

УДК 628.931

И.Н. Козырева, В.Д. Никитин, Н.В. Цугленок

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
И ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСТЕНИЕВОДСТВА

В статье рассматривается упрощение расчетов корреляции между фотометрическими и фотосинтезными величинами для оценки эффективности источника излучения для растениеводства. Предложено преобразование формул связи потоков и средних относительных квазимонохроматических энергий излучения.

Ключевые слова: фотосинтезный поток, световой поток, источник излучения.

I.N. Kozyreva, V.D. Nikitin, N.V. Tsuglenok

GRAPH-ANALYTIC INTERPRETATION OF RADIATION SOURCE CHARACTERISTICS
AND PARAMETERS FOR PLANT CULTIVATION

The correlation calculation simplification between the photometric and photosynthetic values for the radiation source effectiveness assessment in plant cultivation is considered in the article. The conversion of the flow relation formulas and the average relative quasi-monochromatic radiation energy is offered.

Key words: photosynthetic flow, luminous flow, radiation source.

Введение. Для тепличных облучательных установок выбор источника излучения (ИИ) – важнейшая задача, но работы по этой тематике часто не содержат убедительной и полной светотехнической информации. На этом фоне выгодно отличается статья В.В. Малышева и др. [1], рекомендующая корреляцию между фотометрическими и фотосинтезными величинами для оценки эффективности ИИ.

Свет является одним из существенных факторов окружающей среды, регулирующих рост и развитие растений. Только часть излучения видимого оптического диапазона (область фотосинтетически активной радиации – ФАР) способствует фотосинтезу. Интенсивность стимуляции развития растения возрастает, когда облучение осуществляется в диапазонах спектра излучения, к которому растение наиболее восприимчиво [2, 4–10].

Зеленый одиночный лист поглощает 80–90 % энергии ФАР, отражает 5–10 % и примерно столько же пропускает; основную часть отраженного и пропущенного излучения составляют потоки с $\lambda=500-600$ nm [3].

Поглощенная растениями энергия оптического излучения превращается в основном в тепло и частично, в процессе фотосинтеза, – в энергию химических соединений создаваемых органических веществ. Доля наиболее ценной части излучения, потенциально пригодной для осуществления фотосинтеза, зависит от спектрального состава. Эта часть энергии особо важна при искусственном облучении растений.

Несколько замечаний по [1]:

- необходима проверка рекомендаций [1] о расчете лучистого потока Φ_e , фотосинтезного Φ_ϕ и фотонного Φ_ϕ потоков по световому потоку Φ_v (табл. 1, форм. (1), (2), (3));
- в [1] альтернативой Φ_e , Φ_ϕ , Φ_ϕ может быть только Φ_v (с нижним подстрочным индексом v – visual), в светотехнике альтернативой Φ_l (поток лампы) является Φ_c (светильника в сборе);
- для фотонного потока указана размерность $W \cdot eV$, но $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, следовательно, $W \cdot eV = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, что нелепо – на самом деле фотонный поток N/t имеет размерность s^{-1} ; в англоязычной литературе размерность плотности фотосинтетического потока фотонов – $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

• спорно включение в выборку ИИ лампы ДРТИ-1000 – источника ультрафиолетового излучения, применяемого в репрографии.

Приведение к линейной зависимости для возможности анализа

Цель данной работы – упрощение расчетов, их доступность для инженерной практики (ревизия экспериментальных результатов [1] не предполагается).

Таблица 1

Формулы связи потоков и средних относительных квазимонохроматических энергий излучения и преобразования с целью упрощения (тонированы) [1]

