

В.П.Дмитренко

ПРИНЦИПИ І ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ВРОЖАЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ЗА ЕКОЛОГО-ГЕОГРАФІЧНИМИ ЗАСАДАМИ

Наведено узагальнені наукові положення оцінки потенціалу врожаю сільськогосподарських культур за сукупністю провідних принципів і методів. Розглянуто метод еталонних урожаїв, принцип еколого-географічних потенціалів, принцип екстремальної статистики із трендовою складовою, метод господарського максимуму.

Наведені положення за використанням репрезентативної надійної вихідної інформації надають підстави до визначення потенціалу врожаю будь-якої культури на рівні окремих господарств, адміністративних районів і областей, держави в цілому. Сукупність розглянутих положень створює теоретичну базу та систему практичних засобів опрацювання методології еколого-географічних засад оцінки потенціалу урожаю.

Напрями оцінки потенціалу врожаю

У виробничій, управлінській, науковій діяльності, пов'язаній із вирощуванням сільськогосподарських культур і виробництвом рослинної продукції, завжди постає питання про поточний та очікуваний рівень і обсяги її в деякий час на певній території, або про потенціал урожаю. Це питання має незліченні різноманітні аспекти та розв'язки в агрономії, селекції, ґрунтознавстві, меліорації, економіці і інших галузях. Наукове опрацювання його започатковане ще в ХІХ ст. в дослідках зі штучним живленням і має тривалий шлях [7]. Перші визначення охоплювали емпіричні закони мінімуму Ю. Лібіха (1840), оптимуму Ю.Лібіха і Вольні, обмежуючих факторів Ф.Ф.Блекмана (1905), росту Робертсона (1908) і Блекмана (1919), дії окремих факторів росту Е.А.Мітчерліха (1921), їх добутку Б.Бауле (1928), Мітчерліха (1928). У кожному з них важливу складову оцінки дії і взаємодії чинників формування становить визначення потенціалу врожаю. Цей етап розвитку уявлень про його природу за умовами штучного живлення можна закінчити роботами Е.Богуславського, Х.Ейхнера, В.Снайдера (1961-1963). У них вперше

враховано співвідношення між природною і дозованою кількістю поживних речовин. У роботі А.Фоїзіна (1966) наведено опис взаємодії факторів-інгібіторів.

Інший напрям розвитку уявлень про природу потенціалу врожаю на підставі взаємодії чисельності рослин і їх маси має відлік від “Закону урожаю” А.О.Сапегіна (1922). Надалі ним (1928) поєднано сумісний вплив елементів урожаю і їх чинників. Завдяки дослідженням В.М.Юр’єва, В.С.Немчинова, М.С. Савицького (1948), О.І.Носатовського (1965), Д.П.Томашевського (1970) і багатьох інших відбувалася деталізація та поглиблення уявлень про взаємодію органів рослин, визначення їх оптимальних значень. Але за такими підставами не визначалась і не враховувалися динаміка елементів урожаю та вплив на них чинників середовища. Оцінка потенціалу врожаю за ознаками динамічності та оптимальності його елементів уперше була оприлюднена в роботах автора [2, 3] у поєднанні із впливом агрометеорологічних чинників. Цей напрям визначився як підхід сумісної оцінки біологічної, екологічної і антропогенної складових потенціалу врожайності з урахуванням особливостей відповідної місцевості. Його зміст, як еколого-географічного принципу, розглянемо далі.

Визначний вплив на становлення і розвиток уявлень про теоретичну оцінку потенціалу врожаю мала робота О.О.Ничипоровича [12], якою запроваджено принцип максимальної продуктивності за моделлю біологічної врожайності. Остання відображає співвідношення між приходом фотосинтетично активної радіації і її засвоєння рослинами.

Потужним поштовхом до інтенсивного розвою засобів оцінки потенціалу врожаю стало висунення та розробка у Волгоградському сільськогосподарському інституті А.А.Клімовим, Г.Е.Листопадом та Г.П.Устенком (1971) ідеї про програмування врожаю. До цього напрямку залучалося широке коло науковців різноманітних галузей [11]. У ньому, за оцінкою віце-президента ВАСГНІЛ І.С.Шатілова, визначені три рівні потенціалів урожаю: максимального за притоком сонячної радіації (О.О.Ничипорович і ін.), оптимально можливого за біокліматичною продуктивністю землі (А.М.Рябчиков, Д.І.Шашко, О.Р.Константінов, В.П.Дмитренко і ін.) та можливого за вологозабезпеченістю посівів і використанню ними вологи під час вегетації (О.М.Алпатьєв, Ю.І.Чірков та ін.). До останньої групи широко залучені засоби визначення можливого врожаю за його структурою (М.С.Савицький), фітоценотичними

зв'язками (С.А.Муравйов, І.С.Травін та ін.), дозуванням добрив (Г.А.Кулаковська, А.С.Радов, К.П.Афендулов, І.І.Канівець та ін.), особливостями зрошування і ін. Недостатнє опанування засад системного підходу, відсутність концептуальних уявлень про механізми, чинники і засоби формування врожаю та інші недоліки у наведених підходах привели І.С.Шатілова до висновку, що описані методи [11] немає підстав розглядати як усталені принципи і вони мають бути сформульовані в майбутньому.

Метод еталонних урожаїв

За підходом О.О.Ничипоровича Х.Г.Тоомінгом [14] опрацьовано метод еталонних урожаїв. Система його оцінки дозволяє визначити потенційну врожайність ПВ, дійсно можливу врожайність ДМВ та метеорологічну можливу врожайність ММВ, поняття про яку опрацьовано разом із Є.Є.Жуковським (1989, 1990). Підхід Х.Г.Тоомінга отримав помітне поширення. Зміст згаданих понять полягає в наступному.

Потенційна врожайність (ПВ) визначається за виразом:

$$\dot{I}\hat{A} = \eta_{\Pi} k_m \frac{\sum Q_{\phi}}{q}, \quad (1)$$

де η_{Π} – потенційний коефіцієнт корисної дії посіву; k_m – коефіцієнт господарської ефективності врожаю або продукційний індекс; $\sum Q_{\phi}$ – кількість фотосинтетично активної радіації за вегетацію культури, МДж/см²; q – калорійність рослинної маси.

