

CZU: 582.31:581.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ У ВИДОВ С РАЗЛИЧНОЙ ОКРАСКОЙ ВЕНЧИКОВ

*Ирина КОЛОМИЕЦ, Игорь ДРАГУЦАН**Институт экологии и географии*

DISTRIBUȚIA ENERGIEI SOLARE ABSORBITE LA SPECII CU DIFERITE CULORI ALE COROLEI

Distribuția energiei solare absorbite a fost studiată prin modelare matematică și experimental pe plante din speciile *Papaver rhoeas* L., *Borago officinalis* L., *Oenothera biennis* L. în faza de înflorire. S-a stabilit că energia de radiație și energia termică pentru modelul corolei de culoare albastră, roșie și galbenă sunt constante, iar energia de evaporare a corolei variază și depinde de energia absorbției. Astfel, cu cât mai mare este energia de absorbție, cu atât mai mare este energia de evaporare. Energia evaporării crește în rând: corolă de culoare albastră < corolă cu culoare roșie < corolă cu culoare galbenă.

Cuvinte-cheie: energie solară, modelare matematică, absorbție, radiații, evaporare, transmisii termice, echilibru termic, culoarea corolei.

DISTRIBUTION OF ABSORBED SOLAR ENERGY IN SPECIES WITH DIFFERENT COROLLA COLOURS

The distribution of absorbed solar energy was studied both through mathematical modelling and experientially on plants of the species *Papaver rhoeas* L., *Borago officinalis* L., *Oenothera biennis* L. in the flowering phase. It was found that the radiation energy and heat transfer energy for the corolla model of red, blue and yellow colours are constant, and the evaporation energy of corolla varies and depends on the absorption energy of the corolla, so that the higher the absorption energy, the greater the evaporation energy. The energy of evaporation increases in the following order: corollas with blue coloration < corollas with red coloration < corollas with yellow coloration.

Keywords: solar energy, mathematical modelling, absorption, radiation, evaporation, heat transfer, heat balance, corolla.

Введение

Основным источником энергии на Земле является солнечная энергия, обеспечивающая свет и тепло на планете, без чего невозможно существование и жизнедеятельность различных организмов. Свет – один из наиболее важных абиотических факторов среды, определяющий специфику положения в биосфере растений, подавляющее большинство из которых являются фотоавтотрофами. Особый интерес представляет вопрос о перераспределении солнечной энергии венчиками цветковых растений, так как по предположению академика Тахтаджяна [1] именно солнечная радиация обуславливает многообразие окраски венчика, основная функция которого заключается в защите генеративных органов от неблагоприятных абиотических факторов, в том числе и температурных [2,3,4]. Одним из механизмов регулирования температуры цветка является испарение. Среди морфофизиологических признаков, служащих маркерами уровня транспирации цветка, выделяют: количество и размер лепестков в цветке, наличие воскоподобной пленки, количество устьиц [5]. Ранее нами было установлено, что окраска венчика влияет на количество поглощаемой солнечной энергии и, как следствие, приспособленность к различным температурным режимам среды обитания. Цель данной работы сводилась к изучению распределения поглощаемой энергии модельными венчиками различной окраски.

Методы и объекты

В качестве объекта исследований были взяты три вида травянистых цветковых растений: *Papaver rhoeas* L., *Borago officinalis* L., *Oenothera biennis* L. в фазе цветения. Представленные в 2016 году Каспер Дж. Ван дер Коой и другими [6] спектры поглощения, пропускания и отражения для монохроматически окрашенных венчиков были взяты за основу при составлении нами уравнения теплового баланса для модельного лепестка. Плотность (ρ) исследованных солнечных потоков (красного, желтого, синего диапазонов) получали путем деления экспериментально полученных и проинтегрированных значений на энергию фотона (e), заданного диапазона [7], определяемого по формуле:

$$e = \frac{hc}{\lambda},$$

где c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м\с), $h=1,24$ эВ·нм.

Приведенную энергию отраженного потока для синего и красного модельных венчиков получали путем умножения числа фотонов самого малочисленного потока (синего) на усредненную по диапазону энергию фотона. Приведенную энергию поглощенного потока получали аналогичным путем, только для дополнительных цветов: синего – для желтого, зеленого – для красного и желтого – для синего цвета лепестка. Энергию потока пропускания получали путем вычитания из энергии падающего потока энергии отраженного и энергии поглощенного потока. Абсолютную и относительную влажность, используемую для теоретического вычисления скорости испарения в модели, определяли по логарифмическим кривым зависимости количества воды в воздухе при абсолютной и относительной влажности и различной его температуре.

