

СПЕКТРАЛЬНЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ПОСЕВА КУКУРУЗЫ И РАСЧЕТ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ (ФАР)

ХЕРБЕРТ НИЙЛИСК

В статье излагаются результаты спектрофотометрического исследования радиационного поля внутри посева кукурузы во время комплексной экспедиции в Йыгева (Эст. ССР) в 1963 г. Получены средние горизонтальные спектральные потоки радиации на разных уровнях в посевах при пяти длинах волны. На основе этих данных рассчитано спектральное поглощение посева по слоям. Предложена методика расчета фотосинтетически активной радиации (ФАР) по спектральным измерениям. Рассчитана ФАР внутри посева и приведены некоторые примеры расчета фотосинтеза посева.

1. Спектральные потоки радиации в посевах

На основе большого количества измерений оптических свойств листьев растений [1-9] известно, что эти свойства, т. е. отражение, пропускание и поглощение имеют селективный характер. Поэтому можно предполагать, что посев в целом, как оптическая система, имеет также селективные свойства по отношению пропускания, отражения и поглощения. Из этого вытекает, что для детального изучения радиационного режима посевов нужно провести измерения по отдельным длинам волн, т. е. измерить спектральные потоки радиации. До сих пор данных о спектральных потоках радиации внутри растительности весьма мало. Имеются лишь некоторые данные Сауберера [10] в низкой растительности и ряд измерений под пологом леса [11-14]. Несколько больше таких измерений, при которых пытаются выделить селективными приемниками и разными фильтрами фотосинтетически активную область спектра (ФАР).

Теоретические расчеты потоков радиации внутри посева [15-18] обычно также проводятся для монохроматических потоков. Поэтому для проверки теории необходимо знать данные о спектральных потоках.

В составе комплексной экспедиции по изучению фотосинтеза и радиационного режима посевов сельскохозяйственных культур (летом 1963 г. в Йыгева) автором были проведены измерения следующих спектральных потоков радиации внутри рядового посева кукурузы (расстояние между рядами 60 см, сорт Буковина 3) при пяти длинах волны:

1) Нисходящие потоки радиации на высотах 40 ÷ 200 см от поверхности земли через каждые 20 см. При этом в зависимости от высоты посева часть высот выпадала.

2) Восходящие потоки радиации на высотах 32 ÷ 172 см через каждые 20 см. Здесь также в зависимости от высоты посева часть высот выпадала.

Длины волны были выбраны по кривой отражения зеленого листа с таким расчетом, что они приблизительно попали в характерные точки этой кривой [19], а именно: 400, 490, 552, 676 и 764 $m\mu$. Измерения проводили интегрирующим спектрофотометром конструкции автора [20]. Одновременно с измерениями внутри посева измерялась регистрирующим спектрофотометром [21] попадающая на посев суммарная радиация при тех же длинах волны. Это было необходимо для исключения влияния изменения падающей радиации, а также для получения необходимых сведений о спектральном составе падающей радиации.

По падающему на посев потоку радиации $Q_0(\lambda)$ и потоку внутри посева $Q(z, \lambda)$ определяется пропускание слоя посева от уровня z до z_0

$$\alpha_Q(z, \lambda) = \frac{Q(z, \lambda)}{Q_0(\lambda)}. \quad (1)$$

Таким же образом восходящие на разных высотах потоки были выражены в относительных единицах по отношению к падающей радиации, так как этим в некоторой мере исключается влияние изменения падающей радиации во время измерения. Обозначим эту величину

$$\alpha_R(z, \lambda) = \frac{R(z, \lambda)}{Q_0(\lambda)}, \quad (2)$$

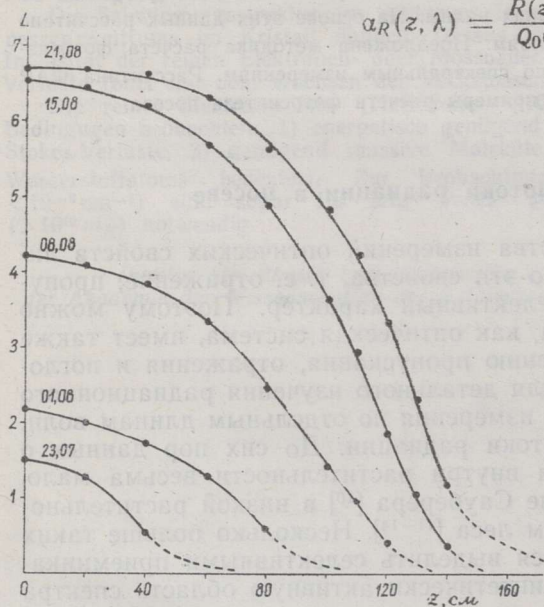


Рис. 1. Функция $L(z)$ для некоторых дней вегетационного периода.

где $R(z, \lambda)$ — восходящий поток радиации на уровне z . Имея в виду обобщение результатов, выразить α_Q и α_R в зависимости от z нецелесообразно, так как основные элементы посева, ослабляющие радиацию — листья растения — распределяются неравномерно по высоте. Поэтому вместо z нужно найти характеристику посева, как оптической среды, которая лучше определяет оптическую плотность посева. Мы выбрали вместо аргумента z площадь тех листьев $L(z)$, которые находятся выше данного уровня z . Такие данные были получены прямыми измерениями площади листьев по 10-сантиметровым слоям. Измерения пло-

щади производились на фотопланиметре. Зависимость L от z для некоторых дней в течение вегетационного периода изображена на рис. 1.

Выражая измеренные в посеве величины α_Q и α_R в зависимости от L , мы в значительной степени можем исключить влияние высоты и густоты посева и применять полученные результаты в некотором приближении для посевов разной высоты.

Чувствительность измерительной аппаратуры можно было изменять в широких пределах, поэтому все потоки радиации, т. е. потоки над растительностью и в глубине посева измерены примерно с одинаковой относительной точностью и сглаживание измеренных величин (которые над посевом и под посевом отличаются более, чем в 100 раз) было целесообразно произвести в логарифмическом масштабе. Зависимость меж-

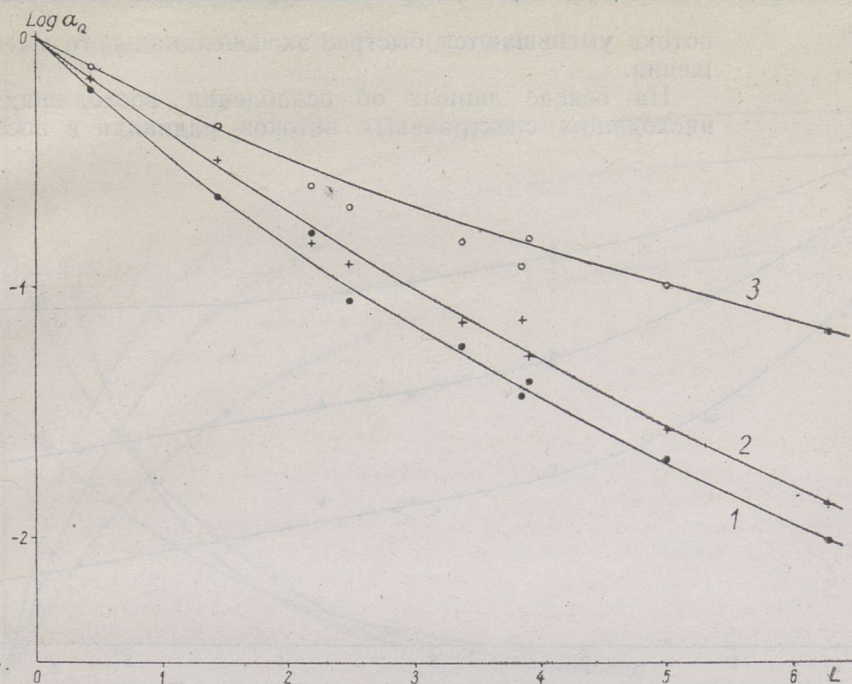


Рис. 2. Ослабление суммарной радиации в посевах: 1 — $\lambda = 400$ мμ, 2 — $\lambda = 552$ мμ, 3 — $\lambda = 764$ мμ.