Зважимо на ту обставину, що ПВ має простий фізичний зміст, легко оцінюється, хоча за межами виразу (1) знаходяться громіздкі кропіткі дослідження біологічних особливостей усіх його складових і їх динаміки протягом вегетації.

Метеорологічно можлива врожайність (ММВ) з урахуванням (1) має вигляд:

$$\dot{I}\hat{A} = \dot{I}\hat{A} \frac{E}{E_0} = \eta_i k_m \frac{\sum Q_{\phi}}{q} \cdot \frac{W_K - W_H + U}{0,63 \sum \frac{R}{L}}, \quad (2)$$

де E , E_0 – випаровування і випарність відповідно, мм; W_K , W_H – запаси вологи в ґрунті кінцеві і початкові відповідно, мм; U – кількість опадів,

мм; R – радіаційний баланс, кДж/(см²·період); L – прихована теплота випаровування, кДж/г.

Співвідношення між ММВ і ПВ визначається Х.Г.Тоомінгом і Є.Є.Жуковським, як коефіцієнт сприятливості метеорологічних умов, який змінюється від 0 до 1.

Наступним рівнем є дійсно можлива врожайність (ДМВ) за виразом:

$$\hat{A} = K_f \cdot \hat{A} \quad , \quad (3)$$

де K_f – коефіцієнт сприятливості ґрунтових умов, який змінюється від 0 до 1 і чисельно прирівнюється бонітету ґрунту в частках одиниці.

Завершує розглянуту систему еталонів урожайність у виробництві (УВ), значення якої є емпіричним мірилом усіх попередніх рівнів.

Метод еталонних урожаїв Х.Г.Тоомінга є одним із важливих напрямів теоретичної оцінки можливих рівнів урожаю. Він поєднує окремі фізичні властивості середовища, провідні агрометеорологічні чинники формування врожаю та продуктивність рослин у вигляді енергетичних показників в єдину систему. Цей метод дозволяє оцінити потенціали врожаю різних рівнів за співвідношенням притоку сонячної радіації, радіаційного балансу, вологості ґрунту, кількості опадів за період вегетації культури, як агрокліматичних ресурсів. За змістом основних понять він реалізує принципи оцінки абіотичного потенціалу продуктивності агроecosистем шляхом використання певних узагальнених ґрунтово-кліматичних показників. Метод еталонних урожаїв надає засіб оцінки агрокліматичних ресурсів за агроecологічними категоріями коефіцієнта корисної дії сонячної радіації в посівах і коефіцієнта господарської ефективності урожаю. Науковими засадами його використано принцип максимальної продуктивності і принцип співставлення умов зовнішнього середовища за період вегетації рослин з можливим обсягом їх продукції. Разом з тим метод еталонних урожаїв у явному вигляді не визначає механізмів впливу провідних чинників на формування врожаю, абстрагується від їх сезонної динаміки і біологічних особливостей онтогенезу рослин та від динаміки взаємодії рослин протягом вегетації. За своїм змістом метод еталонних урожаїв Х.Г.Тоомінга є достатньо обґрунтованим науковим засобом врахування агрокліматичних ресурсів за принципом оцінки кінцевої максимальної продуктивності на різних рівнях дослідження чи господарювання.

Принцип еколого-географічних потенціалів

Згаданий раніше принцип еколого-географічних потенціалів являє собою замкнену систему врахування природних можливих і економічно зумовлених рівнів урожайності на засадах і закономірностях взаємодії чисельності та маси рослин, механізмів дії ефективної родючості ґрунту, плідності клімату та антропогенного ефекту. За принципом еколого-географічних потенціалів урожаю опрацьовані поняття та рівні біологічного Y_b , географічного Y_g , господарського Y_e максимумів і економічного Y_e мінімуму урожайності.

Біологічний максимум урожайності за роботами [2, 3, 4] визначається добутком оптимальної густоти p_0 і оптимальної маси продуктивного органу m_0 рослин під час дозрівання, які відображають спадкові властивості їх взаємодії у формуванні потенціалу врожаю виразом:

$$Y_B = p_0 m_0. \quad (4)$$

Географічний або місцевий чи локальний максимум урожайності визначається за взаємодією біологічного максимуму та ефективної родючості ґрунту F_e і плідності клімату C [3, 8, 15] з урахуванням антропогенного впливу A на систему „рослина – ґрунт – атмосфера” за соціально-економічними і організаційними засадами:

$$Y_G = Y_B \cdot F_e \cdot C \cdot A. \quad (5)$$

Співмножники (5) описуються відповідними моделями, які в загальному вигляді враховують наступні положення.

У господарських умовах на значних площах вирощують декілька різних сортів одного виду культури. Тому в господарствах, адміністративних районах та областях біологічний максимум сукупності сортів у певний рік має враховувати склад цих сортів і площу, яку вони займають. Середнє значення біологічного максимуму врожайності $\bar{Y}_B$ за таких умов на певний рік має визначитись за виразом:

$$\bar{Y}_B = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{B,i} \cdot S_i}{S}, \quad (6)$$

де $Y_{B,i}$ – біологічний максимум урожайності i -го сорту; S_i – площа, що зайнята i -тим сортом; S – загальна площа, відведена під відповідну польову культуру.

Розгорнута у часі формула (6) надає уявлення про динаміку біологічного максимуму врожайності відповідної польової культури.

Зміст ефективної родючості ґрунту розглянуто окремо в роботі [8].

Плідність клімату за [8] визначається системою динамічних моделей. Загальний їх вигляд, що надає можливість кінцевої оцінки, наступний:

$$C=S(Q,T,R,W) \prod_{j=1}^m \left(1-\frac{S_{\Pi}}{S} \zeta_K\right)_j, \quad (7)$$

де $S(Q,T,R,W)$ – сумарний коефіцієнт продуктивності культури за рівнем сумарної сонячної радіації Q , температури повітря T , кількості опадів R та вологості ґрунту W за вегетаційний цикл; ζ_K – показник збитковості K -го стихійного гідрометеорологічного явища на охопленій ним площі S_{Π} у складі досліджуваної площі S .

