

Ю.К. Росс, А.Л. Маршак

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ЛИСТЬЕВ И ЗЕРКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОТРАЖЕНИЯ ЛИСТА НА ИНДИКАТРИСУ ОТРАЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Для вычисления коэффициента спектральной яркости (КСЯ) растительного покрова используется метод Монте–Карло. Модель Росса–Маршака обобщается на случай произвольной ориентации листовых нормалей. Производится учет вклада зеркальной составляющей отражения листа, обусловленной наличием у него воскового слоя. В плоскости солнца оценивается влияние ориентации листовых нормалей на КСЯ. Показано, чем отличаются между собой КСЯ посевов, ориентации которых имеют распределения с одинаковым средним, но разной дисперсией.

Разработан математический аппарат метода Монте–Карло, позволяющий оценивать вклад зеркальной составляющей в КСЯ. При помощи этого аппарата проведены численные эксперименты, которые показывают влияние ориентации листьев на величину вклада зеркальной составляющей.

Результаты расчетов могут быть в дальнейшем использованы для интерпретации данных дистанционного зондирования растительности и определения ориентации листьев и величины воскового слоя листа по данным об отражении от системы «почва–растительность».

Введение

В наших прежних работах [1–3] была предложена геометрическая модель растения и посева, в целом разработан алгоритм расчета индикатрис отражения солнечной радиации от растительного покрова (РП) и проведен ряд численных экспериментов для оценки влияния различных параметров модели на вид индикатрисы. При этом предполагалось, что угол наклона ϑ_L всех листьев па генетической спирали растения имеет постоянное значение, а сами листья матовые. Однако многочисленные экспериментальные данные показывают [4], угол наклона листьев одного вида растений варьируется в широких пределах и может быть описан статистической функцией распределения листовых нормалей $g(\vartheta_L, \varphi_L)$, где φ_L — азимут листа. Различные распределения для функции g были предложены в работах [4–6]. Немногочисленные экспериментальные данные об индикатрисах отражения и пропускания отдельных листьев [4, 7–10] показывают, что у многих видов растений индикатриса отражения имеет выраженную зеркальную составляющую, обусловленную наличием воскового слоя на поверхности листа. Предложенные в [11–12] оптические модели листа качественно объясняют закономерности отражения и пропускания. Однако нет достаточно простых формул или алгоритмов для расчета индикатрис отражения и пропускания радиации листом, за исключением модели Нильсона–Кууска [13], в которой к отражению от листьев добавляется зеркальная составляющая, яркость которой описывается законом Френеля.

Целью настоящей работы является усовершенствование нашей модели индикатрисы РП путем введения вместо постоянного угла наклона ϑ_L функции ориентации листьев g и учета зеркальной составляющей отражения листа. С помощью численных экспериментов производится оценка влияния этих параметров на вид индикатрисы РП. Для учета вертикальной составляющей отражения предлагается следующая простая оптическая модель листа: пропускание — изотропное и характеризуется спектральным коэффициентом T_λ ; отражение состоит из двух компонент: диффузной составляющей, заданной спектральным коэффициентом диффузного отражения R_λ , и зеркальной составляющей $R_F(\vartheta', n)$, зависящей от угла наклона падающего луча ϑ' относительно листовой нормали и от коэффициента преломления n воскового слоя листа [10, 13].

В большинстве моделей, описывающих радиационный режим в атмосфере и в глобальных моделях климата, отражение от подстилающей поверхности задается ламбертовым законом с некоторым альбедо. Результаты данной работы показывают, в каких случаях ламбертова поверхность достаточно хорошо аппроксимирует РП, а когда такое приближение приводит к существенным ошибкам. Выводы работы в основном применимы к посевам сельскохозяйственных культур.

