УДК 635.1/.8
Л.Ю. Божко, *к.г.н.*, **О.Є Ярмольська**, *к.г.н,* **О.А. Барсукова**, *к.г.н*
Одеський державний екологічний університет

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТА ЯКОСТІ ВРОЖАЮ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР

Запропоновано комплексну модель формування кількості врожаю і якості плодів деяких овочевих культур, яка враховує особливості формування вегетативних і репродуктивних органів рослин, хвилі росту плодів та накопичення цукру в них.
Ключові слова: *баклажани, солодкий перець, томати, динамічна модель, агрометеорологічна оцінка, продуктивний процес, якість врожаю.*

Вступ. Харчова цінність плодів баклажанів, солодкого перцю та томатів визначається вмістом в них вуглеводів, органічних кислот, мінеральних солей, ароматичних речовин і вітамінів. Розширення посівних площ цінних овочевих культур потребує підвищення рівня агрометеорологічного обслуговування працівників сільськогосподарського виробництва та розробки методів оцінки і прогнозування кількості та якості врожаю цих культур. В останні два десятиріччя отримали розвиток роботи з моделювання продуктивного процесу рослин, серед яких особливий інтерес для практики становлять довгоперіодні динамічні моделі формування врожаю, на основі яких створюються оперативні методи оцінки агрометеорологічних умов росту та розвитку сільськогосподарських культур і прогнозування їх врожайності [1-6]. Головна перевага динамічних моделей полягає в тому, що для них характерна незалежність кількості параметрів від тривалості періоду та довжини кроку за часом. Теоретичною основою цих моделей є базова динамічна модель формування врожаю сільськогосподарських культур А.М. Польового [1]. Динамічні моделі продуктивного процесу дозволяють вирішити такі задачі: 1 – оцінити агрометеорологічні умови вирощування культур; 2 – прогнозувати величину врожаїв сільськогосподарських культур та їх якість.

Основною **метою** досліджень є вивчення впливу агрометеорологічних умов на формування продуктивності таких овочевих культур як баклажани, солодкий перець та томати, розробка динамічної моделі формування кількості та якості їх врожаю.

Об'єкти та вихідні матеріали досліджень. В якості методики досліджень використано математичне моделювання продуктивного процесу, методи математичної статистики та матеріали польових і лабораторних експериментів на базі навчальної агрометеорологічної лабораторії, які включали спостереження над формуванням біомаси вегетативних і репродуктивних органів, площею поверхні листя, інтенсивністю фотосинтезу листя, формуванням чистої продуктивності та метеорологічними величинами. Інтенсивність фотосинтезу листя визначалась за методикою Всеросійського інституту рослинництва (ВІР). Вміст цукру в плодах вимірювався за допомогою рефрактометра.

Спостереження за баклажанами сорту Донський 14, солодким перцем сорту «Подарунок Молдови» та томатів сорту Факел проводилися у 1994, 1995, 1996 рр. на дослідних ділянках польової агрометеорологічної лабораторії ОГМІ в с. Чорноморка.

Теоретичною основою моделі продуктивності є базова динамічна модель формування врожаю сільськогосподарських культур А.М. Польового [1].

Для модифікації головної моделі щодо формування продуктивності баклажанів, солодкого перцю та томатів було визначено цілу низку параметрів і функцій, які б характеризували вищевказані культури.

Розроблена на основі базової моделі А.М. Польового модель формування продуктивності овочевих культур має блокову систему і в ній відображено вплив факторів середовища на основні процеси життєдіяльності рослин: фотосинтез, дихання, розподіл асимілятів, поглинення елементів мінерального живлення. Також модель враховує особливості формування вегетативних і репродуктивних органів, хвилі росту плодів, які спостерігаються у баклажанів, солодкого перцю та томатів, розташованих на гронах різного порядку і процес накопичення цукру в плодах. Крім формування кількості врожаю, модель описує якість врожаю і можливий розвиток шкідників і хвороб.

Процес фотосинтезу розглядається як функція *ФАР*, температури повітря, вологості ґрунту і площі листя. Дихання, як головний процес розщеплення вуглеводів з виділенням енергії і утворенням інших біохімічних компонентів рослини, береться як функція швидкості фотосинтезу, температури та біомаси (окремо для листя, стебел, коріння, плодів). В базову модель введено блок формування продуктивних і репродуктивних органів і з його допомогою описані процеси утворення бруньок, квітів, запліднення та формування кількості плодів із врахуванням впливу на ці процеси факторів зовнішнього середовища – температури і вологості повітря, вологості ґрунту.

