяет проектировать и оптимизировать светокультуру по единому критерию энергоэкологичности.

На отдельных иерархических уровнях математической модели ИБЭСС выделены параметры, которые можно считать частными показателями энергоэкологичности (*рис. 2*).

Математическая модель объединяет:

1. Агрохимические и физические показатели воздуха и субстрата:

T – температура воздуха и субстрата, °С;

W – влажность воздуха и субстрата, %;

C_i^c – содержание веществ в субстрате, мг/кг;

$C_{орг}$ – содержание органического вещества, мг/кг;

pH – показатель кислотности, ед.;

EC – показатель электропроводности, мСм/см.

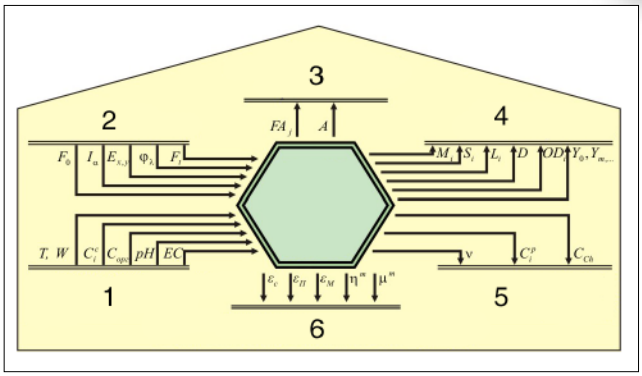

Рис. 2. Комплекс частных показателей энергоэкологичности ИБЭСС: 1 – агрохимические и физические показатели воздуха и субстрата; 2 – показатели радиационного режима; 3 – показатели стабильности развития и устойчивости растений; 4 – биометрические показатели растений; 5 – биохимический состав растений; 6 – технологические показатели светокультуры

Fig. 2. Complex partial indicators of energoecological of IBAS: 1 – agrochemical and physical indicators of air and substrate; 2 – indicators of radiation regime; 3 – indicators of stability of development and stability of plants; 4 – biometric indicators of plants; 5 – biochemical composition of plants; 6 – technological indicators of light culture

2. Показатели радиационного режима:

F_o – величина потока излучения источников, мкмоль/с;

I_α – пространственное распределение потока источников;

$E_{x,y}$ – распределение облученности на уровне верхушек растений, мкмоль·с$^{-1}$·м$^{-2}$;

φ_λ – спектральный состав, отн. ед;

F_t – закон изменения потока во времени.

3. Показатели стабильности развития и устойчивости растений:

FA_j – флуктуирующая асимметрия билатеральных признаков, отн. ед.;

A – степень повреждения клеточных мембран, отн. ед.

4. Биометрические показатели растений:

M_i – масса частей растения ($M_i^л$ – листьев каждого яруса, $M^с$ – стебля, $M^к$ – корня), г;

S_i – площадь листа каждого яруса, см^2;

S – общая площадь листьев, см^2;

L_i – длина междоузлий, см;

H – общая высота растения, см;

D – диаметр шейки стебля, мм;

OD_i – спектральная оптическая плотность листьев , отн. ед.;

Y_0, Y_m – коэффициенты ростовых формул, отн. ед.

5. Биохимический состав растений:

v – содержание сухого вещества, %;

C_i^p – содержание веществ, мг/кг;

C_{ch} – относительное содержание хлорофилла в листьях, отн. ед.

6. Технологические показатели светокультуры:

$\varepsilon_М$ – энергоемкость продукции, кВт·ч/кг;

$\varepsilon_с$ – энергоемкость сырья, кВт·ч/кг;

$\varepsilon_П$ – энергоемкость процесса, отн. ед.;

μ^m – энергоемкость теоретически возможного выхода продукции, отн. ед.;

η^m – КПД процесса, отн. ед.

Первая и вторая группы показателей энергоэкологичности – факторы воздействия на растения (входные координаты); группы с третьей по шестую – выходные координаты математической модели. Получено уравнение для определения коэффициента энергоэкологичности светокультуры через ее технологические показатели:

$$K_{ЭЭ} = \frac{\varepsilon_c}{\mu^m \eta^m \varepsilon_П^2 \varepsilon_M} . \quad (1)$$

Предложена трактовка термина «энергоэкологичность светокультуры» как свойства технологического процесса выращивания растений в искусственно созданных условиях культивационного сооружения соответствовать требованиям энергоэффективности и экологичности.