ду $\log a_Q$ и L для длин волн 400, 552, 764 мμ изображена на рис. 2. Как видно на рисунке, разброс точек измерения в середине кривой, т. е. при средних L , несколько больше, чем при малых и больших L . Это получается потому, что там густота листьев большая и в результате этого влияние измерительной аппаратуры на структуру посева больше.

Все сказанное относится и к кривым a_R , сглаживание которых также производилось в логарифмическом масштабе. Для длин волн 400, 552 и 764 мμ точки измерения и сглаженная кривая $\log a_R$ приведены на рис. 3.

По сглаженным в логарифмическом масштабе зависимостям $\log a_Q$ и $\log a_R$ от L получены соответствующие зависимости a_Q и a_R от L . Средние значения a_Q и a_R для ясного дня при высоте Солнца $30 \div 50^\circ$ и при условии, что направление рядов посева не совпадает с направлением азимута Солнца, приведены в табл. 1 и 2.

Как и можно было ожидать, ослабление радиации в посевах имеет селективный характер. Второй вывод, вытекающий из этих данных, следующий: ослабление падающих потоков радиации внутри посева в зависимости от L имеет в первом приближении экспоненциальный характер, а восходящие

Таблица 1

| $L \backslash \lambda$ | a_Q | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 400 | 490 | 552 | 676 | 764 |
| 0,0 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,5 | 0,569 | 0,596 | 0,643 | 0,598 | 0,725 |
| 1,0 | 0,343 | 0,377 | 0,418 | 0,370 | 0,531 |
| 1,5 | 0,219 | 0,243 | 0,267 | 0,234 | 0,406 |
| 2,0 | 0,143 | 0,160 | 0,195 | 0,151 | 0,316 |
| 2,5 | 0,096 | 0,108 | 0,136 | 0,100 | 0,248 |
| 3,0 | 0,067 | 0,073 | 0,097 | 0,067 | 0,201 |
| 3,5 | 0,047 | 0,051 | 0,069 | 0,046 | 0,165 |
| 4,0 | 0,035 | 0,035 | 0,050 | 0,032 | 0,138 |
| 4,5 | 0,025 | 0,025 | 0,037 | 0,022 | 0,120 |
| 5,0 | 0,019 | 0,018 | 0,027 | 0,015 | 0,100 |
| 5,5 | 0,014 | 0,013 | 0,021 | 0,011 | 0,085 |
| 6,0 | 0,011 | 0,009 | 0,016 | 0,007 | 0,073 |

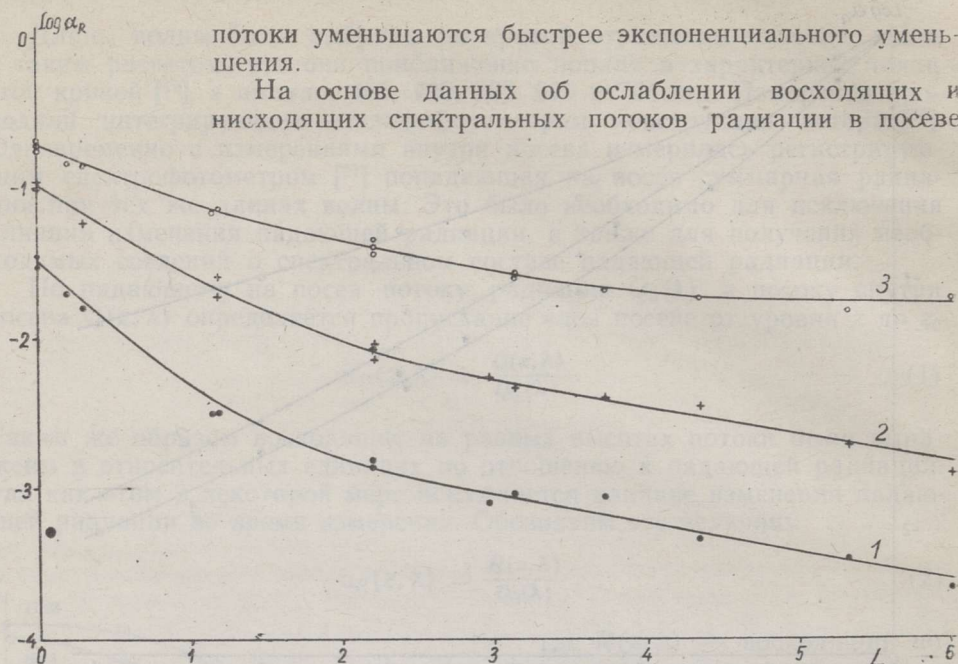


Рис. 3. Ослабление потока вверх внутри посева: 1 — $\lambda = 400$ мμ, 2 — $\lambda = 552$ мμ, 3 — $\lambda = 764$ мμ

можно рассчитать поглощенные посевом спектральные потоки $\Pi(\lambda, L)$. Рассмотрим слой посева от верхней границы до уровня L , т. е. до уровня, выше которого остается относительная площадь листьев L . Этот слой поглощает радиацию

$$\begin{aligned} \Pi(\lambda, L) &= Q_0(\lambda) - Q(\lambda, L) - [R_0(\lambda) - R(\lambda, L)] = \\ &= Q_0(\lambda)[1 - A(\lambda) - a_Q(\lambda, L) + a_R(\lambda, L)], \end{aligned} \quad (3)$$

где $A(\lambda)$ — спектральное альbedo.

