

УДК 633.854.78:551.583:631.559:631.67(477.7)
DOI <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2026.37.11>

ВПЛИВ ПРОГНОЗОВАНИХ ЗМІН КЛІМАТУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ СОНЯШНИКУ В УМОВАХ ПРИРОДНОГО ТА РЕГУЛЬОВАНОГО ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІВДНЯ УКРАЇНИ

ЖИГАЙЛО Т.С. – кандидат сільськогосподарських наук, докторант,
старший науковий співробітник
orcid.org/0000-0002-9580-5922

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України

ЖИГАЙЛО О.Л. – кандидат географічних наук, доцент
orcid.org/0000-0002-3552-327X

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

БАРСУКОВА О.А. – кандидат географічних наук, доцент
orcid.org/0000-0002-9054-142X

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

Постановка проблеми. В умовах глобальних змін клімату одним із ключових викликів для сучасного аграрного виробництва є забезпечення стабільної продуктивності сільськогосподарських культур за зростання температурного режиму, посилення посушливих явищ та зменшення природного вологозабезпечення. Особливо гостро ці процеси проявляються у степовій зоні України, де підвищення аридності клімату супроводжується збільшенням дефіциту ґрунтової вологи, нерівномірністю випадання атмосферних опадів і зростанням ризиків формування нестабільної врожайності.

Соняшник є однією з провідних олійних культур України, що має важливе економічне та експортне значення. Водночас реалізація його продукційного потенціалу значною мірою визначається агрокліматичними умовами вегетаційного періоду, насамперед температурним режимом і забезпеченістю рослин вологою. Прогнозовані зміни клімату можуть істотно змінити умови вирощування культури, що потребує наукового обґрунтування адаптивних технологічних рішень.

Особливої актуальності набуває комплексна оцінка продуктивності соняшнику за умов природного та регульованого вологозабезпечення із застосуванням сучасних методів математичного моделювання. Такий підхід дає можливість оцінити реакцію культури на прогнозовані агрокліматичні зміни, визначити особливості формування продуктивності в різних природно-кліматичних підзонах Південного регіону України та обґрунтувати ефективність зрошення як одного з основних адаптаційних заходів в умовах подальшої аридизації клімату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблемам оцінювання впливу кліматичних змін на продуктивність сільськогосподарських культур присвячено численні дослідження вітчизняних і зарубіжних учених. В Україні вагомий внесок у розвиток цього напрямку зробили А. М. Польовий, В. О. Балабух, О. Г. Тараріко, Т. І. Адаменко, Н. В. Данілова, Р. А. Вожегова та інші дослідники [1-6]. У їхніх працях сформовано теоретичні засади агрокліматичного оцінювання продукційного

процесу рослин, удосконалено підходи до математичного моделювання продуктивності сільськогосподарських культур, досліджено закономірності трансформації агрокліматичних ресурсів України під впливом кліматичних змін, оцінено вплив температурного режиму та вологозабезпечення на формування врожайності, а також обґрунтовано основні напрями адаптації аграрного виробництва до сучасних кліматичних викликів.

Суттєвий розвиток досліджень щодо оцінювання впливу кліматичних змін на продуктивність сільськогосподарських культур відбувся і в зарубіжній науці. Роботи D. B. Lobell, A. Ortiz-Bobea, C. Rosenzweig, A. J. Challinor, S. Asseng, C. Zhao та інших учених присвячені кількісному оцінюванню впливу змін температурного режиму, дефіциту вологи та екстремальних погодних явищ на продуктивність агроєкосистем із використанням математичного моделювання, ансамблевих моделей і кліматичних сценаріїв [7–13]. Їхні дослідження підтверджують необхідність упровадження адаптаційних заходів для забезпечення стабільності сільськогосподарського виробництва в умовах глобальних кліматичних змін.

