

О. В. Ларченко,  
к. с.-г. н., в. о. доцента, Херсонський державний аграрний університет  
С. В. Коковіхін,  
д. с.-г. н., професор, Херсонський державний аграрний університет

# МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ВСТАНОВЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ФОТОСИНТЕТИЧНО АКТИВНОЇ РАДІАЦІЇ ЗА ПЕРІОД ВЕГЕТАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

O. V. Larchenco,  
c. s.-g. n., v.o. of associate professor, Kherson state agrarian university  
S. V. Cocovihin,  
d. s.-g. n., professor, Kherson state agrarian university

MATHEMATICAL METHODS OF ESTABLISHMENT INDEXES PHOTOSYNTHETIC ACTIVE RADIATION FOR THE PERIOD OF VEGETATION OF AGRICULTURAL CULTURES

**У статті висвітлені проблеми використання розрахункових методів при встановленні показників фотосинтетично активної радіації, наведено спосіб розрахунків за допомогою розробленого рівняння множинної регресії, наведені практичні рекомендації для здійснення розрахунків.**

**In the article the lighted problems up of the use of calculation methods at establishment of indexes photosynthesis active radiation, the method of calculations by the developed equalization of multiple regression is resulted, data are practical recommendations for realization of calculations.**

*Ключові слова: фотосинтетично активна радіації ФАР, способи розрахунків, продуктивність рослин, регресія, кореляція*

*Key words: photosynthesis active radiation (PAR), methods of calculations, productivity of plants, regression, correlation*

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У науково-дослідних роботах аграрного напрямку в 60—80 роках минулого століття широкого розповсюдження набули дослідження щодо вивчення реакції різних за біологічними та генетичними ознаками сільськогосподарських культур на кількісні параметри надходження фотосинтетично активної радіації (ФАР). Ці показники вчені мали змогу отримувати за даними агрометеорологічних станцій, а також за допомогою власних стандартних актинометричних та метеорологічних спостережень, на їх основі проводити розрахунок

надходження ФАР, як за окремі міжфазні періоди, так і в цілому за вегетацію [1]. На жаль, в останні роки внаслідок багатьох чинників дослідження такого характеру майже не проводяться, що потребує пошуку нових форм і методів встановлення величин надходження сонячної радіації.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Однією з головних задач рослинницької галузі є підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) викорис-

**Таблиця 1. Типова форма запису та приклад розрахунків ФАР за актинометричними спостереженнями**

Дата	Час	$h_{\odot}$	$\sin h_{\odot}$	$S$	$S'$	$P$	$C_S$	$S'_{\phi}$	$n$	$C_D$	$D$	$S'/D$	$D_{\phi}$	$Q_{\phi}$
4.VI	13.35	56,1	0,830	1,17	0,97	0,60	0,39	0,38	0/0	0,69	0,17	–	0,12	0,50
14.VII	13.40	55,9	0,828	1,04	0,86	0,63	0,40	0,34	5/5	0,63	0,39	–	0,25	0,59
20.VII	15.40	38,7	0,625	1,03	0,64	0,69	0,40	0,26	0/0	0,69	0,16	–	0,11	0,37
3.IX	12.34	34,8	0,571	1,08	0,62	0,72	0,41	0,25	10/0	0,69	0,13	4,8	0,09	0,34
18.X	7.37	9,8	0,170	0,56	0,10	0,73	0,31	0,03	10/0	0,50	0,08	1,2	0,08	0,07

Джерело: [7].

**Таблиця 2. Значення для коефіцієнту переходу для сумарної радіації ( $C_{\phi}$ ) залежно від висоти Сонця ( $h_{\odot}$ )**

$h_{\odot}$	10°	15°	20°	25°	30°	40°	50°	60°
$C_{\phi}$	0,34	0,41	0,48	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51

тання сонячної енергії ( $K_{\phi}$ ), який відображає відношення кількості енергії, що акумулювалась у продуктах фотосинтезу або утворилася у біомасі врожаю, до кількості використаної радіації. Згідно досліджень А.А. Ничипоровича, максимальний теоретично можливий ККД ФАР на засвоєння однієї молекули  $CO_2$  в процесі фотосинтезу потребує в межах 8—10 квантів сонячного світла [2].

