
ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ВРОЖАЙ СОНЯШНИКУ У ПІВДЕННОМУ СТЕПУ УКРАЇНИ: МОДЕЛЮВАННЯ Й АНАЛІЗ

Вожегова Р. А., Жигайло Т. С., Жигайло О. Л.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-389-7-2>

ВСТУП

Майбутні зміни клімату є однією з найбільших проблем, що постали перед людством в новому сторіччі. І зарубіжними¹, й вітчизняними^{2,3} вченими визначається, що глобальні зміни клімату створюють ризики для сільського господарства. Агропромислове виробництво в усьому Світі має пристосовуватися до нових умов глобальних змін клімату з метою забезпечення продовольчої безпеки людства, що є абсолютно неможливим без прогнозування майбутніх чинників⁴. Тому як ніколи актуальним стає питання визначення впливу очікуваних змін клімату на агрокліматичні умови вирощування, продуктивність, валовий збір урожаю провідних культур, а саме соняшнику.

Соняшник став традиційною культурою для сучасного аграрного бізнесу в Україні. Цьому сприяв стабільний попит зовнішніх ринків на соняшникову олію. Як наслідок, привабливі закупівельні ціни внутрішнього ринку на насіння соняшнику сприяли розширенню посівних площ

¹ Brouziyne Y., Abouabdillah A., Hirich A., Bouabid R et al. Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. *Agricultural Systems*. 2018. Vol. 162. P. 154–163. DOI: doi.org/10.1016/j.agry.2018.01.024

² Тараріко О. Г., Льєнко Т. В., Кучма Т. Л. Вплив змін клімату на продуктивність та валові збори зернових культур: аналіз та прогноз. *Український географічний журнал*. 2016. Вип. 1. С. 14–22. DOI: [10.15407/ugz2016.01.014](https://doi.org/10.15407/ugz2016.01.014)

³ Польовий В. М., Лукашук Л. Я., Лук'яник М. М. Вплив змін клімату на розвиток рослинництва в умовах Західного регіону. *Вісник аграрної науки*. 2019. Вип. 9 (798). С. 29–34. DOI: doi.org/10.31073/agrovisnyk201909-04.

⁴ Жигайло О. Л., Вольвач О. В., Толмачова А. В., Костюкевич Т. К. Вплив змін клімату на урожайність соняшнику в Північному Степу України: аналіз і прогноз. *Вісник Полтавської державної академії*. 2021. № 1. С. 180–186. DOI: [10.31210/visnyk2021.01.22](https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.22).

та запровадженню сучасних технологій його вирощування⁵. В Україні соняшник вирощують в усіх регіонах, проте найбільше в південних та центральних областях.

Метою цього дослідження було виявити ступінь впливу кліматичних змін на врожайність культури соняшнику у Південному Степу України. Дослідження формування врожайності соняшника проводилося з використанням математичної моделі оцінки агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур⁶, модифікованої та адаптованої до культури соняшника.

Для моделювання й аналізу змін агрокліматичних ресурсів при можливих змінах клімату використовується набір сценаріїв, а саме Репрезентативні траєкторії концентрацій (Representative Concentration Pathways – RCP). Репрезентативні траєкторії концентрацій – сценарії, які включають часові ряди викидів і концентрації всього набору парникових газів, аерозолів і хімічно активних газів⁷.

Сценарії RCP визначаються приблизною сумарною величиною радіаційного впливу до 2100 року порівняно з 1750 р.: 2,6 Вт/м² для RCP2.6; 4,5 Вт/м² для RCP4.5; 6,0 Вт/м² для RCP6.0 і 8,5 Вт/м² для RCP8.5. Дані чотири RCP містять один сценарій зменшення викидів, який передбачає низький рівень впливу (RCP2.6); два сценарії стабілізації (RCP4.5 і RCP6.0) і сценарій з дуже високими рівнями викидів парникових газів (RCP8.5).

Для комплексної оцінки впливу кліматичних змін на врожайність соняшнику використовувались агрокліматичні показники, а саме характеристики радіаційного та водно-теплогового режимів, вологозабезпеченості посівів за період вегетації від посіву до збиральної стиглості. Аналіз змін агрокліматичних характеристик виконувався за періоди: 1980 – 2010 рр. (взятий як базовий період) і за період 2021–2050 рр. за кліматичними сценаріями зміни клімату RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 і RCP8.5.

⁵ Лопотан Л. В., Казанджі А. В. Порівняльна оцінка виробництва насіння соняшнику в Україні та Одеській області як складової сировинної бази олійно-жирового підкомплексу АПК. *Агроевіт*. Вид-во ТОВ «ДКС-центр». 2015. № 10. С. 36–40.

⁶ Polevoj, A. N. Bazovaya model ocenki agroklimaticeskikh resursov formirovaniya produktivnosti selskohozyajstvennyh kultur. *Meteorologiya, klimatologiya i gidrologiya*. 2004, № 48. Р. 195–205.

⁷ Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату : монографія / за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового. Одеса : «ТЕС», 2018. С. 259–497.

1. Моделювання впливу агрокліматичних умов на врожайність соняшнику

Дослідження формування врожайності соняшнику проводилося за допомогою математичної моделі оцінки агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур, модифікованої й адаптованої для культури соняшнику. Модель призначена для оцінки забезпеченості соняшника природними ресурсами, співвідношення агрокліматичних умов потребам рослин, а також ступінь їх використання. Для більш детальної оцінки агрокліматичних умов кроком моделі розглядався декадний період. Модель має блокову структуру (рис. 1), що містять: вхідну інформацію, показники сонячної радіації і водно-температурного режиму, функції впливу фази розвитку і метеорологічних факторів на продукційний процес рослин, родючість ґрунту і забезпеченість рослин мінеральним живленням, агроекологічні категорії урожайності та узагальнюючі оцінюючі характеристики.