Останніми роками подальшого розвитку набули дослідження, присвячені оцінюванню продуктивності соняшнику в умовах сучасних і прогнозованих кліматичних змін. У роботах О. Л. Жигайло та співавторів [14–15] із використанням математичного моделювання обґрунтовано підходи до прогнозування врожайності культури за різних кліматичних сценаріїв, оцінено вплив агрокліматичних умов на формування врожаю та ефективність адаптаційних заходів, зокрема застосування зрошення. Водночас питання комплексного оцінювання впливу кліматичних змін і зрошення на формування продуктивності соняшнику в умовах Південного Степу України потребують подальших досліджень, що й зумовило вибір теми цієї роботи.

Мета дослідження – оцінити вплив прогнозованих змін агрокліматичних умов на формування продуктивності посівів і врожайності соняшнику в Південному



регіоні України за умов природного та регульованого вологозабезпечення із застосуванням математичного моделювання та визначити ефективність зрошення як адаптаційного заходу до змін клімату.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження виконано із застосуванням методів математичного моделювання продуктивності посівів соняшнику в умовах природного та регульованого водозабезпечення.

Для оцінювання формування продуктивності соняшнику на неполивних землях використано математичну модель MODSON-7 («Водно-тепловий режим і продуктивність соняшнику»), яка дає змогу моделювати вплив агрометеорологічних чинників на ріст, розвиток рослин, формування листкової поверхні, накопичення сухої біомаси та врожайності насіння [16].

Моделювання продуктивності соняшнику за умов зрошення виконано із застосуванням математичної моделі MODSOL-6 («Формування продуктивності сільськогосподарських культур в умовах зрошення»), що забезпечує оцінювання впливу режиму зрошення на водний режим посівів, процеси росту та формування врожаю культури [17].

Параметри моделей адаптовано до біологічних особливостей соняшнику, який вирощується в природно-кліматичних умовах Південного регіону України.

Чисельні розрахунки проведено для двох кліматичних періодів: 1986–2015 рр. – базового, сформованого за даними багаторічних агрокліматичних спостережень [18], та 2026–2050 рр. – прогнозного за сценарієм RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway), що передбачає високий рівень концентрації парникових газів в атмосфері та використовується для оцінювання можливих наслідків змін клімату [19].

Дослідження охоплювали дві природно-кліматичні підзони Південного регіону України – Північний Степ і Південний Степ, які характеризуються різними умовами теплозабезпечення та природного зволоження (рис. 1).

Під час моделювання оцінювали агрокліматичні умови вегетаційного періоду, показники водного режиму посівів, індекс листкової поверхні, приріст і накопичення сухої біомаси, масу кошиків, а також урожайність насіння соняшнику. Для умов зрошення додатково проведено моделювання продуктивності культури за різних рівнів посушливості, що характеризувалися значеннями гідротермічного коефіцієнта (ГТК), із застосуванням розрахункового режиму зрошення сумарною нормою 2300 м³/га.

Результати досліджень. Агрокліматичні перемудови формування продуктивності соняшнику. Результати моделювання свідчать, що за сценарієм кліматичних змін RCP 8.5 агрокліматичні умови вирощування соняшнику в Південному регіоні України змінюватимуться неоднаково залежно від природно-кліматичної підзони (табл. 1). Найсуттєвіші зміни стосуються температурного режиму, атмосферного зволоження, випаровуваності та водного балансу посівів, що безпосередньо визначають інтенсивність ростових процесів і рівень реалізації продукційного потенціалу культури.

У міжфазний період «сходи – цвітіння» у Північному Степу прогнозується певне покращення умов вологозабезпечення. Незважаючи на зниження середньої температури повітря на 1,6 °С, сума атмосферних опадів збільшуватиметься зі 114 до 122 мм, а коефіцієнт вологозабезпеченості – з 0,70 до 0,81 від. од. Такі умови є сприятливими для формування кореневої системи, активного розвитку листкового апарату та накопичення асиміляційної поверхні.