Слід зазначити, що врожайність рослин залежить від фотосинтетичної продуктивності, якість якої визначається інтенсивністю фотосинтезу, розмірами асимілюючої поверхні та тривалістю її роботи. Крім того, врожайність також залежить від характеру розподілу асимілятів в рослинах, який в свою чергу залежить від умов вирощування рослин та біологічних особливостей.

Результати досліджень та їх аналіз. Фотосинтез – головний процес утворення органічної речовини в рослинах. В запропонованій нами моделі в реальних умовах тепло- та вологозабезпеченості інтенсивність фотосинтезу описується рівнянням

$$\Phi_t^j = \Phi_o^j \alpha_\Phi^j \varphi_\Phi^j \mathrm{Y}_\phi^j \ , \qquad (1)$$

де Φ_o^j — інтенсивність фотосинтезу при найсприятливіших умовах тепло- та вологозабезпеченості, мг CO_2 дм$^{-2}$г$^{-1}$;

α_Φ^j — онтогенетична крива фотосинтезу;

φ_Φ^j — функція впливу температури повітря;

Y_ϕ^j — функція впливу вологості ґрунту.

За період розвитку фотосинтетична діяльність рослин не залишається однаковою, а змінюється згідно з реальними умовами тепло та вологозабезпеченості. Ці зміни оцінюються згідно з дослідженнями А.М.Польового [1]. Вплив вологості ґрунту на інтенсивність фотосинтезу враховується з допомогою коефіцієнта вологозабезпеченості

$$\gamma = \frac{\mathrm{E}^j}{\mathrm{E}_o^j} , \qquad (2)$$

де E^j — фактичне сумарне випаровування, мм;

E_0^j — випаровуваність за найбільш можливого зволоження ґрунту, мм.

Температурна крива фотосинтезу апроксимується виразом

$$\varphi_j = \left(\frac{Q^j - 0.0004}{2}\right)^{7.74\left(\frac{Q^\gamma - 1}{10}\right)} \left(\frac{\left(1.4 - Q^\gamma\right)}{0.4}\right)^{38\left(\frac{Q^\gamma - 1}{10}\right)}, \quad (3)$$

$$Q^j = t^j \Big/ t_{optq}, \quad (4)$$

де t^j – середня температура повітря за декаду, °С;

t_{optq} – оптимальна температура повітря, °С;

$Q^j = t^j \Big/ t_{optq}$ – порогова температура початку фотосинтезу, °С.

Витрати енергії на дихання залежать від маси, віку рослин та інтенсивності фотосинтезу і визначаються з формули

$$\mathrm{R} = \alpha_R \left(c_1 M + C_2 \Phi\right), \quad (5)$$

де R – витрати на дихання, г/м^2;

α_R – онтогенетична крива дихання;

C_1 – 0,255 – витрати на підтримку структур;

C_2 – 0,088 – витрати на створення нових структурних одиниць та рух речовин;

M – суха біомаса посіву, г/м^2.

У вегетативних органів овочевих культур найінтенсивніше дихання спостерігається в період цвітіння та формування плодів.

Приріст біомаси посіву визначається як різниця між сумарним фотосинтезом й витратами на дихання

$$\frac{\Delta m^j}{\Delta t} = \frac{1}{1 + C_2} \Phi^j - \frac{C_1 a_R^j}{1 + C_2} M^j Q_{10}^{\frac{1}{2}(T\max - T\min)}, \quad (6)$$

де $\frac{\Delta m^j}{\Delta t}$ – приріст біомаси, г/м$^{-2}$;

C_2 – коефіцієнт дихання підтримки;

C_1 – коефіцієнт дихання росту;

α_R – параметр, який характеризує вплив фази онтогенезу на швидкість дихання;

$T_{\max}$ – максимальна температура повітря, °С;