Моделирование пространственной ориентации листьев

Пусть функция $\frac{1}{2\pi}g(r_L)$ не зависит от высоты и является плотностью распределения листовых нормалей, направленных в верхнюю полусферу [4], причем

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\Omega_U} g(r_L) dr_L = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} g(\vartheta_L, \varphi_L) \sin \vartheta_L d\vartheta_L d\varphi_L = 1.$$

Здесь Ω_U — верхняя полусфера, а $r_L = (\vartheta_L, \varphi_L)$ — единичный вектор направления листовой нормали. Будем считать, что угол наклона ϑ_L и азимут φ_L листа независимы и распределение нормалей по азимуту равномерное. Тогда $g(r_L) = g(\vartheta_L)$ и $\int_0^{\pi/2} g(\vartheta_L) \sin \vartheta_L d\vartheta_L = 1$. Для удобства введем также функцию

$$g^*(\vartheta_L) = g(\vartheta_L) \sin \vartheta_L, \quad \left(\int_0^{\pi/2} g^*(\vartheta_L) d\vartheta_L = 1 \right)$$

которая определяет плотность вероятности того, что нормали листьев находятся в единичном интервале угла наклона ϑ_L .

Модель позволяет выбирать следующие ориентации листьев:

1. Угол наклона у всех листьев постоянный и равен ϑ_0 :

$$g(\vartheta_L) = \delta(\vartheta_L - \vartheta_0),$$

где δ — дельта-функция Дирака.

2. Тригонометрическая ориентация [5]:

$$g^*(\vartheta_L) = a + b \cdot \cos 2\vartheta_L + c \cdot \cos 4\vartheta_L.$$

3. Бета-распределение [6]:

$$g(\vartheta_L) \sim \beta(\mu, \nu) = \frac{\pi}{2} \frac{x^{\mu-1} (1-x)^{\nu-1}}{B(\mu, \nu)}, \quad x \in (0, 1),$$

где $B(\mu, \nu) = \Gamma(\mu)\Gamma(\nu)/\Gamma(\mu+\nu)$ — бета-функция.

В табл. 1 показано, как при помощи последних распределений моделировать различные ориентации листьев.

При тригонометрическом распределении нормалей угол ϑ_L моделируется как решение уравнения $\int_0^{\vartheta_L} g^*(\vartheta) d\vartheta = \alpha$, где α — случайная равномерно распределенная на $(0,1)$ величина. Последнее уравнение легко решаем методом Ньютона, беря за начальное приближение $\pi/2$.

Бета-распределение с параметрами μ и ν моделируется следующим образом [14].

Пусть $\alpha_1, \alpha_2 \in (0, 1)$, вычисляем $s_1 = \alpha_1^{1/\mu}$ и $s_2 = \alpha_2^{1/\nu}$. Если $s_1 + s_2 > 1$, то вычисляем новые s_1 и s_2 , в противном случае

$$\beta(\mu, \nu) = s_1 / (s_1 + s_2).$$

Таблица 1

Ориентации листовых нормалей и их распределения

Ориентация	Тригонометрическое			Бета-		Функция g^*
	a	b	c	μ	ν	
Равномерная	$2/\pi$	0	0	1	1	$2/\pi$
Сферическая	$\sin \vartheta_L$	0	0	1,930	1,101	$\sin \vartheta_L$
Планофильная	$2/\pi$	$2/\pi$	0	1,172	2,770	$4/\pi \cdot \cos^2 \vartheta_L$
Эректофильная	$2/\pi$	$-2/\pi$	0	2,770	1,172	$4/\pi \cdot \sin^2 \vartheta_L$
Плагнофильная	$2/\pi$	0	$-2/\pi$	3,326	3,326	$4/\pi \cdot \sin^2 2\vartheta_L$
Экстремофильная	$2/\pi$	0	$2/\pi$	0,433	0,433	$4/\pi \cdot \cos^2 2\vartheta_L$

Возникает вопрос, каким распределением пользоваться при моделировании, скажем, planoфильных листьев. Так как оба распределения дают статистически близкие результаты [6], то единственным критерием выбора может быть время работы компьютера, затраченное на построение модели посева. В табл. 2 мы привели относительное время построения модели посева, взяв за единицу простейший случай одинаковых углов наклона. Из табл. 2 видно, что для одной ориентации (равномерная, эректофильная, плагиофильная и сферическая) преимущество имеет тригонометрическое распределение, а для planoфильного и экстремофильного — бета-распределение (столь «долгое» моделирование плагиофильной ориентации при помощи β -распределения объясняется большими значениями параметров μ и ν).