Проте фізіологічне значення має тільки максимальне теоретично можливий ККД ФАР. Інші його значення, розраховані шляхом розподілу суми ФАР за період вегетації рослин на урожай, що виражені в калоріях, фізіологічного сенсу не мають і можуть служити лише для порівняльної оцінки ефективності використання сільськогосподарських угідь та елементів технологій вирощування в різних ґрунтово-кліматичних зонах [3; 4].

## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Завданням проведених досліджень було встановлення науково-практичних аспектів використання розрахункового методу встановлення показників ФАР за різні терміни вегетації сільськогосподарських культур з можливостями використання інформаційних технологій.

Дослідження з цього напрямку проведені за допомогою методики, яка висвітлена в працях щодо використання інформаційних технологій в сільському господарстві, а саме Гойси М.І., Перелет Н.О., 1976 [5] та Ушкаренко В.О., Нікішенка В.Л., Голобородька С.П., Коковіхіна С.В., 2008 [5].

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

При проведенні досліджень велике значення має встановлення перехідних коефіцієнтів, які відображають частку фотосинтетично активної радіації в загальному потоці сонячної радіації. Уперше теоретичні положення використання цих коефіцієнтів були висвітлені в працях Молдау [6], Росса [7] та інших для середніх умов прозорості атмосфери й хмарності. Проте, оскільки спектральний склад сонячної радіації значною мірою залежить від низки чинників (наприклад, висоти Сонця  $h_{\odot}$ , прозорості атмосфери  $p$ , кількості хмар  $n$  тощо), то й перехідні коефіцієнти та-

кож повинні залежати від них. У спектральному складі розсіяної радіації при безхмарному небі переважають фіолетові й сині промені, а інфрачервоні майже відсутні. При похмурому небі спектральний склад розсіяної радіації близький до спектрального складу прямої радіації.

Таким чином, частка прямої і розсіяної ФАР у загальному потоці енергії зазнає зміни як протягом доби, так і протягом року. Дослідження цього питання довели, що коефіцієнт переходу для прямої радіації змінюється від 0,12 при висоті Сонця  $h_{\odot} = 12^{\circ}$  і коефіцієнти прозорості  $p = 0,60$  до 0,44 при  $h_{\odot} = 60^{\circ}$  та  $p = 0,80$ . Одночасно коефіцієнти переходу для розсіяної радіації змінюються від 0,69 при ясному небі до 0,50 при похмурому.

Важливим питанням при розрахунках ФАР є встановлення впливу перистих хмар на величину коефіцієнта  $C_D$ . Дослідженнями доведено, що при наявності перистих хмар коефіцієнт  $C_D$  залежить не стільки від їх кількості або площі, скільки від їхньої щільності, яку можна охарактеризувати співвідношенням прямої на горизонтальну поверхню радіації  $S'$  ( $S' = S \sin \cdot h_{\odot}$ ) до розсіяної радіації  $D$ . Якщо при будь-якій кількості перистих хмар це співвідношення перевищує 1,5, тоді коефіцієнти  $C_D$  такі ж самі значення, як і при ясному небі. Ці випадки можна віднести до інтервалу хмарності 0—1 бал. При щільних перистих хмарах, коли  $S' / D \leq 1,5$ , коефіцієнт  $C_D$  приймає значення близьке до його величини при похмурому небі. Такі випадки необхідно відносити до інтервалу хмарності 9—10 балів.

Отже, сумарну фотосинтетично активну радіацію ( $Q_{\phi}$ ) можна розрахувати за формулою, де відображені залежності коефіцієнтів  $C_S$  і  $C_D$  відносно висоти Сонця ( $h_{\odot}$ ), прозорості атмосфери ( $P_2$ ) та кількості хмар ( $n$ ). Похибка розрахунків не перевищує  $\pm 10\%$  [9].

Найбільш розповсюдженими у 70—80 роках ХХ ст. на території колишнього СРСР був метод визначення ФАР за показниками прямої та розсіяної сонячної радіації [7] за допомогою актинометричних спостережень (табл. 1).

За результатами цих даних проводили сумарні розрахунки показників ФАР. Проте, цей метод є досить складний і потребує багаточисельних спостережень і розрахунків.