Испарение водяного пара в образцах измеряли весовым методом через каждые 60 минут в трёх повторностях для каждого вида на электронных весах с погрешностью взвешивания 0,1 мг. Все единицы энергии потока приводили к системе СИ исходя из соотношений: 1 Вт=3600 Дж/час, 1 электрон-вольт [эВ] = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж, 1 джоуль [Дж] = $6,24 \cdot 10^{18}$ [эВ]. Статистическая обработка данных проводилась в рамках программы “Excel”.

Результаты и обсуждение

Поверхность растения, поглощая солнечную радиацию и превращая её в тепло, сама воздействует на температурный режим прилегающих к ней слоев воздуха. Именно эти две составляющие теплового баланса – тепло, поглощаемое растениями, и тепло, затрачиваемое на нагревание воздуха путём турбулентного теплообмена, наряду с оптимальными условиями влажности, являются общими факторами фитолимата. Обычно, чем теплолюбивее растение, тем больше солнечной радиации оно расходует на собственный обогрев и тем меньше на испарение. Так, лён, имеется в виду целое растение, 3/4 поглощенной радиации тратит на испарение и только 1/4 на нагревание, сахарная свекла на нагревание расходует 1/3, а подсолнечник – более половины поглощаемой радиации. Систематические наблюдения за тепловым балансом различной растительности показали, что в каждый период их жизни, в каждую фазу развития соотношение их потребности в тепле и влаге разное. Например, для пшеницы в период роста растения поглощаемая энергия тратится на испарение, а в период созревания – на нагревание [8]. Переход между этими двумя фазами происходит во время цветения. В этой связи представляет интерес проблема распределения поглощаемой энергии цветком. Перераспределение поглощаемой энергии растением в неравновесном случае, когда рабочая поверхность ещё нагревается, происходит по следующим потокам: по потоку фотосинтетически активной радиации ($\Phi_{\Phi AR}$), потоку излученной радиации ($\Phi_{изл}$), потоку теплопередач ($\Phi_{теплопередач}$) и потоку энергии, затраченной на испарение ($\Phi_{испар}$). Приравниваем две формулы для выражения потока поглощения в случае теплового равновесия:

$$\Phi_{погл} = \Phi_{\Phi AR} + \Phi_{изл} + \Phi_{теплопередач} + \Phi_{испар} \quad (1)$$

$$\Phi_{погл} = \Phi_{пад} - \Phi_{отр} - \Phi_{проп}, \text{ тогда}$$

$$\Phi_{\Phi AR} + \Phi_{изл} + \Phi_{теплопередач} + \Phi_{испар} = \Phi_{пад} - \Phi_{отр} - \Phi_{проп}.$$

Венчики цветковых растений, в основном, не содержат хлорофилла, так как фотосинтез в лепестках отсутствует. И если в зелёном листе в процессе фотосинтеза затраты органического вещества восстанавливаются, то в лепестке цветка запас органических веществ не восстанавливается, а используется в процессе дыхания до полного исчезновения ресурса. Следовательно, в отличие от зеленого листа, для которого выполняется условие $\Phi_{\Phi AR} > 0$, для лепестка венчика цветковых растений выполняется условие $\Phi_{\Phi AR} = 0$. Тогда формула теплового баланса примет вид:

$$\Phi_{пад} = \Phi_{изл} + \Phi_{теплопередач} + \Phi_{отр} + \Phi_{проп} + \Phi_{испар}. \quad (2)$$

Согласно закону Стефана-Больцмана [9], поток излучения, испускаемый нечерным (серым) телом, а именно к такому типу относятся венчики цветковых растений, с определенной температурой, равен произведению потока излучения черного тела при данной температуре на ϵ – излучательную способность серого тела. Для одновременно излучающего и поглощающего тела, при условии, что

