

УДК 538.958

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОСИНТЕЗА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА И ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА НА ПРИМЕРЕ *CUCUMIS SATIVUS L.*\*

**С.И. Супельняк<sup>1,2,\*</sup>, В.Г. Косушкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

д. 2, ул. Баженова, Калуга, 248000, Россия

тел.: +7(4842)72-82-63; e-mail: supelnyak@gmail.com

<sup>2</sup>ЛКМ ИК РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

д. 8, ул. Академическая, Калуга, 248640, Россия

doi: 10.15518/isjaee.2018.31-36.086-096

Заключение совета рецензентов: 25.07.18 Заключение совета экспертов: 19.09.18 Принято к публикации: 15.11.18

Рассчитаны потенциально эффективные для фотобиологических процессов значения плотности потоков света для дуговой натриевой трубчатой лампы (ДНАТ) мощностью 250 Вт и светодиодной (СИД) лампы мощностью 46 Вт. Предложено понятие коэффициента использования света для фотобиологических реакций с целью оценки энергетической составляющей спектра света, пригодной для оптимальной активации фоторецепторных систем растения, которые осуществляют управление процессами формообразования и изменения ориентации биологической системы в пространстве на раннем этапе развития для достижения максимальной эффективности фотосинтетической реакции. В расчётах использованы экспериментально полученные значения коэффициентов поглощения листа растения *Cucumis sativus L.* На основе данных о линейных размерах листа растения и зависимости спектра поглощения от возраста растения, а также спектрах действия фотобиологических реакций (фотосинтеза, диссипации избыточной энергии в виде тепла, фототропической реакции, синтеза хлорофилла, фотоморфогенеза) и спектрах излучения источников света рассчитана масса накопленных углеводов на раннем этапе развития растения *Cucumis sativus L.* Для верификации методики аналитической оценки было проведено экспериментальное исследование влияния излучения данных осветителей. Для ДНАТ 250 масса углеводов и сухая масса растения составили 0,24 г и 0,20 г соответственно, для СИД 46 – 0,05 г и 0,05 г соответственно. Предложенная система оценки эффективности спектра и интенсивности излучения по линейным параметрам растения является интеллектуальной основой для создания энергоэффективной системы автоматического управления светодиодным освещением теплицы с обратной связью по измеряемому параметру растения.

Ключевые слова: спектр; энергетические процессы; регуляторные процессы; система автоматического управления.

## THE EVALUATION METHOD FOR THE EFFICIENCY OF PHOTOSYNTHESIS DEPENDING ON THE COMPOSITION AND INTENSITY OF LIGHT ON THE EXAMPLE OF *CUCUMIS SATIVUS L.*

**S.I. Supelnyak<sup>1,2,\*</sup>, V.G. Kosushkin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>BMSTU (KB)

2 Bazhenova Str., Kaluga, 248000, Russia

tel.: +7 (4842) 72 82 63, e-mail: supelnyak@gmail.com

<sup>2</sup>SMS IC RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS

8 Academic Str., Kaluga, Russia, 248640

tel.: +7 (4842) 72 82 63

doi: 10.15518/isjaee.2018.31-36.086-096

Referred 25 July 2018 Received in revised form 19 September 2018 Accepted 15 November 2018

\*Супельняк С.И., Косушкин В.Г. Методика оценки эффективности фотосинтеза в зависимости от состава и интенсивности света на примере *Cucumis Sativus L.* // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;31-36:86-96.



The article calculates potentially effective for photobiological processes density light fluxes arc tube sodium lamps (HPS) and 250 watt Light Emitting Diode (LED) lamps 46 watts. The concept of light utilization for photobiological reactions is proposed to evaluate the energy component of the light spectrum suitable for optimal activation of plant photoreceptor systems that control the shaping process by changing the orientation of the biological system in space at an early stage of development in order to achieve maximum photosynthetic response. The calculations used the experimentally obtained values of the absorption coefficients of the leaf of *Cucumis sativus L.* Based on the data on the linear dimensions of the leaf of the plant and the dependence of the absorption spectrum on the age of the plant, as well as the action spectra of photobiological reactions (photosynthesis, dissipation of excess energy as heat, phototropic reaction, chlorophyll, photomorphogenesis) and emission spectra of light sources, we have calculated the mass of accumulated carbohydrates at an early stage of development *Cucumis sativus L.* In order to test the reliability methods of analytical evaluation, an experimental study of the effect of radiation data illuminators was carried out. For HPS 250, the weight of carbohydrates and the dry weight of the plant were 0.24 g and 0.20 g, respectively, for LED 46, the weight of carbohydrates and dry weight of the plant were 0.05 g and 0.05 g, respectively. The proposed system for assessing the efficiency of the spectrum and the intensity of radiation by the linear parameters of a plant is an intelligent basis for creating an energy-efficient system for automatically controlling LED lighting of a greenhouse with feedback on a measured parameter of a plant.

Keywords: spectrum; energy processes; regulatory processes; automatic control system.



Станислав Игоревич  
Супельняк  
Stanislav Supelnyak

**Сведения об авторе:** аспирант кафедры «Материаловедение» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий инженер ЛКМ ИК РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

**Образование:** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана (2014 г.).

**Область научных интересов:** влияние излучения на функционирование биологических систем; рост монокристаллов полупроводников.

**Публикации:** 13.  
*h*-index 1

**Information about the author:** Postgraduate Student at the Department of Materials Science and Engineering, BMSTU (KB), Lead Engineer at SMS IC RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" of RAS.

**Education:** BMSTU (KB), 2014.

**Research interests:** influence of radiation on the functioning of biological systems; growth of semiconductor single crystals.

**Publications:** 13.



Виктор Григорьевич Косушкин  
Victor Kosushkin

**Сведения об авторе:** д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Образование:** Ленинградский технологический институт им. Ленсовета (1972 г.).

**Область научных интересов:** рост монокристаллов полупроводников; организация инновационной деятельности в вузе.

**Публикации:** более 200.  
*h*-index 12

**Information about the author:** D.Sc. in Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Science and Engineering, BMSTU (KB).