В силу особенностей растения как биологического объекта получение в результате его выращивания конечной продукции с заданными свойствами представляет собой циклический процесс, который начинается с прорастания семени и заканчивается сбором полезной продукции (плодов, зелени).

Создаваемые техническими средствами ИБЭСС параметры среды в культивационном сооружении могут отличаться на различных этапах роста и развития растения. Можно говорить о некоторой «траектории» изменения ИБЭСС в *n*-мерном пространстве состояний, которая соединяет ее начальные и конечные точки. Осями координат служат частные показатели энергоэкологичности (*рис. 3*).

Идеальной (И) считается такая траектория в (*n*+1)-мерном пространстве состояний (с учетом координаты времени), при которой достигается наиболее полная реализация генетического потенциала растения, его сортовых возможностей при условии обеспечения экологичности и энергоэффективности технологического процесса светокультуры. В силу ряда объективных причин этот вариант может быть и не достижим на практике. Оптимальной траектории (*О*) следует ожидать в условиях применения наилучших доступных технологий светокультуры (НДТС). Такие технологии производства продукции растениеводства в контролируемых условиях выбирают для конкретных условий и требований из достигнутого уровня науки, техники и технологий по критерию минимальных удельных энергетических затрат и воздействия на окружающую среду при условии обеспечения экологически

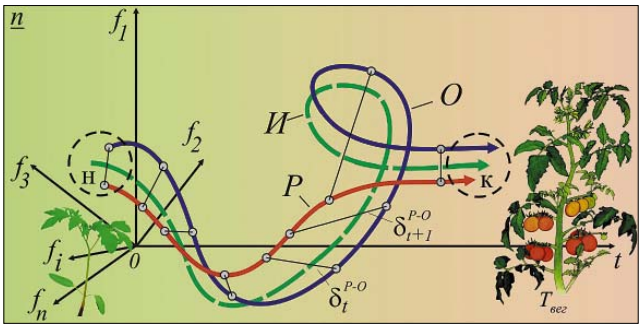

Рис. 3. Траектории развития ИБЭСС
Fig. 3. The trajectory of the development of IBAS

чистой конечной продукции. В реальном культивационном сооружении по причинам несовершенства технологического процесса, несоблюдения режимов работы оборудования, сбоев в подсистемах ИБЭСС возможны существенные отклонения траектории развития (кривая *Р*).

Количественная оценка свойства энергоэкологичности должна характеризовать близость принятой технологии к НДТС. Степень близости может быть оценена по нормированному евклидовому расстоянию между двумя траекториями для сравниваемых условий (*Р*) и для условий НДТС (*О*):

$$ЭЭ^P = \begin{cases} \frac{1}{k}\sum_{t=1}^{k} \delta_t^{P-O} \\ O \in \text{НДТС} \end{cases} . \quad (2)$$

Если функциональные зависимости величин частных показателей от времени заданы в аналитической форме, выражение для энергоэкологичности принимает вид:

$$ЭЭ^P = \frac{1}{T_{вег}} \int_0^{T_{вег}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_i \left(f_i^P(t) - f_i^O(t)\right)^2} dt , \quad (3)$$

где $T_{вег}$ – период вегетации;

f_i^P и f_i^O – функциональные зависимости *i*-го показателя от времени для реальной и оптимальной технологий соответственно;

w_i – весовой коэффициент значимости *i*-го показателя.

Результатом применения научного анализа роли и влияния отдельных факторов в рамках научного направления энергоэкологии светокультуры стало создание НДТС. Светокультура как производственный процесс не относится к области обязательного применения НДТС по категории воздействия на окружающую среду. Но ее технологии, методы, способы и технические решения, достигающие в целом наиболее эффективным способом высокого уровня защиты окружающей среды, разработанные и готовые к внедрению в соответствующей отрасли на конкретном предприятии, подходят для решения многих проблем.