Рис. 1. Карта України з виділенням Південним регіоном: Одеської, Миколаївської, Херсонської та Запорізької областей

Таблиця 1

Агрокліматичні умови вирощування соняшнику на Півдні України

Агрокліматичні показники	Природно-кліматична підзона:			
	Північний Степ		Південний Степ	
	¹ 1986–2015 рр.	² 2026–2050 рр.	¹ 1986–2015 рр.	² 2026–2050 рр.
Сходи – цвітіння				
Середня температура повітря, °	19,9	18,3	19,2	18,5
Сума опадів, мм	114	122	107	101
Сумарне випаровування, мм	191	247	121	96
Випаровуваність, мм	271	305	289	292
Вологозабезпеченість, від. од.	0,70	0,81	0,42	0,33
Цвітіння – збиральна стиглість				
Середня температура повітря, °	22,1	20,0	23,3	23,6
Сума опадів, мм	88	63	57	35
Сумарне випаровування, мм	155	145	62	60
Випаровуваність, мм	327	414	318	375
Вологозабезпеченість, від. од.	0,47	0,35	0,19	0,16
Сходи – збиральна стиглість				
Середня температура повітря, °	21,0	19,1	21,3	21,0
Сума опадів, мм	202	185	164	136
Дефіцит вологи, мм	252	327	424	511
Вологозабезпеченість, від. од.	0,58	0,54	0,30	0,23

Примітка: ¹ – базовий кліматичний період; ² – кліматичний період за сценарієм RCP 8.5.

На відміну від Північного Степу, у Південному Степу вже на початкових етапах вегетації очікується погіршення водного режиму посівів. Зменшення кількості атмосферних опадів зі 107 до 101 мм у поєднанні зі зниженням коефіцієнта вологозабезпеченості до 0,33 від. од. свідчить про посилення дефіциту продуктивної вологи, що може негативно впливати на інтенсивність росту рослин уже на ранніх фазах органогенезу.

У період «цвітіння – збиральна стиглість», який є критичним для формування врожаю соняшнику, агрокліматичні умови погіршуються в обох підзонах. У Північному Степу кількість опадів зменшується до 63 мм, а випаровуваність зростає до 414 мм, унаслідок чого коефіцієнт вологозабезпеченості знижується до 0,35 від. од. У Південному Степу ситуація є ще складнішою: кількість опадів скорочується до 35 мм, а показник вологозабезпеченості зменшується до критичного рівня – 0,16 від. од., що створює передумови для розвитку водного та теплового стресу в період наливу насіння.

Загалом за вегетаційний період прогнозується збільшення дефіциту вологи в обох підзонах, однак найбільш виражені негативні зміни очікуються у Південному Степу, де дефіцит вологи зростатиме з 424 до 511 мм, а коефіцієнт вологозабезпеченості знизиться до 0,23 від. од. Отримані результати свідчать про посилення просторової диференціації агрокліматичних умов вирощування соняшнику та формують передумови для істотних відмінностей у рівні продуктивності культури між досліджуваними підзонами.

Проведений аналіз свідчить, що прогнозовані зміни агрокліматичних умов за сценарієм RCP 8.5 характеризуватимуться посиленням просторової неоднорідності тепло- та вологозабезпечення території Південного регіону України. Найбільш несприятливі умови формуватимуться в Південному Степу, що створює

передумови для суттєвого зниження продуктивності соняшнику в умовах природного зволоження

Реакція посівів соняшнику на прогнозовані кліматичні зміни. Математичне моделювання показало, що прогнозовані зміни агрокліматичних умов безпосередньо впливатимуть на формування продуктивності соняшнику, однак характер цього впливу істотно відрізнятиметься між природно-кліматичними підзонами Південного регіону України (табл. 2, рис. 2).

У Північному Степу покращення умов вологозабезпечення в першій половині вегетації сприятиме активізації ростових процесів і підвищенню ефективності фотосинтетичної діяльності рослин. Це підтверджується збільшенням індексу листової поверхні з 1,35 до 2,19 м²/м², або на 62%, що свідчить про формування більш розвиненого асиміляційного апарату (рис. 2а). Одночасно приріст сухої біомаси збільшиться з 90,45 до 142,06 г/м², а загальна суха біомаса на момент досягання – з 426,07 до 624,71 г/м². Такі зміни відображають підвищення інтенсивності фотосинтетичних процесів і більш повну реалізацію продукційного потенціалу культури.