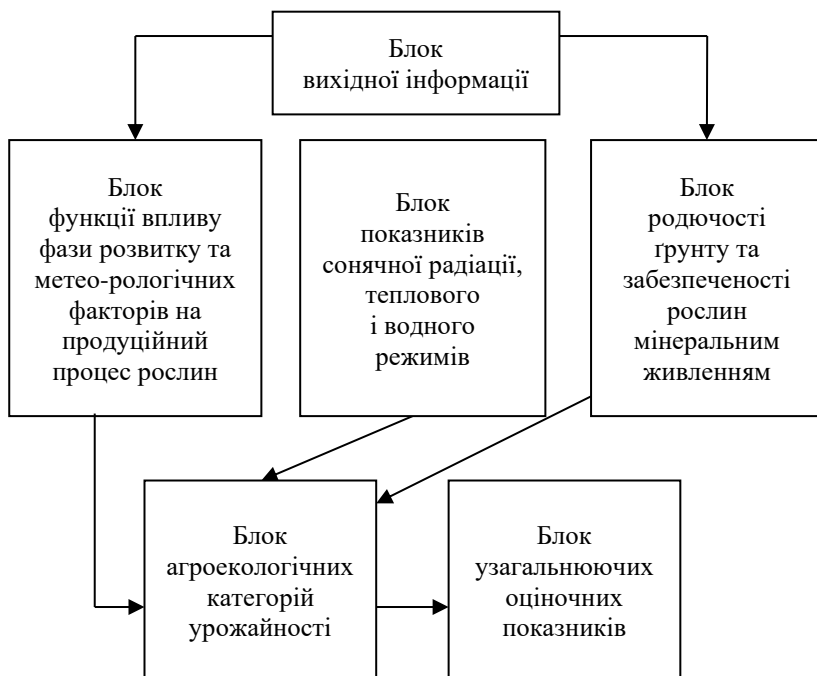


Рис. 1. Блок-схема агрокліматичної моделі формування врожаю соняшнику

Розглянемо докладніше ці блоки.

Блок вихідної інформації містить дані стандартних метеорологічних та агрометеорологічних спостережень і включає параметри та змінні моделі. Вони поділяються на дві групи.

– Перша група: середня за декаду сумарна радіація, Wt/m^2 ; середня за декаду температура повітря, $^{\circ}C$; сума опадів за декаду, мм; середня за декаду відносна вологість повітря, %; число днів у розрахунковій декаді;

– Друга група: концентрація CO_2 у повітрі; тип ґрунту за механічним складом, вміст у ґрунті гумусу, азоту, фосфору та калію, відомості про внесення фактичних і оптимальних доз азотних, фосфорних та калійних добрив; дані про внесення органічних добрив та їх оптимальну дозу; бал ґрунтового бонітету.

Блок радіаційного та водно-теплового режимів включає рівняння, що описують прихід на підстильну поверхню Землі сумарної сонячної радіації (1.1) і фотосинтетичної активної радіації (ФАР), яка надходить на верхню межу посіву (1.2) та поглинається листям (1.3):

$$Q^j = 12.66(S^j)^{1.31} + 315(\sinh_0^j)^{2.1}, \quad (1.1)$$

де S – тривалість сонячного сйива, год.; h_0 – полуденна висота Сонця.

$$I_0^j = \frac{0.5Q^j}{60\tau_g}, \quad (1.2)$$

де Q – сумарна сонячна радіація, $кал/(см^2/добу)$.

$$I^j = \frac{I_0^j}{1 + C * LAI}, \quad (1.3)$$

I_0^j – поглинання сонячної радіації, $кал/(см^2/хв.)$; $C = 0,5$ – емпірична постійна величина; LAI – площа листя, $м^2/м^2$.

Водний режим посівів соняшнику описується в моделі рівняннями водного балансу, сумарного випаровування (вологоспоживання рослин) і випарності (вологотребби рослин).

Так, зміни запасів вологи в ґрунті (W_{0-100}) по декадах визначається за рівнянням водного балансу

$$W^{j+1} = W^j + Q^j + X^j + V_w^j - E^j - U_w^j \quad (1.4)$$

де Q – сума опадів за декаду, мм; X – норма вегетаційного поливу, мм; V_w – витрати ґрунтових вод в зону аерації, мм; E – сумарне випаровування, мм; U_w – інфільтрація атмосферних опадів, мм;

Сумарне випаровування (вологоспоживання) визначається за формулою:

$$E^j = \frac{2W^j + Q^j + X^j + V_w^j}{1 + 2(W_{H.B.} - W_{B.3}) / \eta E^j} \quad (1.5)$$

де $W_{H.B.}$ – найменша вологеміність, мм; $W_{B.3.}$ – волога в'янення, мм;
 η – безрозмірний параметр, що залежить від виду та фази розвитку рослин.

Випарність визначається за допомогою середнього за декаду дефіциту вологості повітря d_w :

$$E_0^j = 0.65 d_w^j n^j \quad (1.6)$$

де n – число днів у розрахунковій декаді.

