

АГРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ УРОЖАЮ СОЧЕВИЦІ В ЗАХІДНІЙ УКРАЇНІ ПРИ ЗМІНІ КЛІМАТУ

Ярмуш С.Х.¹, Польовий А.М.¹, Барсукова О.А.^{1,2}

¹Одеський національний університет імені І.І. Мечнікова
вул. Львівська, 15, 65016, м. Одеса

²Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства Національної академії аграрних наук
вул. Маяцька дорога, 24, 67667, смт. Хлібодарське
apolevoy@te.net.ua, lena5933@ukr.net

Мета дослідження адаптувати базову модель оцінки агрокліматичних ресурсів для формування продуктивності сільсько-господарських культур поля до біологічних особливостей культури сочевиці. Модель заснована на концепції максимальної продуктивності рослин Х.Г. Тоомінга та результатах моделювання формування урожаю рослин А.М. Польового. Моделюються чотири агроекологічних рівня урожайності: потенційна, метеорологічно-можлива, дійсно можлива та урожайність у виробництві. Потенційна урожайність загальної біомаси визначається в залежності від інтенсивності фотосинтетично активної радіації (ФАР) і біологічних особливостей культури. Метеорологічно-можлива урожайність являє собою потенційну урожайність, яка буде обмежена впливом волого-температурного режиму. Формування дійсно можливої урожайності обмежується рівнем природної родючості ґрунту. Одержання рівня господарської урожайності загальної біомаси обмежується реально існуючим рівнем культури землеробства. На цій основі виконано оцінку агроекологічних умов формування урожаю сочевиці в Західній Україні (на прикладі Тернопільської області) в сучасних умовах та в умовах майбутніх змін клімату. Оцінка проведена шляхом порівняння агрокліматичних умов сучасного періоду (1991–2020 рр.) та при реалізації сценаріїв зміни клімату RCP 4.5 та RCP 8.5 на період 2021–2050 рр. Встановлено, що зменшення сумарного надходження ФАР (на 17–19%) та зниження температури повітря (на 0,7–0,8°C) протягом вегетації сільськогосподарських культур призведе до збільшення тривалості вегетаційного періоду. Порівняння агроекологічних рівнів урожайності в сучасних умовах та в умовах майбутніх змін клімату показало, що при реалізації сценарних кліматичних умов відбудеться зниження рівня врожайності (на 17,8%), а урожайність квасолі зменшиться на 2,6–2,7 ц га-1. Допускається використання більш урожайних сортів сочевиці з більшою продуктивністю. Підвищити врожайність сочевиці в умовах зміни клімату до 15–17 ц га-1. *Ключові слова:* сочевиця, модель, клімат, ФАР, температура повітря, урожайність.

Agroclimatic conditions of lentil crop formation in Western Ukraine under climate change. Yarmush S., Polevoy A., Barsukova E.

The purpose of the study is to adapt the basic model of agroclimatic resources assessment for the formation of the productivity of field crops to the biological characteristics of the lentil crop. The model is based on the concept of maximum plant productivity by H.G. Tooming and the results of modeling the formation of plant yields by A.M. Polevoy. Four agroecological levels of yield are modeled: potential, meteorologically feasible, actually possible, and yield in production. The potential yield of total biomass is determined depending on the intensity of photosynthetically active radiation (PAR) and the biological characteristics of the crop. Meteorologically possible yield is a potential yield that will be limited by the influence of the moisture-temperature regime. The formation of actually possible yield is limited by the level of natural soil fertility. Obtaining the level of economic yield of total biomass is limited by the actually existing level of agricultural culture. On this basis, an assessment of the agroecological conditions for the formation of the lentil crop in Western Ukraine (using the example of Ternopil region) was carried out under current conditions and under conditions of future climate change. The assessment was carried out by comparing the agroclimatic conditions of the current period (1991–2020) and under the implementation of the RCP 4.5 and RCP 8.5 climate change scenarios for the period 2021–2050. It was established that a decrease in the total PAR input (by 17–19%) and a decrease in air temperature (by 0.7–0.8 °C) during the growing season of agricultural crops will lead to an increase in the duration of the growing season. A comparison of agroecological levels of yield under current conditions and under conditions of future climate change showed that under the implementation of the scenario climate conditions, the yield level will decrease (by 17.8%), and the yield of beans will decrease by 2.6–2.7 c ha-1. It is allowed to use more productive varieties of lentils with higher productivity. Increase the yield of lentils in conditions of climate change to 15–17 c ha-1. *Key words:* lentils, model, climate, PAR, air temperature, yield.