$T_{\min}$ – мінімальна температура повітря,°С

Маса окремих органів рослин перцю визначається системою рівнянь

$$\begin{cases} m_l^{j+1} = m_l^j + \left(\beta \frac{\Delta m_н^j}{\Delta t} - v_l^j m_l^j\right) n \\ m_s^{j+1} = m_s^j + \left(\beta_s^j \frac{\Delta m_н^j}{\Delta t} - v_s^j m_s^j\right) n \\ m_p^{j+1} = m_p^j + \left(\beta_p^j \frac{\Delta m_н^j}{\Delta t} + v_l^j m_l^j + v_s^j m_s^j\right) n \end{cases}, \quad (7)$$

де m_l^j, m_s^j, m_p^j – біомаси листя, стебел, плодів відповідно, г/м^2 · дек;

$\beta_l^j, \beta_s^j, \beta_p^j$ – ростові функції листків, стебел, плодів відповідно;

v_l^j, v_s^j – функції перетоку асимілятів з листків та стебел.

Функції перетоку визначаються з рівняння

$$v_i^j = \frac{K_p TSI^j}{\left(2\sum T_{opt}^2 - \sum T_p\right)} - 2\sum T_{i\ opt}^2, \tag{8}$$

де TSI – середньодобова температура повітря за декаду, °С;

$\sum T_{opt}$ – оптимальна сума температур для росту плодів, °С;

$\sum T_p$ – сума середньодобових температур, з якої починається утворення плодів, °С;

$\sum T_{i\ opt}^2$ – оптимальна сума температур для росту окремих органів овочевих рослин, °С.

Фотосинтезуюча поверхня визначалась з формули

$$LL^{j+1} = LL^j + \frac{\Delta m_l^j}{\pi}\left(\Delta m_l^j > 0\right), \tag{9}$$

$$LL^{j+1} = LL^j + \frac{\Delta m_i^j}{\sigma_i K_q}\left(\Delta m_l^j < 0\right), \tag{10}$$

де LL^{j+1} – відносна площа листя, м^2/м^2;

Δm_l^j – приріст сухої біомаси листя, г/м^2;

σ_i – питома поверхнева щільність, г/м^2.

Вид ростових функцій вегетативного та репродуктивного періодів і онтогенетичні криві дихання і фотосинтезу визначаються згідно з (4), а їхні параметри - з дослідних даних.

Для розрахунків за моделлю необхідні такі початкові дані:

t_o – номер декади розрахункового періоду, починаючи з травня;

φ – географічна широта місця;

$W_{нв}$ – найменша вологомісткість ґрунту в шарі 0 – 50 см;

m_i – початкова біомаса окремих органів;

L_i – початкова площа асимілюючої поверхні.

Початкову біомасу і площу асимілюючої поверхні визначають з польових спостережень. З польових спостережень також визначені і ростові функції β_R, $\beta_н$, β_l, β_s, β_p які відповідно становлять 0,12; 0,88; 0,34; 0,18; 0,48 для всіх овочевих культур, які розглядаються.

Параметр σ_i, який характеризує питому поверхневу щільність листя, визначена з дослідних даних і для всього періоду вегетації баклажанів становить 43 г/м^2, солодкого перцю – 45 г/м^2, томатів - 41 г/м^2.

Прискорення процесів підтримки при підвищенні температури враховується з допомогою коефіцієнта α_R, в розробленій моделі він дорівнює 2,0. Початкова інтенсивність дихання дорівнює 0,5. Також визначені згідно з [2, 3, 4] $a_ф$ = 0,29 мг CO_2 дм^2 /г/Вт, коефіцієнт затухання $ФАР$ = 0,5.

При описуванні процесів бутонізації, запліднення та утворення зав'язі нами використовувались суми ефективних температур, які визначені також з польових дослідів і становлять для баклажанів та солодкого перцю 180 °С, 230 °С, 270 °С і 310 °С відповідно, для томатів 160 °С, 210 °С, 250 °С, 290 °С.

В розробленій моделі описуються процеси бутонізації, цвітіння, запліднення та формування плодів з врахуванням впливу на ці процеси факторів навколишнього середовища. Для описування цих процесів в модель введено додатковий блок, який складається із шести підблоків (рис. 1).