**Education:** Leningrad Lensovet Institute of Technology, 1972.

**Research interests:** growth of semiconductor single crystals; the organization of innovation in high school.

**Publications:** more than 200.

## 1. Введение

Важным направлением альтернативной энергетики являются вопросы энергосбережения, которые решаются за счет повышения эффективности использования источников энергии. В частности, это актуально для развития технологий выращивания растений в защищённом грунте, где в качестве источников световой энергии всё чаще применяют све-

тодиодные светильники, обеспечивающие существенную экономию электроэнергии по сравнению с натриевыми лампами.

Решение технических задач по выбору режимов искусственного освещения должно быть основано на понимании механизмов поглощения световой энергии растениями и соответствующих моделях, позволяющих рассчитывать параметры процессов.





Исследования влияния света на биологические объекты во многом определяют развитие важнейших прикладных направлений [1–3]. В настоящее время отсутствуют модели, позволяющие рассчитать оптимальный спектральный состав излучения комбинаций красного и синего светодиодов, используемых для искусственного освещения в современных теплицах. Авторы работы [4] подтвердили, что при дополнительном красном и синем свете высота, скорость роста растений и скорость фотосинтеза значительно увеличиваются, в то время как ультрафиолетовое излучение приводит к снижению данных параметров. Для фотофизиологических исследований в [5] была разработана система с программируемым спектром, мощностью потока, фотопериодом и импульсами излучения с применением светодиодов (447 нм, 638 нм, 662 нм, 669 нм, 731 нм, 510 нм, 595 нм). В результате исследования влияния излучения семи различных комбинаций красных и синих светодиодов авторы работы [6] установили, что синий свет необходим для нормального фотосинтетического функционирования листа растения, а при облучении красным светом (0 % синего) наблюдается дисфункция фотосинтезной операции. С помощью программируемой системы освещения на основе пяти типов светодиодов с различными максимумами излучения (405 нм, 460 нм, 630 нм, 660 нм, 735 нм) японские учёные проверили способность спектра света влиять на фототропизм и фотосинтетическую реакцию [7]. Российские учёные изучали влияние различных комбинаций синих и красных светодиодов на развитие растений в установке из 10 ячеек, позволяющей моделировать условия реальной теплицы (поддерживались постоянные температура и уровень освещенности) [8]. В работе [9] было определено, что, хотя красный и синий свет являются базовым участком спектра, зеленый и желтый свет на практике оказывают значительное физиологическое воздействие на исследуемые растения. Более того, в той же работе учёные установили изменчивость спектральных эффектов света для разных ви-

дов растений и различных физиологических показателей. Однако, несмотря на успехи в области конструирования светодиодных осветителей, требуются более детальные исследования эффекта различных спектров на физиологию растений.

Известно [10], что основной системой высших растений, воспринимающей и преобразующей энергию квантов света, являются листья. Излучение в диапазоне длин волн 400 ÷ 700 нм, необходимое для функционирования растения, принято называть фотосинтетически активной радиацией (ФАР) [11]. Воздействия, при которых наблюдается преобразование поглощенной энергии квантов света в тепло и энергию химических соединений синтезируемых органических веществ, получили название энергетических. Воздействия, в результате которых за счёт поглощенной энергии света происходит активация, регуляция, деактивация различных физиологических процессов, называются регуляторными [10]. В сравнении с энергетическими воздействиями, фоторегуляторные требуют в десятки и сотни раз меньше энергии [10], однако точное количество на данный момент не установлено.

Целью данного исследования являлась разработка методики оценки взаимодействия света с поверхностью листа растения.

К основным задачам относились:

- экспериментальное исследование процесса поглощения света огурцами *Cucumis sativus L* (один из основных продуктов современного тепличного хозяйства);
- разработка методики оценки потенциально эффективного потока излучения для энергетических и регуляторных процессов с возможностью численной оценки массы накопленного сухого вещества по параметру растения.

Впервые определена потенциальная эффективность спектров излучения лампы ДНаТ мощностью 250 Вт и СИД светильника мощностью 46 Вт для регуляторных и энергетических процессов в растении.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
$\lambda$	Длина волны света, нм
$\gamma$	Квантовый расход
$\Sigma$	Суммарное значение
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
$D$	Плотность потока фотонов, мкмоль/м <sup>2</sup> ·с
$K$	Коэффициент, отн. ед.
$E$	Количество энергии, кДж/моль
$N_a$	Число Авогадро, моль <sup>-1</sup>
$h$	Постоянная Планка, Дж·с
$c$	Скорость света, нм/с
$N$	Число молекул, безразмерная величина
$S$	Площадь листовой поверхности, м <sup>2</sup>
$t$	Время, с
$V$	Скорость газообмена, мкмоль/м <sup>2</sup> ·с
$M$	Масса, г
$M_r$	Молекулярная масса, г/моль

Продолжение списка обозначений

$L$	Длина, м
$W$	Ширина, м
<u>Индексы нижние</u>	
$CO_2$	Углекислый газ
$i$	Номер листа, безразмерная величина
$C_x(H_2O)_y$	Общая формула углеводов
дых	Дыхание
исп	Использование
общ	Общее значение
погл	Поглощение
погл макс	Максимальное поглощение
$t$	Тепловые потери
$\phi$	Фотосинтез
$\phi_r$	Фототропическая реакция
$\Phi 660$	Фотоморфогенез по фитохрому 660
$\Phi 730$	Фотоморфогенез по фитохрому 730
хл	Синтез хлорофилла
эфф	Эффективность фотобиологической реакции
<u>Аббревиатуры</u>	
ДНАТ	Дуговая натриевая трубчатая (лампа)
СИД	Светодиодная (лампа)
ФАР	Фотосинтетически активная радиация

## 2. Теоретический анализ

В основе работы лежит известное положение о фотосинтезе, как ключевом энергетическом процессе, обеспечивающем функционирование и развитие растения. Установлено, что фотосинтетическая реакция является источником потоков химической энергии, необходимых для синтеза органических соединений и конструктивных процессов в растительной клетке [12]. Поглощение видимого излучения осуществляется молекулами хлорофилла. Вследствие поглощения энергии красного фотона, молекула хлорофилла переходит в возбужденное первое синглетное состояние, а энергия синего фотона способна перевести молекулу хлорофилла во второе синглетное состояние. Время полужизни второго синглетного состояния составляет всего  $10^{-12}$  сек, поэтому это состояние слишком нестабильно, чтобы использовать избыточную энергию для совершения химической работы. В результате возбужденная молекула рассеивает часть энергии в форме тепла за счет вращений и колебаний.