Формулы связи по [1]	Формулы после преобразования
Лучистый поток	
$\Phi_e = \frac{\Phi_l \cdot (S_{отн1} + S_{отн2} + S_{отн3})}{683 \cdot (0,02 \cdot S_{отн1} + S_{отн2} + 0,015 \cdot S_{отн3})} \quad (1)$	$y_e = x \left(\frac{1-0,015d_e}{0,02d_e-1} \right) + \left[\frac{d_e-1}{1-0,02d_e} \right] \quad (4)$
Фотосинтезный поток	
$\Phi_\phi = \frac{0,95 \cdot \Phi_l \cdot (0,6 \cdot S_{отн1} + 0,4 \cdot S_{отн2} + S_{отн3})}{683 \cdot (0,02 \cdot S_{отн1} + S_{отн2} + 0,015 \cdot S_{отн3})} \quad (2)$	$y_\phi = x \left(\frac{0,95-0,015d_\phi}{0,02d_\phi-0,57} \right) + \left[\frac{0,38-d_\phi}{0,02d_\phi-0,57} \right] \quad (5)$
Фотонный поток	
$\Phi_\varepsilon = \frac{0,95 \cdot \Phi_l \cdot (2,7 \cdot S_{отн1} + 2,25 \cdot S_{отн2} + 1,88 \cdot S_{отн3})}{683 \cdot (0,02 \cdot S_{отн1} + S_{отн2} + 0,015 \cdot S_{отн3})} \quad (3)$	$y_\varepsilon = x \left(\frac{1-0,015d_\varepsilon}{0,02d_\varepsilon-1} \right) + \left[\frac{1-d_\varepsilon}{0,02d_\varepsilon-1} \right] \quad (6)$
Параметры формул	
$\Phi_l, S_{отн1}, S_{отн2}, S_{отн3}$ для участков $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$	$d_j = \Phi_j \cdot 683 (\Phi_j)^{-1}, y = S_{отн1} (S_{отн2})^{-1}$ $x = S_{отн3} (S_{отн2})^{-1}, j=e \phi \varepsilon$

Для облегчения расчетов, возможности анализа и удобной интерпретации данных [1] формулы (1), (2), (3) были преобразованы соответственно в формулы (4), (5), (6) введением:

• вспомогательных переменных $x = S_{отн3} (S_{отн2})^{-1}, y = S_{отн1} (S_{отн2})^{-1}$ – приведены в преобразованных формулах (4), (5), (6), число исходных параметров сокращено до двух;

• безразмерного параметра $d_e = \Phi_e \cdot 683 (\Phi_e)^{-1}$ (соответственно $d_\phi \sim \Phi_\phi, d_\varepsilon \sim \Phi_\varepsilon$).

Преобразования дают возможность использовать:

- простые, 2D (без аппликаты), графики;
- линейные зависимости как простейший и, вместе с тем, эффективный вид функциональной связи.

Важным показателем ИИ является параметр d_j ; например, для лампы ДРЛФ имеем: $d_e = 45 W \cdot 683 \text{ lm/W} \cdot (16000 \text{ lm})^{-1} = 1,92$; $d_\phi = 25 W \cdot 683 \text{ lm/W} \cdot (16000 \text{ lm})^{-1} = 1,067$.

Анализ показывает, что табличным данным [1] эквивалентно семейство (убывающих, $k < 0$) прямых $y = kx + b$ ($b > 0$ при $1 < d_e < 50$) в уравнении (4) $\frac{S_{отн1}}{S_{отн2}} = y_e = \left(\frac{1-0,015d_e}{0,02d_e-1} \right) \frac{S_{отн3}}{S_{отн2}} + \left[\frac{d_e-1}{1-0,02d_e} \right]$, где $k = k(d_e)$ выделено круглой, а $b = b(d_e)$ – квадратной скобкой. Линии равных значений параметра d_e (на рис. 1 наряду с d_e у линий указано отношение $\Phi_e \cdot \Phi_e^{-1}$) представляют – в рамках данных [1] – математическую абстракцию, поскольку областью существования на каждой линии (или, при приблизительном равенстве, в ее окрестности) является только точка, соответствующая конкретному ИИ из [1]; момент не принципиальный, и ситуация изменится при расширении базы данных (привлечении в последующем других источников информации).