излучающая и поглощающая поверхность имеет одинаковую площадь (A), закон Стефана-Больцмана запишется в виде:

$$\Phi_{\text{излч}} = \sigma \alpha A (T_1^4 - T_2^4), \quad (3)$$

где $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана. Так как ϵ равен коэффициенту поглощения α , а потоки энергии рассчитываются на единицу площади, то формула (3) примет вид:

$$\Phi_{\text{излч}} = 5,67032 \cdot 10^{-8} \alpha (T_1^4 - T_2^4). \quad (4)$$

Поток энергии, расходуемый на обеспечение функции теплопередач, вычисляется как

$$\Phi_{\text{теплопередач}} = \kappa \Delta T = \kappa (T_1 - T_2), \quad (5)$$

где ΔT – общая разность температур между средами, κ – коэффициент теплопередачи, который в нашем случае равен $5,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Затраты тепла на испарение определяются произведением скрытой теплоты испарения: $L = 2256 \text{ кДж/кг}$ на V (скорость испарения в $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$).

$$\Phi_{\text{испар}} = L \cdot V. \quad (6)$$

Согласно закону Стефана [цитируется по 10], скорость испарения воды выражается формулой:

$$E = 4ir \ln \frac{H - f}{H - F}, \quad (7)$$

где r – радиус лепестка, в нашем случае для модельного лепестка $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, H – атмосферное давление, F – давление насыщенного пара, f – давление пара в окружающем воздухе, T_2 – температура венчика, i – коэффициент диффузии водяных паров в воздухе при температуре окружающей среды T_1 :

$$i = i_{T_1} \left(\frac{T_1 + T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (8)$$

где i_{T_1} (коэффициент диффузии при $T_1 = 20^\circ$) равен $21,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Выведем итоговую формулу для испарения, согласовав размерность:

$$\Phi_{\text{исп}} = 2256 \frac{\text{дж}}{\text{кг}} \cdot 21,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot 1000 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{дж}} \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \left(\frac{T_1 + T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \ln \frac{H - f}{H - F} = 1978 \left(\frac{T_1 + T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}} \ln \frac{H - f}{H - F} \frac{\text{вт}}{\text{м}^2}$$

Поток пропускания тела ($\Phi_{\text{проп}}$), в общем случае, зависит как от свойств самого тела, так и от угла падения, спектрального состава и поляризации излучения.

$$\Phi_{\text{проп}} = \tau \Phi_{\text{пад}}, \quad (9)$$

Таким образом, общее уравнение теплового баланса для венчика будет иметь вид:

$$\Phi_{\text{пад}} = \Phi_{\text{излч}} + \Phi_{\text{теплопередач}} + \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{испар}} + \Phi_{\text{проп}}. \quad (10)$$

Рассмотрим пути перераспределения поглощаемой энергии внутри лепестков различной окраски при температуре воздуха $T_1 = 20^\circ$, $C = 293^\circ \text{ К}$ и температуре венчика $T_2 = 19^\circ$, $C = 292^\circ \text{ К}$:

$$\Phi_{\text{погл}} = \Phi_{\text{излч}} + \Phi_{\text{теплопередач}} + \Phi_{\text{испар}}.$$

$$\Phi_{\text{погл}} = \sigma \alpha (T_1^4 - T_2^4) + \kappa (T_1 - T_2) + L \cdot V.$$

$$\Phi_{\text{погл}} = 5,7032 \cdot 10^{-8} \alpha \cdot (T_1^4 - T_2^4) + k (T_1 - T_2) + 1978 \left(\frac{T_1 + T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}} \ln \frac{H - f}{H - F}$$

Полученная формула отражает зависимость потока поглощения от температуры (T) окружающей среды, $\left(\ln \frac{H - f}{H - F} \right)$ влажности и солнечной активности $\left(\alpha = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{h \beta} \right)$, где β – коэффициент, зависящий от времени года, солнечной активности, прозрачности атмосферы и высоты солнца над горизонтом. Вычислим теоретически ожидаемую величину испарения для модельного лепестка по приведенному потоку при $\Delta T = 1^\circ \text{ К}$:

$$\Phi_{\text{погл}} = 5,67032 \cdot 10^{-8} \alpha (T_1^4 - T_2^4) + \kappa \cdot (T_1 - T_2) + \Phi_{\text{исп}},$$

тогда поток испарения модельного венчика, для которого количество фотонов приведено к количеству фотонов реального венчика *Borago officinalis* L. (далее будет именоваться как приведенный поток), выглядит следующим образом:

$$\Phi_{\text{исп}} = \Phi_{\text{погл}} - 5,67032 \cdot 10^{-8} a (T_1^4 - T_2^4) - k(T_1 - T_2).$$

Воспользуемся полученными нами ранее данными по соотношению спектров поглощения, отражения и пропускания для модельного венчика (таблица 1) и вычислим поток энергии испарения для модельных венчиков.