Оценка энергетической составляющей спектра видимого излучения и управление регуляторными процессами осуществляется фоторецепторами [12]. Ранее в работах [13, 14] были описаны общие характеристики воздействия оптического излучения на биологические системы растения на начальном этапе развития.

Известно, что фоторецепторы синего и красного света, криптохромы и фитохромы, управляют фотоморфогенезом. Фитохромы являются основным семейством киназ, чувствительных к красному свету, которые контролируют разнообразные клеточные функции в растениях, бактериях и грибах [15]. Фитохром представляет собой белок, к которому присоединен поглощающий свет пигмент, и существует в двух формах  $\Phi 660$  и  $\Phi 730$ , поглощающих красный

(660 нм) и дальний красный свет (730 нм) соответственно. В результате поглощения красного света хромофор в составе фитохрома  $\Phi 660$  претерпевает цис-транс-изомеризацию за счет вращения молекулы относительно двойной связи между 15-м и 16-м углеродом тетрапиррола и превращается в хромофор  $\Phi 730$ . Изменения в хромофоре передаются белку и приводят к изменению его конформации, которое далее возбуждает в клетке цепь сигналов, приводящих к фотоморфогенезу [16]. Криптохромы обладают двумя хромофорными группировками и при возбуждении синим и зеленым светом через вторичные мессенджеры передают информацию о световом сигнале [12]. Эти фотосенсоры также активируются через фотоизомеризацию их хромофоров [17]. В частности, фитохромы и криптохромы контролируют длину стебля и площадь листа, изменяя тем самым положение растения в пространстве, с целью увеличения площади листа, открытой для потока излучения и более эффективного фотосинтеза. Кроме того, установлено, что криптохромы участвуют в фотопериодической регуляции как у растений, так у животных [18, 19].

Фоторецепторы синего света, фототропины, отвечают за фототропизм – индуцируемое светом образование изгибов у растений, вызванное неравномерным освещением листьев растения [20]. Под действием кванта синего света происходит возбуждение одной из двух молекул хромофора – флавина. Предполагается, что возбуждение передается с флавина на аминокислотный остаток белковой части фототропина, в результате возникает сигнальный каскад [21]. Таким образом, эти рецепторы также осуществляют управление эффективностью фотосинтетической реакции и корректируют ориентацию растения в пространстве на ранней стадии развития, изменяя

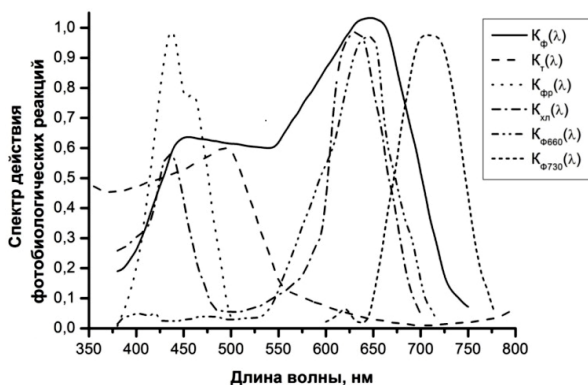
доступную для потока оптического излучения площадь поверхности листа.

Известно, что синтез хлорофилла регулируется выше обозначенными фоторецепторами [22], однако механизм управления этим процессом на данный момент недостаточно изучен.

### 3. Методика эксперимента

Побеги огурца обыкновенного (*Cucumis sativus* L.) гибрида «Кураж» в количестве 14 единиц были выращены в фитобоксе в грунте при температуре ( $T = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), соотношение день/ночь – 18/6 часов. Переменным фактором являлось освещение. Для поддержания постоянной температуры в случае ламп ДНаТ применялась система охлаждения Cooltube d 150. Измерение длины и ширины листовых пластин производили ежедневно в начале светового дня вплоть до появления второго взрослого листа. По истечении означенного периода взвешивание массы влажных и сухих ростков производилось на весах ККmoon digital scale 200x0,01 g.

Установлены спектры фотобиологических процессов, характеризующие зависимость интенсивности физиологических процессов в растении от длины волны падающего света [10]. На рис. 1 представлены спектры управляемых комплексом фоторецепторов фотобиологических реакций в растении.



**Рис. 1** – Спектр фотобиологических процессов: фотосинтеза  $K_{\phi}(\lambda)$ ; диссипации энергии в виде тепла  $K_T(\lambda)$ ;

фототропической реакции  $K_{ФР}(\lambda)$ ; синтеза хлорофилла  $K_{ХЛ}(\lambda)$ ; фотоморфогенеза по фитохрому Ф660  $K_{Ф660}(\lambda)$ ;

фотоморфогенеза по фитохрому Ф730  $K_{Ф730}(\lambda)$

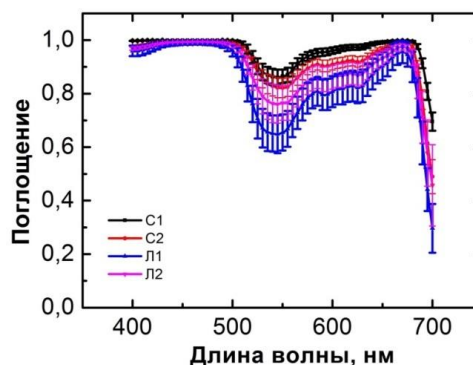
**Fig. 1** – Action spectrum of photobiological processes: photosynthesis  $K_{\phi}(\lambda)$ ; dissipation of energy in the form of heat  $K_T(\lambda)$ ; phototropic reaction  $K_{ФР}(\lambda)$ ; synthesis of chlorophyll  $K_{ХЛ}(\lambda)$ ; photomorphogenesis by phytochrome Ф660  $K_{Ф660}(\lambda)$ ; photomorphogenesis by phytochrome Ф730  $K_{Ф730}(\lambda)$

В результате обобщения экспериментальных данных по поглощению была предложена модель плотности потока фотонов, пригодных для фотосинтеза.

