

CZU: 582.31:581.5

DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.4431614>

## ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ВЕНЧИКОВ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

Ирина КОЛОМИЕЦ

Институт экологии и географии

## ECHILIBRU TERMIC AL COROLELOR PLANTELOR SUPERIOARE

În lucrarea a fost studiată distribuția fluxurilor de căldură ale radiației solare cu corola model de culoare roșie, galbenă și albastră. S-a constatat că corolele albastre absorb mai puțină energie solară decât corolele roșii, ceea ce confirmă existența unei convergențe geografice și sezoniere a colorării corolelor. Speciile cu corola albastră sunt mai adaptate la temperaturi scăzute, în timp ce cele cu corola roșie sunt mai adaptate la temperaturi ridicate.

**Cuvinte-cheie:** echilibru termic, corolă, culoare, temperatură, evoluție.

## HEAT BALANCE OF COROLLAS OF VASCULAR PLANTS

This study focused on the distribution of heat fluxes of solar radiation with model corollas of red, yellow and blue colours. It was found that blue corollas absorb less solar energy than red corollas, which confirms the existence of a geographic and seasonal convergence of corolla coloration. The species with a blue corolla are more adapted to low temperatures, while those with a red corolla are more adapted to high temperatures.

**Keywords:** heat balance, corolla, colour, temperature, evolution.

## Введение

Получение и поддержание оптимальной температуры цветка зачастую является обязательным условием для успешного размножения растений. Большинство взаимосвязей между температурой и скоростью развития генеративных органов у растений обладают унимодальным откликом на температуру. Среди морфофизиологических характеристик вида, влияющих на восприятие, трансформацию и аккумуляцию солнечной энергии цветком, особого внимания заслуживает окраска венчика. Исследования в этой области положили начало новому направлению – термической экологии, изучающей механизмы и закономерности распределения тепловых потоков элементами экосистемы [1-3]. В этой связи, составление и решение уравнения теплового баланса венчика представляет интерес при установлении эволюционных закономерностей распространения вида в различных температурных режимах среды. Цель исследования сводилась к изучению тепловых потоков модельного венчика с красной, желтой и синей окраской лепестков.

## Методы и материалы

В качестве объекта исследований были взяты 3 вида травянистых цветковых растений: *Papaver rhoeas* L., *Borago officinalis* L., *Oenothera biennis* L., в фазе цветения. Представленные спектры поглощения, пропускания и отражения для монохроматически окрашенных венчиков [4] были взяты за основу при составлении уравнения теплового баланса для модельного лепестка (диаграмма 1-3).

Плотность ( $\rho$ ) исследованных цветовых потоков (красного, желтого, синего) получали путем деления экспериментально полученных [5] и проинтегрированных значений на энергию фотона ( $e$ ) заданного диапазона [6], определяемого по формуле:

$$e = h c \lambda, \quad (1)$$

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

Приведенную энергию отраженного потока для желтого и красного 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 [7]: синего – для желтого, зеленого – для красного и желтого – для синего (табл.1,2). Энергию потока пропускания получали путем вычисления из энергии падающего потока энергии отраженного потока и энергии поглощенного потока (табл.3.). 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]. Уравнение теплового баланса составляли на основе законов термодинамики [8]. Статистическая обработка данных проводилась в рамках программы *Excel*.