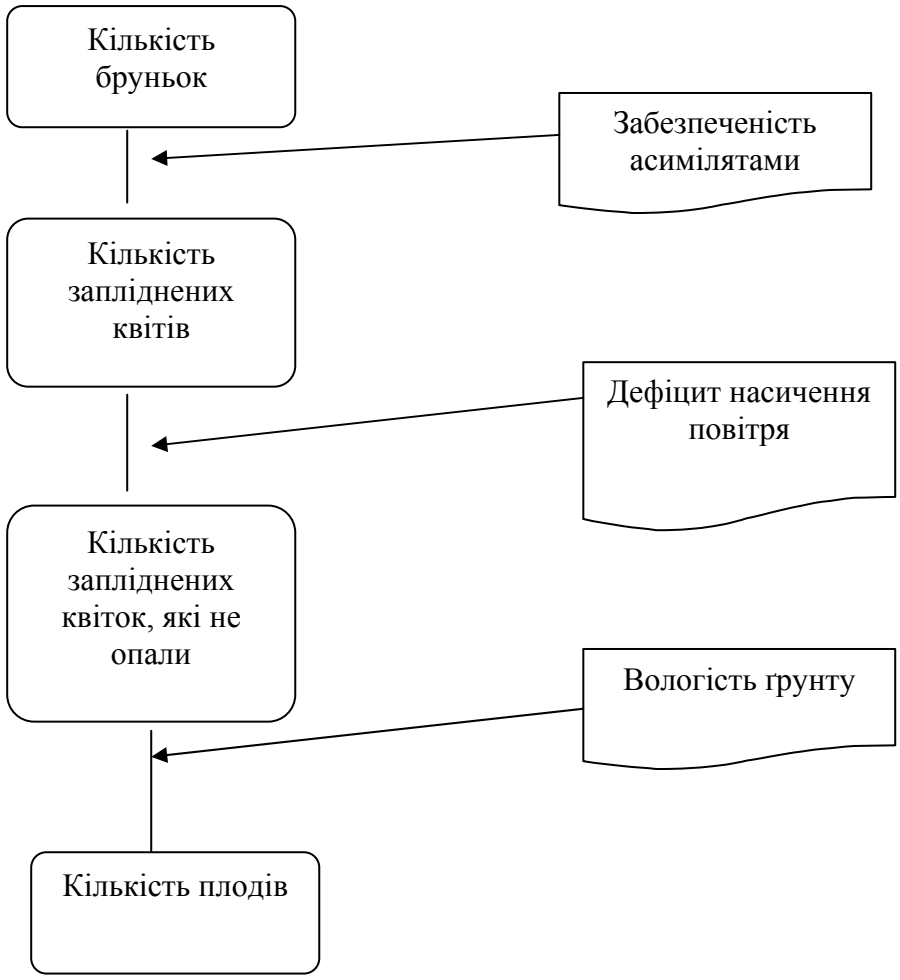


Рис. 1 – Блок формування генеративних та репродуктивних органів овочевих культур

Кількість закладених бруньок на початок цвітіння овочевих культур визначається з виразу

$$S_{\text{I}}^{\,j+1} = (S_{\text{I}}^{\,j} - D/\sum T_{\text{цв}} - \sum T_{\text{бр}} \cdot TS1) \cdot K_1, \qquad (11)$$

де $S_{\text{I}}^{\,j}$ – кількість бруньок на початок цвітіння, шт.;

D – кількість бруньок, які опали, шт.;

$\sum T_{\text{цв}}$ – сума ефективних температур, необхідна для настання фази цвітіння, °С;

$\sum T_{\text{бр}}$ – сума ефективних температур, необхідна для настання фази утворення бруньок, °С;

K_1 – параметр, який визначається з формули

$$K_I^j = \frac{\Delta m_p^j}{\Delta m_{p\max}}, \tag{12}$$

де Δm_p^j – приріст плодів, г/м^2·дек;

$\Delta m_{p\max}$ – максимально можливий приріст плодів, г/м^2·дек.

Величини S_I^j та D задаються на початок розрахунку за результатами польового досліду.