Плотность потока потенциально пригодных для фотосинтеза фотонов  $D_{\phi}(\lambda)$  для длины волны  $\lambda$  может быть рассчитана следующим образом:

$$D_{\phi}(\lambda) = K_{\phi}(\lambda)D(\lambda)K_{\text{полг}}(\lambda), \quad (1)$$

где  $D(\lambda)$  – плотность потока фотонов излучения источника света;  $K_{\text{полг}}(\lambda)$  – коэффициент поглощения листа растения (рис. 2 – каждая кривая представляет среднее значение десяти измерений).



**Рис. 2** – Влияние возраста листа на поглощение света: «С1» и «С2» – семядоля 1 и семядоля 2 соответственно; «Л1» и «Л2» – взрослый лист 1 и взрослый лист 2 соответственно

**Fig. 2** – Effect of leaf age on light absorption: “С1” and “С2” – cotyledon 1 and cotyledon 2, respectively; “Л1” and “Л2” – mature leaf 1 and mature leaf 2, respectively

Для расчёта количества молекул углеводов, образованных под воздействием некогерентного излучения, необходимо знать количество энергии, переносимой фотонами с определённой длиной волны. Количество энергии, переносимой молярным числом  $N_a$  фотонов с длиной волны  $\lambda$ , вычисляется как:

$$E_m(\lambda) = N_a \frac{hc}{\lambda}. \quad (2)$$

В работе [23] установили, что в реальных условиях квантовый расход составляет от 8 до 10 квантов на одну поглощённую молекулу углекислого газа и полученную молекулу кислорода, то есть при максимальном потреблении 10 фотонов с длиной волны  $\lambda = 680\text{ нм}$  энергия составит  $E_{\text{CO}_2} = 1\,760\text{ кДж/моль}$ .

Считается, что только единичный фотон может сделать вклад в каждый элементарный фотохимический акт, тогда потенциальный квантовый расход  $\gamma(\lambda)$  необходимо округлять до ближайшего большего или равного целого числа. Площадь листовой поверхности обозначена как  $S_i$ ,  $i$  – номер листа растения (первый, второй семядольные листья, первый взрослый лист), а  $\lambda_1 \div \lambda_2$  – диапазон длин волн некогерентного излучения. Тогда суммарное количество преобразованных молекул углекислого газа составит:

$$N_{\Sigma\_CO_2} = \sum_i \int_{t_1}^{t_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{D_{\Phi}(\lambda)}{\gamma(\lambda)} S_i d\lambda dt = \sum_i \int_{t_1}^{t_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{D_{\Phi}(\lambda)}{(E_{CO_2}/E_m(\lambda))} S_i d\lambda dt, \quad (3)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – время начала и завершения поглощения света поверхностью.

Для перехода от массы преобразованного углекислого газа к массе накопленного сухого вещества, необходимо ввести поправочные коэффициенты. Коэффициент  $K_1 = 0,64$  определяется как отношение количества синтезированных углеводов к количеству поглощённого углекислого газа [24]. Следует учесть, что не все синтезированные углеводы накапливаются, частично они расходуются в процессе дыхания растения [24]. На основе данных (рис. 3) о зависимости скорости поглощения  $CO_2$  от интенсивности света [25] вводится поправочный коэффициент  $K_2$ , учитывающий изменение диффузии углекислого газа и потери энергии в процессе дыхания:

$$K_2 = \frac{V_{\text{погл}} t_{\text{погл}} - V_{\text{дых}} t_{\text{дых}}}{V_{\text{погл\_макс}} t_{\text{погл}}}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{погл}}$  и  $t_{\text{погл}}$  – скорость и время поглощения  $CO_2$ ;  $V_{\text{дых}}$  и  $t_{\text{дых}}$  – скорость и время дыхания;  $V_{\text{погл\_макс}}$  – максимально возможное поглощение  $CO_2$ .

С учётом поправочных коэффициентов масса накопленных углеводов  $C_x(H_2O)_y$

$$M_{C_x(H_2O)_y} = K_1 K_2 N_{\Sigma\_CO_2} Mr_{CO_2}, \quad (5)$$

где  $Mr_{CO_2} = 44,01$  г/моль – молекулярная масса углекислого газа.

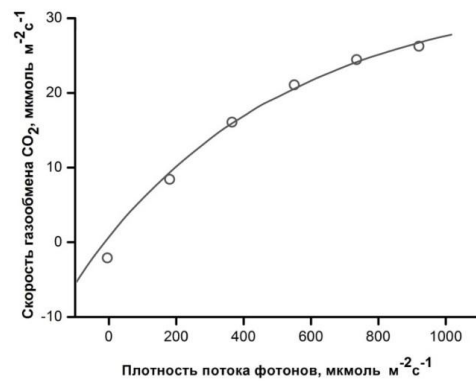


Рис. 3 – Зависимость газообмена  $CO_2$  от интенсивности света для *Cucumis sativus L.*

Fig. 3 – Dependence of  $CO_2$  exchange on light intensity for *Cucumis sativus L.*

Зная линейные характеристики (наибольшие длину  $L$  и ширину  $W$  листа) растения, можно рассчитать площадь поверхности листа  $S$ . Форма семядольного листа близка к эллипсу [26], поэтому площадь листовой поверхности может быть определена по формуле:

$$S = \pi LW. \quad (6)$$

Площадь взрослого листа определена согласно регрессионному уравнению [27]:

$$S = 0,859LW + 2,7. \quad (7)$$

На основании результатов ежедневных измерений листовых пластинок были рассчитаны средние площади листьев. Рассмотрено влияние спектра двух источников света (рис. 4) – дуговой натриевой трубчатой лампы мощностью 250 Вт (ДНАТ 250 Вт) и светодиодного светильника мощностью 46 Вт (СИД 46 Вт) [13] на эффективность фотосинтеза.

