

Полевий А.М., Ляшенко Г.В.

СТРУКТУРА МОДЕЛІ ОЦІНКИ АГРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

Постановка проблеми і зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями. Кліматичні умови, не зважаючи на високий рівень сучасного технічного оснащення, впливає на ведення різних галузей господарства країни. Особливо значний вплив кліматичних умов відчуває на собі сільське господарство. Це пов'язано, по-перше, з тим, що всі об'єкти сільськогосподарського виробництва постійно знаходяться під їх прямою дією. А по-друге, в силу масштабів виробничих площ, в цій галузі обмежене проведення запобіжних заходів. Тому, при розробці стратегій ведення сільського господарства, насамперед, при розробці проектів розміщення сільськогосподарських культур, найбільш ефективним заходом є урахування кліматичних умов.

На теперішній час накопичено значний досвід агрокліматичного обґрунтування розміщення сільськогосподарського виробництва, яке базується на оцінці агрокліматичних ресурсів і біокліматичного потенціалу територій. Не зменшуючи значущості таких робіт, слід визнати необхідність подальшого розвитку досліджень з метою як більшої деталізації агрокліматичних ресурсів в просторово-часовому розрізі, так і визначенні їх впливу на формування продуктивності сільськогосподарських культур. Актуальність досліджень в цьому напрямку очевидна у зв'язку з різноманітністю підстильної поверхні та сортименту культур, які вирощуються на території України.

Аналіз досліджень і публікацій по даній проблемі. Традиційно оцінка агрокліматичних ресурсів виконувалася шляхом агрокліматичних розрахунків загальних радіаційно-світлових, теплових ресурсів і ресурсів зволоження за теплий період (період з температурами вище 10°C), а також умов перезимівлі, заморозконебезпечності і посушливості. Надалі стосовно до конкретних сільськогосподарських культур виконувалася оцінка тепло- і вологозабезпеченості (у відсотках) та імовірність пошкодження рослин морозами і заморозками, а також імовірність посух різної інтенсивності в конкретні періоди розвитку рослин. За останніми були розроблені критерії доцільності розміщення сільськогосподарських культур на територіях різного адміністративного рангу. Завершальним етапом досліджень у цьому напрямку стала розробка схем агрокліматичного районування територій з рекомендаціями по розміщенню культур. Пізніше деякими вченими-аграріями, в тому числі агрометеорологами було запропоновано використовувати показники врожайності (середній багаторічний, врожай за трендом, статистичний максимум) як один із кращих інтегральних показників ступеню сприятливості ґрунтово-кліматичних умов території.

В 70 роки ХХ віку намітився новий напрямок оцінки агрокліматичних ресурсів стосовно до окремих сільськогосподарських культур, який базується на сформульованій Х.Г.Тоомінгом концепції максимальної продуктивності посівів [1]. Суть цієї концепції полягає в тому, що в період вегетаційного росту посіви прагнуть максимізувати свою продуктивність і отриманню максимальних врожаїв заважає, головним чином, невідповідність динаміки факторів зовнішнього середовища (сонячної радіації, водного та термічного режиму) динаміці їх оптимальних значень, які регулюють інтенсивність процесів фотосинтезу, дихання, росту, розвитку рослин. Ця концепція успішно використовувалася при рішенні задач детального агрокліматичного районування [2, 6-10].

Обговорення проблеми і аналіз результатів дослідження. Х.Г.Тоомінгом була розроблена фізико-статистична модель формування продуктивності сільськогосподарських культур. Як показник кінцевої продукції запропоновані еталонні врожаї: потенційний (ПУ), дійсно можливий (ДВУ) і фактичний (УП). Розраховані згідно цієї моделі врожаї сільськогосподарських культур покладені в основу агрокліматичного районування території. Реалізовано цей підхід було на прикладі картоплі та багаторічних трав в Естонії [2]. Надалі одним із авторів дослідження були розвинені в напрямку більшої деталізації – врахуванні агрокліматичних умов впродовж вегетаційного періоду культур.