Кількість запліднених квіток на кожному розрахованому кроці визначається з формули

$$S_{II}^{j+1} = S_{II}^j + \Delta S_{II}^j, \tag{13}$$

де S_{II}^j, S_{II}^{j+1} – кількість запліднених квіток на j-й та j+1 розрахованому кроці, безрозмірні;

ΔS_{II}^j – кількість запліднених квіток за декаду, визначається з такого виразу

$$\Delta S_{II}^j = \frac{S_I^j}{\sum T_{k.цв} - \sum T_{н.цв}} T\ S1 \cdot K(d), \tag{14}$$

де $\sum T_{к.цв}$ – сума ефективних температур, які накопичились на кінець цвітіння, ^{0}C;

$K(d)$ – коефіцієнт, який враховує вплив дефіциту насичення повітря на проходження процесу запліднення квіток.

Вплив дефіциту насичення повітря оцінюється функцією

$$K(d) = \begin{cases} 1 & при \quad d \le d_{opt} \\ \dfrac{1}{0.05d} & при \quad d > d_{opt} \end{cases}, \tag{15}$$

де d – дефіцит насичення повітря, гПа;

d_{opt} – оптимальне значення дефіциту насичення повітря, за якого відбувається запліднення, гПа.

Можлива кількість запліднених квіток, які збереглися до початку інтенсивного росту зав'язі, оцінюється формулою

$$S_{III}^{j+1} = S_{III}^j + \Delta S_{III}^j, \tag{16}$$

де S_{III}^{j+1} та S_{III}^j – кількість запліднених квіток, шт.;

ΔS_{III}^j – кількість запліднених квіток за декаду, визначається за формулою

$$\Delta S_{III}^j = \frac{D_I}{\sum T_{рзав} - \sum T_{к.цв}} TS1 \cdot K_{II}^j, \tag{17}$$

де $\sum T_{рзав}$ – сума ефективних температур, необхідна для початку інтенсивного росту зав'язі, ^{0}C;

$\sum T_{к.цв}$ – сума температур, яка накопичується на кінець цвітіння, ^{0}C;

K_{II}^{j} – коефіцієнт вологості, який визначається з виразу

$$K_{II}^{j} = \begin{cases} 1 \quad при \quad \dfrac{W^{j}}{W_{нв}} \geq 0{,}7 \\ 3.3\left(\dfrac{W^{j}}{W_{нв}} - 0{,}4\right) при \; 0{,}4 \leq \dfrac{W^{j}}{W_{нв}} < 0.7 \end{cases}, \tag{18}$$

де $W_{нв}$ – найменша вологомісткість, мм;

W – вологість ґрунту, мм.

Знаючи кількість утвореної зав'язі (S_{III}^{j}), можна розрахувати на кожному кроці середню вагу одного плоду перцю таким чином. Спочатку визначається середній приріст одного плоду перцю на розрахованому кроці

$$\Delta\overline{m}_{1p}^{j} = \frac{\Delta m_{p}^{j}}{S_{III}^{j}}, \tag{19}$$

де $\Delta\overline{m}_{1p}^{j}$ – середній приріст одного плоду перцю за декаду, г/м^2·дек. Тоді середня маса одного плоду перцю визначається як

$$\overline{m}_{1p}^{j+1} = \overline{m}_{1p}^{j} + \Delta\overline{m}_{1p}^{j}, \tag{20}$$

де $\overline{m}_{1p}^{j+1}$ та $\overline{m}_{1p}^{j}$ – середня маса одного перцю.

Харчова цінність плодів баклажанів, солодкого перцю та томатів визначається вмістом в них вуглеводів, органічних кислот та вітамінів. В запропонованій моделі за показник якості плодів взято вміст в них цукру. Процес утворення цукру в плодах описується виразом Михаеліса-Ментен, з розрахунком впливу на швидкість протікання цього процесу температури повітря [1]

$$\frac{\Delta C^{j}}{\Delta t} = \frac{C_{\max} \cdot \Delta m_{p}^{j} / \Delta t}{R_{m} + \Delta m_{p}^{j} / \Delta t} K(T), \tag{21}$$

де $\dfrac{\Delta C^{j}}{\Delta t}$ – швидкість утворення цукру в плодах, г/дек;

$C_{\max}$ – максимально дійсна швидкість утворення цукру в плодах, г/дек;

R_{m} – константа Міхаеліса-Ментен, г/г·д;

$K(T)$ – функція впливу температури повітря на швидкість утворення цукру, безрозмірна .