Относительное поглощение $a_{\Pi}(\lambda, L)$ равно

$$a_{\Pi}(\lambda, L) = \frac{\Pi(\lambda, L)}{Q_0(\lambda)} = 1 - A - (a_Q - a_R). \quad (4)$$

Таблица 2

| $L \backslash \lambda$ | a_R | | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | 400 | 490 | 552 | 676 | 764 |
| 0,0 | 0,0343 | 0,0592 | 0,102 | 0,0468 | 0,200 |
| 0,5 | 0,0107 | 0,0232 | 0,0473 | 0,0212 | 0,123 |
| 1,0 | 0,00461 | 0,0106 | 0,0255 | 0,0108 | 0,0822 |
| 1,5 | 0,00254 | 0,00553 | 0,0151 | 0,00621 | 0,0589 |
| 2,0 | 0,00166 | 0,00321 | 0,00977 | 0,00392 | 0,0447 |
| 2,5 | 0,00122 | 0,00205 | 0,00679 | 0,00267 | 0,0351 |
| 3,0 | 0,00092 | 0,00142 | 0,00501 | 0,00193 | 0,0283 |
| 3,5 | 0,00072 | 0,00107 | 0,00386 | 0,00148 | 0,0238 |
| 4,0 | 0,00056 | 0,00084 | 0,00308 | 0,00119 | 0,0208 |
| 4,5 | 0,00045 | 0,00069 | 0,00249 | 0,00100 | 0,0187 |
| 5,0 | 0,00036 | 0,00058 | 0,00212 | 0,00087 | 0,0174 |
| 5,5 | 0,00029 | 0,00049 | 0,00186 | 0,00077 | 0,0166 |
| 6,0 | 0,00023 | 0,00042 | 0,00164 | 0,00069 | 0,0164 |

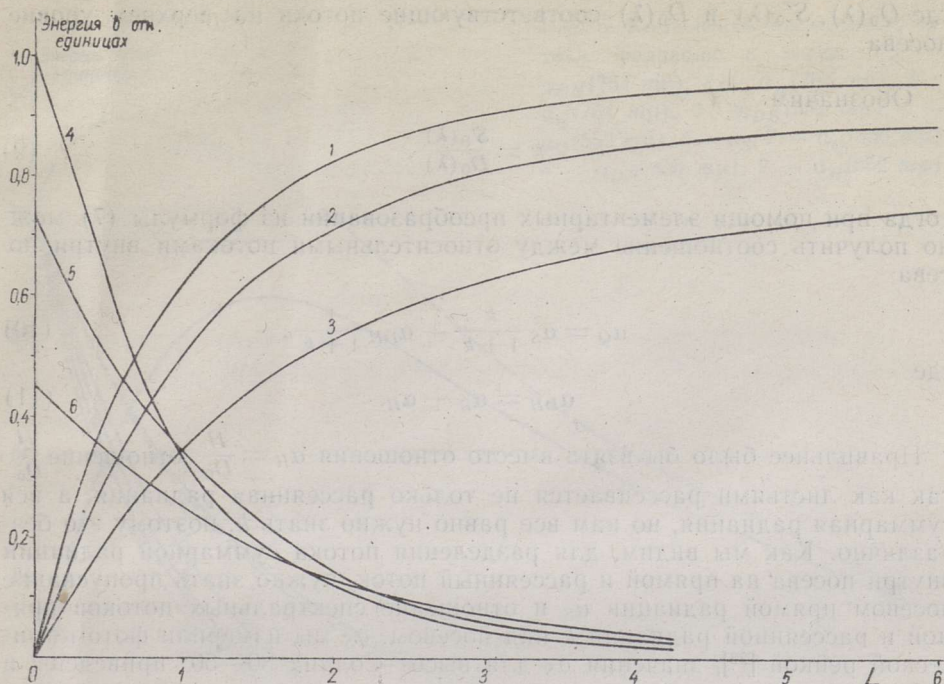


Рис. 4. Спектральное поглощение слоя посева (α_{Π}) и плотность поглощения ($\partial\alpha_{\Pi}/\partial L$): 1 — α_{Π} (400 $m\mu$), 2 — α_{Π} (552 $m\mu$), 3 — α_{Π} (764 $m\mu$); 4, 5, 6 — соответствующие плотности поглощения.

Кривые α_{Π} для длин волн 400, 552 и 764 $m\mu$ в зависимости от L даны на рис. 4. При больших L

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \alpha_{\Pi} = 1 - A. \quad (5)$$

Для дальнейших расчетов нужно знать плотность поглощения на данном уровне, т. е. сколько поглощает слой на уровне, имеющий относительную площадь листьев, равную единице. Эта величина получается из (4) путем дифференцирования по L

$$\frac{\partial \alpha_{\Pi}}{\partial L} = - \left(\frac{\partial \alpha_Q}{\partial L} - \frac{\partial \alpha_R}{\partial L} \right). \quad (6)$$

Кривые $\partial\alpha_{\Pi}/\partial L$ изображены на рис. 4.

Спектральный поток суммарной радиации внутри посева состоит из следующих компонентов:

$$Q(\lambda, L) = S'(\lambda, L) + D(\lambda, L) + H(\lambda, L), \quad (7)$$

где $S'(\lambda, L)$ — поток прямой радиации на уровне L ,

$D(\lambda, L)$ — поток рассеянной радиации неба на уровне L ,

$H(\lambda, L)$ — поток рассеянной от листьев суммарной радиации на уровне L .

Разделяем относительный поток суммарной радиации на отдельные компоненты. Рассмотрим опять относительные величины

$$\alpha_Q = \frac{Q(\lambda, L)}{Q_0(\lambda)}, \quad \alpha_S = \frac{S'(\lambda, L)}{S'_0(\lambda)}, \quad \alpha_D = \frac{D(\lambda, L)}{D_0(\lambda)}, \quad \alpha_H = \frac{H(\lambda, L)}{D_0(\lambda)}, \quad (8)$$

где $Q_0(\lambda)$, $S'_0(\lambda)$ и $D_0(\lambda)$ соответствующие потоки на верхнем уровне посева.

Обозначим

$$k = \frac{S'_0(\lambda)}{D_0(\lambda)}, \quad (9)$$

тогда при помощи элементарных преобразований из формулы (7) можно получить соотношение между относительными потоками внутри посева