В запропонованому варіанті агрокліматичної моделі продуктивності сільськогосподарських культур використовується концепція максимальної продуктивності посівів і положення про моделювання впливу факторів зовнішнього середовища на врожайність культур [4, 5]. Продуктивність сільськогосподарських культур представлена 4-ма рівнями врожаїв – потенційним, кліматично можливим (КМУ), дійсно можливим і виробничим. Потенційна врожайність (ПУ) являє собою врожайність, яка забезпечується надходженням енергії фотосинтетично активної радіації (ФАР) за оптимальних, впродовж вегетаційного періоду рослин, водного і термічного режиму. Кліматично можлива врожайність визначається фактичними агрокліматичними умовами, які часто не співпадають з оптимальними. Тому її можна представити як потенційну врожайність, обмежену лімітуючими агрокліматичними факторами. ДМУ визначається КМУ та фактичною культурною землеробства і бонітетом ґрунтів, а виробнича врожайність враховує прийняту для даної території і культури дозу внесення органічних і мінеральних добрив. Перевага таких категорій врожаїв над фактичними полягає в тому, що вони оцінюють окремо вплив кліматичних і ґрунтових умов території, а також культуру землеробства. Розрахунок цих врожаїв в модифікованому вигляді впродовж періоду вегетації складає основу варіанту агрокліматичної моделі.

Переважає застосування методу динамічного моделювання полягає в можливості враховувати вплив агрокліматичних умов на приріст біомаси в розрізі окремих періодів вегетації, а кінцеві значення індексів урожаїв розраховуються шляхом підсумовування за всі розрахункові декади. Можливість розрахунку оці-

ночних показників по декадам дозволяє виявити критичний або несприятливий період усередині вегетаційного періоду.

На інтенсивність фотосинтезу як процес формування продуктивності сільськогосподарських культур має вплив термічний і вологісний режими, тому ключовим моментом є визначення їхніх функцій впливу, які відрізняються для різних типів культур (типи C_3 і C_4) та ґрунтово-кліматичних умов (територій). Відомо концепція наявності універсальної температурної кривої фотосинтезу рослин [4, 6], яка характеризується трьома кардинальними точками - температурними мінімумом, оптимумом і максимумом. Оптимальна температура для кожної рослини непостійна, а є функція біологічного часу й визначається за формулами:

$$\psi_{\phi} = \begin{cases} 13,7 \cdot \sin(0,077 \cdot x_1^j), & \text{нпу } (t^j - t_o) < t_{opt1}^j, \\ 1, & \text{нпу } t_{opt1} \leq (t^j - t_o) \leq t_{opt2}^j, \\ 1,13 \cdot \cos(1,570 \cdot x_2^j), & \text{нпу } (t^j - t_o) > t_{opt2}^j \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= (t_B - t_o) / (t_{opt1} - t_o) \\ x_2 &= (t_B - t_{opt2}) / (t_{max} - t_{opt2}) \end{aligned} \quad (2)$$

де ψ_{ϕ} – температурна крива фотосинтезу; t_B , – температура повітря; t_o , t_{opt1} , t_{opt2} , t_{max} – відповідно початкова температура, нижня й верхня межа оптимальної температури і максимальна температура процесу фотосинтезу.

Величини t_{opt1} і t_{opt2} варіюють як за часом, так і в просторі.

Вплив умов зволоження на фотосинтез може бути описаний функцією впливу вологості ґрунту:

$$\gamma_{\phi} = \begin{cases} -1,163 \cdot (x_3^j)^2 + 2,187 \cdot x_3^j, & \text{нпу } W^j \cdot K_{зкс}^w \leq W_{opt1}^j, \\ 1, & \text{нпу } W_{opt1}^j \cdot K_{зкс}^j \leq W_{opt2}^j, \\ -0,654 + 3,824 \cdot x_4^j - 2,633 \cdot (x_4^j)^2 + 0,467 \cdot (x_4^j)^3, & \text{нпу } W^j \cdot K_{зкс}^w > W_{opt2}^j \end{cases} \quad (3)$$

$$x_5 = W / W_{opt1} \quad (4)$$

$$x_6 = W / W_{opt2} \quad (5)$$

і відношенням сумарного випару до випаровуваності:

$$e = E / E_o \quad (6)$$

де γ_{ϕ} – функція впливу вологості ґрунту на інтенсивність фотосинтезу; W – запаси вологи у ґрунті; W_{opt1} , W_{opt2} – нижня й верхня межа оптимальних вологозапасів у ґрунті; e – відносна вологозабезпеченість; E – сумарне випарування; E_o – випаровуваність.