Вплив температури повітря на швидкість утворення цукру враховується з допомогою такого виразу

$$K(T) = \begin{cases} 0.04 \quad при \quad T \leq 25^{0} \\ 1 \quad при \quad T > 25^{0} \end{cases}, \tag{22}$$

де T – середня за декаду температура повітря, ^{0}С.

Вміст цукру в плодах на кожному кроці описується виразом

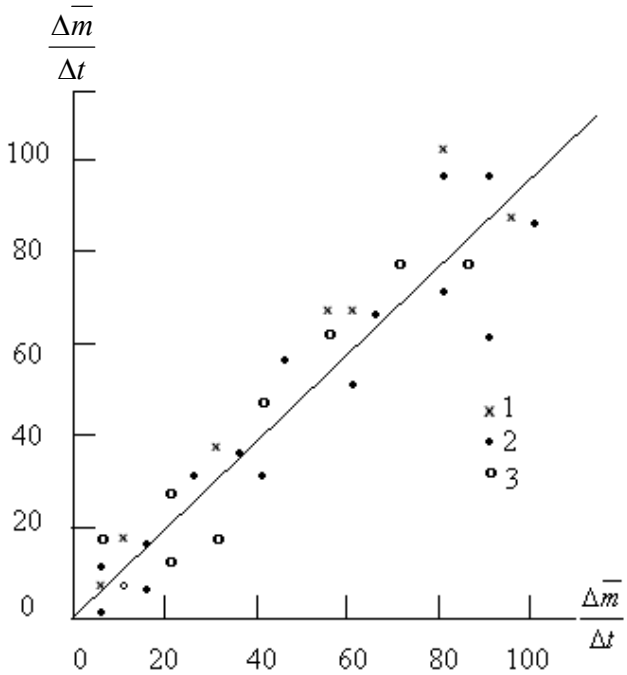
$$C^{j+1} = C^j + \frac{\Delta C^j}{\Delta t}, \qquad (23)$$

де C^j – вміст цукру на початок декади, г/м^2;

C^j – приріст вмісту цукру за декаду, г/м^2.

Розроблена модель перевірялася порівнянням розрахованих за моделлю і дослідних характеристик біомаси вегетативних та репродуктивних органів, площі асимілюючої поверхні. Порівняння проводилося в динаміці від висадки розсади рослин в ґрунт до технічної стиглості.

Результати порівняння представлені на рис. 2. Видно, що розраховані значення приростів біомаси плодів та відносної листової поверхні добре збігаються з дослідними даними. Найбільше відрізняються дослідні і розрахункові дані при значних приростах біомаси.



1-однорічні дані; 2- дворічні; 3- трирічні (1994 – 1996р.р.).

Рис. 2 – Порівняння розрахункових ($\frac{\Delta\overline{m}}{\Delta t}$) та емпіричних ($\frac{\Delta\overline{m}}{\Delta t}$) значень приростів біомаси рослин за декаду, г/м^2 · дек.

Таким чином, закономірність формування площі листової поверхні та репродуктивних органів, розрахованих за моделлю, збігаються із закономірностями динаміки утворення фактичної асимілюючої поверхні і біомаси репродуктивних органів. Значення відносної помилки подано в табл. 1.

Для визначення можливості використання моделі при різних значеннях вхідних параметрів була проведена оцінка чутливості моделі до зміни параметрів. Зміна динаміки накопичення біомаси плодів (середньої для всіх культур) залежно від початкових значень Φ_{max}, α_R розглядалася при позитивному та негативному прирощенні цих параметрів на 5, 10, 15 % (рис. 3). Із збільшенням похибки завдання Φ_{max}, α_R збільшується й помилка розрахунку біомаси репродуктивних органів (табл. 1).