$$a_Q = a_S \frac{k}{1+k} + a_{DH} \frac{1}{1+k}, \quad (10)$$

где

$$a_{DH} = a_D + a_H. \quad (11)$$

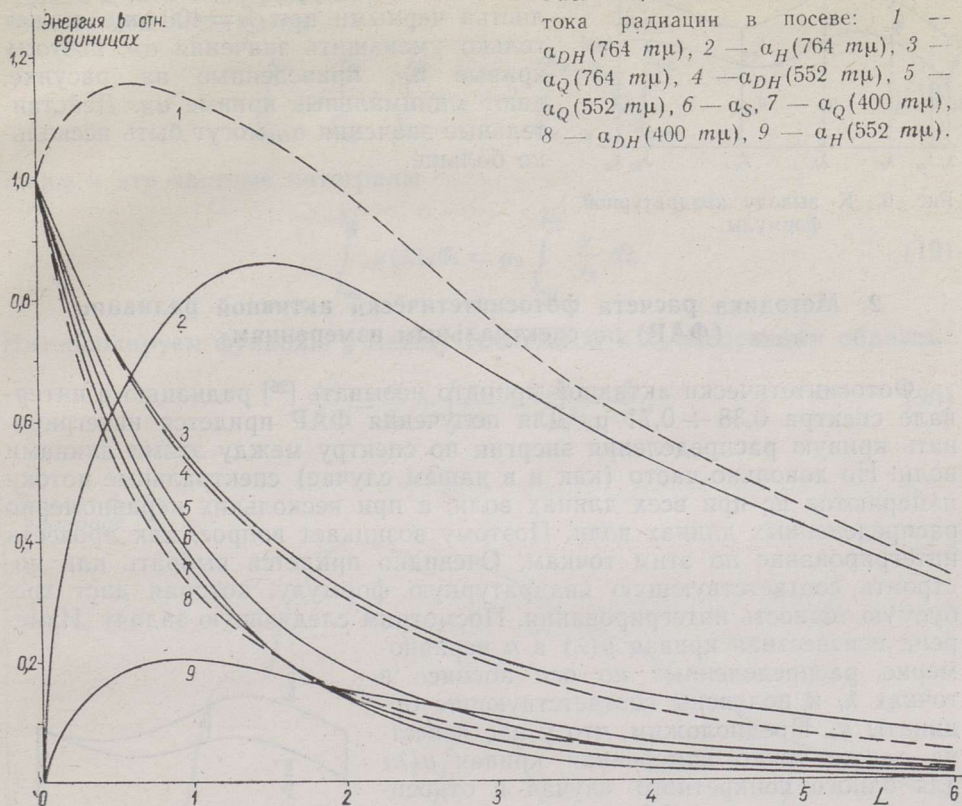
Правильнее было бы взять вместо отношения $a_H = \frac{H}{D_0}$ отношение $\frac{H}{Q_0}$, так как листьями рассеивается не только рассеянная радиация, а вся суммарная радиация, но нам все равно нужно знать k , поэтому это безразлично. Как мы видим, для разделения потока суммарной радиации внутри посева на прямой и рассеянный поток, нужно знать пропускание посевом прямой радиации a_S и отношение спектральных потоков прямой и рассеянной радиации k над посевом. a_S мы измерили фотометрической рейкой [22], значения a_S для высот Солнца 30—50° приведены в табл. 3.

Таблица 3

| L | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 6,0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| a_S | 1,000 | 0,606 | 0,368 | 0,223 | 0,135 | 0,050 | 0,018 | 0,002 |

К сожалению, во время экспедиции не было измерено отношение k . Для этого нужно было бы измерить раздельно спектральные потоки прямой и рассеянной радиаций. Пока придется пользоваться опубликованными данными литературы [23, 24]. Мы использовали данными работ О. Авасте и др. [23], где теоретически рассчитаны спектральные потоки прямой и рассеянной радиаций для ясной погоды при оптической толщине $\tau_0 = 0,3$ и массе атмосферы $m = 2$ ($h_\odot = 30^\circ$). Эти условия близки к нашим условиям измерения. Хотя применение такого теоретически найденного отношения довольно приближенное, можно все-таки провести ориентировочные расчеты. В результате мы получим относительное ослабление рассеянной радиации в посеве. Кривые a_Q , a_S и a_{DH} для трех длин волн показаны на рис. 5. Мы видим, что при 400 $m\mu$ суммарный, прямой и рассеянный потоки ослабляются внутри посева примерно одинаково. Измерения коэффициентов пропускания и отражения листьев кукурузы показывают, что отражение при 400 $m\mu$ около 4—5%, а пропускание 2%, т. е. лист поглощает около 93—94% от всей падающей на него радиации. Таким образом, для радиации при $\lambda = 400 m\mu$ листья почти черные, и основная часть потока радиации внутри посева приходит от неба. Обозначим среднюю прозрачность растительности в направлении (θ, ϕ) на уровне L внутри посева через $a(\theta, \phi, L)$ и интенсивность радиации от неба $I_D(\theta, \phi, \lambda)$. Тогда спектральный поток радиации, приходящий на уровень L от неба, равен

Рис. 5. Компоненты нисходящего потока радиации в посеве: 1 — $\alpha_{DH}(764 \text{ мк})$, 2 — $\alpha_H(764 \text{ мк})$, 3 — $\alpha_Q(764 \text{ мк})$, 4 — $\alpha_{DH}(552 \text{ мк})$, 5 — $\alpha_Q(552 \text{ мк})$, 6 — α_S , 7 — $\alpha_Q(400 \text{ мк})$, 8 — $\alpha_{DH}(400 \text{ мк})$, 9 — $\alpha_H(552 \text{ мк})$.



$$D(\lambda, L) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_D(\vartheta, \varphi, \lambda) \alpha(\vartheta, \varphi, L) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta \quad (12)$$

на уровне $L = 0$.

$$D_0(\lambda) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_D(\vartheta, \varphi, \lambda) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta, \quad (13)$$

отсюда

$$\alpha_D = \frac{D(\lambda, L)}{D_0(\lambda)} = \bar{\alpha}(L), \quad (14)$$

где $\bar{\alpha}(L)$ — некоторое среднее значение α , независящее от λ . Отсюда видно, что α_D не зависит от длины волн.

При $\lambda = 400 \text{ мк}$ $\alpha_H \ll \alpha_D$ и

$$\alpha_{DH} \approx \alpha_D = \bar{\alpha}(L). \quad (15)$$

Используя это обстоятельство, мы можем для других длин волн найти α_H , т. е. долю рассеянной радиации внутри посева, рассеиваемую листьями растений. Соответствующие зависимости α_H от L приведены на рис. 5. Видно, что инфракрасная часть рассеивается гораздо сильнее, чем ФАР. На уровне $L \approx 2$ при $\lambda = 764 \text{ мк}$ поток $H(\lambda, L)$ примерно равен потоку $D_0(\lambda)$ от неба.

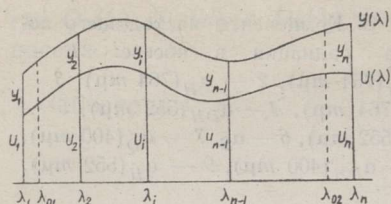


Рис. 6. К выводу квадратурной формулы.

2. Методика расчета фотосинтетически активной радиации (ФАР) по спектральным измерениям

Фотосинтетически активной принято называть [25] радиацию в интервале спектра $0,38 \div 0,71 \mu$. Для получения ФАР придется интегрировать кривую распределения энергии по спектру между этими длинами волн. Но довольно часто (как и в нашем случае) спектральные потоки измеряются не при всех длинах волн, а при нескольких неравномерно распределенных длинах волн. Поэтому возникает вопрос, как провести интегрирование по этим точкам. Очевидно придется выбрать или построить соответствующую квадратурную формулу, которая даст требуемую точность интегрирования. Посмотрим следующую задачу. Измерена неизвестная кривая $y(\lambda)$ в n неравномерно распределенных по оси абсцисс в точках λ_i и получены соответствующие ординаты y_i . Предположим, что у нас известна также точно измеренная кривая $u(\lambda)$ для одного конкретного случая в относительных единицах. Обозначим ее через $u(\lambda)$. Дальше предположим, что физическая сущность процессов, представленных кривыми $y(\lambda)$ и $u(\lambda)$ такова, что они не могут сильно различаться по своему общему виду (рис. 6). Например, если говорить конкретно об изменении спектрального состава суммарной радиации ясной погоды, то этот состав сильно не изменяется. Максимум кривой распределения энергии в спектре всегда находится около 500μ ; в сторону длинных волн кривая равномерно падает, а в сторону коротких волн имеются характерные полосы поглощения. Спектральный состав отраженной от растительности радиации также имеет характерный вид с полосой поглощения около 680μ и относительным максимумом при 550μ . Учитывая приведенные предположения, постараемся построить возможно точную квадратурную формулу для вычисления интеграла