При наличии соответствующего научного обо-

снования, технических разработок, статистического анализа необходимо создать справочник НДТС по аналогии с имеющимися для различных технологических процессов. С учетом специфики светокультуры в алгоритме формирования НДТС можно выделить пять структурных элементов (*рис. 4*).

I. Факторы. Любой элемент внутренней среды культивационного сооружения, оказывающий прямое или косвенное воздействие на растения на протяжении какой-либо фазы их развития, является экологическим фактором. Степень интенсивности *i*-го фактора численно характеризуется величиной f_i.

II. Условия. Обеспечение возможности жизнедеятельности растений в культивационных сооружениях подразумевает соблюдение некоторых дополнительных условий, накладываемых на экологические факторы. Они могут быть заданы в виде математических зависимостей $U = g(f)$, ограничивающих значение соответствующих показателей, например: условие нахождения параметра f_i в некотором диапазоне в пределах от начального $f_i^н$ до конечного значения $f_i^к$; условие превышения некоторого критического значения $f_i^{кр}$; ограничения, наложенные на его пространственную неравномерность, характеризуемую соотношением z между средним $f_i^{ср}$ и минимальным f_i^{min} значениями облученности, и т.д.

III. Правила. Применяемая технология выращивания растений заключается в соблюдении некоторых правил $R = g(U)$, связывающих между собой условия с помощью логических операций (И, + ИЛИ, НЕ). Данные правила реализуются в алгоритме управления светокультурой.

IV. Оценка. Каждой технологии выращивания растений можно поставить некоторую оценку (величину энергоэкологичности) $ЭЭ_i = P(R_i)$, определяющую степень соответствия светокультуры в относительных единицах для данного варианта проведения технологического процесса, сравниваемых условий и условий НДТС.

V. Выбор. Выбор технологии светокультуры в качестве наилучшей доступной осуществляется по критерию экстремального значения из найденных показателей энергоэкологичности (минимум или максимум в зависимости от принятого алгоритма оценки).

Работы НИЛЭЭС в течение последних лет посвящены вопросам оптимизации светокультуры. Предложены концепция ИБЭСС и ее иерархическая информационная модель; метод оценки энергоэффективности процесса фотосинтеза по его энергоемкости, на основе которого выработана методика энергоэкоаудита светокультуры и оценки энергоэкологичности по близости годографов (траекторий) векторов динамической энергоемкости, по-

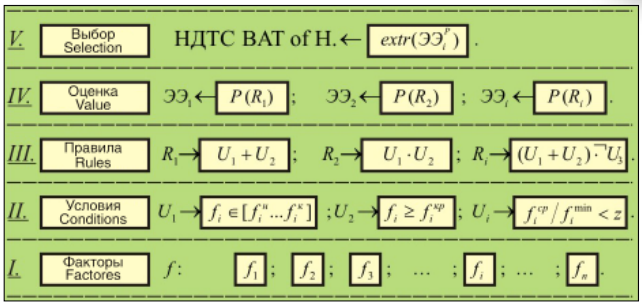

Рис. 4. Структурные элементы алгоритма формирования НДТС

Fig. 4. Structural elements of the algorithm of formation of NDTS

строенных в координатах массы сухого вещества в растении и дозы облучения [6]. Показано влияние спектра излучения на энергоэкологичность светокультуры. Исследованы вопросы комплексной оценки стабильности развития растений в зависимости от качества световой среды. Проведены эксперименты в области частной светокультуры по выращиванию петрушки, салата, томатов и огурцов. Разработаны основы метрологического обеспечения энергоэкологии светокультуры и средства аттестации источников излучения, применяемых при облучении растений. Созданы малогабаритные приборы-анализаторы: спектральной энергоемкости потока излучения, качества спектра и облучения для светокультуры, технические средства (фитооблучатели, облучательные установки, вегетационные модули) для выращивания растений по технологии светокультуры в бытовых помещениях (офисы, квартиры) и в мелких фермерских хозяйствах. Получены патенты, техническим результатом которых стало снижение энергоемкости в тепличных облучательных установках.

Потенциальными потребителями созданной научной продукции стали тепличные хозяйства, мелкотоварное производство закрытого грунта, научно-исследовательские организации, аграрные вузы.