Розрахунок узагальненої функції впливу вологозабезпеченості на фотосинтез (F_w) виконується по формулі:

$$F_w = (\psi_{\phi} \cdot e)^{0,5} \quad (7)$$

Узагальнена функція впливу температури й зволоження на фотосинтез (F_{tw1}) описується формулою:

$$F_{tw1} = (\psi_{\phi} \cdot F_w)^{0,5} \quad (8)$$

Можливе коректування цієї функції на рівень температур разом з вологозабезпеченістю за принципом Лібіха:

$$F_{tw1} = \begin{cases} F_{tw1} \cdot [1 + (1 - \psi_{\phi}) \cdot (1 - F_w)] \cdot [нпу] [t_{\Pi} \leq t_{opt1}], \\ F_{tw1}, & \text{нпу } t_{opt1} \leq t_{\Pi} \leq t_{opt2}, \\ F_{tw1} \cdot [1 - (1 - \psi_{\phi}) \cdot (1 - F_w)] \cdot [нпу] [t_{\Pi} \geq t_{opt2}] \end{cases} \quad (9)$$

Усі три функції нормовані й змінюються від 0 до 1.

Блок – схема моделі представлена на рис.1. Перший блок агрокліматичної моделі продуктивності сільськогосподарських культур містить вхідну інформацію: географічну широту; найменшу вологоємність метрового шару ґрунту; число декад вегетаційного періоду культур; число днів в кожній декаді; число днів від 21 березня до дати сходів; тривалість сонячного сйва по розрахунковим декадам (середнє за декаду число годин); середні декадні значення температури і дефіциту вологості повітря; запаси продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту по декадам; декадна кількість опадів; максимальний фактичний врожай в конкретному господарстві або по району, області.

В другому блоці представлено розрахункові показники подекадних і підсумкових значень ФАР, функції впливу на врожай температури повітря і умов зволоження за період вегетації, а також коефіцієнт використання ФАР посівами. Сумарна ФАР за розрахункову декаду вегетаційного періоду визначається за формулою:

$$Q_{\phi}^j = 0,5Q^j \cdot n \quad (10)$$

де Q_{ϕ}^j – сума ФАР за розрахункову декаду j кДж/(см²·декада); Q – сумарна сонячна радіація, кДж/(см² декада); n – число днів в розрахунковій декаді.