Постановка проблеми. Сочевиця (*Lens culinaris* Medik), одна з найпоширеніших бобових культур у світі, вирощується на 4,34 мільйона гектарів землі та виробляє 4,95 мільйона тонн бобових щорічно (Dikshit et al., 2015). Основні райони вирощування сочевиці у світі стикаються з різними біотичними та абіотичними стресами, які обмежують ріст рослин і, зрештою, обмежують урожай стручків.

У країнах Західної Європи ця рослина завжди була ціною продовольчої культури. В Україні

ж про неї на деякий час забули, але сьогодні вона знову набирає популярності. Завдяки деяким цінним властивостям сочевиця має перевагу над іншими культурами. Насамперед це білок, який засвоюється організмом людини значно легше, ніж білок інших рослин. За його вмістом (20–36% залежно від сорту) сочевиця знаходиться на другому місці після сої (32–40%). Крім того, сочевиця є відмінним попередником у польових сівозмінах. Однією з причин цього є її здатність до симбіотичної фіксації азоту

з повітря, завдяки чому можна істотно скоротити норми внесення мінеральних добрив.

Ця культура має і лікарські властивості. Використання борошна, пророщеного насіння, сухого екстракту з трави, відварів та водних настоїв з сочевиці сприяє лікуванню низки хвороб. У деяких країнах її навіть відносять до лікарських.

З агротехнічного погляду сочевиця характеризується досить високою посухо- й холодостійкістю і добре пристосована до умов помірного клімату. Краще переносить посуху, ніж інші бобові культури. Завдяки здатності до фіксації атмосферного азоту поліпшує родючість ґрунту, сприяючи підвищенню врожайності інших культур сівозміни. Насіння сочевиці містить значну кількість цінного білка, багате на амінокислоти, вітаміни та мікроелементи, що робить її незамінним продуктом харчування, особливо у вегетаріанських дієтах [1, 2].

Сьогодні, незважаючи на очевидну цінність сочевиці та багаторічні наукові дослідження, урожайність її поки що залишається на досить низькому рівні. Технологія вирощування сочевиці в Україні не в достатній мірі розроблена та представлена як така, що спрямована на максимальну реалізацію біологічного потенціалу культури. Адже під час вибору елементів технології виробничники переважно покладаються на промислові складові технологій вирощування інших зернобобових культур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сочевицю бобових культур (*Lens culinaris* Medik.) часто вирощують у сівозміні, щоб забезпечити переваги азоту (N) і води для наступних культур. Урожайність сочевиці сильно залежить від факторів навколишнього середовища та методів управління. Надійна модель врожаю сочевиці може допомогти в оцінці впливу методів управління для пом'якшення екологічного стресу та максимізації врожайності сочевиці. Однак небагато моделей культур імітують розвиток і ріст сочевиці.

У роботі [3] стосовно кліматичних умов Канади адаптували модель CSM-CROPGRO в Системі підтримки прийняття рішень щодо трансферу агротехнологій для моделювання розвитку та росту сочевиці на основі даних, зібраних у шести експериментах, проведених у всьому світі з 2001 по 2021 рік. Початкові значення параметрів, отримані з бобів (*Vicia faba* L.), були змінені на основі повідомленої інформації та аналізу спостережених даних. Ці значення були точно налаштовані, щоб мінімізувати розбіжності між змодельованими та спостережуваними атрибутами культури. Модель імітувала надземну біомасу з нормалізованою середньоквадратичною помилкою ($\leq 23\%$). Урожайність насіння загалом була добре змодельована в експериментах у калібруванні та валідації ($nRMSE = 19\%$) наборів даних, за винятком переоцінки у вологому середовищі Квебеку в Канаді, що могло бути наслідком надмірного вегетативного росту. Механізми, що

лежать в основі надмірного вегетативного росту, потребують подальшого вивчення та включення в модель для оцінки адаптивності сочевиці до певних регіонів. Загалом модель CSM-CROPGRO-Lentil готова для моделювання виробництва сочевиці за різними сценаріями, які можуть визначити шляхи підвищення продуктивності та стійкості систем землеробства, які включають сочевицю.

В роботі [4] Модель APSIM-lentil вперше була детально параметризована для покращення прогнозування моделі. Параметризували властивості рослин для невикористаних сортів сочевиці для моделі сочевиці APSIM у фенології, біомасі та врожайності насіння. Використаний поетапний процес параметризації забезпечив надійні специфічні коефіцієнти сорту, які підходять для ширших досліджень ідеотипів за допомогою моделі APSIM-lentil. Поетапний процес вимагав початкового вимірювання води в ґрунті на експериментальних ділянках із використанням найближчих параметрів APSOIL. Загалом, модель сочевиці APSIM показала хороші результати у прогнозуванні фенології, врожайності насіння та біомаси, і модель повинна бути застосована до інших типів ґрунтів Південно-Східної Австралії та, можливо, інших подібних середовищ. Краще розуміння синергії ідеотипу та агрономічної практики за допомогою моделювання культур допомогло визначити високий потенціал урожайності культур сочевиці в конкретних умовах.

