

CZU: 582.4:581.5

[http://doi.org/10.59295/sum6\(166\)2023_01](http://doi.org/10.59295/sum6(166)2023_01)

**ПОЛИМОРФИЗМ ОКРАСКИ ВЕНЧИКОВ ЦВЕТКОВЫХ,
КАК АДАПТАЦИЯ К ШИРОТНОМУ И
СЕЗОННОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ**

Ирина КОЛОМИЕЦ,

Молдавский Государственный Университет

**POLIMORFISMUL DE CULOARE AL COROLELOR
PLANTELOR CU FLORI CA ADAPTARE LA DISTRIBUȚIA
LATITUDINALĂ ȘI SEZONIERĂ A ENERGIEI SOLARE**

Această lucrare prezintă date privind variația caracteristicilor calitative și cantitative (compoziția spectrală, poziția limitei maxime, lungimii de undă scurtă, intensitatea) ale spectrului solar în regiunile ultraviolete și vizibile. A fost stabilită distribuția latitudinală și sezonieră a maximumului radiației solare. Se presupune că culoarea corolei plantelor cu flori este rezultatul adaptării la spectrul solar maxim.

Cuvintele-cheie: iradierea solară, compoziția spectrală, poziția maximumului, adaptarea, culoarea corolei.

**COLOR POLYMORPHISM OF FLOWERING COROLLAS AS AN ADAPTATION
TO THE LATITUDINAL AND SEASONAL DISTRIBUTION OF SOLAR ENERGY**

This paper presents data on the variation of qualitative and quantitative characteristics (spectral composition, position of the maximum and short-wavelength boundary) of the solar spectrum in the ultraviolet and visible regions. The latitudinal and seasonal distribution of solar radiation maximum has been established. It is hypothesized that the corolla color of flowering plants is the result of adaptation to the solar spectrum maximum.

Keywords: solar irradiance, spectral composition, position of the maximum, adaptation, corolla color.

Введение

Переход растений от вегетативного морфогенеза к генеративному является переломным этапом онтогенеза. Он важен как для онтогенеза развивающегося индивидуального растения, так и для сохранения и дальнейшего процветания вида в целом. Поэтому в процессе эволюции выработался ряд приспособительных реакций, обеспечивающих соответствие перехода к цветению в наиболее благоприятный для конкретного вида период. Свет выступает в качестве триггера основных механизмов эндогенного регулирования цветения. Поэтому при изучении адаптаций у растений (в нашем случае окраски венчиков цветковых) к солнечной радиации необходимо знать, каким образом изменяется сама солнечная радиация – её количественные и качественные характеристики. Последующая задача состоит в создании модели максимально адаптированной к особенностям распределения солнечной радиации и сопоставлении распределения конкретных поверхностей (в нашем случае окраски поверхности венчиков видового богатства Земли) с теоретически ожидаемым модельным распределением. На необходимость таких исследований указано в целом ряде работ современных авторов [1, 2, 3, 4]. Таким образом, цель данной работы сводилась к изучению особенностей распределения качественных и количественных характеристик солнечного излучения в зависимости от времени года и географической привязанности, в создании и проверке модели максимально адаптированной поверхности к основным характеристикам солнечного излучения ультрафиолетового и видимого диапазона.

Методы и материалы

Анализ качественных и количественных характеристик солнечного излучения проводили на основе данных Технического Меморандума 82021 NASA [5] для абсолютно чистого неба ($\alpha = 1.3$, $\beta = 0.02$) при давлении водяного пара $H_2O = 20$ мм и озона $O_3 = 3.4$ мм. Расчеты энергии потока проводили для

максимального значения длины волны спектральных линий видимого диапазона в $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{мкм}^{-1}$. Расчет значений оптических масс (АМ) при разных высотах Солнца (h°) выполняли согласно таблице Бемпорада [6]. Расчет энергии фотонов проводили согласно уравнению Планка [9].

Результаты

Основными качественными характеристиками солнечного излучения являются спектральный состав, положение максимума и коротковолновая граница, которые зависят от h° и от АМ (таблица 1). Известно, что чем ниже опускается Солнце, тем богаче его спектр длинноволновым излучением, а коротковолновая граница и максимум излучения смещаются в сторону больших длин волн. Так как на широте $50^\circ - 60^\circ$ в зимние месяцы Солнце не поднимается над горизонтом выше, чем на $6.5^\circ - 16.5^\circ$ (таблица 1), то отсюда следует, что зимой на этих широтах в солнечном спектре полностью отсутствует ультрафиолетовое излучение с длинами волн короче 360 нм. Летом же ультрафиолетовый конец спектра простирается вплоть до 295 нм [5, 6].

Таблица 1. Широтное варьирование высоты Солнца над горизонтом и среднедневной оптической массы в точках солнцестояния и равноденствия.