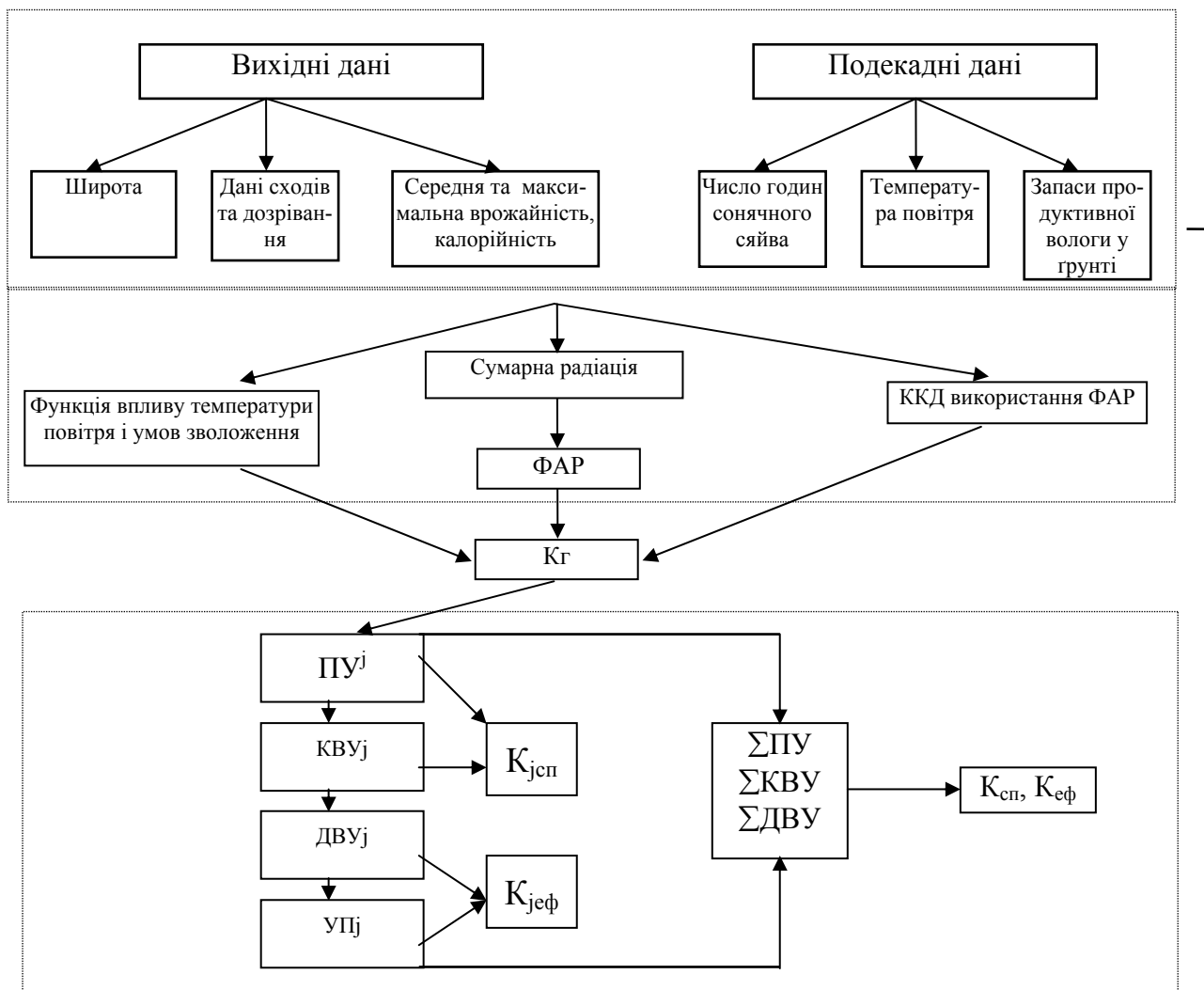


Рис.1. Блок – схема агрокліматичної моделі продуктивності сільськогосподарських культур.

Середня за декаду величина сумарної сонячної радіації обчислюється за формулою С.І.Сивкова:

$$Q^i = 12,66 (SS)^{1,31} + 315 (A^i + B^i)^{2,1} \cdot 0,00419 \quad (11)$$

де SS – середнє число годин сонячного сяйва в розрахунковій декаді.

$$A^i = \sin(0,01745 \cdot I) \cdot \sin \delta^i \quad (12)$$

$$B^i = \cos(0,01745 \cdot I) \cdot \cos \delta^i \quad (13)$$

де I – географічна широта, градуси; δ^i – середньодобове нахилення Сонця в розрахунковій декаді, радіани. Нахилення Сонця визначається за кожну добу та усереднюється за розрахункову декаду:

$$\delta = [0,473 (t_0+i) - 0,196 \cdot 10^{-2} (t_0+i)^2 - 0,407 \cdot 10^{-5} (t_0+i)^3 - 0,616] \cdot 0,01745 \quad (14)$$

де t_0 – число днів від 20 березня до дати сходів; i – номер для розрахункового періоду.