Величину сумарної ФАР ( $Q_{\phi}$ ) можна отримувати використовуючи залежність коефіцієнту переходу для сумарної радіації ( $C_{\phi}$ ) відносно висоти Сонця (табл. 2). Проте, ця залежність отримана без врахування

хмарності та прозорості атмосфери, тому у випадках, коли є експериментальні дані лише про сумарну радіацію, нею можна користуватися для визначення сумарної  $C_Q$ .

На крупних метеорологічних станціях, де проводилися добові реєстрації потоків радіації, сумарну ФАР ( $\sum Q_{\phi}$ ) можна було розрахувати з використанням добової суми інтегральної радіації і середньозважених добових показників коефіцієнтів  $\overline{C_S}$  та  $\overline{C_D}$ . Величину  $\overline{C_S}$  коефіцієнту встановлювали відносно полуденної висоти Сонця  $h_{ng}$  і коефіцієнтів прозорості атмосфери  $P_2$  у полуденний час. Для отримання добових сум ФАР визначалися суми ФАР за годинною інтегральною радіацією за показниками  $h_{\phi}$  і  $P_2$ .

При відсутності актинометричних спостережень як місячні, так і добові величини інтегральної радіації можуть бути отримані розрахунковим методом за даними стандартних метеорологічних спостережень. У цьому випадку для основних вихідних даних використовується показник тривалості сонячного саява (в радянській літературі він позначається — ПСС, в англомовній — SS), а також кількість хмарності.

Серед низки методів розрахунків місячних величин інтегральної радіації  $\sum_m Q$  за місячними сумами тривалості сонячного саява ( $\sum_m ПСС$ ) найбільш точним і досконалим є метод С.І. Сивкова (1973) [5], де розрахунок  $\sum_m Q$  проводиться за формулою (1):

$$\sum_m Q = 0,0049 \cdot (\sum_m ПСС)^{1,31} + 10,5 (\sin \bar{h}_{ng})^{2,1},$$

де  $\sum_m ПСС$  — місячна сума тривалості сонячного саява за показниками геліографу, годин;

$\sin \bar{h}_{ng}$  — синус полуденної висоти Сонця для середнього дня місяця.

Висота Сонця в полудень для середнього місяця розраховується за формулою:

$$h_{ng} = 90 - \varphi + \delta,$$

де  $\varphi$  — географічна широта станції,

$\delta$  — нахил Сонця, який знаходиться для дня, що відповідає середині місяця.

При проведенні науково-дослідних робіт із різними сільськогосподарськими культурами початок місяця можна відлічити від будь-якої дати (строк сівби, сходи, фази росту й розвитку, проведення поливів тощо), для того щоб встановити залежності між надходженням ФАР та досліджуваними факторами. Відповідно цьому початку розрахункового періоду необхідно визначити середину місяця, яка не буде співпадати з 15 числом. Наприклад, сівба кукурудзи відбулася 10 травня. Отже, визначаємо суму ПСС від 10 травня до 10 червня, тоді середина місяця буде приходиться на 26 травня.

З метою спрощення розрахунків і підвищення їх точності нами розроблено рівняння, а також, враховуючи складність вищенаведених способів встановлення інтегральної радіації, нами проведено статистичне моделювання на основі вихідних даних суми тривалості сонячного саява та його полуденної висоти, яке дозволило розробити рівняння множинної регресії.

За отриманими даними проводимо розрахунок рівняння множинного кореляційного зв'язку за формулою:

$$\overline{y}_{x_1 x_2} = a + bx_1 + cx_2.$$

Складові елементи цієї залежності необхідно встановити за способом найменших квадратів:

$$\begin{aligned} \sum y &= n \cdot a + b \sum x_1 + c \sum x_2 \\ \sum yx_1 &= a \sum x_1 + b \sum x_1^2 + c \sum x_1 x_2 \\ \sum yx_2 &= a \sum x_2 + b \sum x_1 x_2 + c \sum x_2^2. \end{aligned}$$