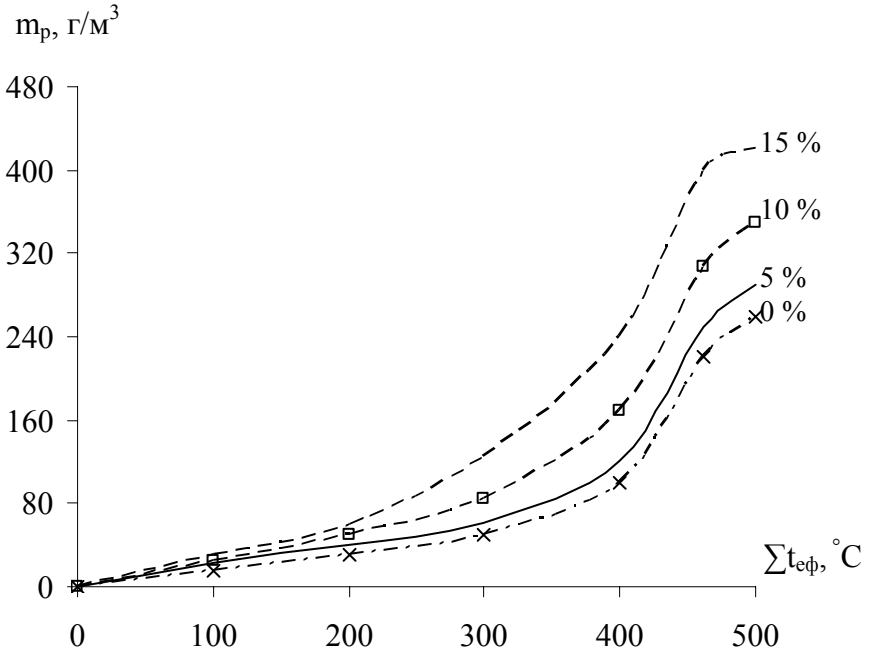


Рис. 3 – Динаміка біомаси плодів залежно від зміни Φ_{max} на 5, 10, 15 % (1996 р.) при t > 15 ˚С.

Модель однаково чутлива як до зміни значень кута нахилу світлової кривої, так і до зміни плато світлової кривої.

Таблиця 1 – Похибки розрахунку (%)

Рік спостереження	Похибка розрахунку, %	
	площа листя	біомаси репродуктивних органів
1994, вар.1	16	14
вар.2	14	14
1995 вар.1	12	12
вар.2	14	12
1996 вар.1	16	14
вар.2	14	11

Так, збільшення Φ_{max} і $a_к$ на 15% призводить до збільшення помилки розрахунку біомаси репродуктивних органів в 1,4 разів. Зниження коефіцієнтів дихання росту C_1 і C_2 дихання підтримки на 5% зумовлює зменшення біомаси репродуктивних органів, причому більш значне зменшення спостерігається при зміні коефіцієнта дихання підтримки. Так, із зниженням C_1 на 5 % біомаса репродуктивних органів знижується на 22 %, а із зниженням C_2 – на 40 %.

Висновки. Дослідження адекватності розробленої моделі і її чутливості до можливих помилок вхідних параметрів дають можливість пропонувати модель для оцінки агрометеорологічних умов росту та формування продуктивності баклажанів, солодкого перцю та томатів, а також для прогнозування їх врожаю.

Список літератури

1. *Польовий А.М.* Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроекосистем. – Київ: КНТ, 2007. – 342 с.

2. *Полевой А.Н* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 318 с.

3. *Тооминг Х.Г.* Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 200 с.

4. *Торнли Дж.Г.М.* Математические модели в физиологии растений. – К., 1982. – 309 с.

5. *Строганова М.А.* Математическое моделирование формирования качества урожая. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 151 с.

6. *Monsi M., Saeki T.* Uber den Pflanzengessellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion.//Jap. J. – 1953. – V. 14. – P. 22 – 25.

Динамическая модель формирования количества и качества урожая овощных культур. Божко Л.Е., Ярмольская Е.Е., Барсукова Е.А.

Предложена комплексная динамическая модель формирования количества урожая и качества плодов некоторых овощных культур, которая учитывает особенности формирования вегетативных и репродуктивных органов, волны роста плодов и накопления в них сахаров.

***Ключевые слова**: баклажаны, сладкий перец, томаты, динамическая модель, агрометеорологическая оценка, продукционный процесс, качество урожая.*

Dynamic model of forming of amount and quality of harvest of vegetable cultures.
Bozko L.E., Yarmolskaya E.E., Barsukova E.A.

The complex dynamic model of forming of amount of harvest and quality of garden-stuffs of some vegetable cultures, which takes into account the features of forming of vegetative and reproductive organs, waves of growth of garden-stuffs and accumulation in them sugar is offered.

***Keywords**: egg-plants, sweet pepper, tomatoes, dynamic model, agrometeorological estimation, products process, quality of harvest.*