Температурні умови кожної декади вегетаційного періоду оцінюються за значенням коефіцієнта:

$$K_T = l^{-a \left(\frac{T - T_{op}}{10} \right)} \quad (15)$$

де T – середньодекадна температура, °С; T_{op} – оптимальна для розвитку культури температура повітря в розрахунковій декаді, °С.

Вплив умов зволоження на продуктивність сільськогосподарських культур оцінюється за допомогою такого коефіцієнта:

$$K_w^j = 1 - \left(\frac{W^j}{HB} - 1 \right)^2 \quad (16)$$

де W – запаси продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту в розрахункову декаду, мм; HB – найменша вологоємність ґрунту, мм.

Для розрахунку величини випаровування скористаємося методом С. І. Харченко:

$$E^j = \frac{2W_0^j + R^j}{2HB} \cdot \frac{1}{1 + \frac{E_0}{E^j}} \quad (17)$$

де R^j – кількість опадів за декаду j , мм; W_0 – запаси продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту, мм.

Значення запасів продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту розраховуються по спрощеному рівнянню водного балансу:

$$W_0^{j+1} = W_0^j + R^j - E^j - F^j \quad (18)$$

де F^j – інфільтрація, мм. Величина інфільтрації визначається як різниця суми запасів вологи і опадів і значення найменшої вологоємності.

Третій блок містить розрахунки показників ПУ, ДВУ та оцінки ступеню сприятливості кліматичних умов і ефективності їх використання при теперішньому рівні культури землеробства Коефіцієнт корисної дії використання посівом ФАР розраховується нами за модифікованою формулою Х.Г.Тоомінга по значенням максимальної врожайності біомаси культури і суми ФАР за період вегетації:

$$\eta = \frac{q \cdot m_{\max}}{10^4 \cdot \Sigma Q_{\phi}^{\max}} \quad (19)$$

де η – потенційний ККД ФАР, %; ΣQ_{ϕ}^{\max} – сума ФАР за період вегетації культури в рік, коли був отриманий максимальний врожай, кДж/см²; m_{\max} – абсолютна суха біомаса рослин, ц/га:

$$m_{\max} = 0,86 \cdot I_{\max} (1+k) \quad (20)$$

де I_{\max} – максимальний врожай, ц/га; k – коефіцієнт, який характеризує частку основної частини врожаю в загальній біомасі.

Для оцінки величини ПУ використовується модифікована формула:

$$ПУ = \frac{AL \cdot \Sigma Q_{\phi} \cdot \eta \cdot K_x \cdot 10^4}{q} \quad (21)$$

де ΣQ_{ϕ} – сумарна за вегетаційний період величина ФАР, кДж/см²; η – коефіцієнт використання ФАР посівами культур, %; K_x – коефіцієнт господарської ефективності врожаю, тобто частка основної продукції до загальної біомаси; q – калорійність або теплотворна здібність врожаю, кДж/кг; AL – онтогенетична крива фотосинтезу, відн. од. Величина AL характеризує мінливість фотосинтетичної здібності рослин впродовж онтогенезу і розраховується за формулою:

$$AL = \exp \left[-a \frac{(j-D)^2}{10} \right] \quad (22)$$

Числове значення параметра a знаходять за виразом:

$$a = \frac{-100 \cdot \ln AL^o}{D^2} \quad (23)$$

де D – номер декади середини вегетаційного періоду; AL^o – початкове значення AL , відн. од.

Згідно [6] дійсно можливі, а згідно [4] метеорологічно можливі врожаї формуються під впливом агрометеорологічних умов і визначаються за формулою:

$$МВУ = ПУ \cdot F(X_1, X_2, X_n), \quad (24)$$

де МВУ – метеорологічно можливий врожай, ц/га; ПУ – потенційний врожай, ц/га; X_1, X_2, X_n – агрометеорологічні показники.