Блок функції впливу фази розвитку та метеорологічних факторів на продукційний процес рослин. В основі продукційного процесу рослин лежить фотосинтез. Його інтенсивність обумовлюється фазою розвитку рослин та умовами навколишнього середовища.

Для розрахунку онтогенетичної кривої фотосинтезу використовується формула виду

$$\alpha_\phi^j = \exp \left[-\alpha_\phi \cdot \left(\frac{TS_2 - \sum t_1}{10} \right)^2 \right] \quad (1.7)$$

в якій величина α_ϕ знаходиться за виразом

$$\alpha_\phi = \frac{-100(1n)\alpha_\phi^0}{(\sum t_1)^2} \quad (1.8)$$

де α_ϕ – онтогенетична крива фотосинтезу, від.од.; α_ϕ^0 – початок онтогенетичної кривої фотосинтезу, від. од.; $\sum t_1$ – сума ефективних температур при якій спостерігається максимальна інтенсивність фотосинтезу рослин, °C; TS_2 – сума ефективних температур, °C.

Функція впливу температури повітря на продукційний процес визначається з виразу:

$$\Psi_{\phi} = \begin{cases} 1.37 \cdot \sin(0.077 \cdot x_1^j), npu(t^j - t_0) < t_{opt1}^j \\ 1, nput_{opt1} \leq (t^j - t_0) \leq t_{opt2}^j \\ 1.13 \cdot \cos(1.570 \cdot x_2^j), npu(t^j - t_0) > t_{opt2}^j \end{cases} \quad (1.9)$$

де Ψ_{ϕ} – температурна крива фотосинтезу; t – середня декадна температура повітря, °C; t_0 – середня декадна температура повітря, при якій починається фотосинтез, °C; t_{opt1} – нижня границя температурного оптимуму для фотосинтезу, °C; t_{opt2} – верхня границя температурного оптимуму для фотосинтезу, °C.

Функція впливу вологості ґрунту на фотосинтез (γ_{ϕ}) визначається за формулою

$$\gamma_{\phi} = \begin{cases} -1.163 \cdot (x_4^j)^2 + 2.187 \cdot x_4^j, \\ npuW^j < W_{opt1}^j, 1, npuW_{opt1}^j \leq W^j \leq W_{opt2}^j, \\ -0.654 + 3.824 \cdot x_5^j - 2.633 \cdot (x_5^j)^2 + 0.467 \cdot (x_5^j)^3, \\ npuW^j > W_{opt2}^j \end{cases} \quad (1.10)$$

де W^j – запаси продуктивної води в метровому шарі ґрунту, мм; W_{opt1} – нижня границя оптимальних вологозапасів, мм; W_{opt2} – верхня границя оптимальних вологозапасів, мм.

Функція впливу вологозабезпеченості посівів розглядалася як поєднання двох функцій. Враховувалася функція впливу вологості ґрунту на продуктивність рослин та відношення сумарного випаровування посівів до випаровуваності:

$$FM = \left(\gamma_{\phi}^j \cdot \frac{E^j}{E_0} \right)^{0.5} \quad (1.11)$$

де FM – відносна вологозабезпеченість посівів.

Блок родючості ґрунту та забезпеченості рослин мінеральним живленням. Родючість ґрунту характеризується наявністю в ньому гумусу, зміст якого залежить від ступеня впливу ерозії ґрунту.

$$G_{um} = k_{er}^G \cdot G_{um} \quad (1.12)$$

$$F_{G_{um}} = \frac{G_{um}}{G_{um,opt}} \quad (1.13)$$

де G_{um} – наявність гумусу в ґрунті, %; G_{um} – наявність гумусу в ґрунті на схилах, з урахуванням ерозії, %; k_{er}^G – функція впливу ерозії ґрунту на наявність гумусу, від. од.; $G_{um,opt}$ – оптимальна для культури наявність гумусу в ґрунті, %.

Функція впливу наявності гумусу в ґрунті визначається за формулою

$$FM_{G_{um}} = (F_{G_{um}})^{1.35} \cdot \exp[1.1 \cdot (1 - F_{G_{um}})] \quad (1.14)$$

де $FM_{G_{um}}$ – функція впливу наявності гумусу в ґрунті на формування врожаю.

Вплив забезпечення елементами мінерального живлення на продукційний процес рослин визначається в моделі по принципу Лібіха з врахуванням функції забезпечення азотом K_N , фосфором K_P і калієм K_K :

$$K_{NPK} = \min \{K_N, K_P, K_K\}, \quad (1.15)$$

де K_{NPK} – коефіцієнт забезпечення рослин елементами живлення.

Значення функції оптимальності азотного, фосфорного та калійного живлення розраховується з рівнянь:

$$K_N = \left(\frac{N}{N_{opt}} \right)^{1.35} \ell^{1.1 \left(1 - \frac{N}{N_{opt}} \right)}, \quad (1.16)$$

$$K_P = \left(\frac{P}{P_{opt}} \right)^{1.35} \ell^{1.1 \left(1 - \frac{P}{P_{opt}} \right)}, \quad (1.17)$$

$$K_K = \left(\frac{K}{K_{opt}} \right)^{1.35} \ell^{1.1 \left(1 - \frac{K}{K_{opt}} \right)}, \quad (1.18)$$

де N, P, K – сумарна кількість N, P_2O_5, K_2O (внесених з добривами та вміщених в ґрунті), еквівалентна добриву, яке вживається, $кг/га$; $N_{opt}, P_{opt}, K_{opt}$ – оптимальна кількість N, P_2O_5, K_2O , необхідна для максимального врожаю, забезпеченого ресурсами світла, тепла та вологи, $кг/га$.