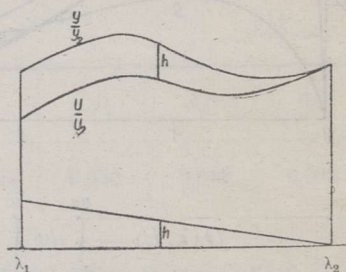


Рис. 7. К выводу формулы (20).

$$\int_{\lambda_{01}}^{\lambda_{02}} y(\lambda) d\lambda. \quad (16)$$

Общий вид всякой квадратурной формулы следующий:

$$\int_{\lambda_{01}}^{\lambda_{02}} y(\lambda) d\lambda = \sum_{i=1}^n a_i y_i. \quad (17)$$

Нужно найти коэффициенты a_i . Для этого представим интеграл (16) в виде суммы интегралов

$$\int_{\lambda_{01}}^{\lambda_{02}} = \int_{\lambda_{01}}^{\lambda_2} + \int_{\lambda_2}^{\lambda_3} + \dots + \int_{\lambda_{n-1}}^{\lambda_{n-1}} + \int_{\lambda_{n-1}}^{\lambda_{02}} \quad (18)$$

Найдем эти частные интегралы

$$\int_{\lambda_{01}}^{\lambda_2} y(\lambda) d\lambda = y_2 \int_{\lambda_{01}}^{\lambda_2} \frac{y}{y_2} d\lambda. \quad (19)$$

Интерполируем функцию y между точками λ_1 и λ_2 следующим образом:

$$\frac{y}{y_2} = \frac{u}{u_2} + \left(\frac{y_1}{y_2} - \frac{u_1}{u_2} \right) \frac{\lambda_2 - \lambda}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (20)$$

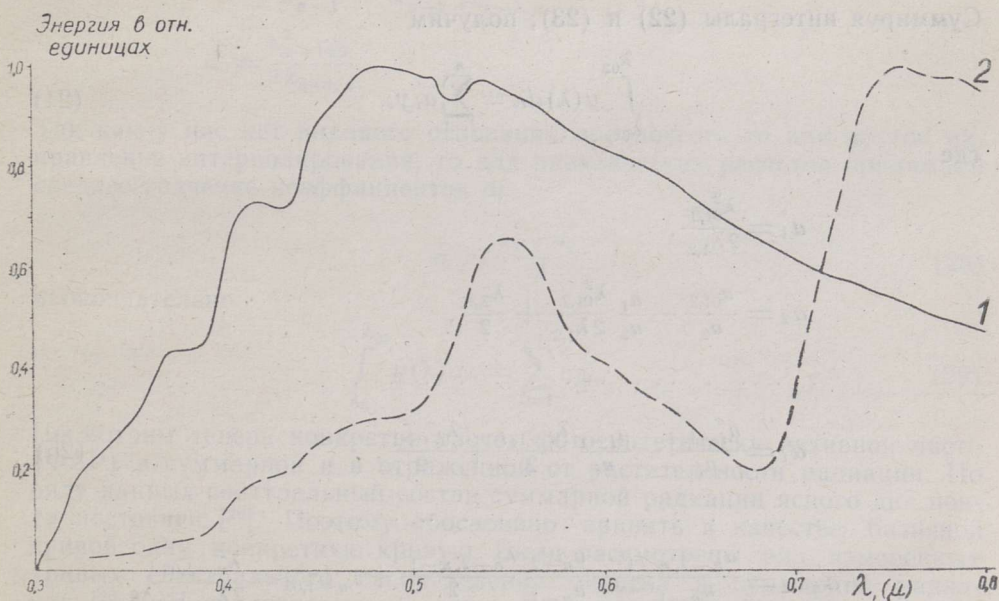


Рис. 8. Распределение энергии в спектре суммарной (1) и отраженной (2) радиации.

Это значит, что мы интерполируем разность известной функции u/u_2 и неизвестной функции y/y_2 между точками λ_1 и λ_2 линейно, как показано на рис. 7. Используя формулу (20), легко провести интегрирование, при этом для краткости обозначим

$$\int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} u d\lambda = u_{i,i+1}, \quad \lambda_{i+1} - \lambda_i = \lambda_{i,i+1}, \quad (21)$$

$$\int_{\lambda_{01}}^{\lambda_2} y(\lambda) d\lambda = \frac{\lambda_{01,2}^2}{2\lambda_{1,2}} y_1 + \left(\frac{u_{01,2}}{u_2} - \frac{u_1}{u_2} \frac{\lambda_{01,2}^2}{2\lambda_{1,2}} \right) y_2. \quad (22)$$

Совершенно аналогично получим следующие интегралы:

$$\begin{aligned} \int_{\lambda_2}^{\lambda_3} y(\lambda) d\lambda &= \frac{\lambda_{2,3}}{2} y_2 + \left(\frac{u_{2,3}}{u_3} - \frac{u_2}{u_3} \frac{\lambda_{2,3}}{2} \right) y_3, \\ \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} y(\lambda) d\lambda &= \frac{\lambda_{i,i+1}}{2} y_i + \left(\frac{u_{i,i+1}}{u_{i+1}} - \frac{u_i}{u_{i+1}} \frac{\lambda_{i,i+1}}{2} \right) y_{i+1}, \\ \int_{\lambda_{n-1}}^{\lambda_{02}} y(\lambda) d\lambda &= \left(\lambda_{n-1,02} - \frac{\lambda_{n-1,02}^2}{2\lambda_{n-1,n}} \right) y_{n-1} + \left[\frac{u_{n-1,02}}{u_n} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{u_{n-1}}{u_n} \left(\lambda_{n-1,02} - \frac{\lambda_{n-1,02}^2}{2\lambda_{n-1,n}} \right) \right] y_n. \end{aligned} \quad (23)$$

Суммируя интегралы (22) и (23), получим

$$\int_{\lambda_{01}}^{\lambda_{02}} y(\lambda) d\lambda = \sum_{i=1}^n a'_i y_i, \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} a'_1 &= \frac{\lambda_{01,2}^2}{2\lambda_{1,2}}, \\ a'_2 &= \frac{u_{01,2}}{u_2} - \frac{u_1}{u_2} \frac{\lambda_{01,2}^2}{2\lambda_{1,2}} + \frac{\lambda_{2,3}}{2}, \\ &\dots \dots \dots \\ a'_i &= \frac{u_{i-1,i}}{u_i} - \frac{u_{i-1}}{u_i} \frac{\lambda_{i-1,i}}{2} + \frac{\lambda_{i,i+1}}{2}, \\ &\dots \dots \dots \\ a'_{n-1} &= \frac{u_{n-2,n-1}}{u_{n-1}} - \frac{u_{n-2}}{u_{n-1}} \frac{\lambda_{n-2,n-1}}{2} + \lambda_{n-1,02} - \frac{\lambda_{n-1,02}^2}{2\lambda_{n-1,n}}, \\ a'_n &= \frac{u_{n-1,02}}{u_n} - \frac{u_{n-1}}{u_n} \left(\lambda_{n-1,02} - \frac{\lambda_{n-1,02}^2}{2\lambda_{n-1,n}} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

Формулы (25) для коэффициентов a'_i одинаковы как для $\lambda_{01} > \lambda_1$, так и для $\lambda_{01} < \lambda_1$.