Найбільшого поширення набув метод розрахунку метеорологічно можливих врожаїв за формулою:

$$МВУ = ПУ \cdot E/E_0, \quad (25)$$

де E – випаровування, яке визначається за скороченим рівнянням водного балансу, мм; E_0 – випарність, розрахунок якого виконується згідно біофізичного методу Алпатьяєва, мм, яке розраховується за формулою:

$$E_0 = \int_0^{\tau} \frac{W_i - W_{\phi} + R}{K \cdot \Sigma d}, \quad (26)$$

Кінцева формула розрахунку метеорологічно можливого врожаю має вигляд:

$$Y_e = \int_0^{\tau} \eta \cdot K_m \cdot \frac{\Sigma Q_{\phi}}{q} \cdot \frac{W_n - W_k + R}{K \cdot \Sigma d}, \quad (27)$$

де W_n , W_k - запаси продуктивної вологи на початок і кінець розрахункового періоду, мм; R , d - кількість опадів та сумарний дефіцит вологості повітря, мм; K - біологічний коефіцієнт вологоспоживання культури, який змінюється в залежності від етапу онтогенезу культур і природно-кліматичних умов.

Дійсно можлива врожайність (ДВУ) згідно [6] розраховується як метеорологічно можлива, обмежена рівнем родючості ґрунту та забезпеченістю органічними та мінеральними речовинами. Під виробничими врожаєм (УП) розуміють або фактичні середні багаторічні врожаї на конкретній території [1], або розрахункові врожаї (по середнім і максимальним фактичним врожаєм) [6].

Визначення рівней потенційних врожаїв можна проводити двома методами. За першим методом всі розрахунки врожаїв виконують по інтегральним агрокліматичним показникам. Другий метод – метод математичного моделювання продукційного процесу рослин, який дозволяє враховувати агрокліматичні умови впродовж вегетації культури та їх вплив на приріст біомаси. Кінцеві значення ПУ, МВУ, ДВУ та УП за вегетаційний період визначаються шляхом підсумування відповідних величин за всі розрахункові періоди або декади:

$$ПУ = \sum_{j=1}^n ПУ^j \quad (28)$$

$$КВУ = \sum_{j=1}^n КВУ^j \quad (29)$$

$$ДВУ = \sum_{j=1}^n ДВУ^j \quad (30)$$

Оцінка агрокліматичних умов формування продуктивності культур виконується за такими показниками як ступінь сприятливості агрокліматичних умов ($K_{сп}$):

$$K_{неб} = 1 - \frac{ДВУ}{ПУ} \quad (31)$$

За цим підходом можна визначати й ступінь або коефіцієнт ефективності використання агрокліматичних ресурсів ($K_{эф}$):

$$K_{эф} = \frac{УП}{ДВУ} \quad (32)$$

Реалізація підходу здійснена на прикладі дослідження мінливості продуктивності озимої пшениці, ярого ячменя, кукурудзи, цукрового буряка, картоплі та винограду в Україні.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Застосування представленої моделі вимагає попередньої ідентифікації параметрів моделі для кожної конкретної культури та природної зони, які визначаються з літературних джерел або за допомогою численного експерименту. Отримані результати по категоріям врожаїв та оціночним показникам стосовно до конкретної культури або групи культур можна використовувати як показники при агрокліматичному районуванні території різного масштабу.

Джерела та література

1. Тооминг Х. Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 264 с.
2. Сепп Ю. В., Тооминг Х. Г. Использование климатических ресурсов для получения высокой продуктивности картофеля (на примере Прибалтики). //Сельскохозяйственная биология, 1984, № 9. С. 26–31.
3. Каринг Ю. К. Агроклиматический атлас многолетних трав Эстонской ССР, составленный с помощью ЭВМ. – Таллин: Валгус, 1980. – 46 с.
4. Федосеев А. П. Погода и эффективность удобрений. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 144 с.
5. Витченко А. Н., Полевой А. Н. Методика агроэкологической оценки сельскохозяйственной продуктивности ландшафтов Белоруссии. //В сб.: Вестник Белорусского университета. Сер. 2. химия, биология, география, 1986, № 2. С. 56–59.
6. Полевой А.Н. Базовая модель оценки агроклиматических ресурсов формирования продуктивности сельскохозяйственных культур. В сб. Метеорология, климатология и гидрология, 2004, вып. 48. – С. 195-205.