Сочевицю вирощують у районах, де стикаються з багатьма екологічними обмеженнями від низької доступності вологи та високих температур до зимових холодів на високих висотах. Використання відповідної та надійної моделі врожаю може запропонувати механістичну базу для дослідження та екстраполяції впливу певної властивості рослини чи управління врожаєм у різних середовищах. В роботі [5] представлено використання загальної моделі SSM-Legumes для розробки простої та прозорої моделі сочевиці. Показано, що модель SSM-Legumes має потужну прогностичну здатність оцінювати варіації у фенологічному розвитку та врожайності сочевиці в трьох місцях на Близькому Сході (Ліван і Сирія) із великою різницею в кількості опадів. Узгодженість між змодельованими та спостережуваними днями до цвітіння або зрілості та врожайністю показала надійність моделі в прогнозуванні росту та врожайності сочевиці. Включення в SSM-бобові підмоделі, яка дозволяє більш реалістично обчислювати виживання культур за дуже низького вмісту води в ґрунті, що призводить до більш реалістичних прогнозів росту та врожайності сочевиці. Використання моделі для тестування потенціалу збільшення врожайності сочевиці шляхом утримання поживних залишків на поверхні ґрунту для зменшення випаровування ґрунту. Результати показали підвищення врожайності до 25% у всіх трьох місцях завдяки збереженню залишків попередніх культур.

Мета та методи дослідження. Мета дослідження полягає в адаптації базової моделі оцінки агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур Польового [6] до біологічних особливостей культури сочевиці та на цій основі оцінці агроєкологічних умов формування урожаю чечевиці в Західній Україні (на прикладі Тернопільської області) при зміні клімату, оцінці агроєкологічних рівнів урожайності в сучасних умовах та в умовах майбутніх змін клімату, порівнянні цих величин.

В основу дослідження покладено матеріали агрометеорологічних спостережень за період 1991–2020 рр. та сценарій зміни клімату RCP 4.5 та RCP 8.5 на період 2021–2050 рр. [7].

Базова модель оцінки агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур заснована на концепції максимальної продуктивності рослин Х.Г. Тоомінга [8] та результатах моделювання формування урожаю рослин А.М. Польового [7].

Розглянемо більш докладно блок агроєкологічних категорій урожайності.

Збільшення потенційної урожайності загальної біомаси за декаду визначається в залежності від інтенсивності фотосинтетично активної радіації (ФАР) і біологічних особливостей культури з врахуванням зміни здатності рослин до фотосинтезу протягом вегетації

$$\frac{\Delta PY^j}{\Delta t} = \alpha_\phi^j \frac{\eta \cdot Q_{\text{фар}}^j \cdot k_{\text{екс}}^j \cdot dv^j}{q}, \quad (1)$$

де $\frac{\Delta PY}{\Delta t}$ – приріст потенційної урожайності загальної біомаси за декаду, г/м²;

α_ϕ – онтогенетична крива фотосинтезу, відн. од.;

η – ККД посівів, відн. од.;

$Q_{\text{фар}}$ – середньодекадна за добу сума ФАР, кал/см² доба;

$k_{\text{екс}}^j$ – коефіцієнт для перерахування середньої за декаду сумарної сонячної радіації з горизонтальної поверхні для схилів різної експозиції і крутості, відн. од.;

q – калорійність.

В основі продукційного процесу рослин лежить фотосинтез. Його інтенсивність обумовлюється фазою розвитку рослин і умовами навколишнього середовища. Для розрахунку онтогенетичної кривої фотосинтезу використовується формула

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

де величина α_ϕ знаходиться за виразом

$$\alpha_\phi = \frac{-100 \cdot \ln \alpha_\phi^0}{(\Sigma t_1)^2}, \quad (3)$$

де α_ϕ – онтогенетична крива фотосинтезу, відн. од.;

α_ϕ^0 – початкове значення онтогенетичної кривої фотосинтезу, відн. од.;

Σt_1 – сума ефективних температур повітря від сходів, при якій спостерігається максимальна інтенсивність фотосинтезу рослин, °С;

TS_2 – сума ефективних температур, °С.