Сумарний коефіцієнт продуктивності культури являє собою суму частинних зважених коефіцієнтів її продуктивності за всі міжфазні періоди з урахуванням мезомасштабної x' і мікрокліматичної Δx складових згаданих метеорологічних величин x :

$$x = x' + \Delta x. \quad (8)$$

У зв'язку з необхідністю забезпечити розрахунки наявною на мережі гідрометеорологічною інформацією та за наслідками дослідження зв'язків між провідними чинниками, вони в моделі (7) мають наступний спрощений вигляд, як сумарний коефіцієнт продуктивності польової культури за температурою повітря T і кількістю опадів R :

$$S(T,R)=\sum_{i=1}^n \eta(T)_i \eta(R)_i \alpha(\tau)_i, \quad (9)$$

де $\eta(T)$ – коефіцієнт продуктивності культури за температурою повітря у період i ; $\eta(R)$ – коефіцієнт продуктивності культури за кількістю опадів у період i ; $\alpha(\tau)$ – ваговий множник внеску періоду i в урожай за його тривалістю відносно вегетаційного циклу.

Коефіцієнт продуктивності культури в окремий міжфазовий період за відсутності даних про біологічні екстремуми температури повітря та їх

динаміку у онтогенезі за середньою температурою повітря T описується емпіричним виразом:

$$\eta(T) = \frac{y(T)}{Y(T_o)} = \exp \left[-a \left(\frac{T - T_o}{10} \right)^2 \right], \quad (10)$$

де $y(T)$ – урожайність за температурою T ; $Y(T_o)$ – максимальна врожайність за оптимальної температури; T_o – біологічний оптимум температури повітря за відповідний міжфазовий період культури; a – параметр, для низки культур: $a=+1$ при $T \leq T_o$ та $a = +2$ при $T > T_o$.

Сукупність біологічних оптимумів температури T_o за всі міжфазові періоди, розташованих послідовно протягом вегетаційного циклу, створює температурну онтогенетичну криву, що надає уявлення про динаміку теплової потреби T_o відповідного виду польової культури. Наявність даних про біологічні екстремуми температури повітря дозволяє визначити також онтогенетичні криві таких екстремумів та замість моделі (10) застосувати за [2] теоретично обґрунтовану.

Коефіцієнт продуктивності культури за кількістю опадів R у окремий міжфазовий період має вигляд:

$$\eta(R) = \frac{y(R)}{Y(R_o)} = \left(1 - \frac{R - R_o}{R_o - R_{min}} \right)^{q_1} \left(1 + \frac{R + R_o}{R_{max} - R_o} \right)^{q_2}, \quad (11)$$

де $y(R)$ – урожайність за кількістю опадів R ; $Y(R_o)$ – максимальна врожайність за оптимальної кількості опадів R_o в даний міжфазовий період; R_{min} , R_{max} – біологічний мінімум та біологічний максимум опадів відповідно у кожний міжфазовий період; q_1 , q_2 – параметри.

Поєднані протягом вегетаційного циклу біологічні оптимуми і екстремуми опадів утворюють динамічну систему у вигляді толерантної зони або кривої толерантності опадів з онтогенетичною кривою оптимальних опадів в її центрі.

Ваговий множник α внеску в урожай міжфазових періодів за їх тривалістю τ в частках вегетаційного циклу T описується виразом:

$$\alpha = \frac{y(\tau)}{Y(T)} = \frac{1}{1 + c(1 - \tau)e^{-r_0\tau}}, \quad (12)$$

де $y(\tau)$ – частка максимальної врожайності у даний міжфазовий період тривалістю τ за всіх оптимальних агрометеорологічних і інших умов; $Y(T)$ – максимальна врожайність, сформована за весь вегетаційний цикл тривалістю T за оптимальних умов; c – параметр, що оцінює вплив агрометеорологічних умов у передпосівний період; r_o – коефіцієнт самозріджуваності посівів за середніх багаторічних даних.

Ваговий множник α зростає від 0 на початку передпосівного періоду до 1 в кінці вегетації культури і надає всій моделі плідності клімату (7) динамічного характеру.

Показник збитковості стихійних гідрометеорологічних явищ ζ за їх загальної n і недепресивної тривалості n_o протягом усього вегетаційного циклу має такий вигляд:

$$\zeta = a_k \{n - n_o [S(T, R)]\}, \quad (13)$$

де a_k – параметр, як коефіцієнт збитковості відповідного k -го явища.

За визначених епізодичності та локальності несприятливих явищ модель (13) враховує їх місцеві особливості у певні міжфазові періоди [8, 10].

Застосування моделі плідності клімату у вигляді виразу (7) чи із спрощеними уявленнями за (9) в окремий рік дозволяє визначити рівень урожайності культури у відносних одиницях до біологічного або господарського максимуму. Визначення за (7) середніх багаторічних значень створює уявлення про плідність клімату також у відносних одиницях до біологічного або господарського максимуму врожайності.

Таким чином, виразом (7) чисельно визначаються метеорологічна за окремий рік або кліматологічна за багаторічний період складові еколого-географічного напряму оцінки потенціалу врожаю сільськогосподарських культур. Він є стрижнем цього принципу і визначається як базова математична модель “погода-урожай” УкрНДГМІ.

Потенціал урожаю із трендовою складовою

Поряд із потенціалом, урожайність має значну кількість інших ознак. До них належать закон розподілу, середнє значення, середнє квадратичне відхилення, мінливість, тренд, особливості розподілу екстремальних значень і ін. (табл. 1). За просторово-часовими ознаками вони створюють можливості самотійної та незалежної оцінки потенціалу

урожайності. Вона жорстко прив'язана до території і часу отримання даних, що можна застосовувати як принцип оцінки потенціалу урожаю за трендовими характеристиками.