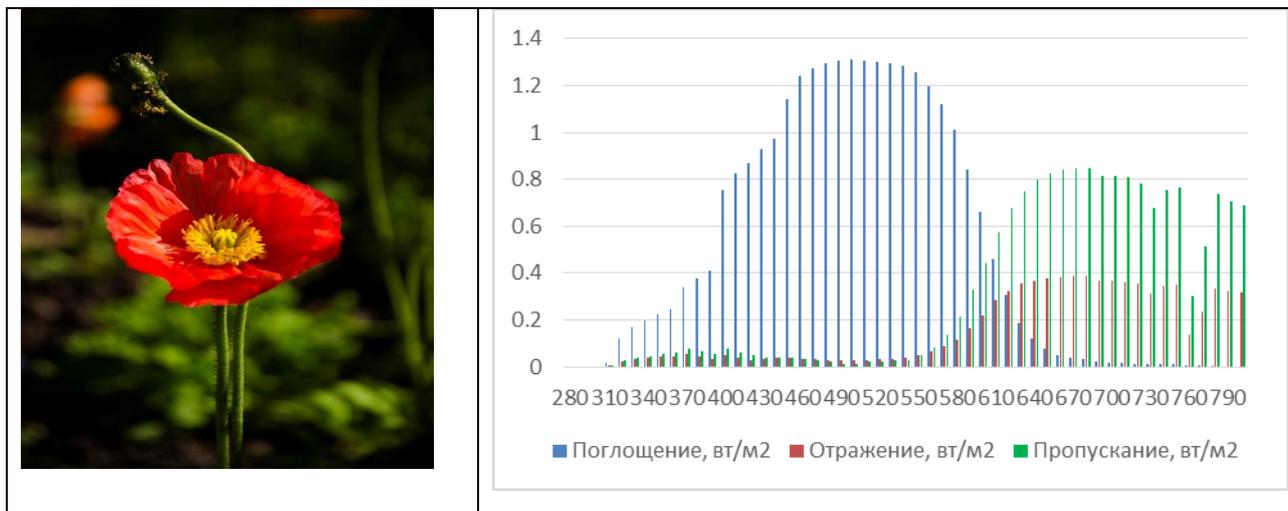


Диаграмма 1. Спектры поглощения, отражения и пропускания венчика *Papaver rhoeas* L.

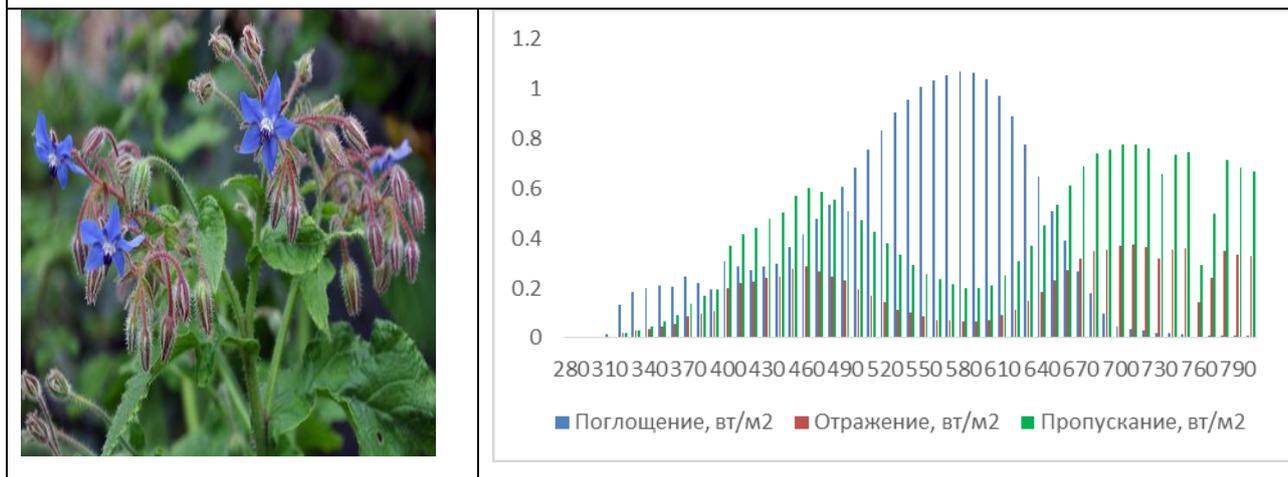


Диаграмма 2. Спектры поглощения, отражения и пропускания венчика *Borago officinalis* L.

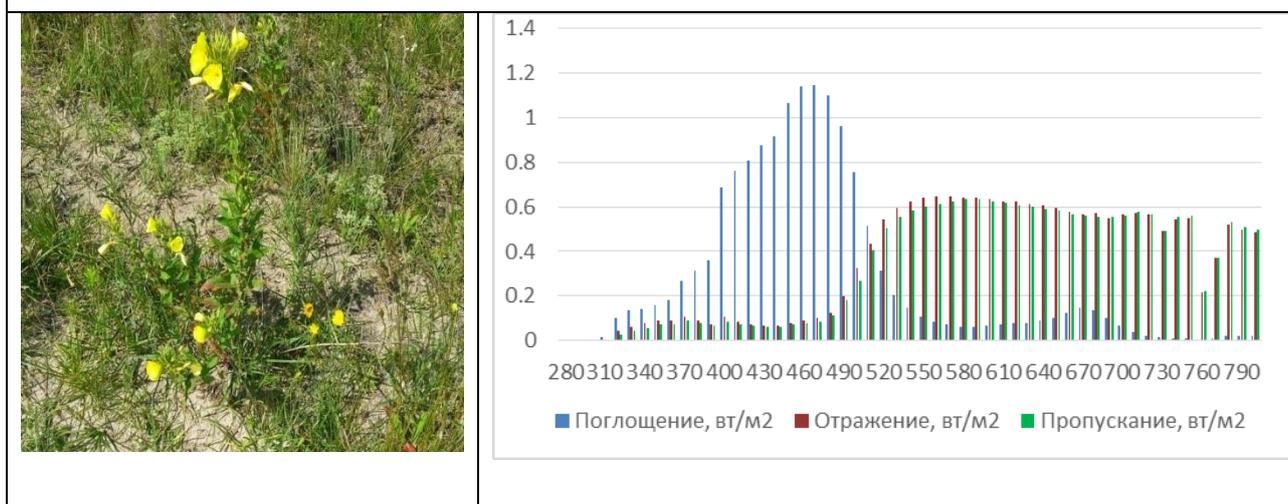


Диаграмма 3. Спектры поглощения, отражения и пропускания венчика *Oenothera biennis* L.