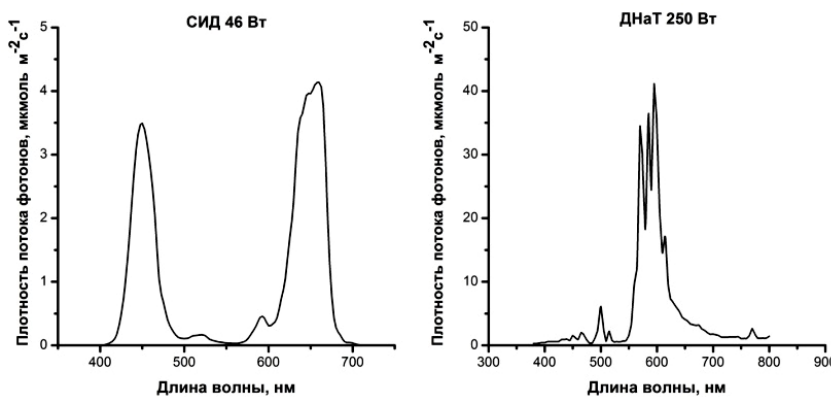


Рис. 4 – Спектры источников света: СИД светильника 46 Вт, ДНАТ лампы 250 Вт

Fig. 4 – Spectra of light sources: LED lamp 46 W, HPS lamp 250 W

Используя зависимости спектра поглощения листа растения от стадии развития и спектры действия фотобиологических реакций [10], можно оценить влияние спектрального состава и интенсивности оптического излучения на растение. Плотность потока фотонов, энергия которых потенциально рассеивается в виде тепла  $D_m$ , можно оценить по следующему выражению:

$$D_m = \int_{400}^{700} K_m(\lambda)D(\lambda)K_{\text{погл}}(\lambda)d\lambda. \quad (8)$$

Известно, что в сравнении с энергетическими воздействиями, фоторегуляторные требуют в десятки и сотни раз меньше энергии. Применение формул (7) или (8) для расчёта пригодного для регуляторных процессов излучения путём подстановки соответствующих коэффициентов для фототропизма, синтеза хлорофилла и других (см. рис. 1) неправомерно, поскольку в таком случае суммарная плотность потока фотонов по всем шести составляющим будет значительно превышать плотность поглощённого потока. В связи с этим для количественной оценки потенциально эффективной для регуляторных процессов доли излучения предложено следующее выражение:

$$D_{\text{эфф}} = K_{\text{исп}} \int_{400}^{700} K_{\text{эфф}}(\lambda)D(\lambda)K_{\text{погл}}(\lambda)d\lambda, \quad (9)$$

где  $K_{\text{исп}}$  – коэффициент использования энергии квантов света в регуляторных процессах. Для оценки потенциально эффективной доли излучения для фототропической реакции  $D_{\text{фр}}$ , синтеза хлорофилла  $D_{\text{хл}}$ , фотоморфогенеза по фитохрому Ф660  $D_{\text{Ф660}}$ , фотоморфогенеза по фитохрому Ф730  $D_{\text{Ф730}}$  коэффициент  $K_{\text{эфф}}(\lambda)$  принимает значения  $K_{\text{фр}}(\lambda)$ ,  $K_{\text{хл}}(\lambda)$ ,  $K_{\text{Ф660}}(\lambda)$ ,  $K_{\text{Ф730}}(\lambda)$  соответственно.

Поток фотонов  $D_{\text{погл}}$ , поглощённый листом растения определенного возраста, определяется:

$$D_{\text{погл}} = \int_{400}^{700} D(\lambda)K_{\text{погл}}(\lambda)d\lambda. \quad (10)$$

Поскольку как элементы системы, так и система в целом очень сложны, допустим ещё одно упрощение: коэффициент  $K_{\text{исп}}$  рассмотрен как один общий для всех регуляторных процессов. Коэффициент использования  $K_{\text{исп}}$  рассчитывается как:

$$K_{\text{исп}} = \frac{(D_{\text{погл}} - D_{\text{ф}} - D_{\text{т}})}{(D_{\text{фр}} + D_{\text{хл}} + D_{\text{Ф660}} + D_{\text{Ф730}})}. \quad (11)$$

При низкой плотности потока фотонов тепловые потери в процессе поглощения и преобразования энергии света практически отсутствуют, так как поглощенная энергия расходуется на совершение фотосинтеза [28]. Тогда для СИД 46 Вт формула (11) принимает вид:

$$K_{\text{исп}} = \frac{(D_{\text{погл}} - D_{\text{ф}})}{(D_{\text{фр}} + D_{\text{хл}} + D_{\text{Ф660}} + D_{\text{Ф730}})}. \quad (12)$$

#### 4. Результаты и их обсуждение

На основе результатов ежедневных измерений линейных размеров листовых пластин 14 побегов были рассчитаны средние значения длины и ширины листа. Эти данные использованы для расчёта средней площади листовой поверхности и среднего значения накопленного сухого вещества. В табл. 1 представлены рассчитанные суммарные средние массы накопленных углеводов  $M_{\text{C}_x(\text{H}_2\text{O})_y}$  и средний сухой вес экспериментально полученных образцов.

Таблица 1

Теоретически рассчитанные средние массы накопленных углеводов и средний сухой вес экспериментально полученных образцов

Table 1

Theoretically calculated average masses of accumulated carbohydrates and average dry weight of experimentally obtained samples

	Теоретически рассчитанная средняя масса накопленных углеводов, г	Средний сухой вес выращенных образцов, г
СИД 46 Вт	0,05	0,05
ДНаТ 250 Вт	0,24	0,20

Верификация данных произведена путём сравнения среднего сухого веса выращенных побегов и теоретически рассчитанной средней массы накопленных углеводов. Установлено совпадение расчётных и экспериментальных данных массы накопленных углеводов в пределах порядка величины. Различия могут быть объяснены тем, что поправочный коэффициент  $K_2$  не учитывает спектральные особенности рассматриваемых источников излучения, а также является косвенной индикацией зависимости скорости диффузии  $\text{CO}_2$  от интенсивности газооб-

мена. Кроме того, коэффициент  $K_1$  является средне-статистическим, не учитывающим все особенности реальных условий.