Приріст метеорологічно-можливої урожайності загальної біомаси являє собою приріст потенційної урожайності, який буде обмежений впливом волого-температурного режиму:

$$\frac{\Delta MMU^j}{\Delta t} = \frac{\Delta PY^j}{\Delta t} \cdot FTW_2, \quad (4)$$

де $\frac{\Delta MMU}{\Delta t}$ – приріст метеорологічно-можливої урожайності загальної біомаси за декаду, г/м²;

FTW_2 – узагальнена функція впливу волого-температурного режиму з корекцією на сполучення різних екстремальних умов, відн. од.

Функція впливу температури повітря на продукційний процес рослин визначається як

$$\psi_\phi = \begin{cases} 13,7 \cdot \sin(0,077 \cdot x_1^j) & \text{при } (T^j - T_\phi) < T_{\text{opt1}}^j, \\ 1 & \text{при } T_{\text{opt1}}^j \leq (T^j - T_\phi) \leq T_{\text{opt2}}^j, \\ 1,13 \cdot \cos(1,570 \cdot x_2^j) & \text{при } (T^j - T_\phi) > T_{\text{opt2}}^j, \end{cases} \quad (5)$$

де ψ_ϕ – температурна крива фотосинтезу, відн. од.;

T – середньодекадна температура повітря, °С;

T_ϕ – середньодекадна температура повітря, при якій починається фотосинтез, °С;

T_{opt1} – нижня межа температурного оптимуму для фотосинтезу, °С;

T_{opt2} – верхня межа температурного оптимуму для фотосинтезу, °С.

У рівнянні (5) проміжні величини знаходяться за формулами

$$x_1^j = (T_s^j \cdot k_{\text{екс}}^T - T_\phi) / (T_{\text{opt1}}^j - T_\phi), \quad (6)$$

$$x_2^j = (T_s^j \cdot k_{\text{екс}}^T - T_{\text{opt2}}^j) / (T_{\text{max}} - T_{\text{opt2}}^j), \quad (7)$$

де T_{max} – середньодекадна температура повітря, при якій припиняється фотосинтез, °С;

T_s – температура повітря на горизонтальній поверхні, °С;

$k_{\text{екс}}^T$ – коефіцієнт для перерахування температури повітря на схилі.

Значення нижньої і верхньої межі температурного оптимуму для фотосинтезу визначаються як функції часу.

Функція впливу вологості ґрунту на фотосинтез γ_ϕ знаходиться як

$$\gamma_\phi = \begin{cases} -1,163 \cdot (x_3^j)^2 + 2,187 \cdot x_3^j & \text{при } W^j \cdot k_{\text{екс}}^W < W_{\text{opt1}}^j, \\ 1 & \text{при } W_{\text{opt1}}^j \leq W^j \cdot k_{\text{екс}}^W \leq W_{\text{opt2}}^j, \\ -0,654 + 3,824 \cdot x_4^j - 2,633 \cdot (x_4^j)^2 + 0,467 \cdot (x_4^j)^3 & \text{при } W^j \cdot k_{\text{екс}}^W > W_{\text{opt2}}^j, \end{cases} \quad (9)$$

де W – запаси продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту, мм;

W_{opt1} – нижня межа оптимальних запасів вологи, мм;

W_{opt2} – верхня межа оптимальних запасів вологи, мм.

$$x_3^j = W^j \cdot k_{eks}^W / W_{opt1}^j, \quad (10)$$

$$x_4^j = W^j \cdot k_{eks}^W / W_{opt2}^j, \quad (11)$$

де k_{eks}^W – коефіцієнт для перерахування запасів вологи на схилі, відн. од.

Функція впливу вологозабезпеченості посівів розглядається як сполучення двох функцій. Враховується функція впливу вологості ґрунту на продуктивність рослин (за даними про фактичні запаси вологи) і відношення сумарного випаровування посівів до випаровуваності з врахуванням експозиції і крутості схилів:

$$FW = \left(\gamma_\phi^j \cdot \frac{E_{eks}^j}{E_{0\ eks}^j} \right)^{0,5}, \quad (12)$$

де FW – відносна вологозабезпеченість посівів, відн. од.