### Результаты и обсуждение

Согласно закону сохранения энергии, поток ( $\Phi_{над}$ ) падающего на единицу площади солнечного излучения лишь частично поглощается телом ( $\Phi_{погл}$ ), часть излучения отражается ( $\Phi_{отр}$ ) и часть проходит ( $\Phi_{проп}$ ) сквозь тело.

$$\Phi_{над} = \Phi_{погл} + \Phi_{отр} + \Phi_{проп}. \quad (2)$$

В результате простейших преобразований формула (2) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \Phi_{погл} / \Phi_{над} &= \Phi_{погл} / \Phi_{над} + \Phi_{отр} / \Phi_{над} + \Phi_{проп} / \Phi_{над} \\ 1 &= a(\lambda, T) + \gamma(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) \end{aligned} \quad (3)$$

где

$a(\lambda, T) = \Phi_{погл} / \Phi_{над}$  – коэффициент поглощения рабочей поверхности растения;

$\gamma(\lambda, T) = \Phi_{отр} / \Phi_{над}$  – коэффициент отражения (альbedo) рабочей поверхности;

$\tau(\lambda, T) = \Phi_{проп} / \Phi_{над}$  – коэффициент пропускания рабочей поверхности растения.

По данным внеатмосферных измерений, поток падающего солнечного излучения на перпендикулярную поверхность –  $\Phi_{над}$  – равен произведению солнечной постоянной  $h$ , равной 1367 Вт/м<sup>2</sup>, на коэффициент  $\beta$ , зависящий от времени года, солнечной активности, прозрачности атмосферы и высоты солнца над горизонтом. Согласно вышесказанному, перечисленные абиотические факторы, определяющие величину  $\beta$ , должны обуславливать сезонную конвергентную окраску венчиков у различных видов цветковых растений, связанную с соответствующими сезонными колебаниями температуры. Для подтверждения данной гипотезы мы решили проверить, какие по цвету венчики поглощают больше всего энергии. Нами были отцифрованы и проинтегрированы (таб.1,2,3) спектры трех видов растений с красными (*Paraver rhoeas* L.), желтыми (*Oenothera biennis* L.) и синими (*Borago officinalis* L.) венчиками [9] для трех типов окраски, используемых в системе RYB в качестве основных цветов [10].

Таблица 1

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

Цвет венчика	Отраженный конкретный поток		Энергия фотона (е,*10 <sup>-19</sup> Дж)	Плотность потока ρ, ед *10 <sup>19</sup>	Отраженный приведенный поток	
	Вт/м <sup>2</sup>	доля, ед			Вт/м <sup>2</sup>	доля, ед
Синий	96,86	0,1879	4,31	22,55	96,86	0,1879
Желтый	187,27	0,3632	3,26	54,63	73,51	0,1426
Красный	81,74	0,1585	2,93	28,13	66,07	0,1282

Полученные спектры отличались не только по длине волны, но и по плотности потока. Чтобы оценить энергию отражённого потока, мы уравнили их по плотности фотонов синего диапазона ( $\rho = 22,55 * 10^{19}$ ). Таким образом, в модельном (для красного и жёлтого венчиков) варианте величина отражённого потока увеличивается пропорционально средней по диапазону длине волны – 66,07 (красный), <73,51 (жёлтый), < 96,86 (синий) Вт/м<sup>2</sup>, в отличие от конкретного потока: 81,74 (красный), <96,86 (синий), <187,27 (жёлтый) Вт/м<sup>2</sup>. По величине конкретного отраженного потока жёлтый венчик приблизительно в 2 раза превышает синий (1,97) и красный (2,29). Однако и для конкретного отраженного и для приведенного отраженного потока характерна закономерность: синие венчики отражают больше энергии, чем красные.