Таблиця 1

Динаміка показників урожайності озимої пшениці в областях України за 11-річні періоди у 1951-1997 рр.

Показник	1951-1961	1962-1972	1973-1983	1984-1994	1987-1997	1951-1997
Чернігівська область						
Середня врожайність $\bar{y}$, ц/га	12,0	18,2	26,0	29,0	27,2	22,5
Середнє квадратичне відхилення σ , ц/га	4,8	4,5	4,0	5,2	7,8	5,3
Коефіцієнт варіації C_V , %	40	24	15	18	29	25
Тренд A , ц/га-рік	0,41	0,16	-0,36	-0,22	-1,75	-0,35
Максимальна врожайність U_{max} , ц/га	20,6	24,5	32,9	37,8	37,8	
Хмельницька область						
Середня врожайність $\bar{y}$, ц/га	14,0	24,5	29,2	36,4	35,9	28,0
Середнє квадратичне відхилення σ , ц/га	2,1	4,9	4,6	5,1	5,1	4,4
Коефіцієнт варіації C_V , %	15	20	16	14	14	16
Тренд A , ц/га-рік	0,66	1,20	0,23	0,64	-0,72	0,40
Максимальна врожайність U_{max} , ц/га	18,4	30,2	35,8	44,4	44,4	
Черкаська область						
Середня врожайність $\bar{y}$, ц/га	17,3	23,6	37,4	40,6	40,3	31,8
Середнє квадратичне відхилення σ , ц/га	5,6	8,1	4,5	7,0	6,7	6,4
Коефіцієнт варіації C_V , %	33	34	12	17	16	22
Тренд A , ц/га-рік	1,05	1,96	-0,52	-0,23	-1,58	0,14
Максимальна врожайність U_{max} , ц/га	26,8	35,1	45,5	51,1	51,4	
Дніпропетровська область						
Середня врожайність $\bar{y}$, ц/га	16,1	20,5	28,8	33,3	33,7	26,5
Середнє квадратичне відхилення σ , ц/га	5,4	5,8	5,0	7,3	6,1	5,9
Коефіцієнт варіації C_V , %	33	28	17	22	18	24
Тренд A , ц/га-рік	0,91	0,74	-0,50	0,86	-1,47	0,11
Максимальна врожайність U_{max} , ц/га	25,2	32,2	36,5	45,1	45,1	
Одеська область						
Середня врожайність $\bar{y}$, ц/га	15,4	22,5	27,0	28,8	28,9	24,5
Середнє квадратичне відхилення σ , ц/га	11,4	5,6	4,7	7,0	7,2	7,2
Коефіцієнт варіації C_V , %	74	25	17	25	25	33
Тренд A , ц/га-рік	0,77	1,44	0,72	-0,29	-0,83	0,36
Максимальна врожайність U_{max} , ц/га	20,4	30,4	34,5	37,6	37,6	
Україна						
Середня врожайність $\bar{y}$, ц/га	15,6	20,5	29,1	33,8	33,2	26,4
Середнє квадратичне відхилення σ , ц/га	3,8	4,9	4,5	5,0	5,2	4,7
Коефіцієнт варіації C_V , %	24	24	15	15	16	19
Тренд A , ц/га-рік	0,88	1,28	0,22	-0,36	-1,26	0,30
Максимальна врожайність U_{max} , ц/га	21,9	29,9	35,2	40,2	40,2	

Урожайність описується логарифмічно-нормальним розподілом. Для спрощення досліджень користуються особливостями нормального закону, пересвідчившись у тому, що гіпотеза про нього не спростовується.

За даними табл. 1 простежуються згадані властивості і характеристики врожайності озимої пшениці в областях і в Україні. Середня врожайність зростає в перші чотири періоди, а далі знижується чи стабілізується. Тривалість періодів застосована з метою, щоб уникнути впливу циклів сонячної активності. Середнє квадратичне відхилення зростає із коливаннями, які відображають співвідношення між впливом агротехніки і погоди. Коефіцієнт варіації свідчить про зменшення мінливості врожаїв з часом протягом перших чотирьох десятиріч, підкреслюючи посилення впливу технології на виробництво, з наступним збільшенням із послабленням цього чинника. Тренд урожайності є найменш стабільною характеристикою серед розглянутих показників. Він увесь час коливається між інтенсивним і деградуєчим землеробством, як найбільш чутлива ознака сукупних властивостей. Тому в питаннях оцінки її потенціалу важливе значення повинно мати врахування саме тренду.

З табл. 1 видно, що у зміні рівнів урожайності за середніми значеннями виділяються закономірні (трендові) та випадкові (коливальні) ознаки. Закономірні зміни натуральних рядів урожайності протягом двох-трьох десятиріч створюють поняття її динамічності, які поділяються за знаком та формою і в цілому відображають тенденцію.

За знаком, на підставі співвідношення приросту врожайності Δy за різні відтинки часу Δt оцінюють її тренд

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = A \quad (14)$$

та виділяють незмінні ряди, коли $A=0$, висхідні при $A>0$ і низхідні при $A<0$. Ці характеристики мають економічне трактування. Незмінні ряди відображають застійний характер землеробства, висхідні – інтенсивний, а низхідні – деградуєчий за відсутності змін клімату.

Коливання врожайності визначають за такими типами: маятникові, циклічні і випадкові. При маятникових коливаннях зміна знаку A відбувається протягом 1-3, інколи 4 років. При циклічних коливаннях періоди сягають 9-11, 20, 30, 80 років. Випадкові коливання не підпорядковані певним закономірностям. Тип коливання визначається

значенням коефіцієнта автокореляції. У маятникових рядах він наближається до -1 , у циклічних – до $0,5$, а у випадкових – до 0 .