Позитивні зміни простежуються також у формуванні генеративних органів. Маса кошиків збільшиться з 231,85 до 307,08 г/м², що забезпечить підвищення врожайності насіння з 1,7 до 2,3 т/га. Отже, для Північного Степу прогнозовані кліматичні зміни не матимуть негативного впливу на продуктивність соняшнику, а за рахунок покращення водного режиму на початкових етапах розвитку навіть сприятимуть ефективнішому використанню природних агрокліматичних ресурсів.

На відміну від Північного Степу, у Південному Степу прогнозується протилежна тенденція. Посилення дефіциту вологи та погіршення вологозабезпечення вже на початку вегетації обмежуватимуть ріст рослин і формування листового апарату. У результаті індекс листової

Таблиця 2

Вплив кліматичних змін на продуктивність соняшнику в умовах Південного регіону України

Показники продуктивності		Природно-кліматична підзона			
		Північний Степ		Південний Степ	
		¹ 1986–2015 pp.	² 2026–2050 pp.	¹ 1986–2015 pp.	² 2026–2050 pp.
Продуктивність посівів в період максимального розвитку:	індекс листової поверхні (LL), м ² /м ²	1,35	2,19	1,44	0,69
	приріст сухої біомаси (ΔM), г/м ²	90,45	142,06	126,85	38,13
Суша біомаса на фазу збирання стиглості:	загальна (M: m _l , m _s , m _r , m _p)	426,07	624,71	439,67	173,44
	кошиків (m _p)	231,85	307,08	167,80	76,76
Урожай насіння (m _q), т/га		1,7	2,3	1,2	0,6

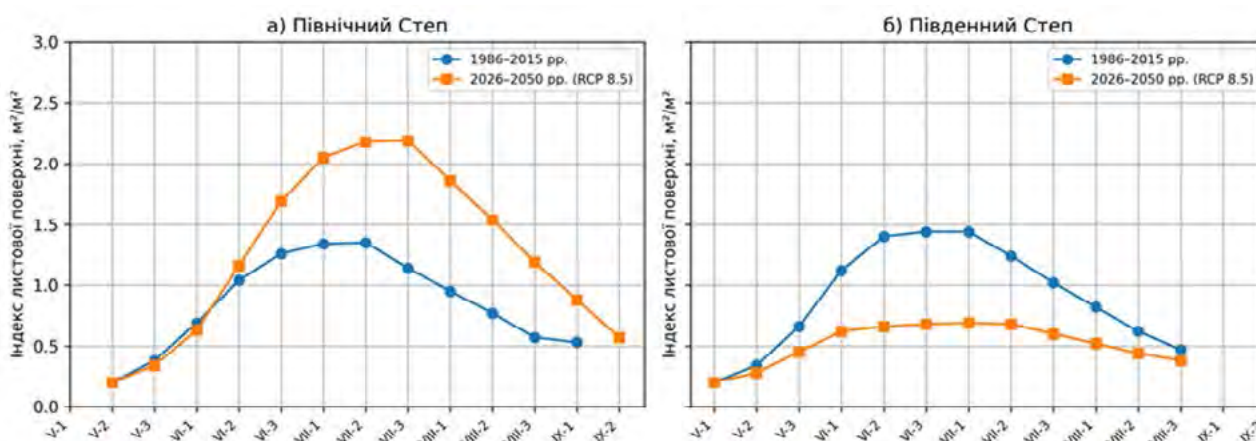


Рис. 2. Динаміка листової поверхні соняшнику. Південний регіон України

поверхні зменшиться майже вдвічі – з 1,44 до 0,69 м²/м² (рис. 2б), що свідчить про істотне зниження фотосинтетичного потенціалу посівів.