Дата	22 декабря		21 марта		21 июня		23 сентября	
Широта, $^\circ$	h°	АМ	h°	АМ	h°	АМ	h°	АМ
90	-	-	0	39.600	23.5	2.500	0	39.600
80	-	-	10	10.400	33,5	2.500	10	10.400
70	-	-	20	5.600	43.5	2.500	20	5.600
60	6.5	14.650	30	3.820	53.5	2.220	30	3.820
50	16.5	6.720	40	2.900	63.5	1.895	40	2.900
40	26.5	4.300	50	2.360	73.5	1.670	50	2.360
30	36.5	3.170	60	2.000	83.5	1.500	60	2.000
20	46.5	2.525	70	1.740	86.5	1.455	70	1.740
10	56.5	2.105	80	1.550	76.5	1.610	80	1.550
0	66.5	1.820	90	1.410	66.5	1.820	90	1.410
-10	76.5	1.610	80	1.550	56.5	2.105	80	1.550
-20	86.5	1.455	70	1.740	46.5	2.525	70	1.740
-30	83.5	1.500	60	2.000	36.5	3.170	60	2.000
-40	73.5	1.670	50	2.360	26.5	4.300	50	2.360
-50	63.5	1.895	40	2.900	16.5	6.720	40	2.900
-60	53.5	2.220	30	3.820	6.5	14.650	30	3.820
-70	43.5	2.500	20	5.600	-	-	20	5.600
-80	33.5	2.500	10	10.400	-	-	10	10.400
-90	23.5	2.500	0	39.600	-	-	0	39.600

Легенда: градиентным серым цветом обозначено уменьшение АМ, «-» - полярная ночь. Знак «-» в первом столбце обозначает широты южного полушария. АМ - показатель атмосферного влияния на интенсивность солнечного излучения, доходящего до земной поверхности,

В моменты весеннего и осеннего равноденствия h° и АМ симметрично изменяются относительно линии экватора (0°). АМ уменьшается в направлении от северного полюса до экватора и увеличивается от экватора до южного полюса, а h° - наоборот: увеличивается в направлении от северного полюса до экватора и уменьшается от экватора до южного полюса. В момент зимнего солнцестояния центр симметрии смещается к южному полюсу на 23° , обуславливая явление полярной ночи на се-

верном полюсе и явление полярного дня на южном полюсе. В момент летнего солнцестояния центр симметрии смещается к северному полюсу на 23°, обуславливая явление полярной ночи на южном полюсе и явление полярного дня на северном полюсе (таблица 1). Варьирование показателей h и AM в зависимости от сезона носит синусоидальный характер и обуславливает изменение основных качественных и количественных характеристик солнечного излучения: спектрального состава, положения максимума, коротковолновой границы, и интенсивности (таблица 2, рисунок 1).

Таблица 2. Распределение максимумов солнечной энергии (E , Вт/м²·μкм) видимого диапазона (λ , нм) в точках весеннего и осеннего равноденствия.

λ , нм	Широта, °									
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
										
	E, Дж									
375	0	53	235	385	493	566	615	646	662	667
415	0	206	581	822	977	1076	1140	1180	1200	1207
420	0	220	598	834	985	1080	1142	1180	1200	1207
480	0	554	1047	1294	1439	1526	1581	1615	1633	1638
495	0	593	1055	1279	1408	1485	1533	1563	1578	1583
500	0	612	1068	1286	1410	1485	1532	1561	1575	1580
505	0	617	1066	1280	1402	1475	1520	1548	1563	1568
525	1	642	1070	1268	1381	1448	1490	1515	1528	1533
530	1	651	1075	1270	1381	1447	1488	1513	1525	1530
535	1	654	1071	1262	1370	1434	1474	1498	1511	1515
575	3	692	1073	1242	1336	1392	1426	1447	1458	1461
585	3	704	1081	1247	1338	1393	1426	1447	1457	1461
610	6	732	1078	1227	1309	1357	1387	1404	1413	1417
640	16	809	1105	1226	1292	1329	1352	1366	1373	1376
650	23	835	1111	1222	1282	1317	1338	1350	1357	1359
660	28	848	1111	1216	1273	1305	1324	1336	1342	1344
700	65	890	1096	1174	1215	1239	1253	1262	1266	1268
710	71	888	1084	1159	1198	1221	1234	1242	1247	1248
722,5	37	711	913	998	1047	1076	1094	1105	1111	1113
735	65	802	985	1058	1097	1120	1135	1143	1147	1149
740	72	812	989	1059	1096	1118	1132	1140	1144	1145
747,5	98	866	1030	1092	1124	1142	1153	1160	1163	1164
765	111	858	1008	1063	1092	1109	1119	1125	1128	1129

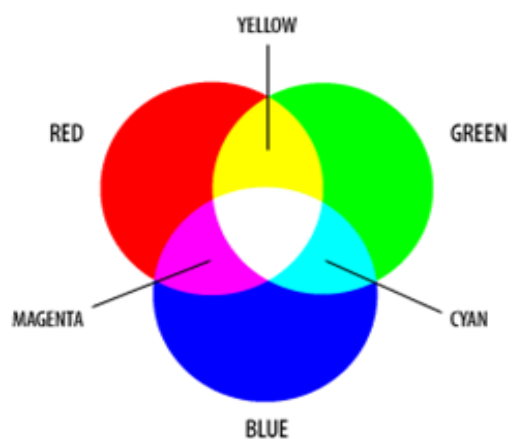
Подробный анализ спектрального распределения солнечного излучения с шагом 5 μкм и поширотным шагом 1° выявил наличие следующих максимумов и их смещений: ультрафиолетовый ($\lambda=375$ нм, $AM=1$), фиолетовый ($\lambda=415$ нм, $AM=1$; $\lambda=420$ нм, $AM=1,5$; 2), синий пик ($\lambda=480$ нм, $AM=1$; 1,5; 2; 3; 4), циановый ($\lambda=500$ нм, $AM=1$; 1,5; 2; 3; $\lambda=505$ нм, $AM=4$). Зеленый максимум проявляется, начиная с $\lambda=525$ нм ($AM=1$; 1,5), смещается на $\lambda=530$ нм при $AM=1,5$; 2;3 и на $\lambda=535$ нм при $AM=4$. Жёлтый пик $\lambda=575$ нм наблюдается при $AM=1$, а при $AM=1,5$; 2; 3; 4 он смещается на 15 нм ($\lambda=590$ нм). Красная область солнечного спектра представлена каскадными смещающимися пиками с $\lambda=610$ нм до 710 нм ($AM=2 - 10$); пиками, с $\lambda=722,5$ нм и с $\lambda=760$ нм, выраженными на всех широтах ($AM=1 - 10$); пиками с $\lambda=735$ нм, $\lambda=765$ нм ($AM=1 - 7$) и пиком с $\lambda=740$ нм, регистрируемом