При поєднанні декількох циклів на інтервалі більше 30 років виникають уявлення про циклічну тенденцію з позитивними та негативними гілками. Поряд з цим утворюється нове поняття про вікову тенденцію, яка поєднує усереднені характеристики кожного з n циклів. У найбільш простому лінійному варіанті віковий тренд $\bar{A}_B$ може визначатися за таким рівнянням:

$$\bar{A}_B = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\bar{y}_{j+1} - \bar{y}_j}{t_{j+1} + t_j} \right), \quad (15)$$

де $\bar{y}$ – середня врожайність за попередній j та наступний $j+1$ цикли тривалістю t років.

Динамічні характеристики циклічної та вікової тенденції врожайності відображають рівень господарювання, поєднуючи ці ознаки із технологією вирощування польових культур.

Вікова тенденція врожайності, крім усередненої характеристики за формулою (15), може розкривати й інші властивості за максимальним та мінімальним рівнями, які можуть бути розвинені додатково.

За формою закономірної динаміки виділяють ряди врожайності: лінійні, параболічні, експоненційні, логістичні та інші. Підставою для їх визначення є формула первісної змінної виду (14) і наслідки її аналізу.

Найбільш поширеною й найчастіше прийнятною є лінійна форма тенденції. Її рівняння може мати вигляд:

$$y_T = \bar{y} + A(t - t_0), \quad (16)$$

де y_T – розрахована врожайність з визначеним трендом A , ц/га; $\bar{y}$ – середня врожайність за досліджуваний період, ц/га; t , t_0 – порядковий та початковий номер року відповідно.

За допомогою рівняння (16) нестационарний ряд урожайності може бути перетворений у стаціонарний шляхом обчислення величин:

$$\Delta y_i = y_i - y_T, \quad (17)$$

або

$$\bar{y} + \Delta y_i = y_i - A(t - t_0). \quad (18)$$

У деяких випадках рівняння (17) чи (18) використовують задля приведення статистичної сукупності до часової однорідності.

Антропогенний вплив на зміну потенціалу врожаю має дуже складний характер. Він може визначатись щорічними і віковими коливаннями. Щорічні коливання, зумовлені сортозміною і впливом агрофітотехнологій на родючість ґрунту, певним чином враховані моделями (4), (5) і (6). Але поза ними залишаються соціально-економічні, адміністративно-організаційні, технологічні чинники та загальний рівень культури суспільства, що частково відображається віковим трендом урожаю.

Антропогенний вплив на рівень урожайності сільськогосподарських культур в узагальненому вигляді можемо визначити за складовими вікового, довго- чи короткоперіодного характеру за символічним переліком:

$$A = A(A_B, A_D, A_K, a_i), \quad (19)$$

де A – узагальнений антропогенний вплив або загальний тренд урожайності сільськогосподарських культур; A_B – віковий тренд, що охоплює декілька періодів тривалістю понад 30 років; A_D – довгоперіодний тренд, зумовлений впливом особливостей сонячної активності, сівозміни або тривалих соціально-економічних зрушень; A_K – короткоперіодний тренд, що підпорядкований коливанням агрофітотехнології або адміністративних заходів тривалістю від одного – трьох років до тривалості сівозміни; a_i – функція внеску відповідного тренду у загальний за співвідношенням тривалості періодів.

Віковий тренд A_B може бути поданий у вигляді виразу:

$$A_B = A_0(\sigma_t - 1), \quad (20)$$

де A_0 – параметр, що відображає загальний рівень землеробської культури суспільства, впливу людини на систему „рослина – ґрунт – атмосфера”; σ_t – середнє квадратичне відхилення врожайності протягом певного часу; t – тривалість періоду.

Таким чином, за ознаками біологічного максимуму врожайності, родючості ґрунту, плідності клімату із (5) та антропогенного вікового впливу за (20) створені підстави для визначення місцевого або географічного максимуму врожайності із трендовою складовою. Його

відповідником за даними натурального ряду є господарський максимум урожайності.

Господарський максимум урожайності на засадах екстремальної статистики

В моделі (5) поєднані потенціали виду сільськогосподарської культури, можливості ґрунту і здатність атмосфери за існуючим чи передбаченим рівнем загальної культури землеробства створювати певний обсяг урожаю у заданій місцевості на відповідному відтинку часу.

Співставлення розрахунків за (4) і (5) з фактичними рівнями врожайності [3, 5, 8] дозволяє вважати, що в Україні ще залишається досить значний резерв ґрунтових і агрокліматичних ресурсів, який надає можливості істотно посилити результативність праці сільськогосподарського працівника.

Наукову основу господарського максимуму становить співвідношення (5), що визначає внесок біологічного потенціалу рослин за (4), родючості ґрунту, плідності клімату із досягненнями загальної культури землеробства. У такому випадку географічний і господарський максимуми врожайності повинні співпадати. За недостатнього рівня ефективної родючості ґрунту і антропогенного впливу загальну модель (5) слід замінити деяким еквівалентним виразом, що мав би враховувати реальні співвідношення між її складовими. Із аналізу (5) випливає, що найбільш реальним адекватним замінником біологічного максимуму врожайності Y_B є натуральна врожайність протягом певного відтинку часу. Але така врожайність втілює в собі увесь набір чинників з реальною щорічною мінливістю. Тому теоретична схема (5) є досить віддаленою від виробничих рівнів урожайності. Їх наближенню може слугувати методологія статистики екстремальних значень. Саме за таким підходом, опрацьованим Е.Гумбелем [1], нами запропоновані поняття і механізм визначення господарського максимуму врожайності [9]. Цей напрям можна розглядати відгалуженням еколого-географічного підходу, як статистичний замінник моделі (5), що ґрунтується на теорії розподілу крайніх членів вибірки [1].

За змістом теорії розподілу крайніх членів вибірки максимальне її значення визначається співвідношенням між основними параметрами розподілу за середнім $\bar{y}$ і середнім квадратичним відхиленням σ у вигляді:

$$Y_C = f_1(\bar{y}) + f_2(\sigma) + \Delta, \quad (21)$$

де Y_C – статистичний максимум урожайності з певною ймовірністю; f_1, f_2 – деякі функції, що з заданою ймовірністю визначають вплив згаданих параметрів на рівень Y_G ; Δ – похибка оцінки Y_G .