Наслідком пригнічення ростових процесів стане різке скорочення накопичення сухої біомаси. Приріст сухої речовини знизиться зі 126,85 до 38,13 г/м², а загальна суха біомаса на фазу досягання – з 439,67 до 173,44 г/м². Одночасно маса кошиків зменшиться більш ніж удвічі – зі 167,80 до 76,76 г/м², що безпосередньо позначиться на формуванні врожаю насіння.

За результатами моделювання врожайність соняшнику в умовах неполивного землеробства Південного Степу знизиться з 1,2 до 0,6 т/га. Такий характер змін обумовлений комплексною дією несприятливих агрокліматичних чинників – дефіциту продуктивної вологи, високої випаровуваності та розвитку водного і теплового стресу в критичні фази росту й розвитку культури.

Таким чином, результати моделювання свідчать про істотну просторову диференціацію реакції соняшнику на прогнозовані кліматичні зміни (рис. 3). Якщо в Північному Степу прогнозується підвищення продуктивності завдяки відносно сприятливим умовам початкового періоду вегетації, то в Південному Степу посилення аридизації клімату істотно обмежуватиме реалізацію продукційного потенціалу культури та зумовлюватиме значне зниження врожайності.

Отримані результати моделювання дають підстави стверджувати, що реакція соняшнику на прогнозовані кліматичні зміни визначається насамперед рівнем природного вологозабезпечення території. За умов Північного Степу можливе збереження відносно сприятливих умов формування продуктивності культури, тоді як у Південному Степу посилення аридизації клімату істотно обмежуватиме реалізацію її продукційного потенціалу.

Ефективність зрошення як адаптаційного заходу за різних рівнів посушливості. За умов прогнозованого посилення аридизації клімату особливого значення набуває оцінювання ефективності адаптаційних заходів, спрямованих на компенсацію дефіциту продуктивної вологи. Одним із найбільш дієвих заходів є зрошення, яке забезпечує стабілізацію водного режиму ґрунту та створює передумови для підтримання продуктивності соняшнику навіть за несприятливих погодних умов.

Результати математичного моделювання (табл. 4) свідчать, що застосування розрахункового режиму зрошення із сумарною зрошувальною нормою 2300 м³/га забезпечує суттєве підвищення продуктивності посівів незалежно від рівня розвитку посушливих явищ. Підтримання оптимального водного режиму сприяє збереженню фізіологічної активності рослин, формуванню більш розвинутого листового апарату, інтенсивнішому