Таблица 2

Время, затраченное на моделирование посева

Распределение	Ориентация						
	равномерная	planoфильная	эректофильная	плагиофильная	экстремофильная	сферическая	постоянная
Бета-	4,9	9,0	9,0	63,1	3,6	6,7	1
Тригонометрическое	2,0	14,4	5,4	13,6	10,2	1,5	

Учет зеркальной составляющей отражения листа

В связи с тем что шероховатая поверхность листа покрыта слоем воска, при отражении возникает зеркальная составляющая, интенсивность R_F которой определяется по формуле Френеля:

$$R_F(\vartheta', n) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\vartheta' - i)}{\sin^2(\vartheta' + i)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\vartheta' - i)}{\operatorname{tg}^2(\vartheta' + i)} \right], \quad (1)$$

где $i = \arcsin(\sin\vartheta'/n)$. Отражение происходит в плоскости, проходящей через падающий луч r' и нормаль r_L под углом к нормали $\vartheta = \vartheta'$. Отметим, что в предельном случае $\vartheta' = 0$ (падение по нормали) формула (1) не работает и тогда $R_F(0, n) = [(n - 1)/(n + 1)]^2$.

Очевидно, что при помощи метода прямого моделирования оценить вклад зеркальной составляющей не представляется возможным, ибо вероятность того, что зеркально отраженный фотон попадает в приемник, телесный угол приема которого $\Delta\Omega$, крайне мала. Предлагаемый алгоритм построен следующим образом.

После попадания фотона на верхнюю поверхность листа, т.е. $\cos(r_L, r') > 0$ (в противном случае мы пренебрегаем составляющей Френеля, ибо рассеяние идет вниз) мы искусственно поворачиваем нормаль листа по азимуту в вертикальную плоскость с приемниками и начинаем «расшатывать» лист по нормальному закону с математическим ожиданием, равным разности между нормалью листа и углом падения и некоторой дисперсией. Для экономии времени работы компьютера мы, во-первых, моделируем не само нормальное распределение, а аппроксимируем его двумя гиперболами, предварительно нормировав их. Во-вторых, мы пользуемся лишь тригонометрическими функциями углов падения и отражения (а не самими углами), но для построения гипербол требуются значения самих углов (так как гипербола есть $f(x) = 1/x$). Поэтому траектория фотонов в данном случае проходит лишь по заранее заданной дискретной сетке направлений и сами гиперболы аппроксимируются кусочно-постоянной функцией.

Итак, вклад зеркальной составляющей Френеля в отражение от поверхности листа задается равенством

$$F = \frac{R_F \int_{\Delta\Omega} \frac{1}{2\pi} g(r_L) dr_L}{2 \cdot \Delta\Omega}. \quad (2)$$

Более строго описанный выше процесс можно представить следующим образом. Зададим некоторый параметр $0 \leq \sigma \leq 1$, характеризующий дисперсию нашей аппроксимации («размазанность» составляющей Френеля). Если $\sigma = 0$, то вклад происходит по всем направлениям. $\sigma = 1$ соответствует вкладу лишь в тот приемник, в который попадает отраженный луч. Далее введем коэффициенты a_i , $i = 1, \dots, L$ (L — число приемников). Пусть $\sigma_{ii} = \sigma$, тогда

$$a_i = \begin{cases} \sigma_{ij}, & r \in \Omega_j, j = 1, \dots, L; \cos(r_L, r') > 0, \\ 0, & \cos(r_L, r') < 0. \end{cases}$$

Здесь r – зеркально отраженный луч, а

$$\sigma_{ij} = \gamma_j \Delta \vartheta_i \begin{cases} |\vartheta_i - \vartheta_j|^{-1}, & i \neq j, \varphi_i = \varphi_j, \\ |\vartheta_i + \vartheta_j|^{-1}, & i \neq j, \varphi_i = \varphi_j + 180^\circ, \end{cases}$$

причем γ_j выбирается таким образом, чтобы $\sum_{i=1}^L \sigma_{ij} = 1, j = 1, \dots, L$.