Важность проблем повышения энергоэффективности и ресурсоотдачи, энергосбережения и улучшения экологической обстановки сегодня неоспорима. Современное тепличное производство является энерго- и ресурсоемким, характеризуется высоким потреблением энергии, питательных веществ и технических средств выращивания растений. Интенсивность технологического процесса сказывается как на окружающей среде, так и внутренней среде теплицы. Энергоэффективное производство требует внедрения современных специальных энергоэкологических технологий.

Выводы. Показали, что концептуальные основы разрабатываемого нового научного направления «Энергоэкология светокультуры» направлены на изучение закономерности преобразования пото-

ков вещества и энергии в ИБЭСС, формирующие ее энергоэффективность и экологичность. Повышение энергоэкологичности светокультуры связано с применением научного анализа и интеллектуальных алгоритмов управления светокультурой как многоуровневой системой, включающей энергетические, технологические и биологические объекты.

Впервые поставили вопрос о разработке структурных элементов алгоритма формирования НДТС по критерию энергоэкологичности как системному интегративному критерию оптимальности.

Разработанные методики энергоаудита стали важнейшим результатом проводимых исследований, которые можно использовать для оптимизации процесса выращивания растений по критерию минимальных отклонений энергоэкологичности путем варьирования параметров облучения, условий окружающей среды и других факторов.

Комплексная реализация энергоэкологичных технологий светокультуры позволит достичь расчетных показателей увеличения эффективности продукционного процесса, снижения энергоемкости при повышении качества продукции и обеспечении экологичности производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2013. Т. 7. N4. С. 8-11.

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. Lansink A., Bezlepkin I. The effect of heating technologies on CO_2 and energy efficiency of Dutch greenhouse firms. *Journal of Environmental Management*. 2003. N68(1). 73-82.

4. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Транчук А.С. Применение иерархической модели искусственной биоэнергетической системы для оценки экологичности и энергоэффективности светокультуры // *Известия Санкт–Петербургского государственного аграрного университета.* 2015. N40. С. 262-268.

5. Ракутько С.А. Энергоэкология светокультуры как новое актуальное научное направление // *Труды ГОСНИТИ.* 2016. Т. 124. N1. С. 138-141.

6. Ракутько С.А. Энергоэкологичность как свойство искусственной биоэнергетической системы светокультуры // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.* 2018. N2(95). С. 77-89.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. Perspektivnyye puti primeneniya energo- i ekologicheski effektivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv [Promising ways of using energy- and environmentally efficient machine technologies and technical means]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2013. Vol. 7. N4. 8-11 (In Russian).

2. Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Rezul'taty issledovaniy vliyaniya bioenergeticheskikh faktorov na povyshenie urozhaynosti v rastenievodstve [Research results of the influence of bioenergy factors on yield increasing in crop production]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N2. 19-25 (In Russian).

3. Lansink A., Bezlepkin I. The effect of heating technologies on CO2 and energy efficiency of Dutch greenhouse firms. *Journal of Environmental Management*. 2003. N68(1). 73-82 (In English).

4. Rakut'ko S.A., Rakut'ko Ye.N., Tranchuk A.S. Primenenie ierarkhicheskoy modeli iskusstvennoy bioenergeticheskoy sistemy dlya otsenki ekologichnosti i energoeffektivnosti svetokul'tury [Application of a hierarchical model of an artificial bioenergy system for assessing the environmental friendliness and energy efficiency of indoor plant lighting]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. N40. 262-268 (In Russian).

5. Rakut'ko S.A. Energoekologiya svetokul'tury kak novoye aktual'noe nauchnoe napravlenie [Energy-and-ecology of indoor plant lighting as a new promising scientific direction]. *Trudy GOSNITI*. 2016. Vol. 124. N1. 138-141 (In Russian).

6. Rakut'ko S.A. Energoekologichnost' kak svoystvo iskusstvennoy bioenergeticheskoy sistemy svetokul'tury [Energy-and-ecology as a property of an artificial bioenergy system of indoor plant lighting]. *Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva*. 2018. N2(95). 77-89 (In Russian).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17.11.2018
The paper was submitted to the Editorial Office on 17.11.2018

Статья принята к публикации 28.11.2018
The paper was accepted for publication on 28.11.2018