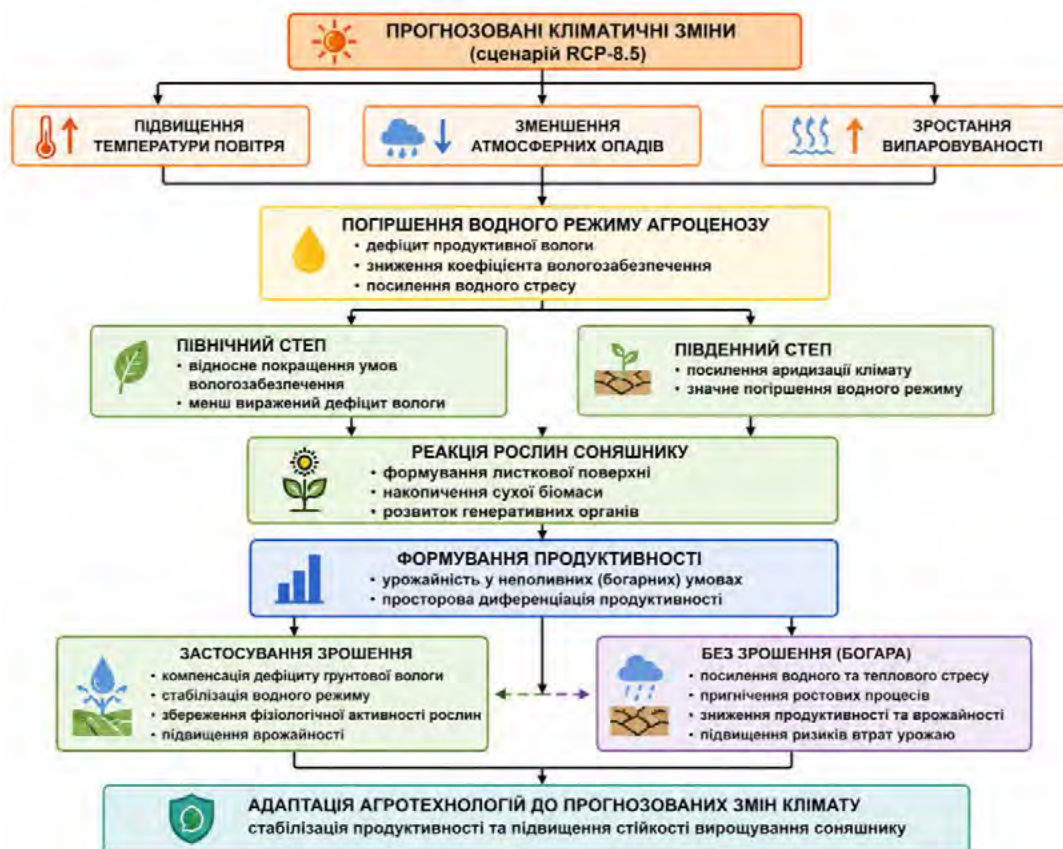


Рис. 3. Схема впливу прогнозованих змін клімату на формування продуктивності соняшнику та роль зрошення як адаптаційного заходу

накопиченню сухої біомаси та кращому розвитку генеративних органів.

Найвища ефективність зрошення спостерігається за умов сильної посухи, коли врожайність соняшнику досягає 2,7–2,9 т/га, що більш ніж удвічі перевищує показники неполивного землеробства. Це свідчить, що за своєчасного забезпечення рослин вологою негативний вплив дефіциту атмосферних опадів може бути значною мірою компенсований (табл. 4).

Зі збільшенням інтенсивності посушливих явищ ефективність зрошення дещо знижується, однак навіть за умов надзвичайної посухи врожайність залишається на рівні близько 1,8 т/га, що істотно перевищує показники, отримані без зрошення. Отже, підтримання оптимального водного режиму дозволяє суттєво пом'якшити

негативний вплив водного стресу та забезпечити стабільніше формування врожаю.

Отримані результати підтверджують, що зрошення виконує не лише функцію компенсації дефіциту ґрунтової води, а й виступає важливим адаптаційним інструментом підвищення стійкості агроєкосистем до прогнозованих кліматичних змін. Використання математичного моделювання дозволило кількісно оцінити ефективність цього заходу та обґрунтувати доцільність його застосування насамперед у Південному Степу, де прогнозується найбільше погіршення умов природного вологозабезпечення.

Таким чином, застосування зрошення дозволяє значною мірою компенсувати негативний вплив дефіциту води та стабілізувати продуктивність соняшнику

Таблиця 4

Порівняльна продуктивність соняшнику на зрошуваних і неполиваних землях

Показники вологозабезпечення		Урожай насіння, т/га		
Гідротермічний коефіцієнт ГТК, від. од.	Вологозабезпеченість посівів E _ф /E _о , від. од.	Без зрошення	Зрошення	
за сценарієм RCP 8.5				
0,4	0,35	1,5	2,7	2,8 ¹
0,3	0,33	1,3	2,8	2,9 ¹
0,1	0,31	0,7	1,7	1,8 ¹

Примітка: зрошувальна норма 2300 м³/га; ¹ – в період досягання додається вегетаційний полив за дефіциту води для продовження наливу.

навіть за умов розвитку сильних посух. Це підтверджує доцільність використання зрошення як одного з ключових адаптаційних заходів в умовах подальших кліматичних змін.