Итак, при каждом столкновении фотона с листом для учета вклада зеркальной составляющей Френеля в L -й приемник мы суммируем величины $R_F(r_i, r', n) \cdot a_i(x_k) (\sin \vartheta_L)^{-1} \cdot B_j(x_k)$. Здесь x_k – точка траектории цепи Маркова; $B_j(x_k)$ – «вес» фотона при столкновении k -й кратности для j -й траектории $B_j(x_1) = 1, B_j(x_k) = (1 - \kappa)B_j(x_{k-1})$; $\kappa = 2, 3, \dots$, а κ – коэффициент поглощения. Наличие множителя $1/\sin \vartheta_L$, обусловлено тем фактом, что в модели ориентация листьев строится согласно функции $g^*(\vartheta_L)$, а не $g(\vartheta_L)$, суммирование которой происходит в (2).

Проведя N испытаний, получим оценку вклада зеркальной составляющей для i -го приемника:

$$F_i \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{\kappa=1}^{\infty} R_F(r_L, r', n) \cdot a_i(x_\kappa) \cdot (\sin \vartheta_L)^{-1} \cdot B_j(x_\kappa), \quad i = 1, \dots, L. \quad (3)$$

Отметим, что при столкновении с почвой и стеблем величина $R_F \equiv 0$.

Расчет коэффициента спектральной яркости

Введем вспомогательные коэффициенты Q по формуле

$$Q^{i,j}(x_\kappa) = p_i(x_\kappa) B_j(x_\kappa), \quad i = 1, \dots, L; \quad j = 1, \dots, N; \quad \kappa = 1, 2, \dots,$$

где

$$p_i(x_k) = \begin{cases} k \int \rho dr, & \text{если фотон из точки } x_k \text{ вылетит} \\ & \text{в телесном угле } \Delta \Omega_i, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

а $\rho(r, r_L) = 2 \cos(r, r_L)$ – индикатриса отражения от «ламбертовой» поверхности листа. Здесь $\kappa = T_\lambda$ или $\kappa = R_\lambda$ в зависимости от того, было это отражение или пропускание. Таким образом, $Q^{i,j}(x_\kappa)$ есть вклад j -го фотона, находящегося в точке x_κ , в оценку i -го функционала. Тогда оценка вклада в i -й приемник вычисляется как среднее от N реализаций, а именно:

$$I_i \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{\kappa=1}^{\infty} Q^{i,j}(x_\kappa), \quad i = 1, \dots, L. \quad (4)$$

Для того чтобы в (3) и (4) не суммировать «малые веса» во внутренней сумме, но в то же время получать несмещенные оценки, проводится случайный обрыв траектории I .

С учетом (3) и (4) коэффициент спектральной яркости (КСЯ) b_i считается по формуле

$$b_i = (I_i + F_i) / (\cos \vartheta_i \cdot \Delta \Omega_i), \quad i = 1, \dots, L.$$

Ниже приводятся результаты численных экспериментов, проведенных при стандартном наборе параметров модели посева [15], для оценки влияния ориентации листьев и зеркальной составляющей отражения листа на КСЯ системы «почва – растительность».

Архитектура одного растения: высота растения $H = 60$ см, имеется по вертикали 4 круглых листа с диаметром 7,6 см, угол на генетической спирали $\alpha_T = 120^\circ$, стеблей нет.

Модель посева: квадратно-гнездовая с $LAI = 3$ (LAI — индекс листовой поверхности). Оптические параметры листа: коэффициент отражения $R_\lambda = 0,04$; коэффициент пропускания $T_\lambda = 0,04$; коэффициент преломления n варьируется от 1,0 до 1,4; почва черная ($R_{SOIL} = 0$).

Условия освещения: азимут солнца относительно ряда $\varphi_0 = 30^\circ$, зенитный угол $\vartheta_0 = 30^\circ$ или $\vartheta_0 = 60^\circ$, диффузной радиации нет.

Расчеты проведены для случая плоскости солнечного вертикала.