Підхід за формулою (21) на підставі методу Е.Гумбеля [1] застосовано [5, 8, 13] при визначенні статистичного максимуму врожайності. Особливості застосування моделі (21) за згаданими роботами полягали в наступному. Натуральний ряд урожайності повинен мати достатній обсяг вибірки та із досить значною ймовірністю описуватись нормальним законом розподілу. За цих обставин статистичний максимум урожайності Y_{CT} аналітичним способом з ймовірністю 99,9% оцінювався формулою:

$$Y_{CT} = \bar{y} + 3,09\sigma, \quad (22)$$

де $\bar{y}$ – середня врожайність у зазначений період; σ – середнє квадратичне відхилення врожайності за цей же період.

За обмеженого обсягу вибірки у 22 роки цей показник за роботою [13] з тією ж ймовірністю визначався за формулою:

$$Y_{CT} = \bar{y} + 3,43\sigma. \quad (23)$$

Застосування формул (22) і (23) в моделі врожайності за роботами [5, 8] доповнювалось трендовою складовою і загальна формула статистичного максимуму перетворювалась у модель господарського максимуму Y_G у вигляді виразу:

$$Y_G = \bar{y} + k\sigma + A(t - t_o), \quad (24)$$

де k – коефіцієнт співвідношення між емпіричним і теоретичним значенням середнього квадратичного відхилення врожайності; A – тренд урожайності; t – рік відліку і t_o – рік початку відліку.

Формули (22) і (23) відповідають моделі (21) із числовим визначенням функцій f_1 та f_2 і без урахування похибки розрахунку Δ . Незаперечною умовою їх застосування є підпорядкування генеральної сукупності врожайності нормальному розподілу, за яким значення максимального члена вибірки має неістотно відрізнятись від співвідношення:

$$y_{max} = \bar{y} + 3\sigma. \quad (25)$$

У разі незадоволення цієї умови числове значення буде відрізнятись від коефіцієнта 3 тим більше, чим істотніше генеральна сукупність не співпадатиме з нормальним розподілом. За вихідними засадами розподіл урожайності описується логарифмічно-нормальним законом із незначною правосторонньою асиметрією. За достатнього обсягу сукупності і незначним трендом урожайності його можна апроксимувати нормальним законом, що фіксується формулою (22). За нею в роботі [9] визначена врожайність озимої пшениці, ярого ячменю і кукурудзи за 1945-1969 роки із $0,5 \leq \sigma \leq 2,8$ ц/га і трендом урожайності $0,54 \leq A \leq 1,07$ ц/га·рік. Формула (23) за роботою [13] описує дані за 1945-1989 роки. За цей період середня врожайність і середнє квадратичне відхилення зросли більше ніж вдвічі згідно з даними табл.1, а тренд, за деякими винятками, коливався навколо значення 1 ц/га·рік. Із співставлення формул (22) і (23) випливає, що вони відповідають висунутим умовам про достатній обсяг вибірки та підпорядкування розподілу нормального закону. Разом з тим істотне зростання у виразі (23) значень $\bar{y}$ і σ (див. табл. 1) є наслідком більш-менш стабільного збільшення тренду до 1987-1993 років. З кінця цього періоду в усіх областях і майже для всіх польових культур відбулась зміна знаку тренду, тобто порушився внутрішній зміст статистичної вибірки, за яким опрацьовувались формули статистичного максимуму врожайності (22) і (23). За цих ознак до попередніх вихідних положень додається умова фіксування господарського максимуму врожайності на початку досліджуваного періоду, а не наприкінці, та застосування досить помітного від'ємного тренду, що змінює параметри статистичного розподілу.

Перевірка і оцінка розглянутих положень здійснена по більшості провідних культур в усіх областях України за період з 1945 до 1997 року. Останній був довільно розподілений на 11-річні інтервали з 1951 до 1994 року для співставлення матеріалів з урахуванням циклів сонячної активності та у відповідності з прийнятою нами методикою визначення тренду врожайності [5]. Оскільки висновки по всіх об'єктах дослідження співпадають, для ілюстрації надамо наслідки аналізу врожайності озимої пшениці. У табл. 2 наведено дані оцінки її максимуму врожайності в Дніпропетровській області за вказані раніше періоди за моделями (25), (22), (23) і господарського максимуму за моделлю (24).

Таблиця 2

Оцінка наслідків розрахунку статистичного і господарського максимуму врожайності озимої пшениці в Дніпропетровській області за різні періоди

Вид моделі чи величини	Періоди						Межі коли- вань
	1945- 1950	1951- 1961	1962- 1972	1973- 1983	1984- 1994	1987- 1997	
Значення розрахункового і фактичного максимуму врожайності, ц/га							
$y_{max} = \bar{y} + 3\sigma$ (25)	17.4	32.3	37.9	43.8	55.2	52.0	17-55
$Y_{CT.2} = \bar{y} + 3,09\sigma$ (22)	17.7	32.8	38.4	44.2	55.9	52.5	18-56
$Y_{CT.3} = \bar{y} + 3,43\sigma$ (23)	18.7	34.6	40.4	46.0	58.3	54.6	19-58
$Y_{Г.4} = \bar{y} + k\sigma + A(t - t_o)$ (24)	18.2	33.2	38.6	43.3	56.1	50.5	18-56
y_{max} фактичний	13.4	25.2	32.2	35.4	45.1	45.1	13-45
Відхилення розрахованого від фактичного максимуму врожайності, ц/га							
$y_{max} = \bar{y} + 3\sigma$ (25)	4,0	7,1	5,7	8,4	10,1	6,9	4-10
$Y_{CT.2} = \bar{y} + 3,09\sigma$ (22)	4,3	7,6	6,2	8,2	10,8	7,4	4-11
$Y_{CT.3} = \bar{y} + 3,43\sigma$ (23)	5,3	9,4	8,2	10,6	13,2	9,5	5-13
$Y_{Г.4} = \bar{y} + k\sigma + A(t - t_o)$ (24)	4,8	8,0	6,4	7,9	11,0	5,4	5-11
Відносне відхилення розрахованого від фактичного максимуму врожайності, %							
$y_{max} = \bar{y} + 3\sigma$ (25)	23	22	15	19	18	13	13-23
$Y_{CT.2} = \bar{y} + 3,09\sigma$ (22)	24	23	16	20	19	14	14-24
$Y_{CT.3} = \bar{y} + 3,43\sigma$ (23)	28	27	20	23	23	17	17-28
$Y_{Г.4} = \bar{y} + k\sigma + A(t - t_o)$ (24)	26	24	17	18	20	11	11-26

У табл. 3 наведено аналогічні дані по областях різних ґрунтово-кліматичних зон України за 1987-1997 роки, коли скрізь відзначалася зміна знаку тренда врожайності за даними табл. 1.