Рассчитаны значения плотности потоков фотонов  $D_{\Phi}, D_T, D_{\Phi P}, D_{\text{ХЛ}}, D_{\Phi 660}, D_{\Phi 730}$ , потенциально эффективных для фотобиологических реакций, для С1 и С2 семядольных листьев, а также для Л1 и Л2 взрослых листьев (табл. 2). Приведены исходные характеристики каждого источника света и количество излучения, поглощаемого листьями различного возраста (С1, С2, Л1, Л2).

Таблица 2  
Потенциально эффективная для фотобиологических реакций плотность потока фотонов  
Table 2  
Potentially effective for photobiological reactions photon flux density

Источник излучения	$D$ , мкмоль/м <sup>2</sup> с	Тип листа	$D_{\text{ПОГЛ}}$ , мкмоль/м <sup>2</sup> с	Плотность потока фотонов, мкмоль/м <sup>2</sup> с					
				$D_{\Phi}$	$D_T$	$D_{\Phi P}$	$D_{\text{ХЛ}}$	$D_{\Phi 660}$	$D_{\Phi 730}$
СИД 46	64	С1	63	53	–	2	4	3,4	0,6
		С2	62	52	–	2	4	3,3	0,6
		Л1	59	49	–	2,1	3,9	3,2	0,7
		Л2	60	51	–	1,9	3,6	3	0,6
ДНаТ 250	404	С1	385	312	46	0,9	11,4	13,4	1,4
		С2	367	297	44	0,9	11	12,9	1,3
		Л1	327	265	40	0,9	9,3	10,8	1,1
		Л2	349	283	43	0,8	9,7	11,3	1,1

Методика оценки потенциально эффективных для фотобиологических реакций потоков света в зависимости от спектрального состава может быть применена в системе автоматизированного управления процессом освещения растений с обратной связью по линейным размерам листовой поверхности.

### 5. Заключение

Предложенный метод оценки эффективности фотосинтеза в зависимости от спектрального состава, интенсивности света и площади листовой поверхности позволяет оценивать эффективность освещения без применения специализированных датчиков расхода воздуха. Расчёт для светодиодного светильника мощностью 46 Вт [13] и дуговой натриевой лампы (ДНаТ) мощностью 250 Вт показал, что теоретически рассчитанная средняя масса накопленных углеводов составляет 0,05 г и 0,24 г соответственно. Верность метода подтверждена экспериментальными данными. Значения среднего сухого веса выращенных под светодиодным светильником и под ДНаТ образцов составили 0,05 г и 0,20 г соответственно. Значения потенциально эффективных потоков фотонов в спектре светодиодного светильника для регуляторных процессов (фототропизма, синтеза хлорофилла, фотоморфогенеза), которые были определены впервые, составили 2 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 4 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 3,4 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 0,6 мкмоль/м<sup>2</sup>с для первой семя-

доли, в спектре лампы ДНаТ – 0,9 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 11,4 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 13,4 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 1,4 мкмоль/м<sup>2</sup>с для первой семядоли. В процессе формирования второй семядоли, первого и второго взрослого листа значения потенциально эффективных потоков фотонов для регуляторных процессов изменялись для обоих источников света. Для второго взрослого листа значения эффективных для фототропизма, синтеза хлорофилла, фотоморфогенеза потоков фотонов в спектре светодиодного светильника составили 1,9 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 3,6 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 3,0 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 0,6 мкмоль/м<sup>2</sup>с, в спектре лампы ДНаТ – 0,8 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 9,7 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 11,3 мкмоль/м<sup>2</sup>с; 1,1 мкмоль/м<sup>2</sup>с. Результаты исследования являются основой для создания энергоэффективной системы автоматического управления освещением растений с обратной связью по параметру растения (площади листовой поверхности).

Разработанный метод оценки влияния спектра света на процессы в растении может быть применен для различных биологических систем (низкоэнергетическое излучение в медицине, животноводстве, в современных гибридных высокотехнологичных системах преобразования излучения и т.д.). Теоретическое исследование воздействия спектра света на изменение физических свойств конденсированных веществ на примере биологической структуры растения показало энергоёмкость энергетических и регуляторных процессов. Разработка и исследование фи-





зико-технологических принципов совершенствования облучательных приборов электронной техники для живых систем с применением методов инженерии является перспективным направлением развития энергоэффективных технологий.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

#### Acknowledgments

This work was supported by the Federal Academy of Scientific Organizations (agreement № 007-ГЗ/Ч3363/26).

#### Список литературы

- [1] Bhushan, B. Biomimetics: lessons from nature—an overview / B. Bhushan // Biomimetics: lessons from nature—an overview. Phil. Trans. R. Soc. A. – 2009. – Vol. 367. – P. 1445–1486; DOI: 10.1098/rsta.2009.0011
- [2] Patra, J.K. Application of nanotechnology in textile engineering: An overview / J.K. Patra, S. Gouda // Journal of Engineering and Technology Research. – 2013. – Vol. 5. – No. 5. – P. 104–111; DOI: 10.5897/JETR2013-0309
- [3] Liu, C. Water splitting–biosynthetic system with CO<sub>2</sub> reduction efficiencies exceeding photosynthesis / C. Liu [et al.] // Science. – 2016. – Vol. 352. – No. 6290. – P. 1210–1213; DOI: 10.1126/science.aaf5039
- [4] Wang, S. Effect of light quality on the growth and photosynthetic characteristics of cucumber Cucumis sativus L. under solar greenhouse / S. Wang [et al.] // III International Symposium on Cucurbits 731. – 2005. – P. 243–251; DOI: 10.17660/ActaHortic.2007.731.33
- [5] Urbonavičiūtė, A. Photophysiological Investigations Using Light Emitting Diode Illumination / A. Urbonavičiūtė [et al.] // RURAL DEVELOPMENT 2009. – 2009. – P. 414.
- [6] Hogewoning, S.W. Blue light dose–responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of Cucumis sativus grown under different combinations of red and blue light / S.W. Hogewoning [et al.] // Journal of experimental botany. – 2010. – Vol. 61. – No. 11. – P. 3107–3117; DOI: 10.1093/jxb/erq132
- [7] Yano, A. Plant lighting system with five wavelength-band light-emitting diodes providing photon flux density and mixing ratio control / A. Yano, K. Fujiwara // Plant Methods. – 2012. – Vol. 8. – No. 1. – P. 46; DOI: 10.1186/1746-4811-8-46
- [8] Фокин, А.А. Установка для экспериментального исследования влияния параметров светового излучения на растения / А.А. Фокин, А.Н. Попов // Вестник МичГАУ. – 2012. – №2. – С. 117–121.
- [9] Olle, M. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality / M. Olle, A. Viršile // Agricultural and food science. – 2013. – Vol. 22. – No. 2. – P. 223–234; DOI: 10.23986/afsci.7897

[10] Волков, В.Н. Искусственное облучение растений / В.Н. Волков [и др.]. – Институт агрохимии и почвоведения РАН–Пушино, 1982. – 42 с.