Аналогічно визначається узагальнена функція впливу термічного режиму і вологозабезпеченості FTW_1 на фотосинтез:

$$FTW_1 = (\psi_\phi FW)^{0,5}. \quad (13)$$

До цієї функції вводиться корекція на рівень температури в сполученні з вологозабезпеченістю

$$FTW_2 = \begin{cases} FTW_1[1 + (1 - \Psi_\phi)(1 - FW)] & \text{при } t_n < t_{opt1} \\ FTW_1 & \text{при } t_{opt1} \leq t_n \leq t_{opt2} \\ FTW_1[1 - (1 - \Psi_\phi)(1 - FW)] & \text{при } t_n > t_{opt2} \end{cases}. \quad (14)$$

Формування дійсно можливої урожайності загальної біомаси обмежується рівнем природної родючості ґрунту:

$$\frac{\Delta DMU^j}{\Delta t} = \frac{\Delta MMU^j}{\Delta t} B_{nl} F_{Gum}, \quad (15)$$

де $\frac{\Delta DMU}{\Delta t}$ – приріст дійсно можливої урожайності загальної біомаси за декаду, г/м²;

B_{nl} – бал ґрунтового бонітету, відн. од.

Одержання рівня господарської урожайності загальної біомаси обмежується реально існуючим рівнем культури землеробства й ефективністю внесених мінеральних і органічних добрив:

$$\frac{\Delta UB^j}{\Delta t} = \frac{\Delta DMU^j}{\Delta t} k_{земл} FWM_{ef}^j, \quad (16)$$

де $\frac{\Delta UB}{\Delta t}$ – приріст урожайності загальної біомаси у виробництві, г/м²;

$k_{земл}$ – коефіцієнт, що характеризує рівень культури землеробства і господарської діяльності, відн. од.;

FWM_{ef} – функція ефективності внесення органічних і мінеральних добрив в залежності від умов вологозабезпеченості декад вегетації, відн. од.

Різні агроєкологічні категорії врожаю зерна при його стандартній 14%-ій вологості визначаються за виразом

$$ПУ_{зерна} = ПУ \cdot K_{госп.}^{ПУ} \cdot 1,14 \cdot 0,1 \quad (17)$$

де $ПУ_{зерна}$ – потенційний урожай зерна, ц/га;

$K_{госп.}^{ПУ}$ – частка зерна в загальній масі потенційного урожаю, відн. од., яка визначається в залежності від розмірів урожаю загальної біомаси.

Аналогічно визначаються відповідно метеорологічно-можливий $ММУ_{зерна}$, дійсно можливий $ДМУ_{зерна}$ і урожай у виробництві $УВ_{зерна}$ зерна.

Виклад основного матеріалу. Порівняння температурного режиму та режиму зволоження, які очікуються за кліматичними сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5, зі середніми багаторічними умовами показує їх суттєву різницю (рис. 1).

Для обох сценарних років буде характерним більш низький рівень температури протягом вегетації культури. Для більш вірогідного сценарію RCP 4.5 ця різниця становитиме 1–2 °С протягом всієї вегетації і лише останні дві декади вона зменшиться. Динаміка температури повітря за сценарієм RCP 8.5 буде аналогічна, інколи перевищуючи (перш-третя та шоста-сьома декади).

Очікуваний за сценаріями зміни клімату режим зволоження буде більш вологим. Кількість опадів за сценарієм RCP 4.5 перші три декади вегетації буде на 5–7 мм вище, чим багаторічна. Потім, протягом четвертої-сьомої декади вона буде нижче багаторічної і після восьмої декади вони зрівняються. Для кліматичного сценарію RCP 8.5 тільки в першу декаду вегетації кількість опадів буде дещо менша від багаторічної, але з другої по сьому включно декади вона буде переважно більше (на 2–4 мм), після восьмої декади кількість опадів зменшиться на 7–9 мм порівняно з багаторічними значеннями.

Приріст потенційної урожайності визначається рівнем інтенсивності сонячної радіації. Порівняємо прихід сумарної сонячної радіації за багаторічний період та сценарний період згідно сценаріям RCP 4.5 та RCP 8.5. Як видно з даних рис. 2, в сценарний період за обома кліматичними сценаріями очікується зменшення приходу сумарної сонячної радіації протягом всього періоду вегетації сочевиці, за винятком двох останніх декад вегетації.

Це зменшення становить в середньому від 12 до 22%. Скорочення приходу сумарної сонячної радіації і відповідно фотосинтетично активної радіації викликає зниження приростів потенційної урожайності в сценарний період порівняно з середніми багаторічними умовами. Так, в період максимального росту приріст ПУ при середніх багаторічних умовах