При интерполяции разности функции y/u_2 и u/u_2 мы интерполировали ее «назад», т. е. начинали интерполяцию от правой ординаты промежутка (рис. 7). Таким же образом можно начинать интерполяцию с левого ордината и получить коэффициенты квадратурной формулы при интерполировании «вперед». Тогда

$$\int_{\lambda_{01}}^{\lambda_{02}} y(\lambda) d\lambda = \sum_{i=1}^n a''_i y_i, \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned}
 a_1'' &= \frac{u_{01,2}}{u_1} - \frac{u_2}{u_1} \left(\lambda_{01,2} - \frac{\lambda_{01,2}^2}{2\lambda_{1,2}} \right), \\
 a_2'' &= \frac{u_{2,3}}{u_2} - \frac{u_3}{u_2} \frac{\lambda_{2,3}}{2} + \lambda_{01,2} - \frac{\lambda_{01,2}^2}{2\lambda_{1,2}}, \\
 a_3'' &= \frac{u_{3,4}}{u_3} - \frac{u_4}{u_3} \frac{\lambda_{3,4}}{2} + \frac{\lambda_{2,3}}{2}, \\
 &\dots \\
 a_i'' &= \frac{u_{i,i+1}}{u_i} - \frac{u_{i+1}}{u_i} \frac{\lambda_{i,i+1}}{2} + \frac{\lambda_{i-1,i}}{2}, \\
 &\dots \\
 a_{n-1}'' &= \frac{u_{n-1,02}}{u_{n-1}} - \frac{u_n}{u_{n-1}} \frac{\lambda_{n-1,02}^2}{2\lambda_{n-1,n}} + \frac{\lambda_{n-2,n-1}}{2}, \\
 a_n'' &= \frac{\lambda_{n-1,02}^2}{2\lambda_{n-1,n}}.
 \end{aligned} \tag{27}$$

Так как у нас нет никакого основания предпочесть то или другое направление интерполирования, то для практических расчетов принимаем среднее значение коэффициентов a_i

$$a_i = \frac{a_i' + a_i''}{2} \tag{28}$$

и окончательно

$$\int_{\lambda_{01}}^{\lambda_{02}} y(\lambda) d\lambda = \sum_{i=1}^n a_i y_i. \tag{29}$$

Посмотрим теперь конкретно расчет фотосинтетически активной части (ФАР) в суммарной и в отраженной от растительности радиации. По ряду данных спектральный состав суммарной радиации ясного дня почти постоянен [26]. Поэтому обосновано принять в качестве базисной кривой одну конкретную кривую. Были рассмотрены ряд измеренных кривых спектрального распределения энергии в суммарной радиации [26, 27, 28] и некоторые теоретические кривые [23]. Мы выбрали кривую из монографии Кондратьева [26], которая лучше всего согласовывается с нашими измерениями. Кроме того, эта кривая лучше других экспериментальных кривых согласуется и с теоретическими расчетами. Эта кривая приведена на рис. 8. Кривую спектрального распределения энергии, отраженной от растительности радиации, мы получили следующим образом. За основу принята спектральная кривая коэффициента отражения, измеренная Тоомингом [19]. Эту кривую экстраполировали в сторону ультрафиолетовой части на основе данных Шульгина и др. [8] и в сторону инфракрасной части на основе данных Дирмхирн [9]. Для приближенного получения спектрального состава отраженной радиации при ясной погоде коэффициент отражения умножим на спектральное распределение суммарной радиации. В результате получилась кривая 2 (см. рис. 8). Используя эти кривые и формулу (28), получили коэффициенты квадратурной формулы для примененных длин волн. По измеренным при четырех длинах волн спектральным потокам суммарной радиации рассчитана ФАР для всех случаев измерения внутри посева.

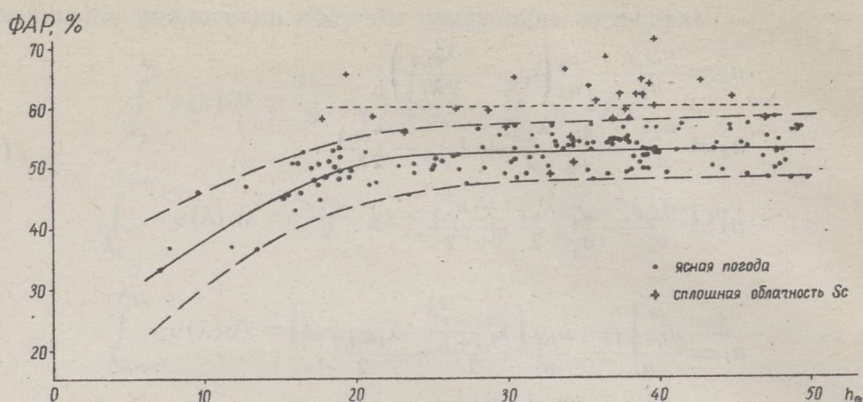


Рис. 9. Процент ФАР в суммарной радиации.

Пиранометром регистрировали суммарную радиацию. Зная ФАР и суммарную радиацию, можно получить процент (или коэффициент) ФАР в суммарной радиации. На рис. 9 показана зависимость коэффициента ФАР от высоты Солнца. На графике нанесены все точки измерения, при незакрытом облаками диска Солнца, полученные в течение экспедиции 1963 г. (июль, август) в Эстонии. На этом же графике показаны точки измерения при сплошной облачности (Sc) разной плотности. На рис. 9 видно, что коэффициент ФАР для случаев, когда перед диском Солнца нет облаков, составляет в среднем $52,5\%$, при этом все точки измерения для высот Солнца больше 15° находятся в промежутке $(52,5 \pm 5)\%$. Для сплошной облачности коэффициент ФАР в среднем 60% , но там колебания величины коэффициента больше. Еще большие колебания можно получить при других видах облачности, особенно при переменной облачности. Таким же способом можно без всяких затруднений рассчитать ФАР в отраженной от растительности радиации, вычисляя коэффициенты по формуле (28) и используя измерения спектрофотометра над посевом. Несколько сложнее расчет ФАР внутри посева. По ряду данных, спектральная кривая пропускания листьев весьма похожа на кривую отражения [3, 29]. Поэтому при вычислении нисходящих потоков ФАР на большой глубине в посевах, т. е. при больших L , можно использовать коэффициенты квадратурной формулы для отраженной радиации, так как там часть приходящей прямо от неба радиации мала. В верхних слоях посева, т. е. при малом L очевидно можно использовать коэффициенты квадратурной формулы для суммарной радиации, так как там, в основном, радиация, приходящая от неба и от Солнца. Самое неясное положение при средних L (около 2). Мы рассчитали для этих L ФАР по общим коэффициентам. Их разность составлял не больше $5-6\%$. Такой является и точность расчета для этих L . На рис. 10 приведены результаты расчета. Кривая 1 изображает относительное ослабление нисходящего потока ФАР. Кривая 2 показывает восходящий поток ФАР. На основе этих потоков можно рассчитать и поглощенную в слое от 0 до L ФАР, которая дана кривой 3, а также плотность поглощенная (кривая 4). Зная поглощенную в посевах ФАР и световые кривые фотосинтеза, мы можем рассчитать фотосинтез посева. Но данных о световых кривых кукурузы, особенно в естественных условиях, пока весьма мало [30, 31, 32]. Кроме того, эти кривые нужно знать для листьев разных ярусов. Такие данные пока вообще отсутствуют. Нужно еще отметить, что в ряде случаев измерения фотосинтеза и методика измерения ра-