Таблица 1

Соотношение величин спектров поглощения, отражения и пропускания модельных видов с различной окраской венчика (280 нм - 800 нм)

Цвет (исключенный) венчика	Поглощенный приведенный поток		Отраженный приведенный поток		Пропущенный приведенный поток	
	Вт/м ²	доля, ед	Вт/м ²	доля, ед	Вт/м ²	доля, ед
Синий	208,3	0,404	96,86	0,188	210,2	0,408
Желтый	261,8	0,646	73,51	0,143	108,5	0,211
Красный	245,4	0,476	66,07	0,129	202,3	0,395
Среднее	238,5	0,509	78,81	0,153	176,3	0,338
Соотношение	3		1		2	

$$\Phi_{\text{исп. син. прив}} = 208,3 - 5,67032 \cdot 0,40 - 5,6 = 200,42 \text{ Вт/м}^2$$

$$\Phi_{\text{исп. жел. прив}} = 261,8 - 5,67032 \cdot 0,65 - 5,6 = 252,50 \text{ Вт/м}^2$$

$$\Phi_{\text{исп. крас. прив}} = 245,4 - 5,67032 \cdot 0,48 - 5,6 = 237,10 \text{ Вт/м}^2$$

Таким образом, энергия испарения приведенного потока, как и энергия потока поглощения, уменьшается в следующем направлении: энергия испарения венчика желтой окраски > красной окраски > синей окраски. Сравним эти данные с конкретно полученными результатами по интегральным спектрам поглощения видов *P. rhoeas*, *B. officinalis*, *Oen. biennis*, представленных в таблице 2, и вычислим испарение для лепестков видов *P. rhoeas*, *B. officinalis*, *Oen. biennis*.

Таблица 2

Интегральные величины спектра поглощения венчиков различной окраски для видов: *P. rhoeas*, *B. officinalis*, *Oen. biennis* (280 нм - 800 нм)

Цвет (исключенный) венчика	Поглощенный конкретный поток		Цвет (дополни тельный) венчика	Энергия фотона (ϵ , *10 ⁻¹⁹ Дж)	Плотность потока ρ , ед*10 ¹⁹	Поглощенный приведенный поток	
	Вт/м ²	доля, ед				Вт/м ²	доля, ед
Синий	208,3	0,404	жёлтый	3,43	60,73	208,3	0,404
Желтый	147,1	0,363	синий	4,31	34,13	261,8	0,646
Красный	266,9	0,518	зеленый	4,04	66,06	245,4	0,476

$$\Phi_{\text{исп. син. кон}} = 208,3 - 5,67032 \cdot 0,4 - 5,6 = 200,42 \text{ Вт/м}^2$$

$$\Phi_{\text{исп. жел. кон}} = 147,1 - 5,67032 \cdot 0,36 - 5,6 = 139,45 \text{ Вт/м}^2$$

$$\Phi_{\text{исп. крас. кон}} = 266,9 - 5,67032 \cdot 0,52 - 5,6 = 258,34 \text{ Вт/м}^2$$

Теоретически ожидаемые результаты подтверждены конкретными результатами для синего и красного венчиков. Энергия испарения конкретного потока, как и энергия поглощения для красного и синего венчиков, уменьшается в направлении: энергия испарения венчика красной окраски > энергии испарения венчика синей окраски. Конкретная энергия испарения желтого венчика отлична от теоретически ожидаемой в 1,8 раза (с учетом ошибки отклонения – почти в 2 раза). Для получения адекватной оценки энергии испарения для венчиков с желтой окраской мы решили весовым методом определить скорость испарения водяного пара (таблица 3) для лепестков венчиков исследуемых видов *B. officinalis*, *Oen. biennis*, *P. rhoeas*. Из полученных результатов следует, что энергия испарения лепестков увеличивается в направлении: *B. officinalis* (синий цвет венчика) < *P. rhoeas* (красный цвет венчика) < *Oen. biennis* (желтый цвет венчика), в соответствии с поглощаемой энергией. Исходя из формулы массы тела ($m = Sh\rho$), в нашем случае измеряемой массы лепестка, легко заметить, что энергия испарения зависит от морфофизиологических характеристик: плотности (ρ), толщины (h) и

площади лепестка, что подтверждается данными других авторов [11]. Полученные экспериментальным путем результаты хорошо согласуются с представленными выше теоретическими данными.