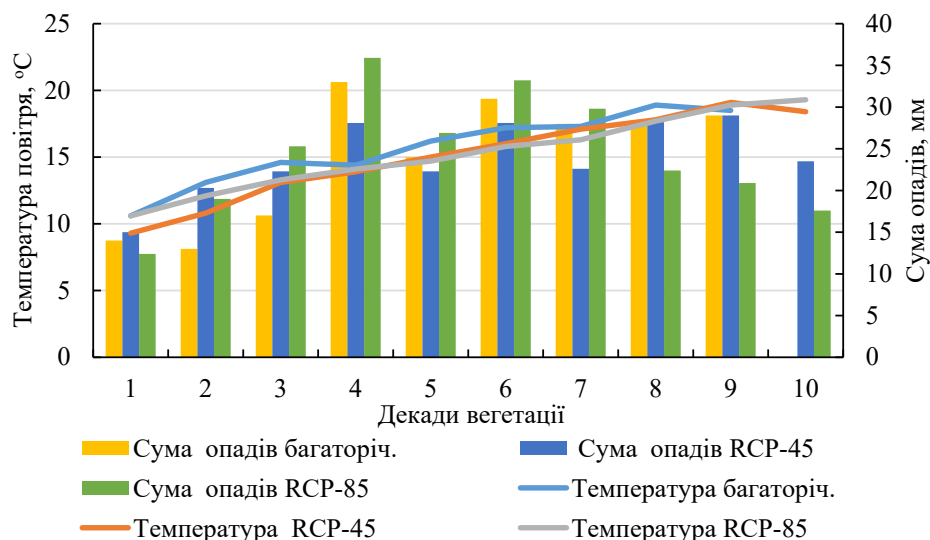


Рис. 1. Порівняння динаміки середніх багаторічних значень температури повітря та кількості опадів з очікуваними за сценаріями зміни клімату за період вегетації сочевиці

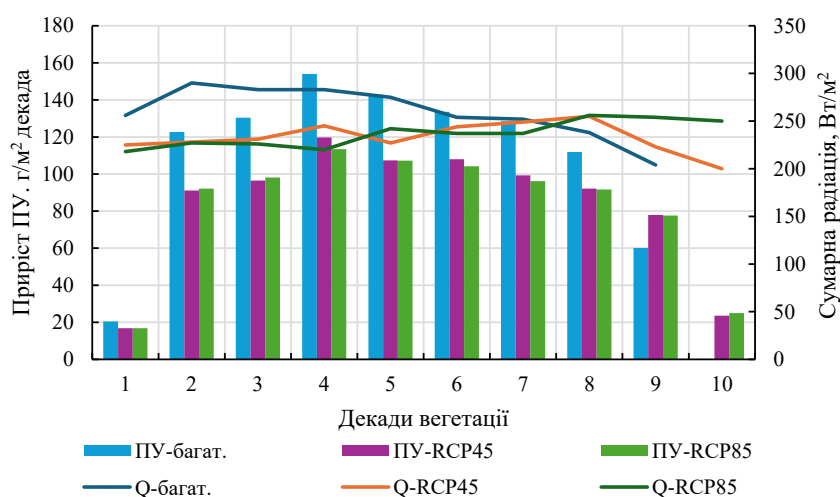


Рис. 2. Динаміка декадних приростів потенційної урожайності сочевиці та сумарної радіації за середніми багаторічними даними та кліматичними сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5

складав 134–154 г м⁻², для сценарного періоду він складатиме 104–120 г м⁻².

Вплив волого-температурного режиму визначає рівень приростів метеорологічно-можливого урожаю. В табл. 1 приведені значення функцій впливу температури повітря та вологозабезпечення на формування урожаю сочевиці для середніх багаторічних умов та сценарних кліматичних умов.

Знижений з першої по сьому декаду вегетації сочевиці температурний режим відповідно і дещо зменшує вплив на формування метеорологічно можливого урожаю.

В порівнянні з середніми багаторічними умовами значення ψ_{ϕ} для очікуваних сценарних кліматич-

них умов зменшуються на 0,5–0,18 відн.од. Виняток складають лише дві останні декади вегетації коли їх значення були досить близькі.

Режим зволоження вегетаційного періоду сочевиці за кліматичними сценаріями можна охарактеризувати як достатньо високий, рівень відношення E/E_0 значно на 0,07–0,18 відн. од. перевищує декадні середні багаторічні значення.

Такі зміни волого-температурного режиму в період вегетації сочевиці за сценарний період позначились на рівні ММУ (рис. 3). Це спостерігається від другої до восьмої декади вегетації. Різниця в приростах ММУ складає від 20 до 45 г м⁻² за декаду. Максимальних значень вона сягає в четверту декаду.