Сумарну кількість N , P_2O_5 , K_2O обчислюють, користуючись рівняннями:

$$\begin{cases} N = m_N N_n + N_M + m_{N_{o,d}} N_{o,d} \times 1000 \times m_{N_c} \times m_{N_{d,n}} \times m_{N_{pik}}, \\ P = m_P P_n + P_M + m_{P_{o,d}} P_{o,d} \times 1000 \times m_{P_c} \times m_{P_{d,n}} \times m_{P_{pik}}, \\ K = m_K K_n + K_M + m_{K_{o,d}} K_{o,d} \times 1000 \times m_{K_c} \times m_{K_{d,n}} \times m_{K_{pik}}, \end{cases} \quad (1.19)$$

де m_N , m_P , m_K – коефіцієнт еквівалентності легкогідролізованого азоту, рухливих фосфору та калію ґрунту, цим же елементам мінерального добрива; $m_{N_{o,d}}$, $m_{P_{o,d}}$, $m_{K_{o,d}}$ – коефіцієнти еквівалентності азоту, фосфору та калію органічних добрив; m_{N_c} , m_{P_c} , m_{K_c} – коефіцієнт співвідношення азоту, фосфору та калію до загальної норми внесеного органічного добрива; $m_{N_{d,n}}$, $m_{P_{d,n}}$, $m_{K_{d,n}}$ – коефіцієнт діючого початку азоту, фосфору та калію в рік внесення органічних добрив; $m_{N_{pik}}$, $m_{P_{pik}}$, $m_{K_{pik}}$ – порядковий номер року після внесення органічних добрив; N_n , P_n , K_n – легкогідролізований азот, рухливі фосфор і калій в рік проведення аналізу; N_M , P_M , K_M – азот, фосфор і калій мінеральних добрив, внесених у році одержання врожаю; $N_{o,d}$, $P_{o,d}$, $K_{o,d}$ – азот, фосфор і калій органічних добрив, внесених у році одержання врожаю.

Вплив режиму зволоження ґрунту на ефективність добрив розраховується за виразом:

$$k_{ef}^j = \begin{cases} 1, \text{при } W^j / W_{opt1}^j \geq 0.85 \\ 0.8, \text{при } 0.70 < W^j / W_{opt1}^j < 0.85 \\ 0.6, \text{при } W^j / W_{opt1}^j \leq 0.70 \end{cases}, \quad (1.20)$$

де k_{ef}^j – коефіцієнт ефективності добрив залежно від вологості ґрунту, від. од.

Блок агроекологічних категорій урожайності. В моделі розглянуті такі категорії урожайності: потенційна врожайність (ПУ) – урожайність сорту в ідеальних умовах, вона обумовлюється приходом ФАР та біологічними особливостями сільськогосподарських культур;

метеорологічно можлива врожайність (МВУ) – максимально можливий урожай сільськогосподарських культур за існуючих агрометеорологічних та оптимальних ґрунтових умов; дійсно можлива врожайність (ДВУ) – максимально можливий урожай сільськогосподарських культур у існуючих метеорологічних та ґрунтових умовах.

Збільшення потенційної врожайності за декаду визначається залежно від інтенсивності ФАР та біологічних особливостей культури з урахуванням зміни здатності рослин до фотосинтезу протягом вегетації:

$$\frac{\Delta PY^j}{\Delta t} = \alpha_\phi^j \frac{\eta \cdot Q_{\text{фар}}^j \cdot dv^j}{q}, \quad (1.21)$$

де $\frac{\Delta PY^j}{\Delta t}$ – приріст потенційної врожайності за декаду, г/м²; α_ϕ – онтогенетична крива фотосинтезу, від.од.; η – ККД посівів, %; $Q_{\text{фар}}$ – інтенсивність ФАР, кал/см²·добу; dv – число днів у розрахунковій декаді; q – калорійність, кДж/г; j – номер розрахункової декади.

Приріст метеорологічно можливої врожайності є приріст потенційної врожайності, який буде обмежений впливом волого-температурного режиму

$$\frac{\Delta MBV^j}{\Delta t} = \frac{\Delta PY^j}{\Delta t} \cdot FTW2, \quad (1.22)$$

де $\frac{\Delta MBV^j}{\Delta t}$ – приріст метеорологічної можливої врожайності, г/м²; $FTW2$ – узагальнена функція впливу волого-температурного режиму з корекцією на поєднання різних екстремальних умов.

Ця функція визначається за принципом Лібіха з урахуванням впливу температури повітря та умов зволоження на продукційний процес.

Формування дійсно можливої врожайності обмежується рівнем природної родючості ґрунту

$$\frac{\Delta DV^j}{\Delta t} = \frac{\Delta MBV^j}{\Delta t} \cdot B_{\text{III}} \cdot F_{G_{\text{um}}}, \quad (1.23)$$

де $\frac{\Delta DV^j}{\Delta t}$ – приріст справді можливої врожайності, г/м²;

B_{III} – бал ґрунтового бонітету.

2. Аналіз впливу змін клімату на агрокліматичні умови та врожайність соняшнику

На основі моделі виконані чисельні розрахунки агрокліматичних показників і показників формування врожаю соняшнику в Південному Степу України.

Аналіз отриманих розрахунків показав, що сіяти соняшник за фактичними середніми багаторічними даними починають на початку квітня, за сценаріями змін клімату RCP2.6 і RCP6.0 (табл. 1) сіятимуть раніше на 11–14 днів і трохи пізніше (на 4–5 днів) за сценаріями RCP4.5 і RCP8.5.