при варьировании АМ от 1 до 4. Широтный анализ распределения максимумов солнечной энергии в течении года показал, что в северном полушарии распределение максимумов излучения происходит симметрично июню месяцу. Таким образом, что июль симметричен маю, апрель – августу, сентябрь аналогичен марту (точки осеннего и весеннего равноденствия), октябрь – февралю, ноябрь - январю, а декабрь в южном полушарии является осью симметрии, также как июнь в северном полушарии [6].

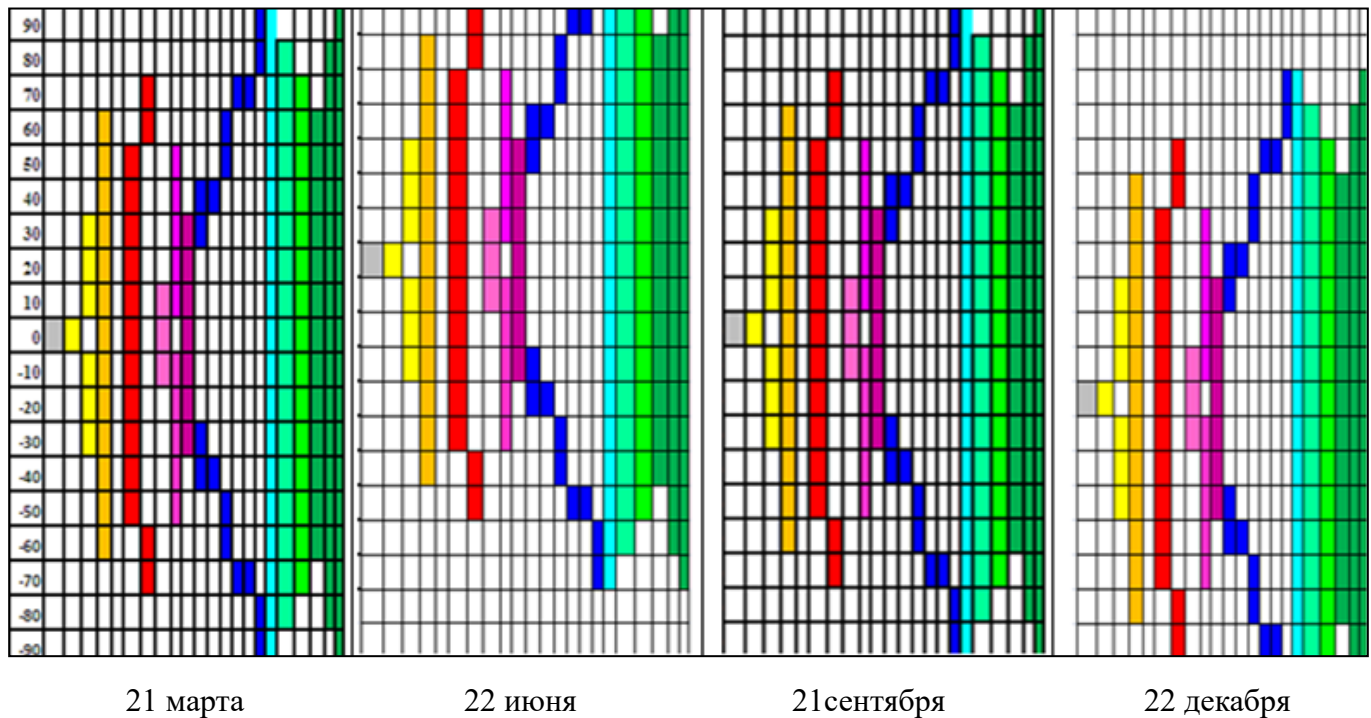
Исходя из того, что выраженность качественных характеристик солнечного излучения носит циклический характер, правомочно предположить, что реакция биологических систем на солнечную радиацию также носит циклический характер, проявляющийся в виде адаптаций как на широтном, так и на сезонном уровне. В процессе эволюции биологическая адаптация цветковых растений могла пойти по пути формирования светочувствительных поверхностей, максимум поглощения которых совпадает со спектральным максимумом падающего излучения. Для таких поверхностей выполняются общие законы поглощения электромагнитного излучения. Они определяют связь между величиной поглощения и количеством поглощающего вещества - пигмента. Для пигментов характерно специфическое строение молекул, а именно – наличие системы сопряженных двойных связей. В зависимости от положения и числа двойных связей, пигмент избирательно поглощает электромагнитное излучение. В связи с чем, каждый пигмент имеет соответствующую окраску и специфическую кривую поглощения света. Чем больше в молекуле пигмента двойных связей, тем длиннее его волна поглощения [7]. Согласно закону Гротгуса-Дрепера [8] химическое превращение вещества может вызвать только тот свет, который этим веществом поглощается. Можно ориентировочно считать, что на тело определенной окраски химически действует только такой свет, цвет которого является комплементарным цвету данного тела, т.е. дополняет его до белого (таблица 3). Используя указанные в таблице 3 формулы, построим модель венчика, поверхность которого сформировалась как результат адаптации к максимумам солнечного спектра. Представим формирование окраски поверхностей оптимально адаптированных к максимумам солнечного излучения. Общие закономерности в распределении максимумов солнечного излучения видимого диапазона должны сохраняться и при распределении максимумов отраженного света адаптированных к ним плоскостей. Сезонные аспекты будут изменяться со смещением распределения окраски венчиков по широтам на 23° в точке летнего солнцестояния и на -23° в точке зимнего солнцестояния.