Таблиця 1

**Порівняння функцій впливу температури повітря та вологозабезпечення
за середніми багаторічними даними та кліматичними сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5
на формування урожаю сочевиці**

Декади вегетації	Функції впливу, відн. од.					
	температури повітря			вологозабезпечення		
	у	у	у	Е/Е ₀ багаторіч.	Е/Е ₀ RCP-4.5	Е/Е ₀ RCP-8.5
1	0.81	0.67	0.81	0.84	0.85	0.84
2	0.92	0.74	0.84	0.83	0.88	0.86
3	0.93	0.85	0.85	0.77	0.89	0.87
4	0.84	0.83	0.83	0.77	0.9	0.92
5	0.93	0.86	0.83	0.78	0.82	0.96
6	1	0.91	0.90	0.78	0.93	0.99
7	1	1	0.95	0.81	0.94	0.99
8	0.95	1	1	0.82	0.93	0.98
9	0.89	0.89	0.9	0.83	0.91	0.93
10		0.89	0.81		0.92	0.90

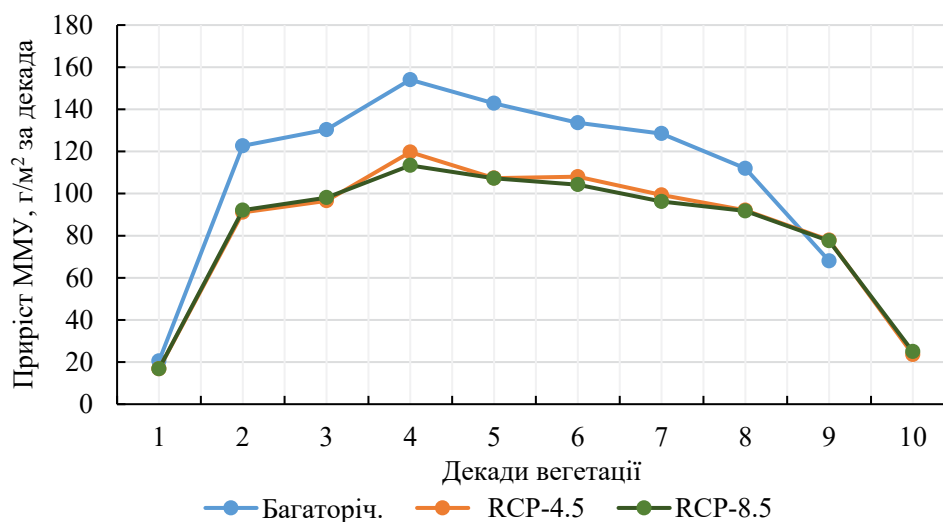


Рис. 3. Динаміка декадних приростів метеорологічно-можливої урожайності сочевиці за середніми багаторічними даними та кліматичними сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5

Підсумкові значення характеристик вегетаційного періоду та урожайності сумарної сухої біомаси сочевиці приведені в табл. 2.

За кліматичними сценаріями відбудеться зменшення сумарного приходу ФАР за вегетаційний період сочевиці: для сценарію RCP 4.5 на 11,47 кДж см⁻² за період, а для сценарію RCP 8.5 – на 12,30 кДж см⁻² за період. Це на фоні пониження середньої за період температури повітря (на 0,7–0,8 °C) призведе до збільшення періоду вегетації культури на 6 діб. Кількість опадів за кліматичними сценаріями зростає на 22–26 мм.

Такі агрокліматичні умови відповідним чином проявляться на рівнях урожайності: відбудеться зменшення потенційної урожайності всієї сухої маси

сочевиці за кліматичними сценаріями порівняно з потенційною урожайністю при середніх багаторічних умовах (на 180–190 г м⁻² за період). Відповідно знизиться рівень метеорологічно-можливої урожайності (на 190–200 г м⁻² за період), а також знизиться рівень дійсно-можливої урожайності (на 59–167 г м⁻² за період) та урожайності у виробництві (на 102–108 г м⁻² за період).

Урожай бобів сочевиці при середніх багаторічних умовах складає (при 14-% вологості бобів) 13,3 ц га⁻¹. При реалізації кліматичних сценаріїв урожай бобів знизиться на 2,6–2,7 ц га⁻¹.