Прихід фотосинтетичної активної радіації за період сівба – збиральна стиглість за фактичними даними становить 146,6 кДж/см². За сценарієм RCP2.6 надходження ФАР на посіви соняшнику очікується на 8 % вище в порівнянні з фактичною середньою багаторічною. Це зумовить різницю у формуванні потенційного урожаю всієї сухої маси посівів. За фактичними середніми багаторічними умовами вона становить 127 ц/га, за сценарними даними вона буде на 7 % вище.

Середня температура повітря за період сівба – збиральна стиглість, яка за фактичними середніми багаторічними склала 18,2 °С, за сценарієм очікується на 1,0 °С вище.

Очікувана кількість опадів за кліматичним сценарієм RCP2.6 складе 84 % від фактичного середнього багаторічного. Це трохи погіршить умови вологозабезпечення, збільшить дефіцит вологи до 476 мм замість 373 мм, як наслідок знизиться відносна вологозабезпеченість посівів з 0,42 від.од. до 0,34 від.од. У той же час величина ГТК очікується рівною фактичній (табл. 1).

Водно-тепловий режим для теплолюбного і посухостійкого соняшнику сприятиме кілька більшого наростання площі листя (до цвітіння). У період цвітіння площа листя очікується 4,5 м²/м², після цвітіння вона буде трохи нижче фактичної середньої багаторічної (рис. 1а). Тому значення фотосинтетичного потенціалу не матимуть істотних відмінностей (99 % від фактичного середнього багаторічного).

Агрокліматичні умови за сценарієм RCP2.6 обумовлять трохи нижче рівень метеорологічно можливого урожаю в порівнянні з фактичним середнім багаторічним (57 ц/га проти 59 ц/га). Рівень дійсно можливого урожаю становитиме 97 % від фактичного середнього багаторічного.

Проте, врожайність надземної маси, яка становить 70 % від всієї сухої маси посіву, буде однаковою (табл. 1). Урожай насіння очікується трохи нижче (94 % від фактичного середнього багаторічного).

Таблиця 1

Показники формування урожаю соняшнику в Південному Степу України (за період сівба – збиральна стиглість)

Показники	Фактичний	Сценарії RCP			
		RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
	Кліматичний період				
	1980–2010 рр.	2021–2050 рр.			
<i>Агрокліматичні показники</i>					
Дата сівби	04.04	24.03	08.04	21.03	09.04
Середня температура повітря за період ($T_{\text{ср.}}$), °С	18,2	19,2	19,2	19,4	18,9
Сума опадів за період (R), мм	194	163	128	169	123
Сумарне випаровування за період (E), мм	266	248	177	260	180
Випаровуваність за період (E_0), мм	639	724	710	725	699
Відносна вологозабезпеченість (E/E_0), від. од.	0,42	0,34	0,25	0,36	0,26
Середній за період ГТК, від. од	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5
Сума ФАР, кДж/см ² за період	146,6	157,8	158,2	156,8	158,4
<i>Показники формування урожаю соняшнику</i>					
Потенційний урожай(ПУ), ц/га	127	136	137	136	137
Метеорологічно можливий урожай(ММУ), ц/га	59	57	52	58	52
Дійсно можливий урожай (ДМУ), ц/га	36	35	32	36	32
Фотосинтетичний потенціал, (ФП), м ² /м ² за період	273	270	275	268	271
Урожай соняшника при його вологості 14 %: Надземної маси, т/га	2,5	2,5	2,2	2,5	2,2
Маса насіння, т/га	1,7	1,6	1,4	1,6	1,4

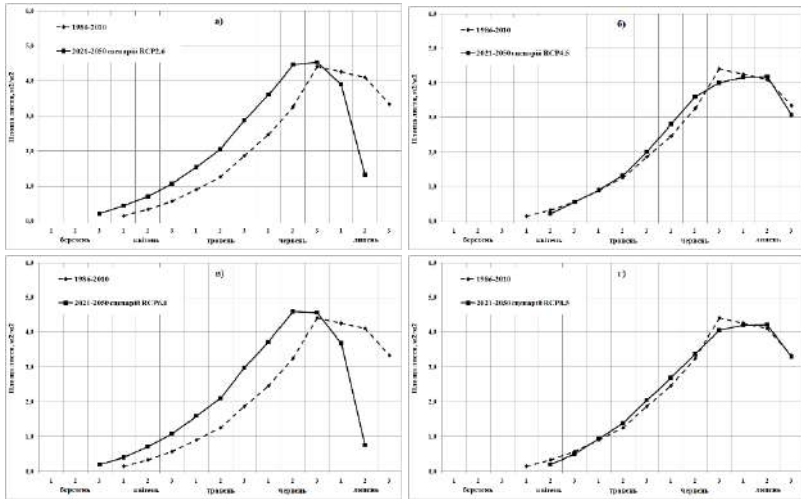


Рис. 1. Динаміка площі листя в період сівба – збиральна стиглість в порівнянні фактичних середніх багаторічних і сценарних розрахункових даних. Південний Степ

Прихід ФАР за сценарієм RCP4.5 за період посів – збиральна стиглість також як і за сценарієм RCP2.6 очікується на 8 % вище в порівнянні з фактичною середньою багаторічною. Це означає, що потенційний урожай буде вище фактичного на 8 %, і буде дорівнювати урожаю, який очікується за сценарієм RCP2.6 (табл. 1).