Отримані результати узгоджуються із сучасними уявленнями про визначальну роль водного режиму у формуванні продуктивності польових культур за умов кліматичних змін. Проведене моделювання підтвердило, що реакція соняшнику на прогнозовані зміни агрокліматичних умов має виражений просторовий характер і визначається насамперед рівнем природного вологозабезпечення. Встановлено, що найбільш ефективним адаптаційним заходом є зрошення, яке забезпечує стабілізацію продукційного процесу та істотне зменшення негативного впливу посушливості клімату.

Отримані результати свідчать, що за умов подальших кліматичних змін вирощування соняшнику на неполивних землях Південного Степу супроводжуватиметься істотним зростанням виробничих ризиків, тоді як застосування зрошення дозволяє підтримувати стабільний рівень продуктивності культури та розглядатися як один із ключових напрямів адаптації землеробства до аридизації клімату.

Висновки. Встановлено, що за сценарієм кліматичних змін RCP 8.5 агрокліматичні умови вирощування соняшнику в Південному регіоні України змінюватимуться неоднаково залежно від природно-кліматичної підзони. У Північному Степу прогнозується відносно покращення умов вологозабезпечення на початкових етапах вегетації, тоді як у Південному Степу посилення аридизації супроводжуватиметься зростанням дефіциту вологи та погіршенням водного режиму посівів.

За результатами чисельних розрахунків встановлено істотні просторові відмінності реакції соняшнику на прогнозовані зміни агрокліматичних умов. У Північному Степу очікується підвищення продуктивності культури: індекс листової поверхні збільшиться з 1,35 до 2,19 м²/м², загальна суха біомаса – з 426,07 до 624,71 г/м², а врожайність насіння – з 1,7 до 2,3 т/га. Натомість у Південному Степу прогнозується істотне пригнічення продукційного процесу, що супроводжуватиметься зниженням урожайності з 1,2 до 0,6 т/га.

Встановлено, що визначальним чинником формування продуктивності соняшнику за умов прогнозованих кліматичних змін є рівень природного вологозабезпечення території. Посилення дефіциту продуктивної вологи обмежує розвиток листового апарату, накопичення сухої біомаси та формування генеративних органів, що зумовлює суттєве зниження реалізації продукційного потенціалу культури в умовах Південного Степу.

Доведено високу ефективність зрошення як адаптаційного заходу до змін клімату. Підтримання оптимального рівня зволоження ґрунту протягом вегетаційного періоду забезпечує стабілізацію водного режиму посівів, сприяє повнішій реалізації продукційного потенціалу соняшнику та дозволяє підвищити врожайність у 2,5–3,0 рази порівняно з неполивними умовами навіть за розвитку надзвичайної посухи.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування математичного моделювання для

прогнозування продуктивності соняшнику в умовах кліматичних змін та обґрунтування адаптаційних заходів. Практичне використання результатів дослідження сприятиме оптимізації технологій вирощування соняшнику, підвищенню ефективності використання водних ресурсів і зменшенню виробничих ризиків у степовій зоні України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Степаненко С. М., Польовий А. М., Лобода Н. С. та ін. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України : монографія. Одеса : ТЕС, 2015. 520 с.
2. Балабух В. О., Тараріко О. Г., Ільєнко Т. В., Величко В. А. Вплив зміни температури повітря на формування врожайності сільськогосподарських культур в Україні на межі XX–XXI століть (1981–2010 pp.). *Сільськогосподарська наука та практика*. 2021. Т. 8, № 3. С. 71–87. <https://doi.org/10.15407/agrisp8.03.071>
3. 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. № 1. С. 14–22. <https://doi.org/10.15407/ugz2016.01.014>
4. Адаменко Т. І. Зміна клімату та сільське господарство в Україні: що варто знати фермерам. Київ : Німецько-український агрополітичний діалог, 2019. 36 с. <https://dspace.organic-platform.org/items/3143ad68-8a9d-4a41-942a-798b2d7d72e5>
5. Данілова Н. В. Вплив змін клімату на продуктивність проса в Лісостеповій зоні України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. № 25. С. 63–73. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.06>
6. Вожегова Р. А., Нетіс І. Т., Онуфран Л. І., Сахацький Г. І., Шарата Н. Г. Зміна клімату та аридизація Південного Степу України. *Аграрні інновації*. 2021. № 7. С. 16–24. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.7.3>
7. Lobell D. B., Schlenker W., Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*. 2011. Vol. 333, No. 6042. P. 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
8. Ortiz-Bobea A., Ault T. R., Carrillo C. M., Chambers R. G., Lobell D. B. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*. 2021. Vol. 11, No. 4. P. 306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>
9. Rosenzweig C., Elliott J., Deryng D., Ruane A. C., Müller C., Arneth A., Boote K. J., Folberth C., Glotter M., Khabarov N. et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2014. Vol. 111, No. 9. P. 3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
10. Challinor A. J., Watson J., Lobell D. B., Howden S. M., Smith D. R., Chhetri N. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*. 2014. Vol. 4, No. 4. P. 287–291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
11. Asseng S., Ewert F., Martre P., Rötter R. P., Lobell D. B., Cammarano D. et al. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*. 2015. Vol. 5, No. 2. P. 143–147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
12. Zhao C., Liu B., Piao S., Wang X., Lobell D. B., Huang Y. et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings*