Після підставлення відповідних значень отримуємо такі параметри цього рівняння:

$$206,1 = 21a + 4672,0b + 840c$$

$$61542,8 = 4672,0a + 1329526,0b + 224222,5c$$

$$10260,3 = 840,0a + 224222,5b + 38412,5c.$$

Розділивши члени рівняння на коефіцієнти при  $a$ , отримуємо:

$$9,8142 = a + 222,47619b + 40,0c$$

$$13,1725 = a + 284,5732b + 47,9928c$$

$$12,2146 = a + 266,9316b + 45,7292c.$$

Віднявши від другого рівняння перше, одержуємо:

$$3,3584 = 62,0970b + 7,9928c.$$

Віднімаємо від другого рівняння третє й отримуємо:

$$0,9551 = 17,6417b + 2,2637c.$$

Здобуваємо систему двох рівнянь із двома невідомими:

$$3,3584 = 62,0970b + 7,9928c$$

$$0,9551 = 17,6417b + 2,2637c.$$

Розділимо кожне рівняння на коефіцієнт при  $b$ :

$$0,0541 = b + 0,1287c$$

$$0,0543 = b + 0,1283c.$$

Із першого рівняння віднімаємо друге й отримуємо:

$$-0,00023 = 0,00040c$$

$$\text{звідки } c = -0,5629.$$

Підставивши в перше рівняння значення коефіцієнта  $c$ , отримуємо значення коефіцієнта  $b$ :

$$0,0541 = b + 0,1287 \cdot (-0,5629); b = 0,1265.$$

Таку ж величину коефіцієнта  $b$  одержуємо, якщо підставити значення  $c$  у друге рівняння:

$$0,0543 = b + 0,1283 \cdot (-0,5629); b = 0,1265.$$

Значення коефіцієнтів  $b = 0,1265$  і  $c = -0,5629$  підставляємо в перше рівняння:

$$9,8142 = a + 222,47619 \times 0,1265 + 40,0 \times (-0,5629)$$

$$13,1725 = a + 284,5732 \times 0,1265 + 47,9928 \times (-0,5629)$$

$$12,2146 = a + 266,9316 \times 0,1265 + 45,7292 \times (-0,5629).$$

Розрахунки показують, що значення коефіцієнту  $a$  для всіх рівнянь дорівнює 4,1784.

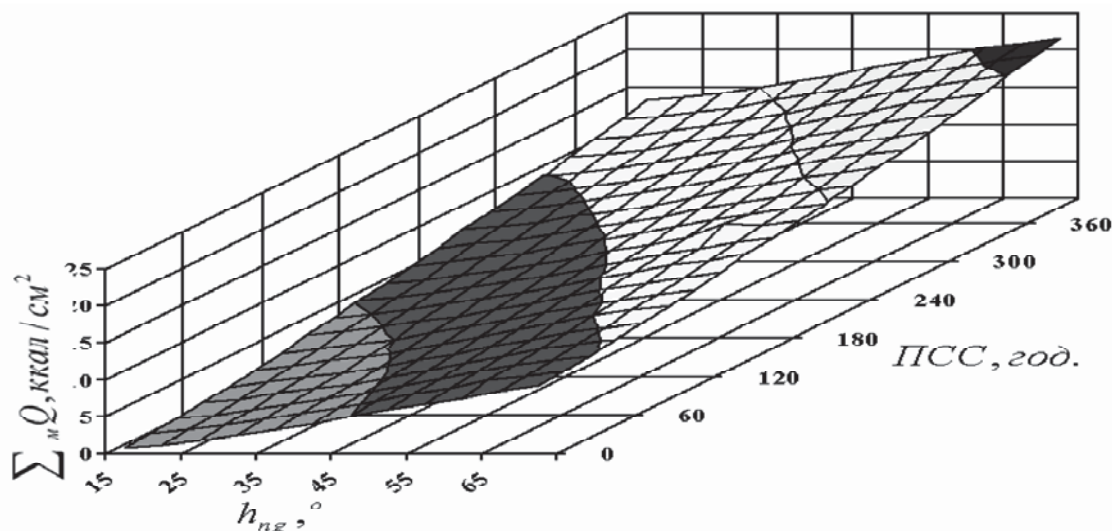
Отже, формуємо загальне рівняння множинної регресії досліджуваних показників:

$$\overline{y}_{x_1 x_2} = 4,1784 + 0,1265x_1 - 0,5629x_2.$$

Підставляємо значення показників для визначення сумарної радіації і отримуємо таку регресійну залежність:

$$\sum_m Q = 4,1784 + 0,1265 \cdot \sum_m ПСС - 0,5629 \cdot h_{ng},$$

де  $\sum_m Q$  — сума інтегральної радіації, ккал/см<sup>2</sup> за місяць,



**Рис. 1.** Тривимірна поверхня відгуку показників сумарної інтегральної радіації ( $\Sigma_m Q$ ) залежно від показників тривалості сонячного сяйва (ППС) та полуденної висоти Сонця для середнього дня місяця ( $h_{ng}$ )