Середня температура за період сівба – збиральна стиглість в порівнянні з фактичною очікується так само вище на 1,0 °C і буде дорівнювати середній температурі за сценарієм RCP2.6 (табл. 1).

Сума опадів за період від посіву до збиральної стиглості очікується значно менше (66 % від фактичної величини). Значне зниження опадів, збільшить випаровування, і тим самим збільшить дефіцит вологи до 533 мм, що послужить причиною низької вологозабезпеченості до 0,25 від.од. замість 0,42 від.од. Гідротермічний коефіцієнт складатиме 83 % від фактичного середнього багаторічного.

Умови забезпеченості посівів вологою за сценарієм RCP4.5 в порівнянні з умовами за сценарієм RCP2.6 будуть також більш посушливими. Вологозабезпеченість складатиме 74 % від її величини.

Динаміка площі листя за сценарієм RCP4.5 (рис. 1б) буде схожою з динамікою площі листя за фактичними середніми багаторічними даними, але рівень буде трохи нижче. Якщо в період цвітіння при середніх багаторічних умовах площа листя становить 4,4 м²/м², то за

сценарієм вона очікується $4,2 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Нижче він буде і в порівнянні з рівнем площі листя за сценарієм RCP2.6 ($4,2 \text{ м}^2/\text{м}^2$ проти $4,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$).

Фотосинтетичний потенціал посівів буде на рівні фактичного середнього багаторічного і фотосинтетичного потенціалу за сценарієм RCP2.6 (табл. 1).

В даних агрокліматичних умовах фотосинтетичної діяльності посівів метеорологічно можлива урожайність становитиме 88 % від фактичної середнього багаторічної і 91 % від ММУ за сценарієм RCP2.6. Дійсно можлива урожайність всієї сухої маси посівів очікується на рівні 32 ц/га (89 % від фактичних даних і 91 % від сценарних RCP2.6).

При таких агрокліматичних умовах урожай надземної маси посівів становитиме 88 % як від фактичного середнього багаторічного, так і від урожаю за сценарієм RCP2.6. Урожай насіння за сценарієм RCP4.5 очікується 1,4 т/га. Це нижче в порівнянні з фактичним урожаем на 0,3 т/га і за сценарієм RCP2.6 на 0,2 т/га.

Прихід фотосинтетичної радіації за сценарієм RCP6.0 за період сівба збиральна стиглість очікується дещо більше фактичної (на 7 %). Це зумовить збільшення потенційного урожаю всієї сухої маси посівів з 127 ц/га до 136 ц/га.

Кількість очікуваної фотосинтетичний активній радіації за сценарієм RCP6.0 буде близькою за величиною ФАР попередніх двох сценаріїв (99 %). Тому потенційна врожайність за всіма трьома сценаріями не буде особливо відрізнятися (табл. 1).

Температурний режим за період від посіву до збиральної стиглості буде підвищеним в порівнянні з фактичним (на $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$), трохи вище він буде і в порівнянні з температурним режимом попередніх двох сценаріїв (на $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$).

Кількість опадів за період сівба – збиральна стиглість очікується менше в порівнянні з фактичною середньою багаторічною (на 87 %), так само як і за попередніми сценаріями. Це збільшить дефіцит вологи на 465 мм замість 373 мм, одночасно знизиться відносна вологозабезпеченість посівів з 0,42 від. од. до 0,36 від. од. Разом з тим, величина ГТК буде такою, як фактична середня багаторічна. Слід зазначити, що вологозабезпеченість за сценарієм RCP6.0 буде схожою з величиною за сценарієм RCP2.6 і вище на 44 % величини за сценарієм RCP4.5.

У той же час такий водно-тепловий режим сприятиме формуванню кілька більшої площі листя (рис. 1в). У період цвітіння площа листя в порівнянні з фактичною середньою багаторічною збільшиться з $4,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$ до $4,6 \text{ м}^2/\text{м}^2$. У порівнянні з величинами двох попередніх сценаріїв за сценарієм RCP6.0 рівень площі листя теж очікується трохи вище.

Фотосинтетичний потенціал посівів буде близьким до величини фактичного середнього багаторічного (98%). Не суттєвою буде відмінність з сценарними даними RCP2.6 і RCP4.5 (табл. 1).

При таких агрокліматичних умовах фотосинтетичної діяльності посівів рівень ММУ становитиме 58 ц/га (98% від фактичної), а ДВУ 36 ц/га (100% фактичної) всієї сухої рослинної маси, тобто буде домірним до рівня врожайності при фактичних умовах.

Урожайність надземної маси, яка становить 70% від всієї сухої маси посіву, буде рівною фактичній і за сценарієм RCP2.6. У порівнянні з урожаєм за сценарієм RCP4.5 його величина буде вище на 14% (табл. 1). Урожай насіння очікується трохи нижче фактичного (94%) і домірним з величиною за сценарними даними RCP2.6. У порівнянні з урожаєм по сценарним даним RCP4.5 він буде вище (1,6 т/га проти 1,4 т/га).

За кліматичним сценарієм RCP8.5 за вегетаційний період сівба – збиральна стиглість в порівнянні з приходом фактичної сонячною радіації, як і за трьома попередніми сценаріями, очікується збільшення ФАР (до 8%). Збільшення ФАР обумовить збільшення потенційної урожайності посівів (на 10 ц/га від фактичної середньої багаторічної).