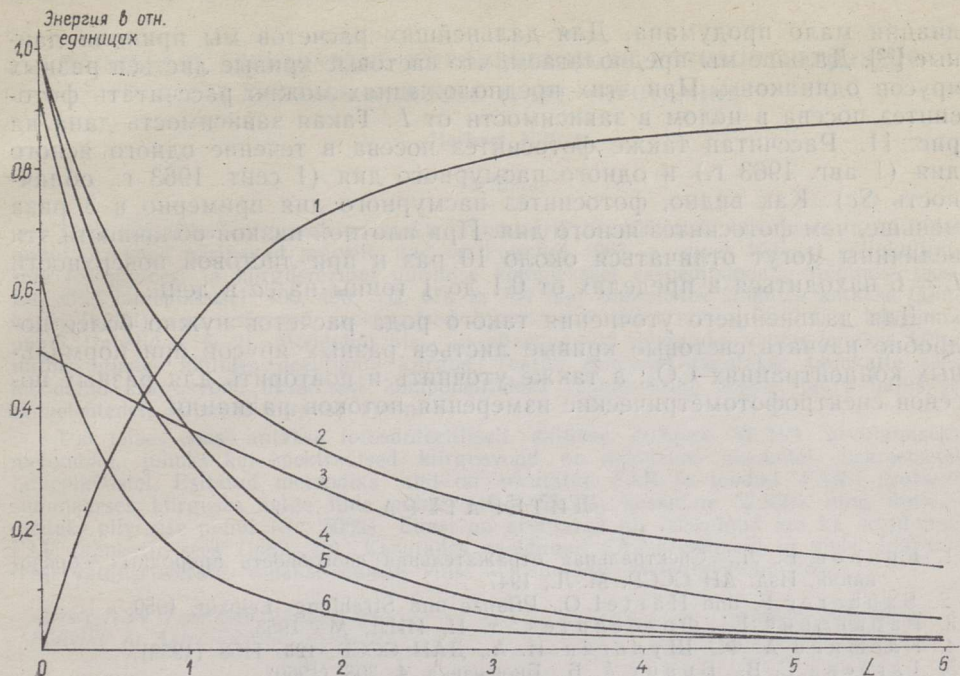


Рис. 10. Относительные потоки ФАР в посеве: 1 — поглощенный в слое $0 \div L$ поток, 2 — ослабление интегральной суммарной радиации, 3 — коэффициент ФАР суммарной радиации в посеве, если над посевом 50% ФАР, 4 — нисходящий поток, 5 — плотность поглощения на уровне L , 6 — восходящий поток (масштаб вертикальной оси в 10 раз увеличен).

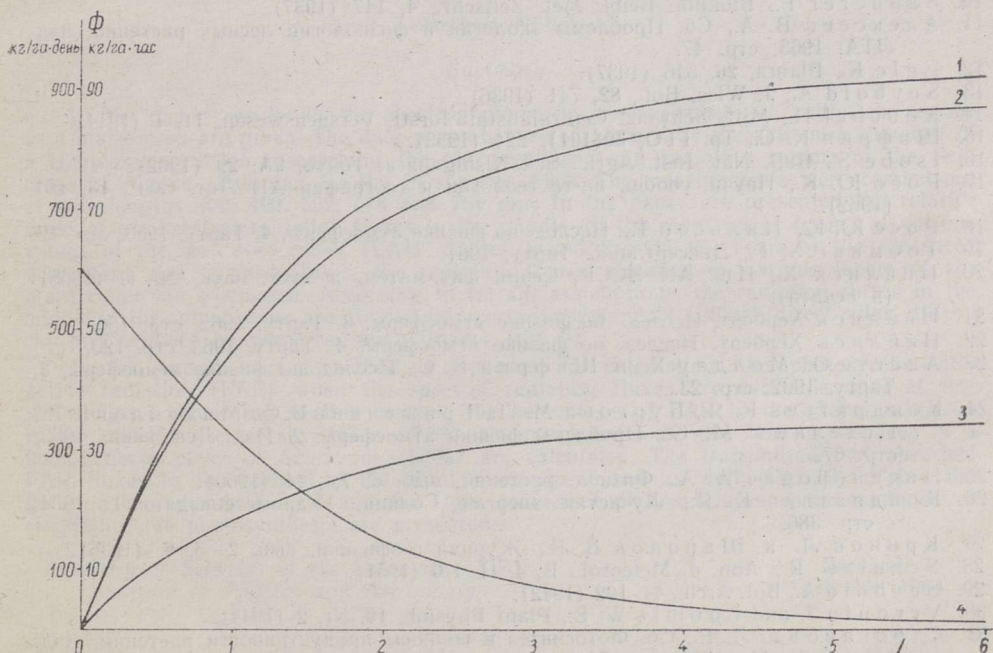


Рис. 11. Чистый фотосинтез посева: 1 — фотосинтез в ясный день (1 авг. 1963 г.) в зависимости от L в $\text{кг/га} \cdot \text{день}$, 2 — фотосинтез слоя посева $0 \div L$ в $\text{кг/га} \cdot \text{час}$, 3 — фотосинтез в пасмурный день (облачность Sc), 4 — фотосинтез слоя посева, имеющего относительную площадь листьев, равную единице.

диации мало продумана. Для дальнейших расчетов мы приняли данные [32]. Далее мы предполагаем, что световые кривые листьев разных ярусов одинаковы. При этих предположениях можно рассчитать фотосинтез посева в целом в зависимости от L . Такая зависимость дана на рис. 11. Рассчитан также фотосинтез посева в течение одного ясного дня (1 авг. 1963 г.) и одного пасмурного дня (1 сент. 1963 г., облачность Sc). Как видно, фотосинтез пасмурного дня примерно в 3 раза меньше, чем фотосинтез ясного дня. При плотной низкой облачности эти величины могут отличаться около 10 раз и при листовой поверхности $L = 6$ находиться в пределах от 0,1 до 1 тонны на га в день.