Таблица 3. Моделирование в системе RGB окраски максимально адаптированных плоскостей по сезонам.

Видимая окраска	Компоненты отражения	Компоненты поглощения
Black	0+0+0	R+G+B
White	R+G+B	0+0+0
Red	R+0+0	0+G+B
Green	0+G+0	R+0+B
Blue	0+0+B	R+G+0
Cyan	0+G+B	R+0+0
Magenta	R+0+B	0+G+0
Yellow	R+G+0	0+0+B



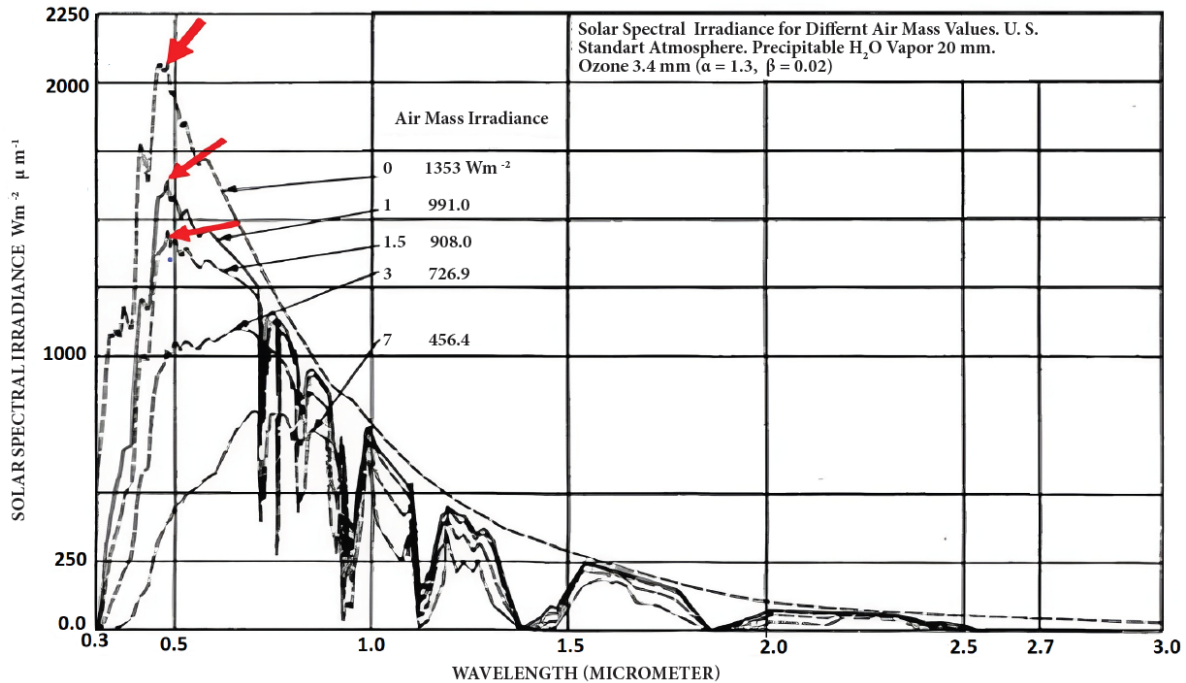
Очевидно, что если спектр излучения и поглощения (таблица 2) упорядочен в направлении: ультрафиолетовый - фиолетовый - синий – циановый – зелёный – жёлтый - оранжевый – красный, то порядок при отражении (таблица 3.) примет следующий вид: белый - желтый - оранжевый – красный – пурпурный – фиолетовый - синий – циановый - зелёный, согласно системе цветопередачи RGB. Система цветопередачи RGB считается более эффективной при спектральном анализе, так как соответствует, в отличии от системы цветопередачи RYB, трем типам колбочек (светочувствительных клеток к синему, красному и зеленому диапазону) на сетчатке глаза человека.