Слід зазначити, що очікувана однакова за всіма чотирма сценаріями кількість фотосинтетичної активної радіації (табл.1), зумовить однаковий потенційний урожай всієї рослинної маси посівів.

Середня за період вегетації температура повітря за сценарієм RCP8.5 буде на 0,7 °С вище фактичної середньої багаторічної і на 0,3–0,5 °С нижче в порівнянні з сценарними величинами RCP2.6, RCP4.5 і RCP6.0.

За кліматичним сценарієм RCP8.5 очікується зниження опадів за період сівба – збиральна стиглість (на 38% від фактичних середніх багаторічних). Це погіршить умови забезпечення рослин вологою, зросте дефіцит вологи з 373 мм до 519 мм, знову ж знизиться вологозабезпеченість посівів (до 62% від фактичної середньої багаторічної). Зменшиться ГТК до 0,5 від. од.

Умови вологозабезпеченості посівів будуть схожими з сценарними умовами RCP4.5 (табл.1). У порівнянні з умовами забезпеченості рослин вологою за сценаріями RCP2.6, і RCP6.0 вони будуть гірше. Очікувані опади будуть на 25–28% менше, тому відносна вологозабезпеченість зменшиться майже на третину.

Як і за сценарієм RCP4.5 динаміка площі листя за сценарієм RCP8.5 буде схожою з динамікою площі листя за фактичними середніми багаторічними даними, але рівень буде трохи нижче (рис. 1г). Якщо в період цвітіння при середніх багаторічних умовах площа листя становить $4,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$, то за сценарієм вона очікується $4,2 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Трохи нижче вона буде і в порівнянні з рівнем площі листя за сценаріями RCP2.6 і RCP6.0 (4,2 м²/м² проти 4,5–4,6 м²/м²).

Фотосинтетичний потенціал посівів буде на рівні фактичного середнього багаторічного і складатиме 271 м²/м². У той же час він буде близьким за величиною до сценарних даних RCP2.6, RCP6.0 і RCP4.5 (табл. 1).

Погіршення вологозабезпечення посівів зумовить знижений рівень метеорологічно можливої урожайності всієї сухої маси в порівнянні зі фактичною (88 %). Рівень дійсно можливого урожаю становитиме 89 % від фактичного середнього багаторічного. Трохи нижче ММУ буде в порівнянні з сценарними величинами RCP2.6 і RCP6.0 (52 ц/га проти 57–58 ц/га) і співрозмірною з рівнем ММУ за сценарієм RCP4.5. Так само як і ММУ дійсно можлива урожайність буде нижче на 3–4 ц/га в порівнянні з сценарними даними RCP2.6, RCP6.0 і точно такий, як за сценарієм RCP4.5.

Урожай надземної маси в агрокліматичних умовах сценарію RCP8.5 (табл.1) очікується нижче (88 % від фактичного середнього багаторічного), нижче буде і урожай насіння (1,4 т/га проти 1,7 т/га). У порівнянні з урожайністю за сценаріями RCP2.6, RCP6.0 він буде нижче (надземної маси на 0,3 т/га, насіння на 0,2 т / га). Урожай надземної маси і насіння за сценаріями RCP8.5 і RCP4.5 будуть рівними за величиною (2,2 т / га і 1,4 т / га).

ВИСНОВКИ

В ході досліджень встановлено, що в Південному Степу за всіма сценаріями збільшуватиметься прихід фотосинтетичної активної радіації (156,8–158,4 кДж/см² проти 146,6 кДж/см²), тому зростатиме потенційний урожай (136–137 ц/га проти 127 ц/га). Але очікуване підвищення температурного режиму за всіма сценаріями (18,9–19,4 °С проти 18,2 °С) і зменшення кількості опадів, особливо за сценарієм RCP8.5 (123 мм проти 194 мм) приводитимуть до збільшення дефіциту вологоспоживання рослинами (465–533 мм проти 373мм).

Слід зазначити, що в даний час в Південному Степу спостерігаються посушливі умови (ГТК дорівнює 0,6), за сценаріями RCP2.6 і RCP6.0 вони зберігатимуться, а за сценаріями RCP8.5 і RCP4.5 будуть посилюватися (ГТК →0,5). Тому за першими двома сценаріями метеорологічно і дійсно можливі врожаї очікуватимуться на рівні фактичних, а за двома останніми зменшуватимуться. За всіма сценаріями врожай насіння соняшника дорівнюватиме 1,4–1,6 т/га, при потенційній врожайності посухостійких сортів 4–5 т/га.

Таким чином, у разі реалізації будь-якого з розглянутих сценаріїв, на Півдні України спостерігатиметься посилення посушливості клімату, що сприятиме зниженню врожаю соняшникового насіння. З метою отримання високих сталих валових зборів насіння соняшнику в майбутньому, необхідно вже в даний час переглянути технології вирощування даної культури в Південному Степу з урахуванням агротехнічних і меліоративних заходів, що спрямовані на збереження вологи в ґрунті та поповнення її в період вегетації.

АНОТАЦІЯ

Глобальні зміни клімату формують нові умови для всіх галузей світової та української економіки, включно з сільським господарством. З їх впливом пов'язані агрокліматичні умови вирощування сільськогосподарських культур, зокрема, соняшнику. Необхідність оцінити ці умови є актуальною, тому що вони вкрай важливі при врахуванні потенційної адаптації соняшника до кліматичних змін та рентабельності його вирощування в окремих природно-кліматичних зонах України.

Метою цього дослідження було виявити ступінь впливу кліматичних змін на врожайність культури соняшнику в Південному Степу України.