Влияние ориентации листьев на КСЯ

Расчеты проведены в отсутствие зеркальной составляющей отражения листа. На рис. 1 изображены КСЯ для различных распределений углов наклона листьев, причем средний угол наклона листьев изменяется от горизонтального ($M\vartheta_L = 0^\circ$) до вертикального ($M\vartheta_L = 90^\circ$, M — математическое ожидание). Явно прослеживается увеличение яркости посева с уменьшением среднего угла наклона листьев для всех углов визирования. При этом растет эффект обратного блеска, который вызывает также асимметрию индикатрисы относительно надира. Некоторое увеличение КСЯ в надирных направлениях для горизонтальных и планофильных листьев объясняется конкретным углом на генетической спирали $\alpha_r = 120^\circ$ (Например, при $\alpha_r \leq 60^\circ$ [3] это увеличение пропадает).

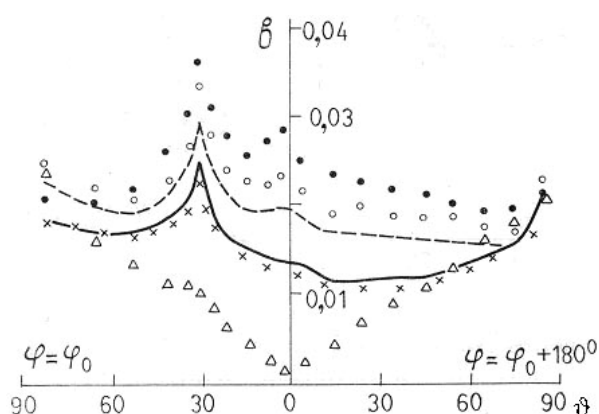


Рис. 1. Коэффициенты спектральной яркости посевов с ориентациями листьев, имеющими различные средние углы наклонов, $\vartheta_0 = 30^\circ$: темные кружки — горизонтальная; светлые кружки — планофильная; штриховая линия — равномерная; сплошная — сферическая; крестики — эректофильная; треугольники — вертикальная ориентации. Математическое ожидание $M\vartheta_L$ равно 0,0; 26,8; 45,0; 57,3; 63,2; 90,0 для каждой ориентации соответственно

Представляет интерес сравнение КСЯ для ориентации, имеющих одинаковое среднее ($M\vartheta_L = 45^\circ$), но разные дисперсии (см. рис. 2). Если в солнечной стороне ($\varphi = \varphi_0$) их яркости практически совпадают, то в противосолнечной стороне ($\varphi = \varphi_0 + 180^\circ$) при $10^\circ < \vartheta < 70^\circ$ имеются ярковыраженные различия, причем при увеличении дисперсии яркость растет. Минимум КСЯ имеет место при $D\vartheta_L = 0^\circ$, ибо листья, чьи нормали направлены в противоположную от солнца сторону $\varphi_L = \varphi_0 + 180^\circ$, слабо освещены прямыми солнечными лучами [15].

Таким образом, область углов визирования $\vartheta = 90^\circ - M\vartheta_L$ является очень чувствительной к дисперсии распределения углов наклона листьев.

Картина отражения резко меняется при уменьшении высоты солнца. На рис. 3 приведены вертикальные разрезы КСЯ в плоскости солнечного вертикала при $\vartheta_0 = 60^\circ$. По сравнению с $\vartheta_0 = 30^\circ$ (см. рис. 1) резко растет зависимость КСЯ от угла визирования в обе стороны от надира, причем зависимость $b(\vartheta)$ хорошо описывается параболой

$$b(\vartheta) = a_2\vartheta^2 + a_0, \quad (5)$$

особенно для ориентации с преимущественно эректофильными листьями. С увеличением числа планофильных листьев величина a_0 растет от 0 до $R_\lambda/2$. (В случае горизонтальных и даже планофильных листьев аппроксимация КСЯ параболой довольно груба, ибо тогда в противосолнечной стороне наблюдается практически одинаковое отражение при всех углах визирования. Как видно из рис. 3, коэффициент a_2 в равенстве (5) уменьшается с переходом к планофильной ориентации и происходит «расширение» параболы. Существенное отличие от параболы имеется лишь в направлениях обратного блеска, где наблюдается ярко выраженный острый и тонкий пик.