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 (дополнительный) венчика	Энергия фотона (е,*10 <sup>-19</sup> Дж)	Плотность потока ρ, ед*10 <sup>19</sup>	Поглощенный приведенный поток	
	Вт/м <sup>2</sup>	доля, ед				Вт/м <sup>2</sup>	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

Конкретные интегральные величины спектров поглощения синих, желтых и красных венчиков соотносятся как 4,17: 2,94: 5,34≈4: 3: 5, соответственно, а для приведенного потока соотносятся как 4,17: 5,24: 4,91≈4: 5: 5 (табл. 2). Это может обуславливаться генетическими особенностями синтеза пигментов, отвечающих за акцепцию и трансформацию солнечной радиации у видов одного рода. Установлено, что для рода *Oenothera* характерен диплоидный набор хромосом,  $2n = 14, 28, 42, 56$  [11]. У мака также диплоидный набор хромосом,  $2n$  равен 14, хотя встречаются и тетраплоиды (*P. orientale*  $2n = 28$ ) и гексаплоиды (*P. pseudo-orientale*  $2n = 42$ ) [12]. Следовательно, количество поглощенной солнечной энергии генетически детерминировано и экологически обусловлено. И так как для конкретного и для приведенного поглощенного потока синие венчики поглощают меньше энергии, чем красные (табл. 3), то виды с синей окраской цветка должны быть более адаптированы к низким температурам, а виды с красной окраской цветка должны быть более адаптированы к высоким температурам. Такая эволюционная закономерность доказывает существование сезонной и зональной конвергенции окраски венчиков высших растений. Присутствие на одной территории видов с синими, красными и желтыми венчиками демонстрирует высокий адаптивный потенциал рода. Например, повышение полиплоидии у видов с синей окраской венчика можно рассматривать как адаптацию к повышению температуры ареала, а уменьшение полиплоидии у видов с красным венчиком – как адаптацию к понижению температуры. Можно предположить, что эволюционные закономерности распространения видов в неблагоприятных для них температурных условиях связаны с увеличением концентрации пигментов – акцепторов фотонов для видов с синими венчиками, и уменьшением концентрации пигментов – акцепторов фотонов для видов с красными венчиками.

Таблица 3

**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 <sup>2</sup>	доля, ед	вт/м <sup>2</sup>	доля, ед	вт/м <sup>2</sup>	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	

Пропущенный приведенный и пропущенный конкретный потоки по абсолютной величине, как для синего, так и для красного венчика, одинаковы, желтый венчик пропускает приблизительно в два раза меньше света, чем синий и красный (табл.3). В среднем, поглощенный, отраженный и пропущенный потоки для модельных вариантов соотносятся как 3: 1: 2. Другими словами, лепестки модельного венчика, уравненного по количеству фотонов, поглощают половину падающего на единицу площади солнечного излучения.

**Выводы:**

- синие венчики цветковых растений поглощают меньше энергии, чем красные, что подтверждает существование географической и сезонной конвергенции окраски венчиков;
- для модельного лепестка, варьирующего только по окраске, поглощенный, отраженный и пропущенный потоки в среднем соотносятся между собой как 3 : 1 : 2;
- эволюционные закономерности распространения видов в неблагоприятных для них температурных условиях связаны с увеличением концентрации пигментов – акцепторов фотонов для видов с синими венчиками, и уменьшением концентрации пигментов – акцепторов фотонов для видов с красной окраской венчика;

**Литература:**

1. 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, pp.1111–1120, <https://doi.org/10.1093/aob/mcw041>

2. CARLOS, M., HERRERA, M. Pollination consequences of simulated intra floral microbial warming in an early-blooming herb Estación Biológica de Doñana, CSIC, Avenida Américo Vespucio s/n, Isla de La Cartuja, E-41092 Sevilla. In: *V:Spain Flora*, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.flora.2016.10.003>
3. ХАРРАП, МАЙКЛ ДЖ. М., РЭНДС, ШОН., ХЕМПЕЛЬ ДЕ ИБАРРА, НАТАЛИ., ХИЗЕР, М УИТНИ. *Разнообразие цветочных температурных моделей и их использование опылителями* <https://doi.org/10.7554/eLife.31262.002>
4. КАСПЕР, ДЖ. ВАН ДЕР КООЙ., ЭЛЬЗЕНГА, ДЖ. ТЕО М., СТААЛ, МАРТЕН., СТАВЕНГА, ДОКЕЛЬ Г. Как раскрасить цветок: на оптических принципах окраски цветов. В: *Proc. Biol. Sci.*, 2016, 283 (1830): 20160429. Doi: 10.1098 / rspb.2016.0429.
5. Там же.
6. КУХЛИНГ, Х. *Справочник по физике*, 2-е изд. Москва: Мир, 1985. 520с.
7. Там же.
8. Там же.
9. КАСПЕР, Дж. ВАН ДЕР КООЙ и др. *Указ. соч.*
10. ГУРЕВИЧ, М.М. *Цвет и его измерение*. Москва – Ленинград. 1950. 267с.
11. CIOCÂRLAN, V. *Flora ilustrată a României*. București: Ed.Cereș, 2000. 1138 p.
12. CIOCÂRLAN, V. *Указ. соч.*

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 авторе:**

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

**E-mail:** ikolomiec71@gmail.com

**ORCID:** 0000-0002-2144-7667

*Prezentat la 28.09.2020*