Для оцінки впливу змін клімату на врожайність соняшнику використовуються сучасні сценарії RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5. Дані чотири RCP містять один сценарій зменшення викидів, який передбачає низький рівень впливу (RCP2.6); два сценарії стабілізації (RCP4.5 і RCP6.0) і сценарій з дуже високими рівнями викидів парникових газів (RCP8.5). За сценаріями досліджено кліматичний період з 2021 по 2050 роки. Для порівняльного аналізу сценарних кліматичних значень за минулими даними взято період із 1980 по 2010 роки. Дослідження формування врожайності соняшника проводилося з використанням математичної моделі оцінки агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур, модифікованої та адаптованої до культури соняшника. В роботі використовуються основні агрокліматичні характеристики: фотосинтетична активна радіація, середня температура повітря, сума опадів, середній за період ГТК, сумарне випаровування та випаровуваність, вологозабезпеченість. Моделюється вплив агрокліматичних умов на основні показники продуктивності: площу листя, фотосинтетичний потенціал, суху біомасу, врожайність надземної та підземної маси рослин, врожайність насіння соняшника.

В ході досліджень встановлено, що в Південному Степу за всіма сценаріями збільшуватиметься прихід фотосинтетичної активної

радіації (156,8–158,4 кДж/см² проти 146,6 кДж/см²), тому зростатиме потенційний урожай (136...137 ц/га проти 127 ц/га). Але очікуване підвищення температурного режиму за всіма сценаріями (18,9...19,4 °С проти 18,2 °С) і зменшення кількості опадів, особливо за сценарієм RCP8.5 (123 мм проти 194 мм) приводитимуть до збільшення дефіциту вологоспоживання рослинами (465–533 мм проти 373мм).

Слід зазначити, що в даний час в Південному Степу спостерігаються посушливі умови (ГТК дорівнює 0,6), за сценаріями RCP2.6 і RCP6.0 вони зберігатимуться, а за сценаріями RCP8.5 і RCP4.5 будуть посилюватися (ГТК→0,5). Тому за першими двома сценаріями метеорологічно і дійсно можливі врожаї очікуватимуться на рівні фактичних, а за двома останніми зменшуватимуться. За всіма сценаріями врожаєм насіння соняшника дорівнюватиме 1,4–1,6 т/га, при потенційній врожайності посухостійких сортів 4–5 т/га.

Отже, у разі реалізації будь-якого з розглянутих сценаріїв, на Півдні України спостерігатиметься посилення посушливості клімату, що сприятиме зниженню врожаю соняшникового насіння. З метою збереження північних площ соняшнику і отримання високих сталих валових зборів насіння соняшнику в майбутньому, необхідно вже в даний час переглянути технологію вирощування даної культури в Південному Степу з урахуванням агротехнічних і меліоративних заходів, що спрямовані на збереження вологи в ґрунті та поповнення її в період вегетації.

Література

1. Brouziyne Y., Abouabdillah A., Hirich A., Bouabid R et al. Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. *Agricultural Systems*. 2018. Vol. 162. P. 154–163. doi.org/10.1016/j.agry.2018.01.024.
2. Тараріко О. Г., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л. Вплив змін клімату на продуктивність та валові збори зернових культур: аналіз та прогноз. *Український географічний журнал*. 2016. Вип. 1. С. 14–22. DOI: 10.15407/ugz2016.01.014.
3. Польовий В. М., Лукашук Л. Я., Лук'яник М. М. Вплив змін клімату на розвиток рослинництва в умовах Західного регіону. *Вісник аграрної науки*. 2019. Вип. 9 (798). С. 29–34. DOI: doi.org/10.31073/agrovisnyk201909-04.
4. Жигайло О. Л., Вольвач О. В., Толмачова А. В., Костюкевич Т. К. Вплив змін клімату на урожайність соняшнику в Північному Степу України: аналіз і прогноз. *Вісник Полтавської державної академії*. 2021. № 1. С. 180–186. DOI: 10.31210/visnyk2021.01.22.

5. Лопотан Л. В., Казанджі А. В. Порівняльна оцінка виробництва насіння соняшнику в Україні та Одеській області як складової сировинної бази олійно-жирового підкомплексу АПК. *Агросвіт*. Вид-во ТОВ «ДКС-центр». 2015. № 10. С 36–40.

6. Polevoj, A. N. Bazovaya model ocenki agroklimaticheskikh resursov formirovaniya produktivnosti selskohozyajstvennykh kultur. *Meteorologiya, klimatologiya i gidrologiya*. 2004, No 48, P. 195–205.

7. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату : монографія / за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового. Одеса : ТЕС, 2018. С. 259–497.

Information about the authors:

Vozhehova Rayisa Anatoliivna,

Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
Academician of National Academy of Sciences,
Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy
of Agrarian Sciences of Ukraine,
24, Maiatska doroha str., Khibodarske, Odesa region, 67667, Ukraine

Zhygailo Taras Serhiiovych,

Candidate of Agricultural Sciences,
Doctoral Student at the Department of Climate-Oriented
Agricultural Technologies,
Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy
of Agrarian Sciences of Ukraine,
24, Maiatska doroha str., Khibodarske, Odesa region, 67667, Ukraine

Zhygailo Olena Leonidivna,

Candidate of Geographical Sciences
Associate Professor at the Department
of Agrometeorology and Agroecology,
Odessa State Environmental University,
15, Lvivska str., Odesa, 65016, Ukraine