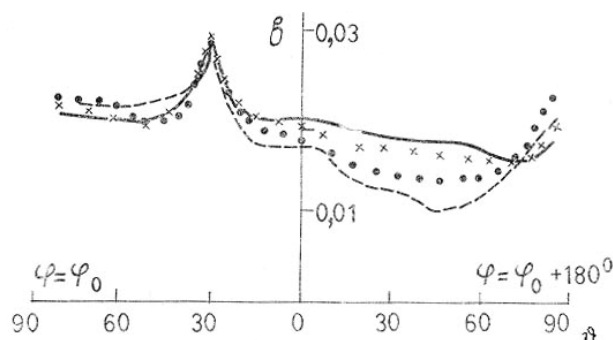


Рис. 2. Коэффициенты спектральной яркости посевов с ориентациями листьев, имеющими одинаковые средние углы наклонов $M\vartheta_L = 45^\circ$, но различные дисперсии $D\vartheta_L$, $\vartheta_0 = 30^\circ$: штриховая линия — постоянная ($\vartheta_L = 45^\circ$); темные кружки — плагиофильная; крестики — равномерная; сплошная линия — экстремофильная ориентации. Дисперсия $D\vartheta_L$, равна 0; 4,6; 11,8; 18,9 для каждой ориентации соответственно

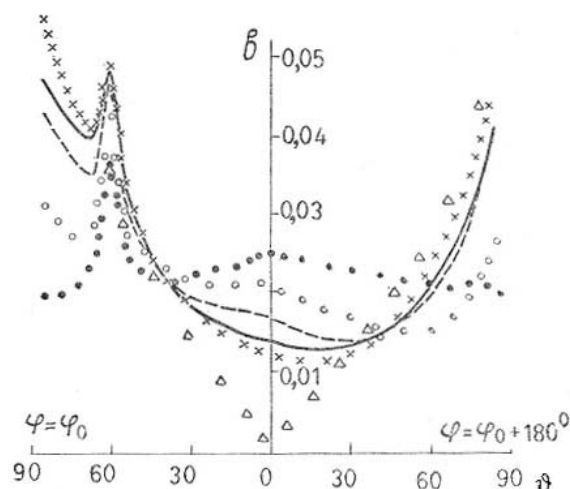


Рис. 3. Коэффициенты спектральной яркости посевов с ориентациями листьев, имеющими различные средние углы наклонов, $\vartheta_0 = 60^\circ$. Обозначения такие же, как и на рис. 1

Влияние зеркальной составляющей отражения листа на коэффициент спектральной яркости

Очевидно, что в приближении однократного рассеяния вклад зеркальной составляющей листа совершенно не зависит от диффузных коэффициентов отражения и пропускания, а определяется лишь ориентацией листьев и коэффициентом преломления n . Поэтому он будет одинаковым для всех областей спектра и наиболее интересно исследовать зависимость вклада зеркальной составляющей от ориентации листьев в красной области.

Влияние ориентации листьев на вклад зеркальной составляющей при $\vartheta_0 = 30^\circ$ представлено на рис. 4. Для ориентаций, у которых большое число плагиофильных листьев, в КСЯ имеется ярко выраженный зеркальный блеск; величина которого тем выше, чем больше более горизонтальных листьев (для строго горизонтальных листьев) в области зеркального отражения появляется просто δ -функция). Наибольшее значение вклада зеркальной составляющей в противосолнечной области имеют экстремофильные листья, имеющие преимущественно горизонтальную ориентацию, затем — плагиофильные и равномерно-ориентированные листья. У сферических, плагиофильных и тем более эректофильных ориентаций пик в зеркальной области вообще отсутствует, что и естественно, так как число горизонтальных листьев в этих ориентациях мало. С ростом углов визирования в противосолнечной стороне наблюдается резкое уменьшение КСЯ у экстремофильных и, наоборот, увеличение у плагиофильных, так как при этих углах визирования существенную роль играют листья с плагиофильной ориентацией. Вклад в околонадирные направления $\vartheta < 20^\circ$ дают листья, нормаль которых ориентирована почти в вертикальных направлениях $\vartheta_L < 30^\circ$, поэтому величина КСЯ упорядочивается согласно наличию плагиофильных и экстремофильных, затем равномерных, плагиофильных, сферических и, наконец, эректофильных листьев. Аналогичная картина наблюдается и в области обратного блеска.