Область белой максимально адаптированной поверхности, как результат адаптации к ультрафиолетовому максимуму, находится на экваторе, где АМ близко или равно единице, область желтой адаптивной поверхности (таблица 3) располагается в пределах от 0° до 60° градусов по обе стороны от светового экватора. (Световой экватор совпадает с географическим в момент весеннего и осеннего равноденствия и изменяет свое положение в течении года вслед за изменением высоты Солнца над горизонтом.) Область красной поверхности варьирует от 0° до 70° градусов, а пурпурной (маржентовой) от 0° до 60° . Фиолетовая зона замыкается в пределах $\pm 50^\circ$. Поверхность синего цвета отсутствует на экваторе, а появляется только на $\pm 30^\circ$ широте и носит каскадный, фрагментарный характер на отрезке от 610 нм до 710 нм. Говоря о фрагментарном синем нужно обратить внимание, что насыщенный синий на 30-ой широте и на 90-ой должны отличаться не только по интенсивности, но и по оттенку. Синий каскадно переходит в голубой в направлении к полюсам. Голубая (циановая) полоса характерна для диапазонов $\pm [0^\circ - 90^\circ]$. Зеленная поверхность характерна для всех широт, поэтому, с точки зрения эволюции, наиболее приспособлена к варьированию интенсивности солнечного излучения, сдвигу коротковолновой границы спектра и к положению максимумов на электромагнитной шкале (таблица 3). Представленная модель характерна для точек 21 марта и 21 сентября. В точке летнего солнцестояния представленная картина сдвигается на 23° в направлении к северному полюсу, а в точке зимнего солнцестояния сдвигается на 23° в направлении к южному полюсу. Такое смещение обуславливает сезонную специфику окраски венчиков у цветковых растений [11]. Длинноволновой диапазон солнечного излучения наравне с коротковолновым диапазоном, также может обуславливать появление адаптивной поверхности белого цвета, благодаря приспособлению к многочисленным пикам в ИК – диапазоне (рисунок 1).

Основной количественной характеристикой солнечного излучения является интенсивность которая достигая земли, меняется в зависимости от времени суток, года, местоположения и погодных условий. Интенсивность солнечного излучения в свободном пространстве на удалении, равном среднему расстоянию между Землей и Солнцем, называется солнечной постоянной. Ее величина — 1353 Вт/м^2 . При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется в основном из-за поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения — озоном и рассеяния излучения частицами атмосферной пыли и аэрозолями (на рисунке 1 показано спектральное распределение интенсивности солнечного излучения в различных условиях).

Рис. 1. Изменение интенсивности, спектрального состава, положения максимума и коротковолновой границы солнечного излучения [5]. Красные стрелки указывают на двойной максимум в синем и циановом диапазоне, черные на показатели АМ.



Верхняя кривая (АМ0) соответствует солнечному спектру за пределами земной атмосферы (например, на борту космического корабля), т.е. при нулевой воздушной массе атмосферы. Она аппроксимируется распределением интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре 5800 °К. Кривые АМ1 иллюстрирует спектральное распределение солнечного излучения на поверхности Земли, когда Солнце в зените и при угле между Солнцем и зенитом 60°, соответственно. При этом полная мощность излучения — соответственно порядка 925 и 691 Вт/м². Средняя интенсивность излучения на Земле примерно совпадает с интенсивностью излучения при АМ=1,5 (Солнце - под углом 45° к горизонту) [5, 6]. Около поверхности Земли можно принять среднюю величину интенсивности солнечной радиации 635 Вт/м². В очень ясный солнечный день эта величина колеблется от 950 Вт/м² до 1220 Вт/м². Среднее значение — примерно 1000 Вт/м² или 860 ккал/(м²ч). Для упрощения вычисления по приходу солнечной энергии, его обычно выражают в часах солнечного сияния с интенсивностью 1000 Вт/м² [6].

Определенные ранее границы максимально адаптированных плоскостей основывались на поиске положения на ультрафиолетовом и видимом диапазоне максимального значения интенсивности солнечной радиации на выбранной широте. Если проанализировать значение интенсивности солнечной радиации по меридиану, то можно легко заметить ее увеличение по направлению от полюсов к световому экватору [6]. Таким образом, максимально адаптированная к широтному максимуму плоскость, по мере приближения к экватору должна увеличивать концентрацию пигмента, поглощающего в данном диапазоне. Если широтный максимум находится в приэкваториальной зоне, то по мере удаления от экватора концентрация пигмента должна уменьшаться (таблица 2). Усиление пигментации будет уменьшать альбедо поверхности и способствовать ее перегреву. Поэтому, по мере приближения к экватору естественный отбор будет направлен в сторону плоскости с высокой отражательной способностью, в идеале белой поверхности. Логично предположить, что в условиях существования нескольких пиков доминирующая окраска максимально адаптированной поверхности будет оставаться за окраской комплементарной пику с наибольшей интенсивностью. Однако при наличии равных по численности фотонов (N1=N2) потоков комплементарных диапазонов, адаптация будет происходить к обоим максимумам одновременно, что приведет и к отражению во взаимно комплементарных диапазонах, а следовательно и к появлению поверхности белого цвета

с наибольшим показателем альбеде. Докажем это положение. Исходя из законов цветообразования (таблица 3), запишем формулу для плоскости белого цвета в отраженном свете:

$$\text{White} = R+G+B \quad (1)$$

Просуммируем отраженный свет одного из трех комплементарных диапазонов: красный - циановый
 $\text{Red} + \text{Cyan} = R+0+0 + 0+G+B = R+G+B = \text{White} \quad (2)$