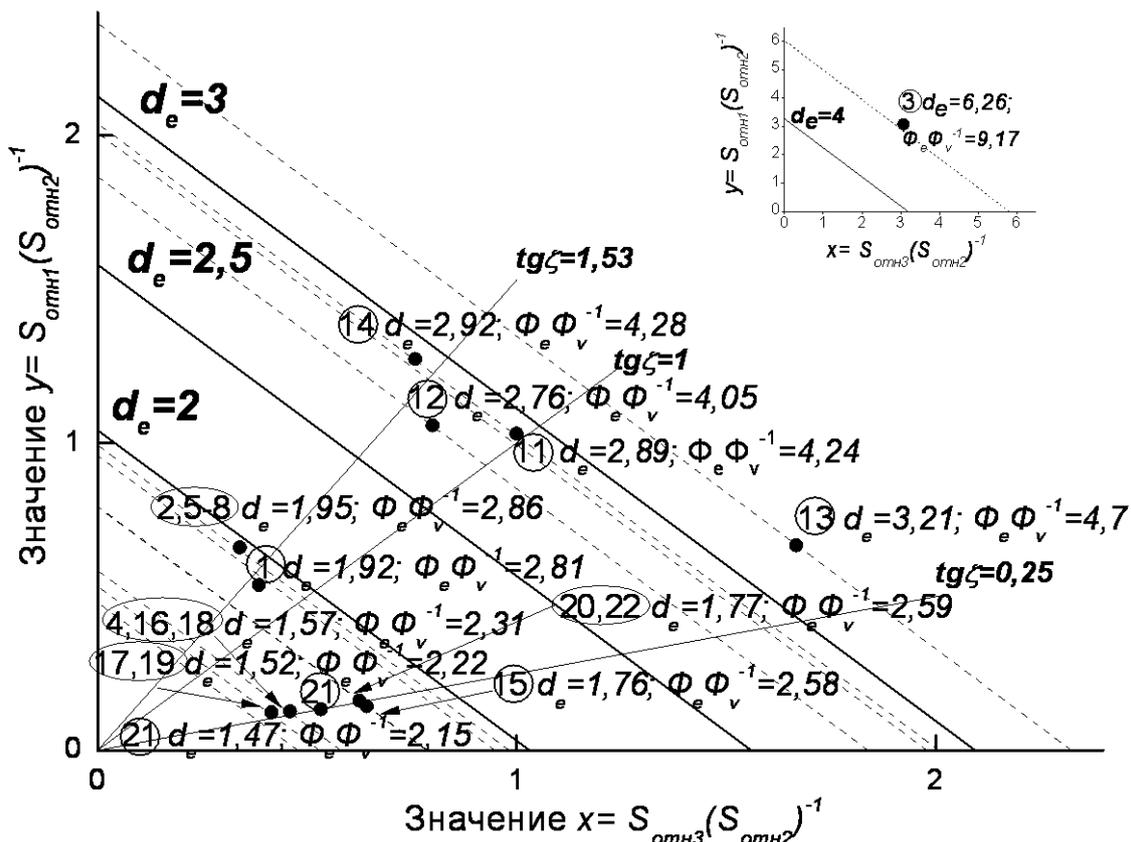


Рис. 1. Точки 1...22 (кроме ДРТИ-1000) в поле отношений средних относительных квазимонохроматических энергий излучения x, y ; линии $d_e = \text{const}$ и $\text{tg}\zeta = \text{const}$; геометрическое место точек $\Phi_e \Phi_v^{-1} = \text{const}$

Фактически положение линий $d_e = \text{const}$ на рисунке 1 (являются проекциями на плоскость XOY , рис. 2) определяется значением $K_1 = K_1(d_e)$, положение точки C' – коэффициентом $K_2 = K_2(x, y)$, ход линий $d_e = \text{const}$ в пространстве – коэффициентом $K_3 = K_3(x, y, d_e)$ (рис. 3).

