

УДК 631

МОДЕЛЮВАННЯ ЗРОСТАННЯ БІОМАСИ С/Г КУЛЬТУР

**Масленніков Д.І., к. фіз.-мат. н., доцент,
Масленнікова В.В., канд. ек. наук, доцент**

Державний біотехнологічний університет (ДБТУ)

Наведено метод моделювання врожайності с/г культур за допомогою системи диференціальних рівнянь. Враховано швидкість фотосинтезу рослини, залежно від впливу світла, вуглекислого газу, температури та розміру рослини.

Швидкість збільшення біомаси в посівах має велике значення для визначення врожайності фруктів і овочів, і вона безпосередньо залежить від фотосинтезу. Фотосинтез перетворює вуглекислий газ з повітря на сахарозу (СН₂О) у листках рослин. Частина вуглецю в цьому СН₂О поєднується з іншими елементами (N, P, K S, ...) і утримується в рослинній тканині, а частина використовується для забезпечення енергії для синтезу тканини, вивільняючи СО₂ у процесі. Penning de Vries та інші (1989) описують надійну кількісну основу для обчислення швидкості синтезу тканини на основі швидкості фотосинтезу та складу тканини, що синтезується. Було обчислено вагу чистого продукту білка, вуглеводів, ліпідів, лігніну, органічної кислоти або мінералу, якщо 1 г СН₂О використовувався для отримання вуглецю в кінцевому продукті та енергії для синтезу продукту. Таким чином, залежно від складу рослинної тканини, ефективність перетворення, E, може бути обчислена та використана для перетворення швидкості фотосинтезу в швидкість накопичення сухої речовини. Для вегетативної тканини ця ефективність перетворення знаходиться в діапазоні 0,65-0,75 (г тканини)/(г СН₂О).

Дихання - це втрата СО₂ рослинами в процесі росту та підтримки. Дихання росту враховується в ефективності перетворення, описаній вище. Підтримуюче дихання - це втрата СО₂ внаслідок розпаду та повторного синтезу існуючої тканини та залежить від температури. Було отримано формулу підтримку частоти дихання як

$$R_m = k_m e^{0.00693(T-25)} \quad (1)$$

де R_m - підтримуюча швидкість дихання, (г СН₂О)/[(г тканини)·год],

T - температура, °С,

k_m - частота дихання при 25°С, (г СН₂О)/[(г тканини)·год].

Рівняння для швидкості росту біомаси культури має вигляд

$$\frac{dW}{dt} = E(P_g - R_m W) \quad (2)$$

де dW/dt - швидкість росту біомаси культури (г тканини)/(м²·год),

W - загальна суха маса рослини, г/м²,

R_m - опорна швидкість дихання, (г CH_2O)/(г тканини·год),

E - ефективність перетворення CH_2O в рослинну тканину, (г тканини·год)/(г CH_2O),

P_g - загальна швидкість фотосинтезу полога, (г CH_2O)/(м²·год).

Загальна швидкість росту біомаси поділяється на біомасу крони та кореня за допомогою функції $f_c(N)$, або $dW_s/dt = (dW/dt)f_c(N)$, і $dW_r/dt = (1-f_c(N))$.

Цей розподіл нової порослі між пологом і коренем змінюється залежно від стадії розвитку, однак у цьому прикладі ми припустимо, що $f_c(N)$ постійна для всіх N .

Вираз необхідний для прогнозування загальної швидкості фотосинтезу рослини, P_g , залежно від впливу світла, CO_2 , температури та розміру рослини. Існує багато моделей, які описують фотосинтез листя та крони, наприклад, було встановлено рівняння, що адекватно описує швидкість фотосинтезу помідорів. Це рівняння, модифіковане для врахування температурних ефектів, є

$$P_g = D \frac{\tau C p(T)}{K} \ln \left(\frac{\alpha K I_0 + (1-m)\tau C}{\alpha K I_0 e^{-KL} + (1-m)\tau C} \right) \quad (3)$$

де D - коефіцієнт для перетворення розрахунків фотосинтезу з (мкмоль CO_2)/(м²·с) в (г CH_2O)/(м²·год),

τ - провідність листя до CO_2 , (мкмоль CO_2)/((м²·лист)·с),

C - концентрація CO_2 в повітрі, (мкмоль CO_2)/(моль повітря),

$p(T)$ - коефіцієнт зниження фотосинтезу, безрозмірний,

α - ефективність використання світла листя (мкмоль CO_2)/(мкмоль фотонів),

K - безрозмірний коефіцієнт гасіння світла куполи,

I_0 - щільність світлового потоку у верхній частині куполи, (мкмоль фотонів)/((м² землі)·с),

m - коефіцієнт світлопроникності листя без розміру,

L - індекс листової площі крони (м² листя)/(м² землі).