Аналогичное доказательство можно провести для двух других комплементарных пар:

$$\text{Green} + \text{Magenta} = R+0+B+0+G+0 = R+G+B = \text{White} \quad (3)$$

$$\text{Yellow} + \text{Blue} = R+G+0+0+0+B = R+G+B = \text{White} \quad (4)$$

Необходимо подчеркнуть, что для модельной плоскости принимается условие, что коэффициент пропускания будет равномерным и не равным 0. Для максимумов, находящихся в северных широтах для которых характерна низкая плотность фотонов, максимально адаптированными являются плоскости зеленого, синего и цианового цвета, согласно системе RGB, отбор направлен в сторону повышения концентрации количества молекул пигмента, для уменьшения альбеде и повышения температуры цветка, как защитной функции от охлаждения. Согласно квантово – оптическому закону эквивалентности Эйнштейна – Штарка [8], каждый поглощенный фотон вызывает фотохимическое возбуждение только одной молекулы. Поэтому количество фотонов определенного диапазона должно находиться в эквивалентном соотношении с количеством молекул пигмента – ловушки. Вычислим количество фотонов для потоков шириной 1 мкм.

Вычисляем энергию (E) фотона для каждого максимума, согласно уравнению Планка (1) и, разделив энергию потока (P) на энергию фотона (2), узнаем число фотонов (n) [9].

$$E = hc/\lambda \quad (5)$$

где h - постоянная Планка = $6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; c- скорость света = $3 \cdot 10^8$ м/с; λ - длина волны максимума солнечного излучения.

$$1\text{м} = 1 \cdot 10^9 \text{нм}, \text{ а } 1 \text{ нм} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м } \quad 375 \text{нм} = 3,75 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$E = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} / 3,75 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 19,89 \cdot 10^{-26} / 3,75 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 19,89 \cdot 10^{-26} \cdot 10^7 / 3,75 \text{ Дж} = 5,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$n = P/E \quad (6)$$

где P – интенсивность потока, Вт/м²·μкм, E – энергия одного электрона, Дж.

Исходя из полученных данных (таблица 4), можно заключить, что по численности фотонов световые потоки коротковолнового диапазона всегда меньше чем потоки длинноволнового диапазона. Из чего следует, что поверхности, адаптированные к длинноволновому диапазону превалируют над поверхностями, адаптированными к коротковолновому диапазону.

Таблица 4. Распределение плотности фотонов по максимумам излучения видимого диапазона (λ, нм) в точках весеннего и осеннего равноденствия.

λ, нм	Широта,°										E, Дж
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	
375	0	16	71	117	149	172	186	196	201	202	3,3
415	0	69	194	274	326	359	380	393	400	402	3,0
420	0	74	202	282	333	365	386	399	405	408	2,95
480	0	213	403	498	553	587	608	621	628	630	2,6
495	0	237	422	512	563	594	613	625	631	633	2,5
500	0	247	431	519	569	599	618	629	635	637	2,48
505	0	251	433	520	570	600	618	629	635	637	2,46
525	0	272	453	537	585	614	631	642	647	650	2,36
530	0	278	459	543	590	618	636	647	652	654	2,34
535	0	284	466	549	596	623	641	651	657	659	2,3

575	1	320	497	575	619	644	660	670	675	676	2,16
585	1	335	515	594	637	663	679	689	694	696	2,1
610	3	366	539	614	655	679	694	702	707	709	2,00
640	8	421	576	639	673	692	704	711	715	717	1,92
650	12	437	582	640	671	690	701	707	710	712	1,91
660	15	451	591	647	677	694	704	711	714	715	1,88
700	37	503	619	663	686	700	708	713	715	716	1,77
710	41	507	619	662	685	698	705	710	713	713	1,75
722,5	22	413	531	580	609	626	636	642	646	647	1,72
735	38	475	583	626	649	663	672	676	679	680	1,69
740	43	483	589	630	652	665	674	679	681	682	1,68
747,5	60	531	632	670	690	701	707	712	713	714	1,63
765	69	530	622	656	674	685	691	694	696	697	1,62

Вычисления по соотношению численности фотонов комплементарных диапазонов (их равновеликие значения дают в сумме белый цвет) показали, что на широтах, где соотношение между комплементарными диапазонами близко к 1 (530 нм/740нм; 0° - 30° северной и южной широты и 500 нм/722,5нм; 0° - 50° северной и южной широты) высокая вероятность появления в ходе эволюции максимально адаптированных плоскостей белого цвета. Таким образом, сочетание высокой и равномерной поглощающей способности рабочей поверхности в комплементарных диапазонах может быть причиной белоцветковости у высших растений. Обращает на себя внимание факт, что в соответствии с моделью цветообразования (таб. 3, рис. 1) неравноценные соотношения комплементарных диапазонов могут привести к образованию плоскости смешанного цвета. Поскольку количество фотонов в каждом диапазоне разное, то возможно оно формирует соответствующее распределение частот максимально адаптированных поверхностей. Интегрирование ультрафиолетовой и видимой части солнечного спектра по диапазонам цветовой гаммы показало соответствие между частотами максимально адаптированных поверхностей и конкретными глобальными частотами видов с желтой, красной, пурпурной и синей окраской венчиков (таблица 5). Несоответствие распределения частот для модельных плоскостей и для видов с белой окраской венчика вызвано отсутствием учета всех вариантов, для которых отношение между основным и дополнительным (комплементарным) диапазоном близко или равно единице. Несоответствие распределения частот с зеленой окраской венчика вызвано нераздельностью частот окраски вегетативных листьев и окраски лепестков цветка. Особого внимания заслуживает факт, что генераторами белоцветковости являются голубой и зеленые диапазоны.