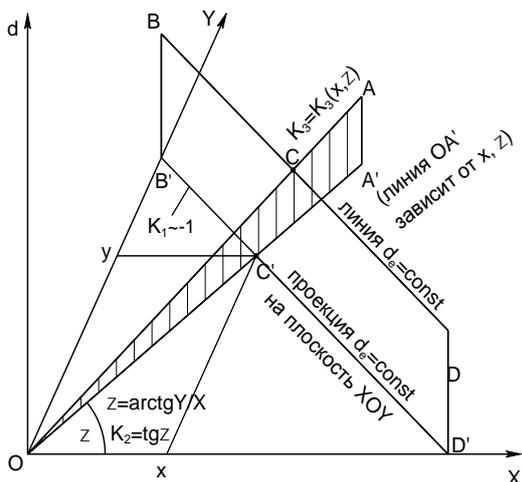


Рис.2. К построению рисунков 1 и 3

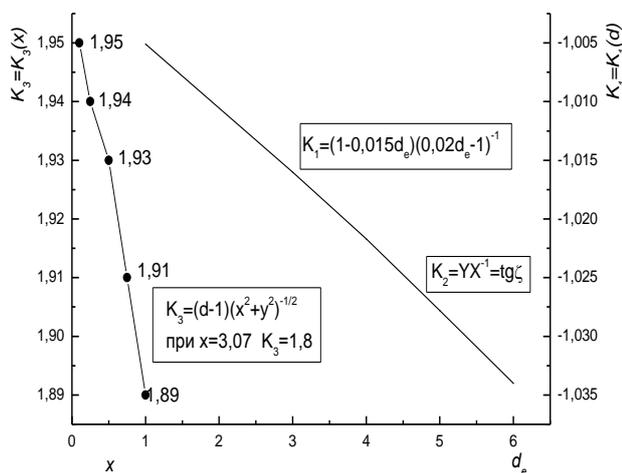


Рис.3. Определение K_1 и K_3

Алгоритм построения и анализ графика $S_{отн1} / S_{отн2} = f(S_{отн3} / S_{отн2})$

Алгоритм построения, пояснения и замечания по рисунку 1 даны в таблице 2.

Алгоритм построения («анатомия» – на рис. 1, 2) и пояснения

Алгоритм построения	Пояснения, замечания
<ul style="list-style-type: none"> • Находятся координаты $x=S_{отн3} \cdot (S_{отн2})^{-1}$, $y=S_{отн1} \cdot (S_{отн2})^{-1}$ искомого ИИ: абсцисса $x = \frac{d_e - 1}{1 - 0,015 d_e}$ при $y=0$ и ордината $y=b$ при $x=0$ искомого ИИ • Проводится прямая по точкам $(x, y=0)$ и $(x=0, y)$ (контроль – прохождение линии через точку, отображающую искомым ИИ) • Линия маркируется значением $d_e = \Phi_e \cdot 683(\Phi_v)^{-1}$ (Φ – в <i>lm</i>) и значением $\Phi_e \cdot \Phi_v^{-1}$ (Φ – в <i>klm</i>); результаты расчетов d_e и $\Phi_e \cdot \Phi_v^{-1}$ даны в таблице 3, а примеры расчетов линий $d_e = const$ – в таблице 4 • Наряду с линиями d_e, «обслуживающими» конкретные расчетные точки, на рисунке 1 дано семейство «круглых» значений d_e (показаны <i>black</i>), которое необходимо для размещения новых данных (дополнения информации) 	<ul style="list-style-type: none"> • Шаг линий на рисунке выбран из соображений компактности • Номера ИИ заключены в кружок либо (при совпадении) в овал • ИИ(10) имеет координаты $x=y=0$ и (минимальное) значение $d=1,0$ • Выявлено нарушение последовательности: для ИИ(21) линия $d_e=1,47$ проходит правее линии $d_e=1,567$ для ИИ(4, 16, 18); возможно, для SON-N-AGRO-400 имела место незначительная экспериментальная ошибка • На рисунке 1 не представлено графическое отображение для ДРТИ-1000 (x – неопределенность $\frac{0}{0}$, $y = \frac{100}{0} = \infty$); • Точка для ЛОР 1000 – перенесена, чтобы избежать значительного увеличения площади рисунка (обособленная точка $x=y=3,07$ с $d_e=6,26$)