$\Sigma_m PPC$  — сума тривалості сонячного сяйва, год.,  
 $h_{ng}$  — полуденна висота Сонця (обирається залежно від географічної широти метеостанції і терміну спостережень).

Визначення ступеня тісноти зв'язку прямолінійної множинної кореляції значення ознаки  $\bar{y}$  від двох змінних величин  $x_1$  і  $x_2$  дозволило виявити тісну ступінь множинного кореляційного зв'язку ( $R_{yx_1x_2} = 0,8217$ ). Проведені розрахунки дозволили побудувати тривимірну поверхню відгуку показників сумарної інтегральної радіації відносно змінних показників тривалості сонячного сяйва та полуденної висоти Сонця (рис. 1).

Таким чином, за допомогою розробленого рівняння можна проводити розрахунки інтегральної ФАР за різні проміжки часу вегетації сільськогосподарських культур. Усі необхідні показники можна отримувати як безпосередньо на метеорологічних станціях, так і за допомогою баз даних із мережі Інтернет.

## ВИСНОВКИ

Встановлення показників ФАР має велике значення з точки зору проведення порівняльної оцінки ефективності використання земель сільськогосподарського призначення та елементів технологій вирощування в різних ґрунтово-кліматичних зонах. Також відомості щодо показників ФАР є основою для програмування врожаю, проведення досліджень інтенсивності процесів фотосинтезу, агрометеорології та інших напрямів аграрної науки.

Встановлювати показники фотосинтетично активної радіації можна як за допомогою прямих актинометричних вимірювань, так і розрахунковими методами. На сучасному етапі можна проводити розрахунки за допомогою кореляційно-регресійного моделювання з використанням баз даних мережі Інтернет.

Враховуючи важливість експериментальних даних із вивчення реакції сортів і гібридів сільськогосподарських культур на диференційовані умови надходження фотосинтетично активної радіації, дослідження в цьому напрямі мають певну актуальність і потребують продовження.

## Література:

1. Ковалев В.М. Теоретические основы оптимизации формирования урожая. — М.: МСХА, 1997. — 247 с.
2. Ничипорович А.А. Основы фотосинтетической продуктивности растений // Современные проблемы фотосинтеза. — М.: МГУ, 1973. — С. 5—28.
3. Ничипорович А.А. Энергетическая эффективность и продуктивность фотосинтезирующих систем как интегральная проблема // Физиология растений. — 1978. — Т. 25. — Вып. 5. — С. 922—937.
4. Ничипорович А.А. Фотосинтетическая деятельность растений как основа их продуктивности в биосфере и земледелии // Фотосинтез и продукционный процесс. — М.: Наука, 1988. — С. 5—28.
5. Гойса Н.И., Перелет Н.А. Методические указания для расчета фотосинтетически активной радиации. — К.: УкрНИГМИ, 1976. — 26 с.
6. Ушкаренко В.О., Нікішенко В.Л., Голобородько С.П., Коковіхін С.В. Дисперсійний і кореляційний аналіз у землеробстві та рослинництві: навчальний посібник. — Херсон: Айлант, 2008. — 272 с.
7. Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям. — Л.: Гидрометеоиздат, 1971. — С. 7—14.
8. Росс Ю.К. Математическое моделирование продукционного процесса и урожая // Программирование урожая сельскохозяйственных культур. — М.: Колос, 1975. — С. 415—426.
9. Продолжительность солнечного сияния по месяцам и суткам. Картоотека № 6. — Херсон: ХОГМЦ, 2007 — С. 12—24.

Стаття надійшла до редакції 29.03.2013 р.