[11] McCree, K.J. Photosynthetically active radiation / K.J. McCree // Physiological plant ecology I. – 1981. – P. 41–55.

[12] Алехина, Н.Д. Физиология растений: Учебник для студ. вузов под ред. И.П. Ермакова / Н. Д. Алехина [и др.] – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 640 с.

[13] Супельняк, С.И. Моделирование и разработка светодиодного адаптивного осветителя для растений / С.И. Супельняк, В.Г. Косушкин, С.А. Адарчин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2017. – Т. 22. – №. 7. – С. 21.

[14] Супельняк, С.И. Спектрофотометрическое измерение спектра поглощения растений / С.И. Супельняк, В.Г. Косушкин, С.А. Адарчин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2017. – Т. 22. – №. 8. – С. 25.

[15] Takala, H. Signal amplification and transduction in phytochrome photosensors / H. Takala [et al.] // Nature. – 2014. – Vol. 509. – No. 7499. – P. 245; DOI:10.1038/nature13310

[16] Кулаева, О.Н. Как свет регулирует жизнь растений / О.Н. Кулаева // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7. – №. 4. – С. 6–12.

[17] Hellingwerf, K.J. Key issues in the photochemistry and signalling-state formation of photosensor proteins / K.J. Hellingwerf // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. – 2000. – Vol. 54. – No. 2-3. – P. 94–102; DOI: 10.1016/S1011-1344(00)00004-X

[18] Czarna, A. Structures of Drosophila cryptochrome and mouse cryptochrome1 provide insight into circadian function / A. Czarna [et al.] // Cell. – 2013. – Vol. 153. – No. 6. – P. 1394–1405; DOI: 10.1016/j.cell.2013.05.011

[19] Thresher, R.J. Role of mouse cryptochrome blue-light photoreceptor in circadian photoresponses / R.J. Thresher [et al.] // Science. – 1998. – Vol. 282. – No. 5393. – P. 1490–1494; DOI: 10.1126/science.282.5393.1490

[20] Уоринг, Ф. Рост растений и дифференцировка / Ф. Уоринг, И. Филлипс. – М.: Мир, 1984. – 515 с.

[21] Briggs, W.R. Phototropins: a new family of flavin-binding blue light receptors in plants / W.R. Briggs, J.M. Christie, M. Salomon // Antioxidants and Redox Signaling. – 2001. – Vol. 3. – No. 5. – P. 775–788; DOI: 10.1089/15230860152664975

[22] Kasemir, H. Control of chloroplast formation by light / H. Kasemir // Cell biology international reports. – 1979. – Vol. 3. – No. 3. – P. 197–214; DOI: 10.1016/0309-1651(79)90033-X

[23] Emerson, R. The quantum yield of photosynthesis / R. Emerson // Annual Review of Plant Physiology. – 1958. – Vol. 9. – No. 1. – P. 1–24.

[24] Якушкина, Н.И. Физиология растений: учебник для студентов вузов / Н.И. Якушкина, Е.Ю. Бахтенко. – М.: Изд-во ВЛАДОС, 2004. – 464 с.



[25] Alam M.A. Night time temperature and day time irradiance on photosynthesis and growth of cucumber: Potential and possibilities for energy saving: thesis. – Norwegian University of Life Sciences, 2016.

[26] Gregory, F.G. Studies in the energy relations of plants. I. The increase in area of leaves and leaf surface of *Cucumis sativus* / F.G. Gregory // *Annals of Botany*. – 1921. – No. 1. – P. 93–123; DOI: 10.1093/oxfordjournals.aob.a089751

[27] Blanco, F.F. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants / F.F. Blanco, M.V. Folegatti // *Horticultura Brasileira*. – 2003. – Vol. 21. – No. 4. – P. 666–669; DOI: 10.1590/S0102-05362003000400019

[28] Хебер, У. Запасание и диссипация энергии света растениями как взаимно дополняющие процессы, вовлеченные в поддержание жизни растения / У. Хебер, О.Л. Ланге, В.А. Шувалов. – Проблемы регуляции в биологических системах: биофизические аспекты / под ред. Рубина АБМ, – 2007. – 195 с.

### References

[1] Bhushan B. Biomimetics: lessons from nature—an overview. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2009;367:1445–1486; DOI: 10.1098/rsta.2009.0011

[2] Patra J.K., Gouda S. Application of nanotechnology in textile engineering: An overview. *Journal of Engineering and Technology Research*, 2013;5(5):104–111; DOI: 10.5897/JETR2013-0309

[3] Liu C., Colón B.C., Ziesack M., Silver P.A., Nocera D.G. Water splitting–biosynthetic system with CO<sub>2</sub> reduction efficiencies exceeding photosynthesis. *Science*, 2016;352(6290):1210–1213; DOI: 10.1126/science.aaf5039

[4] Wang S., Fan S., Kong Y., Qingjun C. Effect of light quality on the growth and photosynthetic characteristics of cucumber *Cucumis sativus* L. under solar greenhouse. *III International Symposium on Cucurbits 731*, 2005;243–251; DOI: 10.17660/ActaHortic.2007.731.33

[5] Urbonavičiūtė A., Duchovskis P., Brazaitytė A., Samuolienė G. Photophysiological Investigations Using Light Emitting Diode. *RURAL DEVELOPMENT 2009*, 2009; 414 p.