Таблица 5. Соотношение количества фотонов комплементарных диапазонов солнечного спектра.

Комплементарные диапазоны λ_1/λ_2	Географическая широта, β°									
	90	80	70	60	50	40	30	20	0	
420 нм/585 нм	0,0	0,2	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
480 нм/650 нм	0,0	0,5	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
500 нм/722,5 нм	0,0	0,6	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
530 нм/740 нм	0,0	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0

Легенда: серым цветом обозначены равновесные по числу фотонов состояния комплементарных диапазонов обуславливающих появление белоцветковости.

Что касается равновеликих соотношений комплементарных диапазонов по энергиям, то этот вопрос требует детального изучения с точки зрения терморегуляции растительного организма. Как

цветообразующий индекс, гораздо интереснее неравновеликие соотношения по численности фотонов, так как они формируют многообразную палитру в окраске венчиков, создающих колористическое богатство видов растительного мира и огромный материал для естественного отбора. Используя современные электронные программы ([get-color.ru/color - mixer/](http://get-color.ru/color-mixer/)) и представленные нами соотношения, можно спрогнозировать в каком направлении будет действовать отбор на определенной территории и в определенное время. Какие виды предпочтительно культивировать в той или иной точке земного шара с целью получения максимальной продуктивности.

Таблица 6. Теоретически предполагаемая и глобальная частота окраски цветов [10] на основе зрительного восприятия человека (N = 10 437 видов).

Окраска венчика	Белый	Желто-оранжевый	Красный	Пурпурный	Синий	Зеленый	Коричневый
Число видов	2466	2507	443	2121	772	1559	569
Доля видов, %	24,0	24,0	4,0	20,0	7,0	15	5
Доля модельных плоскостей, %	4,9	23,7	4,6	19,4	7,3	40,0	

Сравнение предполагаемых результатов и конкретных (база данных TRY) показало близкие значения для желтого, пурпурного, красного и синего цвета. Несоответствие модельного и конкретного распределения для зеленого и белого цвета заслуживает более детального изучения. Следует отметить, что приведенная модель максимально адаптированной поверхности рассчитывалась для абсолютно чистого неба. При пасмурном небе картина распределения, как максимумов солнечного излучения, так и окраски максимально адаптированных поверхностей смещается в сторону больших воздушных масс (от экватора к полюсу).

Обсуждение

Поиск закономерностей, определяющих разнообразие растительных систем и растительных сообществ, является серьезной проблемой экологии растений. Установление таких закономерностей может дать ответ на вопрос о причине исчезновения видов и помочь в поиске методов реставрации и сохранения видового богатства. Географические закономерности окраски лепестков у цветковых растений рядом авторов объяснялись температурными характеристиками среды произрастания вида [12], кислотностью [13], трофическими качествами почвы, расстоянием до ледникового рефугиума [14].

Все перечисленные факторы объединяются в предложенной нами модели адаптации цветковых растений к максимумам солнечного спектра [11]. Изменение положения максимума солнечного спектра является причиной варьирования, температуры, влажности и других абиотических и биотических факторов. Полученные данные по адаптации к максимумам в ближнем красном диапазоне ($\lambda=610\text{nm} - 710\text{nm}$) на широте от 30° до 90° северного и южного полушария объясняет малочисленность видов с синей окраской венчиков, их отсутствие на экваторе и присутствием в средиземноморском регионе [1] появлении на 50 –ых широтах в точке летнего и зимнего солнцестояния.

Представленная модель максимально адаптированных плоскостей хорошо объясняет явление полиморфизма окраски цветков одного вида, а также появление разнообразных оттенков базовой окраски, как адаптации к различной плотности фотонов одного и того же диапазона. Данное предположение позволит посмотреть на центры происхождения культурных видов с точки зрения географической обусловленности их полиморфизма.

Выводы

Большая часть поверхности земного шара находится, согласно системы RGB, под воздействием двух основных типов излучения синего (фиолетового, синего и голубого), а также красного (ближнего красного и дальнего красного). Переходными между этими двумя типами максимумов является максимум в зелёном и желтом диапазонах солнечного излучения.

1. Максимально адаптированной к солнечной радиации, проникающей сквозь атмосферу, будет поверхность, с максимумами поглощения в двух основных диапазонах - синем и красном (как у хлорофилла).

2. Подробный анализ спектрального распределения солнечного излучения с шагом 5 мкм и поширотным шагом 1° выявил наличие следующих максимумов и их смещений: фиолетовый ($\lambda=415$ нм, АМ=1; $\lambda=420$ нм, АМ=1,5; 2), синий пик ($\lambda=480$ нм, АМ=1; 1,5; 2; 3; 4), циановый ($\lambda=500$ нм, АМ=1; 1,5; 2; 3; $\lambda=505$ нм, АМ=4). Зеленый максимум проявляется, начиная с $\lambda=525$ нм (АМ=1;1,5), смещается на $\lambda=530$ нм при АМ=1,5; 2;3 и на $\lambda=535$ нм при АМ=4. Жёлтый пик $\lambda=575$ нм наблюдается при АМ=1, а при АМ=1,5; 2; 3; 4 он смещается на 15 нм ($\lambda=590$ нм). Красная область солнечного спектра представлена смещающимся пиком $\lambda=610$ -710 нм (АМ=2 - 10), пиками, выраженными на всех широтах (АМ=1 - 10) с $\lambda=722,5$ нм и с $\lambda=760$ нм, пиками с $\lambda=735$ нм, $\lambda=765$ нм (АМ=1 - 7) и пиком с $\lambda=740$ нм, регистрируемом при варьировании оптической массы от 1 до 4.