Таблица 3

Ранжирование ИИ

Ранг	Номер в [1]	Тип источника ОИ, наполнение	Φ_v , <i>klm</i>	$d_e = \Phi_e \cdot 683(\Phi_v)^{-1}$	$\Phi_e \cdot \Phi_v^{-1}$	$\Phi_\phi \cdot \Phi_v^{-1}$	$\Phi_\alpha \cdot \Phi_v^{-1}$
1	9	ДРТИ 1000-1, <i>In</i>	2	51,2	75	41,5	197,5
2	1	ДРЛФ 400, <i>Hg</i>	16	1,92	2,81	1,56	6,38
3	3	ЛОП 1000, <i>Li, In</i>	24	6,26	9,17	6,67	21,6
4	4	ДНаЗ-350, <i>Na</i>	34	1,57	2,29	1,29	5,03
5	5	ДРИ 400-5, <i>Na, Sc</i>	36	1,95	2,86	1,56	6,94
6	13	КГ220-2000-4, <i>W, Br</i>	44	3,21	4,70	3,75	10,1
7	16	ДНаЗ-400, <i>Na</i>	44,5	1,61	2,36	1,28	5,01
8	21	SON-T-AGRO-400, <i>Na</i>	54	1,47	2,15	1,39	5,24
9	2	ДРФ 1000, <i>Na, Sc</i>	72	1,94	2,85	1,53	6,93
10	17	ДНаЗ-600, <i>Na</i>	81	1,52	2,22	1,22	4,88
11	20	PLANTSTAR-600, <i>Na</i>	82	1,77	2,59	1,54	5,59
12	15	LU 600, <i>Na</i>	84	1,76	2,58	1,55	5,56
13	18	SON-T600 <i>W, Na</i>	85	1,57	2,31	1,27	5,01
14	19	NaV-T600 <i>S, Na</i>	85	1,53	2,24	1,22	4,88
15	10	ДРТИ 1000-2, <i>TI</i>	95	1,01	1,47	0,56	3,29
16	6	ДРИ 1000-5, <i>Na, Sc</i>	103	1,96	2,87	1,55	6,94
17	22	LU 750W, <i>Na</i>	112	1,77	2,59	1,68	5,58
18	14	ДРОТ 2000, <i>Sn</i>	120	2,92	4,28	2,41	10
19	11	ДРИ 2000-1, <i>Dy, Ho, Tm</i>	170	2,89	4,24	2,69	9,77
20	7	ДРИ 2000-6, <i>Na, Sc</i>	200	1,96	2,88	1,56	6,94
21	12	ДКсТВ 6000, <i>Xe</i>	220	2,76	4,05	2,59	9,36
22	8	ДМ4-6000, <i>Na, Sc</i>	540	1,96	2,87	1,56	6,94

Примеры расчетов значений d_e и параметров линий (фрагмент для № п/п 1, 2, 3 в табл. 3)

Точка	Значения параметров		
	$x y$	$d_e = \Phi_e \cdot 683(\Phi_v)^{-1}$	$b = y(x) - kx$
1	0,385 \\ 0,538	$45 \cdot 683(16000)^{-1} = 1,92$	$0,538 - \frac{1 - 0,015 \cdot 1,92}{0,02 \cdot 1,92 - 1} \cdot 0,385 = 0,927$
2	0,340 \\ 0,66	$205 \cdot 683(72000)^{-1} = 1,94$	$0,66 - \frac{1 - 0,015 \cdot 1,94}{0,02 \cdot 1,94 - 1} \cdot 0,34 = 1,003$
3	3,071 \\ 3,071	$220 \cdot 683(24000)^{-1} = 6,26$	$3,071 - \frac{1 - 0,015 \cdot 6,26}{0,02 \cdot 6,26 - 1} \cdot 3,071 = 6,253$

Анализ связи Φ_e , Φ_ϕ , Φ_ϕ со световым потоком

Представляет интерес подтвердить (или опровергнуть) принципиальную возможность нахождения лучистых \ фотосинтезных \ фотонных потоков на основе значений Φ_v . В таблице 3 представлены ИИ из таблицы 1 [1], проранжированные по значению светового потока, а на рисунке 4 – значения Φ_ϕ в функции Φ_v . Очевидно, что оценка Φ_ϕ по Φ_v в целом связана с неприемлемой погрешностью, однако аппроксимация (грубая) для некоторых ИИ возможна. На рисунке 5 дана зависимость фотонных потоков $\Phi_\phi = \Phi_\phi(\Phi_v)$. Расчет фотонного потока Φ_ϕ через Φ_v по формуле (3) [1, с. 20] дает заметную погрешность. Отметим также, что во многих ситуациях нелепо сравнивать «на равных», например, ДКсТВ 6 кВт и ДНаЗ 350 Вт (отношение по мощности: $6000 \cdot 350^{-1} \approx 17$, по фотосинтезному потоку: $570 \cdot 44^{-1} \approx 13$).