Таблица 3

Оценка энергии испарения для лепестков венчика видов *B.officinalis*, *Oen. biennis*, *P. rhoeas* (при $L=2256$ кДж/кг и скорости ветра $V_{ветра}=0$)

Цвет венчика	$V_{\text{эсп.}} \cdot 10^{-6}$, кг/мин.	$E_{\text{эсп. исп.}}$ 10^{-3} Дж/мин.	$E_{\text{эсп. исп.}}$, Вт	$S_{\text{лепестка}}$, 10^{-4} м^2	$\Phi_{\text{исп. леп.}}$, 10^{-12} Вт/м^2	$\Phi_{\text{исп.}}$ 10^{-8} Вт/м ²
Синий	0, 5	1128	0,0188	1,5	2,82	1,83
Жёлтый	1,0	2256	0,0376	12,0	45,3	3,78
Красный	0, 5	1128	0,0188	15,0	28,2	1,88

Выводы:

- энергия испарения прямо пропорциональна площади, толщине и плотности лепестковой пластинки;
- энергия испарения лепестка зависит от окраски венчика опосредованно, через количество поглощаемой энергии;
- количество поглощаемой энергии зависит, в свою очередь, от окраски венчика и увеличивается в направлении: синий < красный < желтый венчик.

Литература:

1. ТАХТАДЖЯН, А.Л. Система и филогения цветковых растений / Академия наук СССР. Ботанический институт имени В.Л. Комарова. М.-Л.: Наука, 1966. 611 с.
2. HARRAP, M.DJ, RANDS, S.A., HEMPEL DE IBARRA, N., WHITNEY, H.M. The diversity of floral temperature patterns, and their use by pollinators. In: *eLife*, 2017; 6:e31262 DOI: <https://doi.org/10.7554/eLife.31262>
3. EVARISTO, J., JASECHKO, S., MCDONNELL, J.J. Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow. In: *Nature: journal*, 2015, vol.525, no.7567, p.91-94. ISSN 0028-0836. <https://doi.org/10.1038/nature14983>
4. ROSBAKH, S., POSCHLOD, P. Minimal temperature of pollen germination controls species distribution along a temperature gradient. In: *Annals of Botany*, 2016, vol.117, issue 7, p.1111-1120, <https://doi.org/10.1093/aob/mcw041>
5. JASECHKO, S., ZACHARY, D., SHARP, J.J., GIBSON, S., BIRKS, J. YI & FAWCETT, P.J. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. In: *Nature: journal*, 2013, vol.496, no.7445, p.347-350. <https://doi.org/10.1038/nature11983>. PMID 23552893.
6. VAN DER KOOI, C.J., ELZENGA, J.T., STAAL, M., STAVENGA, D.G. How to colour a flower: on the optical principles of flower coloration. In: *Proc. Biol. Sci.*, 2016, 283 (1830): 20160429, <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0429>
7. КУХЛИНГ, Х. Справочник по физике, 2-е изд. Москва: Мир, 1985, с.520.
8. РУСИН, Н.П., ФЛИТ, Л.А. Солнце на земле. Москва: Гидрометеиздат, 1971, с.206.
9. КУХЛИНГ, Х. Указ. соч.
10. БРОКГАУЗ Ф.А., ЕФРОН И.А. *Энциклопедический словарь*. Москва: Аутопан, 1998 Электронное издание <https://biblioclub.ru/index>.
11. JASECHKO, S., ZACHARY, D., SHARP, J.J., GIBSON, S., BIRKS, J. YI YI & FAWCETT, P.J. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. In: *Nature: journal*, 2013, 3 April, vol.496, no.7445, p.347-350. <https://doi.org/10.1038/nature11983>. PMID 23552893.

Представленная работа выполнена в рамках государственного проекта № 20.8000.9.707.11.(2020-2023):
Оценка устойчивости городских и сельских экосистем с целью обеспечения их устойчивого развития.

Данные об авторах:

Ирина КОЛОМИЕЦ, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экоурбанистики, Институт экологии и географии.

E-mail: ikolomiec71@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2144-7667

Игорь ДРАГУЦАН, старший инженер лаборатории экоурбанистики, Институт экологии и географии.

Prezentat la 08.12.2020