3. Спектр излучения - поглощения упорядочен в направлении: ультрафиолетовый -фиолетовый - синий – циановый – зелёный – жёлтый - оранжевый – красный. Согласно системе цветопередачи RGB, порядок при отражении примет следующий вид: белый- желтый - оранжевый – красный – пурпурный – фиолетовый - синий – циановый - зелёный.

4. Процентное распределение частот в случайной выборке из 10437 растений по желтой, красной, пурпурной и синей окраске венчиков соответствует процентному распределению интегральных энергий солнечного спектра по соответствующим диапазонам. Таким образом, спектральная ширина диапазонов видимого спектра солнечного излучения, находится в ассоциативной связи с частотой окраски венчиков в рандомизированной выборке цветковых растений.

5. Адаптивный потенциал модельной поверхности увеличивается в следующем направлении: красный (4,6%) <белый (4,9%)<синий (7,3%) < пурпурный (19,4%)< желтый (23,7)< зеленый (40%).

6. Фрагментарный характер распространения видов с синей окраской венчиков обусловлен фрагментарным распределением максимума солнечного излучения в ближнем красном диапазоне от 610 нм до 710 нм.

Библиографические ссылки:

1. ARISTA, M., TALAVERA, M., BERJANO, R., ORTIZ, P. L. *Abiotic factors may explain the geographical distribution of flower colour morphs and the maintenance of colour polymorphism in the scarlet pimpernel. Journal of Ecology.* Volume 101, Issue 6, 2013, p. 1613-1622. DOI: 10.1111/1365-2745.12151
2. CHITTKA, L. AND MENZEL, R. *The evolutionary adaptation of flower colours and the insect pollinators' colour vision. Journal of Comparative Physiology A.* Volume 171, 1992, p. 171–181. DOI: 10.1007/BF00188925.
3. DALRYMPLE, R. L., KEMP, D. J., FLORES-MORENO, H., LAFFAN, S. W., WHITE, T. E., HEMMINGS, F. A. AND MOLES, A. T. *Macroecological patterns in flower colour are shaped by both biotic and abiotic factors. New Phytologist,* 2020, 228(6):1972–1985. <https://doi.org/10.1111/nph.16737>
4. WARREN, J. AND MACKENZIE, S. *Why are all colour combinations not equally represented as flower-colour polymorphisms? New Phytologist.* Volume 151, Issue 1, 2001, p. 237-241. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2001.00159.x
5. MECHERIKUNNEL, A. T.; RICHMOND, J. C. *Spectral Distribution of Solar Radiation.* NASA - TM - 82021, 41 p. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19810016493/downloads/19810016493.pdf>
6. SIVCOV S. I. *Methods for calculating the characteristics of solar radiation.* Hydrometeorological publishing house „Leningrad”, 1968, p. 234.
7. BRITTON, G. *Biochemistry of natural pigments.* M.: Mir, 1986, 422 p.

8. TURRO, N. *Molecular photochemistry*. - M.: Mir, 1967, 483 p.
9. KVIAT, D. *Planck's constant - the result of connecting two strings*. *Journal of High Energy Physics, Gravity and Cosmology*, 8, 2022, p. 919-926. <https://doi.org/10.4236/jhepgc.2022.84062>
10. KATTGE, J., BÖNISCH, G., DÍAZ, S., LAVOREL, S., PRENTICE, I. C., LEADLEY, P. TRY plant trait database—enhanced coverage and open access. *Glob. Chang. Biol.* 26, 2020.- p. 119–188. DOI: 10.3390/data3020016
11. KOLOMIETS, I. *Spatio-temporal variation in the composition of the solar spectrum and its possible evolution ECOTERRA - Journal of Environmental Research and Protection*. Volume 18, Issue 2/2021, p. 1-9. www.ecoterra-online.ro<http://doi.org/10.5281/zenodo.4431614>,
12. LACEY, E., LOVIN, M., RICHTER, S., HERINGTON, D. *Floral Reflectance. Color and Thermoregulation: What Really Explains Geographic Variation in Thermal Acclimation Ability of Ectotherms? Journal of The American Naturalist*. Volume 175, Number 3, 2010, p. 335-349. DOI: 10.1086/650442
13. STAVENGA, D. G.; LEERTOUWER, H. L; DUDEK, B.; KOOI, C. J. VAN DER. *Coloration of flowers by flavonoids and consequences of pH dependent absorption*. *Journal of Frontiers in Plant Science* 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.600124>
14. KOSKI, M. H., GALLOWAY, L. F. *Geographic variation in pollen color is associated with temperature stress*. *New Phytologist*. Volume 218, Issue 1, 2018, p. 370-379. <https://doi.org/10.1111/nph.14961>

Примечание: 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 ГУМ.

Тел: 079467405

ORCID: 0000-0002-2144-7667

Prezentat la 25.08.2023