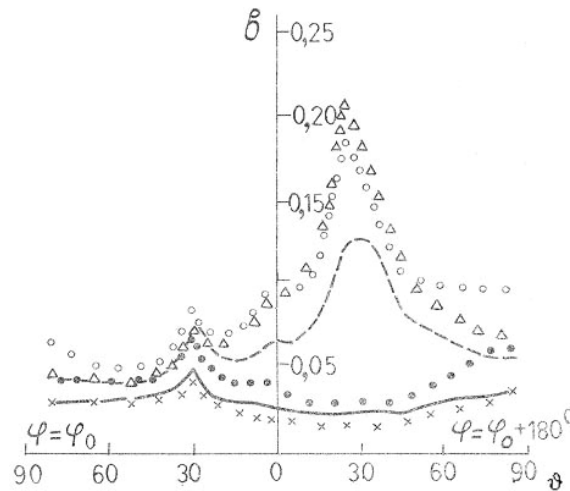


Рис. 4. Коэффициенты спектральной яркости посевов различных ориентации с учетом зеркальной составляющей отражения листа $\vartheta_0 = 30^\circ$, $n = 1,4$: светлые кружки — планофильная; штриховая линия — равномерная; сплошная линия — сферическая; крестики — эректофильная; темные кружки — плагиофильная; треугольники — экстремофильная

При увеличении угла падения солнечных лучей значительно меняется и КСЯ. Так, при $\vartheta_0 = 60^\circ$ в отличие от $\vartheta_0 = 30^\circ$ отсутствует пик в зеркальной области, а наблюдается непрерывное возрастание КСЯ с увеличением углов визирования в противосолнечной стороне. Причиной этого является тот факт, что несмотря на уменьшение числа фотонов, отражающихся под углами $\vartheta > 60^\circ$, растет их «вес», т.е. величина (см. (2)). Это происходит из-за того, что отражение в данном случае происходит, под большим углом от листовой нормали, а с увеличением угла между нормалью и падающей радиацией происходит резкое увеличение зеркальной составляющей R_F (см. (1)). В солнечной стороне при больших углах визирования (в том числе и в области обратного блеска) наблюдается резкое увеличение КСЯ для эректофильных, экстремофильных и сферических ориентации, что обусловлено наличием у них большого числа почти вертикальных листьев.

Заключение

Результаты, представленные в этой работе, показывают, что метод моделирования Монте–Карло является полезным инструментом для оценки влияния ориентации листовых нормалей и зеркальной составляющей на КСЯ. Метод позволяет моделировать как произвольные теоретические ориентации, так и измеренные экспериментально. Наличие только двух независимых параметров β -распределения дает ему преимущество по сравнению с тригонометрическим распределением, особенно для тех ориентаций, для которых время работы компьютера, затраченное на их реализацию, не превосходит значительно время, затраченное на построение реализаций тригонометрического распределения (см. табл. 2).

Анализ численных экспериментов показывает, что при высоком солнце (см. рис. 1) КСЯ посева тем больше, чем больше доля планофильно ориентированных листьев. Увеличение дисперсии распределения при одинаковом среднем угле наклона листьев приводит к увеличению КСЯ в области вокруг направления визирования $\vartheta = 90^\circ - M\vartheta_L$ в противоположной от солнца стороне (см. рис. 2).

При низком солнце зависимость КСЯ от ориентации листовых нормалей в корне отличается (см. рис. 3). Для посевов с преимущественно эректофильными листьями КСЯ достаточно хорошо описывается параболой с включением пика в области обратного блеска. Для таких посевов имеет место наибольшее отличие от ламбертовой поверхности и, наоборот, для горизонтальных и почти горизонтальных ориентации аппроксимация посева ламбертовой поверхностью дает наименьшую ошибку (за исключением области обратного блеска).