Для дальнейшего уточнения такого рода расчетов нужно более подробно изучать световые кривые листьев разных ярусов при нормальных концентрациях CO_2 , а также уточнить и повторить для разных посевов спектрофотометрические измерения потоков радиации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кринов Е. Л., Спектральная отражательная способность природных образований, Изд. АН СССР, М.-Л., 1947.
2. Saubereger F. und Härtel O., Pflanze und Strahlung, Leipzig, 1959.
3. Рабинович Е., Фотосинтез, т. II, ИИЛ, М., 1953.
4. Клешнин А. Ф., Шульгин И. А., ДАН СССР, 125, 1158 (1959).
5. Тагеева С. В., Брант А. Б., Биофизика, 4, 308 (1960).
6. Шахов А. А., Станко С. А., Хазанов В. С., Дьяконов Ф. С., Ботан. ж., 14, 1681 (1959).
7. Кондратьев К. Я., Метеорол. и гидрология, 5, 46 (1960).
8. Шульгин И. А., Клешнин А. Ф., Подольный В. З., Физиология растений, вып. 2, 7, 141 (1960).
9. Dirmhirn, I., Wetter und Leben, 9, H. 3—5, 41 (1957).
10. Saubereger F., Bioklim. Beibl. Met. Zeitschr., 4, 147 (1937).
11. Алексеев В. А., Сб. Проблемы экологии и физиологии лесных растений, изд. ЛТА, 1963, стр. 47.
12. Egle K., Planta, 26, 546 (1937).
13. Seybold A., J. Wiss. Bot., 82, 741 (1936).
14. Knuchel H., Mitt. Schweiz. Centralanstalt forstl. Versuchswesen, 11, 1 (1914).
15. Шифрин К. С., Тр. ГГО, 39(101), 224 (1953).
16. Isobe S., Bull. Nat. Inst. Agric. Sci. Nishigahara, Tokyo, 9A, 29 (1962).
17. Росс Ю. К., Научн. сообщ. ин-та геологии и географии АН Лит. ССР, 13, 151 (1962).
18. Росс Ю. К., Нильсон Т., Исслед. по физике атмосферы, 4, Тарту, 1963, стр. 42.
19. Тооминг Х. Г., Диссертация, Тарту, 1961.
20. Нийлиск Х., Изв. АН ЭССР, Серия физ.-матем. и техн. наук, № 1, (1965) (в печати).
21. Нийлиск Херберт, Исслед. по физике атмосферы, 3, Тарту, 1962, стр. 150.
22. Нийлиск Херберт, Исслед. по физике атмосферы, 4, Тарту, 1963, стр. 120.
23. Авасте О., Молдау Х. и Шифрин К. С., Исслед. по физике атмосферы, 3, Тарту, 1962, стр. 23.
24. Кондратьев К. Я., Бургова М. Л., Гришечкин В. С., Михайлов В. В., Петелин Г. М., Сб. Проблемы физики атмосферы, 2, Изд. Лен. ун-в., 1963, стр. 67.
25. Ничипорович А. А., Физиол. растений, вып. 6, 7, 744 (1960).
26. Кондратьев К. Я., Лучистая энергия Солнца. Гидрометеоиздат, Л., 1954, стр. 386.
27. Кринов Л. и Шаронов В. В., Журнал геофизики, вып. 2—3, 6 (1936).
28. Schulze R., Ann. d. Meteorol., B. 4, H. 1/6 (1951).
29. Seybold A., Bot. Arch., 44, 102 (1942).
30. Verduin J. and Loomis W. E., Plant Physiol., 19, Nr. 2 (1944).
31. Строганова Л. Е., Сб. Фотосинтез и вопросы продуктивности растений, Изд. АН СССР, М., 1963, стр. 71.
32. Hesketh J. D. and Moss D. N., Crop Science, 3, № 2, 107 (1963).

MAISIKÜLVI SPEKTRAALNE KIIRGUSREŽIIM JA FOTOSÜNTEETILISELT AKTIIVSE KIIRGUSE (FAR) ARVUTAMINE

Herbert Niilisk

Resüme

Töös esitatakse kiirgusrežiimi spektrofotomeetriliste mõõtmiste tulemused maisi külvil puhul. Andmed pärinevad autorilt, nad on kogutud 1963. a. suvel Jõgeval põllukultuuride fotosünteesi ja kiirgusrežiimi uurimise kompleksel ekspeditsioonil. Mõõtmisi teostati viiel lainepikkusel: 400, 490, 552, 676 ja 764 mμ. Suhtelistes ühikutes antakse taimkatte (külvil) sees esinevad spektraalsed kiirgusvood mitmesuguse suhtelise lehepinna puhul (tabelid 1 ja 2). Mõõdetud üles- ja allasuunatud voogude kaudu leitakse külvil mitmesugustes kihtides neeldunud kiirgus. Teatud eeldustel jagatakse taimkatte sees mõõdetud kiirgusvood üksikuteks komponentideks (summaarne, otsene, taeva hajus ja taimlehtedelt hajunud kiirgus) (joon. 5).

Töö teises osas antakse fotosünteesilist aktiivse kiirguse (FAR) arvutamiseks meetodika, juhuks kui spektraalsed kiirgusvood on mõõdetud üksikutel diskreetsetel lainepikkustel. Esitatud meetodika abil on arvutatud FAR ja toodud FAR-i protsent summaarses kiirguses selge ilma puhul (47,5—57,5%, keskmine 52,5%) ning ühtlase madala pilvisuse puhul (Sc, 60%). Edasi on arvutatud nii läbitulnud kui ka neeldunud FAR taimkatte sees (joon. 10). Kasutades neeldunud FAR-i andmeid ja maisi fotosünteesi valguskõvera, tuuakse mõned külvil fotosünteesi arvutamise näited.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Füüsika ja Astronoomia Instituut

Saabus toimetusse
6. IV 1964

SPECTRAL RADIATION REGIME OF A MAIZE CROP AND CALCULATION OF THE PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION (FAR)

Herbert Niilisk

Summary

In the paper results of the spectrophotometric measurements of radiation regime in a maize crop are given. The data presented were obtained by the author in the staff of a complex expedition researching the photosynthesis and radiation regime of the field crops at Jõgeva (Estonian S.S.R.) in summer, 1963. The measurements were carried out at wavelengths 400, 490, 552, 676 and 764 mμ. In the paper are presented the relative units of the spectral radiation fluxes in the middle of the plant cover (crop) at various values of the leaf area index (LAI) (tables 1 and 2). On the basis of the measured downward and upward fluxes, the radiation fluxes absorbed in various layers of the plant cover are calculated. According to certain assumptions, the radiation fluxes in the middle of the plant cover are divided into certain components (global, direct solar, diffuse sky and diffused by plant radiation fluxes) (fig. 5).

In the second part a method is proposed for calculating the photosynthetically active radiation (FAR) when the spectral radiation fluxes are available only at few wavelengths. According to this method, the percentage of FAR in the global radiation in the case of a clear sky (47.5—57.5%, the mean value 52.5%) and in the case of a homogeneous cover of Sc clouds (60%) are calculated. The transmitted and absorbed FAR fluxes in the middle of the plant cover are found as well (fig. 10). Using the data on the absorbed FAR and the light curves of photosynthesis some examples of estimating the photosynthesis are presented.

Academy of Sciences of the Estonian S.S.R.,
Institute of Physics and Astronomy

Received
April 6th, 1964