Функція $p(T)$ виражає вплив температури на максимальну швидкість фотосинтезу для одного листка, виражену як квадратне рівняння з T :

$$P(T) = 1 - \left(\frac{\varphi_h - T}{\varphi_h - \varphi_l} \right)^2 \quad (4)$$

де φ_h — температура, при якій фотосинтез листя максимальний, а φ_l — температура, нижче якої фотосинтез листя дорівнює нулю. Погодинні значення I_0 були обчислені як

$$I_0 = I_m \sin(2\pi(t_h - 6)/24) \quad (5)$$

де I_m — максимальна щільність світлового потоку (опівдні), а t_h — сонячний час у годинах.

Це рівняння містить змінні навколишнього середовища (T , C , I_0), різні параметри (τ , a , K , m , D) і площу листа крони, L , яка залежить від часу. Співвідношення площі листа (квадратних метрів площі листа на грам рослини) та питома площа листа (m^2 листка)/(г листка) значно змінюються залежно від умов навколишнього середовища. За низьких температур листа з'являється повільніше, не накопичує суху вагу протягом тривалого періоду росту, але розширюється приблизно до тієї ж кінцевої площі в практичному діапазоні температур. За слабкого освітлення листа, як правило, буде тоншим через нижчу швидкість фотосинтезу на одиницю розвитку. Припущення, що L є функцією N , забезпечує модель, яка імітує спостережувані реакції співвідношення площі листа на світло, температуру та CO_2 . Для зв'язку між площею листа та кількістю вузлів з використанням даних для помідорів, вирощених при двох рівнях CO_2 і трьох температурах було запропоновано таке рівняння:

$$L = \rho \cdot \frac{\delta}{\beta} \cdot \ln(1 + e^{\beta(N-n_b)}) \quad (6)$$

де L - індекс площі листа, (m^2 листа)/(m^2 землі),

ρ - густина рослин, кількість/ m^2 ,

N - номер листа,

і δ , β і n_b є емпіричними коефіцієнтами для пояснювального рівняння.

Таким чином, модель передбачає швидкість появи листа, яка в першу чергу залежить від температури, і розраховує площу листа. Остаточна модель змінної трьох станів може бути виражена як

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= r_m r(T), \\ \frac{dW_c}{dt} &= E(P_g - R_m W) f_c(N), \\ \frac{dW_r}{dt} &= E(P_g - R_m W)(1 - f_c(N)). \end{aligned} \quad (7)$$

В подальшому для розв'язку рівнянь використовується комп'ютерне моделювання. Для цього можна використати певний часовий крок (Δt), наприклад, 1 год, а весь час моделювання узяти наприклад, 80 днів. Для кожної симуляції вхідні дані навколишнього середовища (C , T і I_0) повинні підтримуватися постійними для кожного циклу, а для демонстрації поведінки моделі можна змоделювати декілька комбінацій.

У використанні цієї моделі є обмеження. Вона не враховує старіння чи збирання рослинного матеріалу, а також не розподіляє суху біомасу на різні компоненти рослини, наприклад фрукти. Модель може бути розширена для опису росту плодів та інших органів, створюючи таким чином більше змінних стану, рівнянь і потребу в більшій кількості коефіцієнтів і зв'язків.

Список літератури:

1. Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman, and J.T. Ritchie. 2003. DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265.
2. Jones, J. W., E. Dayan, L. H. Allen, H. van Keulen, and H. Challa. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Trans. ASAE* 34: 663-672.
3. Odum, H. T. 1973 An energy circuit language for ecological and social systems. In *Systems Analysis and Simulation in Ecology*. Vol II B. C. Patten (Ed) New York: Academic Press, pp 140-277.
4. Penning de Vries, F. W. T. 1993. Rice production and climate change. In: *Systems Approaches for Agricultural Development*, F. Peruring de Vries, P. Teng, and K. Metselaar (Eds.). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, pp. 175-189.