Учет зеркальной составляющей отражения от воскового слоя листа значительно изменяет вид КСЯ. В области зеркального блеска при высоком солнце для ориентации с наличием почти горизонтальных листьев наблюдается значительный рост КСЯ, причем его величина тем выше, чем больше более горизонтальных листьев (рис. 4).

При низком солнце пик в области зеркального блеска отсутствует, а имеет место непрерывное возрастание КСЯ при углах визирования больших, чем наклон солнца, особенно для посева с преимущественно горизонтальной ориентацией листьев. Это объясняется значительным ростом яркости зеркальной составляющей в этих областях визирования.

Итак, для красной области спектра учет вклада зеркальной составляющей является необходимым для построения моделей отражения радиации от системы «почва–растительность». В ближней инфракрасной области для посевов со сферической и более эректофильной ориентацией листьев учетом

зеркальной составляющей можно пренебречь. Однако для планофильных посевов (особенно при низком солнце) даже в этой области спектра неучет составляющей Френеля может привести к существенным искажениям результатов.

1. Росс Ю. К., Маршак А. Л. — Исслед. Земли из космоса, 1984, № 5, с. 58–67.
2. Росс Ю. К., Маршак А. Л. Исслед. Земли из космоса, 1987, № 2, с. 96–105.
3. Росс Ю. К., Маршак А. Л. — Исслед. Земли из космоса, 1987, № 4, с. 86–93.
4. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. — Л.: Гидрометеиздат, 1975.
5. Bunnik N. J. J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Mededel. Landbouwhogeschool Wageningen, Nederland, 1978, No 78–1.
6. Goel N., Strebel D. E. — Agron. J. 1984, v. 76, № 5, p. 800–802.
7. Молдау Х. В сб.: Вопросы радиационного режима растительного покрова. Тарту: Институт физики и астрономии АН Эстонской ССР, 1965, с. 89–95.
8. Вреесе И. Т., Holmes R. A. — Appl. Optics., 1971, v. 10, № 1, p. 119–127.
9. Woolley J. T. — Plant Physiol., 1971, v. 47, No 5, p. 656–662.
10. Gausma H. W., Allen W. A., Wiegand C. L., Escobar D. E., Rodriguez R. R., Richardson A. J. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. Technical Bulletin N 1465, 1973. Agricult. Res. Service US Dep. Agricult., Texas Agricult. Experiment Station. 59 p.
11. Молдау Х. — В сб.: Фитоактинометрические исследования растительного покрова. Таллин: Валгус, 1967, с. 89–109.
12. Tucker C. J., Garrat M. W. — Appl. Opt., 1977, v. 16, No 3, p. 635–642.
13. Нильсон Т., Кууск А. — Исслед. Земли из космоса, 1984, № 5, с. 76–83.
14. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Курс статистического моделирования. — М.: Наука, 1976.
15. Ross J. K., Marshak A. L. Calculation of the canopy bidirectional reflectance using the Monte Carlo method. — Remote Sens. Environ. 1987 (in press).

Институт астрофизики
и физики атмосферы АН ЭССР, Тарту

Поступила в редакцию
21 декабря 1987 г.

J. K. Ross, A. L. Marshak. Estimation of the Influence of the Leaf Normal Orientation and Reflectance Specular Component on the Canopy Phase Function.

The plant canopy bidirectional reflectance distribution function (BRDF) was calculated using the Monte Carlo method. Ross–Marshak canopy model was generalized to the case of an arbitrary leaf normal orientation. The contribution of the leaf reflectance specular component due to the leaf wax layer was taken into account. The effect of the leaf normal orientation on BRDF was estimated in the principal plane. Differences between the canopies having the leaf normal distributions with the same first moments but different second moments are discussed.

A body of mathematics for the Monte Carlo method was derived and used in numerical experiments. The estimates show that the leaf normal orientation affects the contribution from the leaf reflectance specular component. The results obtained appear to be useful for interpreting the remote sensing data on vegetation and retrieval of the leaf normal orientation and wax layer size from the soil–canopy system reflectance.