Особливість наведених даних полягає в тому, що в них відображені різні рівні натуральної врожайності, різноманітні тренди за значеннями і знаками та сукупності із вилученим трендом (див. табл. 3). До всіх цих даних застосовані моделі статистичного максимуму із різними коефіцієнтами до середнього квадратичного відхилення та одноманітна модель господарського максимуму врожайності.

Таблиця 3

Оцінка наслідків розрахунку статистичного і господарського максимуму врожайності озимої пшениці в окремих областях і в Україні за 1987-1997 роки за моделями (22) і (24)

Область	Розрахунковий максимум урожайності, ц/га			Фактичний максимум урожайності, ц/га	Відхилення від фактичного максимуму врожайності, ц/га			Відносне відхилення від фактичного, %		
	статистичний за (22)	господарський за (24)	статистичний з вилученим трендом		за (22)	за (24)	з вилученим трендом	за (22)	за (24)	з вилученим трендом
Чернігівська	50,5	40,0	26,9	37,8	12,7	2,2	3,9	25	6	14
Хмельницька	51,2	46,9	45,4	44,4	6,8	2,5	4,6	15	5	10
Дніпропетровська	52,0	46,0	36,9	45,1	6,9	0,9	3,6	13	2	10
Одеська	50,6	49,8	44,1	37,6	13,0	12,2	6,5	26	24	17
Україна	49,0	43,9	35,8	40,1	8,9	3,8	4,1	18	9	11

Критерії оцінки наслідків розрахунку вміщують значення абсолютного відхилення між розрахованими показниками Y_j і фактичним максимумом урожайності Y_{max} у вигляді:

$$\Delta = Y_j - Y_{max} \quad (26)$$

та відносного відхилення δ у вигляді:

$$\delta = \frac{\Delta}{Y_j} \cdot 100. \quad (27)$$

За розглядом наслідків оцінки запропонованих підходів у всі періоди формулюються наступні висновки. Для кожної моделі властивий певний рівень оцінок відносних відхилень. Вони неістотно відрізняються між собою і свідчать про те, що розрахунковий максимум урожайності перевищує фактично отриманий на 11-28% (див. табл. 2) із переважанням до 1994 р. значень близьких до 20%. Відхилення статистичного максимуму від фактичного збільшується зі збільшенням коефіцієнта при середньому квадратичному відхиленні, але мінливість їх практично однакова і знаходиться на рівні 18-19%. Господарський максимум за середнім рівнем відносного відхилення співпадає з відхиленням за моделлю (22). Але дисперсія його помітно більша і мінливість за коефіцієнтом варіації знаходиться на рівні 25%. Це означає, що введення тренду до моделі (24) підвищує чутливість показника до зміни умов та

істотно зменшує відносне відхилення розрахунків до 2-6% у всіх областях за винятком Одеської (див. табл. 3). Значною перевагою моделі (24) є оцінка трендової складової за знаком, що дозволяє більш гнучко відображати спрямованість землеробства і з більшою точністю оцінювати господарський потенціал урожаю та його коливання.

Таким чином, розглянутий підхід із одночасного врахування провідних параметрів розподілу врожайності і її тренду дозволяє вважати показник потенціалу врожайності чутливим до спрямованості і рівня господарювання та пропонувати його до застосування в моделі “погода-урожай” як господарський максимум урожайності.

Метод модельної оцінки господарського максимуму врожайності

Поряд із розглянутими підходами визначення господарського потенціалу урожаю за фактичними даними можливе на засадах еколого-географічного принципу із використанням базової моделі “погода-урожай” у вигляді виразу:

$$y = Y_G S(T, R) \prod_{j=1}^m \left(1 - \frac{S_n}{S} \gamma_{\kappa} \right)_j, \quad (28)$$

де y – фактична врожайність із натурального ряду; Y_G – невідомий господарський максимум урожайності; усі інші позначення описані при попередніх формулах.

Зміст цього методу модельної оцінки господарського максимуму урожайності полягає у застосуванні моделі (28) в наступному вигляді:

$$Y_G^P = y \cdot \left[S(T, R) \prod_{j=1}^m \left(1 - \frac{S_n}{S} \gamma_{\kappa} \right)_j \right]^{-1}, \quad (29)$$

де Y_G^P – розрахункове значення господарського максимуму врожайності.

Процедура визначення Y_G^P містить низку етапів, головними з яких є наступні. Формується ряд натуральної врожайності за період 22 роки та визначаються його стандартні статистики і тренд. Із зазначеного ряду вибираються найбільше, найменше та близьке до середнього значення фактичної врожайності. Для років із названими значеннями за моделлю (29) визначаються сумарний коефіцієнт продуктивності та показники блоку несприятливих явищ і додаткових чинників. За цими даними розраховуються показники, що вміщені у прямих дужках. Далі відповідні

значення фактичної врожайності ділять на сукупність згаданих показників за роки їх належності і оцінюється господарський максимум для кожного з них. Отримані значення порівнюються між собою і визначаються розбіжності між ними. Останні не повинні перевищувати половини раніше визначеного середнього квадратичного відхилення. За цієї умови Y_F^P приймається таким, що визначений у рік з найбільшою фактичною врожайністю. У разі значних розбіжностей проводиться додатковий аналіз сукупності та додатковий підбір даних.