[6] Hogewoning S.W., Trouwborst G., Maljaars H., Poorter H., van Ieperen W., Harbinson J. Blue light dose–responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of experimental botany*, 2010;61(11):3107–3117; DOI: 10.1093/jxb/erq132

[7] Yano A., Fujiwara K. Plant lighting system with five wavelength-band light-emitting diodes providing photon flux density and mixing ratio control. *Plant Methods*, 2012;8(1):46; DOI: 10.1186/1746-4811-8-46

[8] Fokin A.A., Popov A.N. The installation for research of influence of light parameters on plant

(Ustanovka dlya eksperimental'nogo issledovaniya vliyaniya parametrov svetovogo izlucheniya na rasteniya). *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*, 2012;2:117–121 (in Russ.).

[9] Olle M., Viršile A. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and food science*, 2013;22(2):223–234; DOI: 10.23986/afsci.7897

[10] Volkov V.N., Sventitskii I.I., Storozhev P.I., Tsareva L.A. Artificial irradiation of plants (Iskusstvennoe obluchenie rastenii). Institute of Agrochemistry and Soil Science RAS-Pushchino, 1982; p. 42 (in Russ.).

[11] McCree K.J. Photosynthetically active radiation. *Physiological plant ecology I*, 1981;41–55.

[12] Alekhina N.D., Balnokin Yu.V., Gavrilenko V.F. Physiology of Plants: A Textbook for Students of Universities edited by I.P. Ermakov (Fiziologiya rastenii: Uchebnik dlya stud. vuzov pod red. I.P. Ermakova). Moscow: Publishing Center Academy, 2005; 640 p. (in Russ.).

[13] Supelnyak S.I., Kosushkin V.G., Adarchin S.A. Numerical simulation and design of led grow lamp for plants (Modelirovanie i razrabotka svetodiodnogo adaptivnogo osvetitelya dlya rastenii). *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2017;22(7):21–27 (in Russ.).

[14] Supelnyak S.I., Kosushkin V.G., Adarchin S.A. Spectrophotometric measurement of the plant absorption spectrum (Spektrofotometricheskoe izmerenie spektra pogloshcheniya rastenii). *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2017;22(8):25–30 (in Russ.).

[15] Takala H., Björling A., Berntsson O., Lehtivuori H., Niebling S., Hoernke M., ... Westenhoff S. Signal amplification and transduction in phytochrome photosensors. *Nature*, 2014;509(7499):245; DOI:10.1038/nature13310

[16] Kulaeva O.N. How light regulates life of plant (Kak svet reguliruet zhizn' rastenii). *International Soros Science Education Program*, 2001;7(4):6–12 (in Russ.).

[17] Hellingwerf K.J. Key issues in the photochemistry and signalling-state formation of photosensor proteins. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2000;54(2-3):94-102; DOI: 10.1016/S1011-1344(00)00004-X

[18] Czarna A., Berndt A., Singh H.R., Grudziecki A., Ladurner A.G., Timinszky G., ... Wolf E. Structures of *Drosophila* cryptochrome and mouse cryptochrome1 provide insight into circadian function. *Cell*, 2013;153(6):1394–1405; DOI: 10.1016/j.cell.2013.05.011

[19] Thresher R.J., Vitaterna M.H., Miyamoto Y., Kazantsev A., Hsu D.S., Petit C., ... Sancar A. Role of mouse cryptochrome blue-light photoreceptor in circadian photoresponses. *Science*, 1998;282(5393):1490–1494; DOI: 10.1126/science.282.5393.1490

[20] Wareing P.F., Phillips I.D. The control of growth and differentiation in plants (Rost rastenii i differentsirovka). Moscow: Mir Publ., 1984; 515 p.



[21] Briggs W.R., Christie J.M., Salomon M. Phototropins: a new family of flavin-binding blue light receptors in plants. *Antioxidants and Redox Signaling*, 2001;3(5):775–788; DOI: 10.1089/15230860152664975

[22] Kasemir H. Control of chloroplast formation by light. *Cell biology international reports*, 1979;3(3):197–214; DOI: 10.1016/0309-1651(79)90033-X

[23] Emerson R. The quantum yield of photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1958;9(1):1–24.

[24] Yakushkina N.I., Bakhtenko E.Yu. Plant physiology: a textbook for university students (Fiziologiya rastenii: uchebnik dlya studentov vuzov). Moscow: VLADOS Publ., 2004; 464 p.

[25] Alam M.A. Night time temperature and day time irradiance on photosynthesis and growth of cucumber: Potential and possibilities for energy saving: Master's thesis. Norwegian University of Life Sciences, 2016.

[26] Gregory F.G. Studies in the energy relations of plants. I. The increase in area of leaves and leaf surface of *Cucumis sativus*. *Annals of Botany*, 1921;1:93–123; DOI: 10.1093/oxfordjournals.aob.a089751

[27] Blanco F.F., Folegatti M.V. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants. *Horticultura Brasileira*, 2003;21(4):666–669; DOI: 10.1590/S0102-05362003000400019

[28] Kheber U., Lange O.L., Shuvalov V.A. Storage and dissipation of light energy by plants as mutually complementary processes involved in maintaining plant life (Zapasanie i dissipatsiya energii sveta rasteniyami kak vzaimno dopolnyayushchie protsessy, vovlechenyye v podderzhanie zhizni rasteniya). Problems of regulation in biological systems: biophysical aspects / edited by Rubin ABM, 2007; 195 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI



ГАУ ВО «Волгоградский областной бизнес-инкубатор» информирует: 20–21 февраля 2019 года в г. Москве состоится IV Международная конференция «Арктика: шельфовые проекты и устойчивое развитие регионов» («Арктика-2019»).

Цели мероприятия:

- содействовать устойчивому социально-экономическому развитию и освоению Арктики;
- стимулировать научно-техническую и инновационную деятельность в регионе;
- создать благоприятные условия для привлечения инвестиций в проекты развития Арктической зоны Российской Федерации.

Ежегодно в конференции принимают участие представители Федерального Собрания Российской Федерации, федеральных органов государственной власти, органов государственной власти субъектов РФ, крупнейших российских и зарубежных компаний нефтегазовой отрасли и смежных с ней отраслей, представители бизнеса, а также делегаты от научных, исследовательских и проектных институтов и организаций.

<http://vinkub.ru/info/news/iv-international-conference-arctic-2019/>