Підвищення рівня урожайності сочевиці пов'язано з використанням дослідження дозволяє різноманітних засобів агротехніки, в тому числі, і з вирощу-

Таблиця 2

**Порівняння характеристик вегетаційного періоду і урожайності сочевиці
за середніми багаторічними даними та кліматичними сценаріями RCP 4.5 і RCP 8.5**

Період, роки	Сума ФАР, кДж/см ²	Трива- лість періоду, доба	Середня температура повітря, °С	Сума опадів, мм	Урожай всієї сухої біомаси, г м ⁻²				Урожай бобів, ц га ⁻¹
					ПУ	ММУ	ДМУ	УВ	
Багатор. 1991- 2020	66,15	81	11,1	217	1012	1000	891	573	13,3
RCP-4.5 2021- 2050	54,68	87	10,3	239	832	810	732	471	10,7
Різниця	-11,47	+6	-0,8	+22	-180	-190	-159	-102	-2,6
RCP-8.5 2021- 2050	53,85	87	10,4	243	822	800	724	465	10,6
Різниця	-12,30	+6	-0,7	+26	-190	-200	-167	-108	-2,7

ванням більш продуктивних сортів сочевиці. Модель формування урожаю як інструмент дослідження дозволяє оцінити використання такої практики.

В табл. 3 наводяться розрахунки урожаю у вирощуванні (УВ), розраховані за різних значень коефіцієнта корисної дії (ККД) збільшених на 10, 20, 30%. За даними Ничипоровича ККД максимальне при максимальній площі листа 27–30 тис. м² га⁻¹ [8].

Таблиця 3

**Потенційно можливий урожай (УВ) сочевиці
в Тернопільській області**

% збільшення ККД	Урожай, ц га ⁻¹
0% (база)	13,3
10%	14,6
20%	15,9
30%	17,3

В залежності від величини урожаю сухої маси рослин формується і різний врожай зерна сочевиці. Так при ККД (база) він становить 13,3 ц га⁻¹, 14,6 ц га⁻¹ при збільшенні ККД на 10%, 15,9 ц га⁻¹ при збільшенні ККД на 20%, 17,3 ц га⁻¹ при збільшенні ККД на 30%.

Головні висновки. За результатами дослідження можна зробити такі висновки:

1. Вперше виконана адаптація базової моделі оцінки агрокліматичних ресурсів формування

продуктивності сільськогосподарських культур Польового до біологічних особливостей культури сочевиці. Її використання дозволяє вивчати вплив різних агротехнічних прийомів вирощування культури та досліджувати наслідки кліматичних змін.

2. Виконано порівняння сучасних (1991–2020 рр.) агрокліматичних умов вирощування сочевиці з майбутніми (2021–2050 рр.) за кліматичними сценаріями клімату RCP 4.5 та RCP 8.5. Встановлено, що зменшення приходу сумарної ФАР (на 17–19%) та зниження температури повітря (на 0,7–0,8 °С) за вегетацію культури призведе до збільшення тривалості вегетаційного періоду.

3. Порівняння агроєкологічних рівнів урожайності в сучасних умовах та в умовах майбутніх змін клімату показало, що при реалізації сценарних кліматичних умов відбудеться зменшення рівнів урожайності (на 17,8%), а урожай бобів понизиться на 2,6–2,7 ц га⁻¹.

4. Використання більш продуктивних сортів сочевиці з більшим коефіцієнтом корисної дії дозволяє. Підвищити урожай сочевиці в умовах зміни клімату до 15–17 ц га⁻¹.

Перспективи використання результатів досліджень. Отримані дослідження можуть бути використані при розробці агротехніки вирощування сочевиці при зміні кліматичних умов в Західній Україні з метою заміни сучасних сортів більш продуктивними, які мають більш високий рівень ККД посівів.

Література

1. Зінченко О.І., Салатенко В.Н., Білоножко М.А. Рослинництво: Підручник. Київ: Аграрна освіта, 2001. 591 с.
2. Черенков А.В., Клиша А.І., Гирка А. Д., Кулініч О.О., Сидоренко Ю.Я., Бочевар О.В., Ільєнко О.В., Кулик А.О. Сучасна технологія вирощування сочевиці. Науково-виробниче видання. Дніпропетровськ. 2013. 46 с.
3. Qi Jing, Kenneth J. Boote et al., 2024. Simulating the development and growth of lentil using the CSM-CROPGRO model. *Agronomy Journal*, 14 August 2024. <https://doi.org/10.1002/agj2.21654>
4. Tefera A.T. et al., 2022. Identification of agro-physiological traits of lentil that reduce risks of drought. *Front Plant Sci.* 2022 Oct 24;13:1019491. doi: 10.3389/fpls.2022.1019491

5. Ghanem M. E. et al., 2015. Lentil Variation in Phenology and Yield Evaluated with a Model. *Agronomy Journal*, 107(6): 1–32. DOI:10.2134/agronj15.0061
6. Польовий А.М. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроєкосистем. Київ: КНТ, 2007. 344 с.
7. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах змін клімату / за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса : ТЕС, 2018. 546 с.
8. Польовий А.М. Сільськогосподарська метеорологія. Підручник. Одеса. «ТЕС», 2012. 612 с.