Висновки

Таким чином, проблема визначення потенціалу врожайності польових культур опрацьована за теоретичними засадами і вміщує низку методів оцінки його значень. Провідну ідею розв'язання цієї проблеми складає принцип максимальної продуктивності за моделлю біологічної врожайності, опрацьований О.О.Ничипоровичем.

Розвиток цієї ідеї, виконаний Х.Г.Тоомінгом (1984), і доповнений принципом співставлення метеорологічних умов з урахуванням їхньої сприятливості за весь період вегетації рослин із можливим обсягом продукції останніх. Цей підхід розроблений у вигляді методу еталонних урожаїв, який охоплює поняття потенційної, метеорологічно можливої і дійсно можливої врожайності.

Своєрідне поглиблення і розвиток принципу максимальної продуктивності становить еколого-географічний напрям оцінки системи потенціалів урожайності, опрацьований автором цієї роботи (1969-1973). Еколого-географічний напрям охоплює закономірності взаємодії чисельності і маси рослин, як принцип життєдіяльності популяції, механізми впливу на них плідності клімату і родючості ґрунту та антропогенного ефекту. За цим підходом визначається біологічний, географічний, господарський максимуми та економічний мінімум урожайності польових культур. Відмітною ознакою еколого-географічного принципу є визначення закономірностей росту і розвитку рослин за динамікою їх потреби в основних факторах поряд із особливостями динаміки останніх за вегетаційний цикл. Визначення господарського максимуму врожайності може здійснюватися за суто теоретичними засадами, а також методами екстремальної статистики самостійно, ними ж із урахуванням трендових властивостей і методом модельної оцінки із натурального ряду врожайності.

Розглянуті положення створюють завершену систему наукових принципів і методів визначення потенціалу врожаю сільськогосподарських культур у різноманітних еколого-географічних умовах. Ці положення охоплюють первісні емпіричні закони дії окремих чинників, “закон урожаю” А.О.Сапегіна за взаємодією густоти і маси рослин та дією факторів, принцип максимальної продуктивності за моделлю біологічної врожайності О.О.Ничипоровича, метод еталонних урожаїв Х.Г.Тоомінга, еколого-географічний принцип системи біологічного, географічного, господарського потенціалів із урахуванням закономірностей онтогенезу рослин та кривих їх толерантності. Останній принцип доповнений методами екстремальної статистики та властивостями динаміки врожаю.

* *

Приведены и обобщены научные основы оценки потенциала урожая сельскохозяйственных культур по совокупности ведущих принципов и методов.

Рассмотрены метод эталонных урожаев, принцип эколого-географических потенциалов, принцип экстремальной статистики с трендовой составляющей, метод хозяйственного максимума. Описанные положения при использовании репрезентативной надежной исходной информации дают основания для определения потенциала урожая любой культуры на уровне отдельных хозяйств, административных районов и областей, государства в целом. Совокупность приведенных положений создает теоретическую базу и систему практических способов освоения методологии эколого-географических основ оценки потенциала урожая.

* *

1. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965. - 450 с.
2. Дмитренко В.П. Об оптимальных значениях и закономерностях влияния осадков и температуры воздуха на урожайность сельскохозяйственных культур // Труды УкрНИГМИ. – 1969, Вып. 84. – С. 26-46.
3. Дмитренко В. П. О моделях расчета урожайности сельскохозяйственных культур с учетом гидрометеорологических факторов // Метеорология и гидрология. – 1971, №5. – С. 84-91.
4. Дмитренко В.П. Математическая модель урожайности сельскохозяйственных культур // Труды УкрНИГМИ. – 1973. – Вып. 122. – С. 3-13.

5. *Дмитренко В.П.* Методическое пособие по анализу и количественной оценке агрометеорологических условий выращивания зерновых культур в отдельном районе. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 52 с.
6. *Дмитренко В.П.* О статистических характеристиках элементов урожайности // Труды УкрНИГМИ. – 1980. – Вып. 182. – С. 36-47.
7. *Дмитренко В.П.* Об агрометеорологических факторах урожая // Труды УкрНИИ Госкомгидромета. – 1983. – Вып. 191. – С. 3-22.
8. *Дмитренко В.П.* Плідність клімату, родючість ґрунтів і урожай // Див. цей збірник
9. *Дмитренко В.П., Бердник А.А.* Статистическая модель географического максимума урожайности сельскохозяйственных культур // Труды УкрНИГМИ. – 1974. – Вып. 131. – С. 11-23.
10. *Дмитренко В.П., Круківська А.В., Строкач Н.К.* Напрями і засоби врахування та використання несприятливих явищ погоди в моделі «погода-урожай» // Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища 2002. Доповіді до ювілейної міжнародної конференції, присвяченої 70-річчю утворення Одеського державного екологічного університету. Частина 1. – Одеса, 2003. – С. 218-223.
11. *Каюмов М.К.* Справочник по программированию урожаев. – М.: Россельхозиздат. - 1977. – 188 с.
12. *Ничипорович А.А.* Фотосинтез растений как фактор урожайности // Изв. АН СССР, серия биол. – 1952, 4.
13. *Скорупский Б.В.* Изучение сопоставимости агроклиматических показателей со среднеобластной урожайностью полевых культур на Украине // Труды УкрНИГМИ. – 1992. – Вып. 244. – С. 28-47.
14. *Тооминг Х.Г.* Экологические принципы максимальной продуктивности посева. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 264 с.
15. *Dmitrenko V.P.* Fruitfulness of Climate is the Basis of the General Concept of Agrometeorological Adaptation Strategies to Climate Variability and Climate Change //WMO/ TD NO/ 1029. Geneva, Switzerland, May 2001, PP.43-44/ CagM Report No/ 77 b: Contributions from members on operational applications in Agrometeorology and from discussants of the papers presented at the International Workshop: “Agrometeorology in the 21st century, needs and perspectives”. – WMO/TD No 1029, Geneva. Switzerland, May 2001. – 175 p.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*