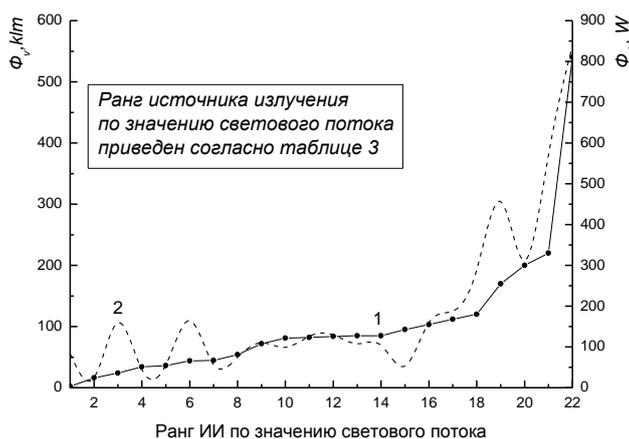


Рис. 4. Значения Φ_ϕ в функции Φ_v : 1 – световой поток Φ_v (klm); 2 – фотосинтезный поток Φ_ϕ (W)

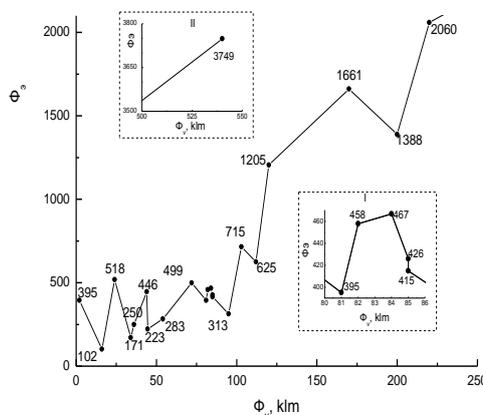


Рис. 5. Зависимость $\Phi_\phi = \Phi_\phi(\Phi_v)$: область 80...85 klm дана на врезке I; область 500...550 klm – на врезке II

Выводы. Значения Φ_{ϕ} в функции Φ_{ν} . Оценка Φ_{ϕ} в функции Φ_{ν} в целом связана с неприемлемой погрешностью, однако аппроксимация (грубая) для некоторых ИИ возможна.

Расчет фотонного потока Φ_{ν} через Φ_{ϕ} по формуле (3) [1, с. 20] дает заметную погрешность. Спорны сравнение фотонных потоков ИИ, не сопоставимых по мощности, и возможность считать растениеводческой лампу ДРТИ-1000 – источник ультрафиолетового излучения, применяемый в репрографии.

Предложенные преобразования формул связи лучистых, фотосинтезных и фотонных потоков и средних относительных квазимонохроматических энергий излучения упрощают расчеты, повышая их доступность для инженерной практики.

Литература

1. *Мальшев В.В., Кручинин П.Г., Летаев С.А.* Оценка эффективности источников оптического излучения для растениеводства // *Техника в сельском хозяйстве.* – 2009. – № 4. – С. 19–22.
2. Спектральные характеристики источников света и особенности роста растений в условиях искусственного освещения / *Н.Н. Протасова, Дж. М. Уеллс, М.В. Добровольский* [и др.] // *Физиология растений.* – 1990. – Т. 37. – Вып. 2. – С. 386–396
3. Искусственное облучение растений: метод. рекомендации / *В.Н. Волков, И.И. Свентицкий, П.И. Сторожев* [и др.]. – Пущино, 1982.
4. Principles of radiation measurement // Брошюра компании LI-COR. – URL: http://www.licor.com/env/pdf/light/Rad_Meas.pdf (дата обращения: 24.06.2013).
5. *Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М.* Биофизические и биотехнологические основы. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 213 с.
6. *Тихомиров А.А., Лисовский Т.М., Сидько Ф.Я.* Спектральный состав света и продуктивность растений. – Новосибирск: Наука, 1991. – 168 с.
7. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
8. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц: реальность и перспективы / *И. Бахарев, А. Прокофьев, А. Туркин* [и др.] // *Современные технологии автоматизации.* – 2010. – № 2. – С. 76–82.
9. *Воскресенская Н.П.* Фотосинтез и спектральный состав света. – М.: Наука, 1965. – 311 с.
10. *Леман В.М.* Курс светокультуры растений. – М.: Высш. шк., 1976. – 271 с.