- of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2017. Vol. 114, No. 35. P. 9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>
13. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee, J. Romero (Eds.). Geneva : IPCC, 2023. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
 14. Жигайло О. Л., Вольвач О. В., Толмачова А. В., Костюкевич Т. К. Вплив змін клімату на урожайність соняшнику в Північному Степу України: аналіз і прогност. *Науковий прогност та інновації*, 2021. Вип. 1, 180–186. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.22>
 15. Жигайло Т. С., Жигайло О. Л. Оцінка продуктивності посівів соняшнику в степовій зоні України за кліматичними сценаріями RCP. *Таврійський науковий вісник*. 2026. Вип. 148, ч. 1. С. 213–220. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.1.24>
 16. Жигайло, О. Л., Жигайло, Т. С. Моделювання продуктивності соняшнику в умовах майбутніх змін клімату в Україні за сценаріями антропогенного впливу RCP. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2017. № 20. С. 71–78. <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/2115>
 17. Жигайло Т. С., Жигайло О. Л. Оптимізація вирощування пшениці озимої з урахуванням сценарію RCP8.5 в умовах Південного Степу України. *Аграрні інновації*. 2026. № 36. С. 113–119. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2026.36.16>
 18. Адаменко Т. І., Кульбіда М. І., Прокопенко А. Л. Агрокліматичний довідник по території України: (1986–2015 рр.). Житомир : «Полісся». 2019. 82 с.
 19. Степаненко С. М., Польовий А. М. та ін. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: монографія. Одеса : «ТЕС», 2018. 546 с.
- REFERENCES:**
1. Stepanenko S. M., Poloviy A. M., Loboda N. S. та ін. (2015) Klimatichni zminy ta yikh vplyv na sfery ekonomiky Ukrainy: monohrafiia. [Climate Change and Their Impact on the Economic Sectors of Ukraine : Monograph]. Odesa : TES, 520 p. [in Ukrainian].
 2. Balabukh V. O., Tarariko O. H., Iliencko T. V., Velychko V. A. (2021) Vplyv zminy temperatury povitria na formuvannya vrozhaivosti silskohospodarskykh kultur v Ukraini na mezhi XX-XXI stolit (1981-2010 rr.). [Influence of Air Temperature Changes on Crop Yield Formation in Ukraine at the Turn of the 20th and 21st Centuries (1981–2010)]. *Silskohospodarska nauka ta praktyka*, 8(3), 71–87. <https://doi.org/10.15407/agrisp8.03.071> [in Ukrainian].
 3. Tarariko O. H., Iliencko T. V., Kuchma T. L. (2016) Vplyv zmin klimatu na produktyvnist ta valovi zbory zernovykh kultur: analiz ta prohnoz. [Impact of Climate Change on the Productivity and Gross Harvest of Cereal Crops: Analysis and Forecast]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*, 1, 14–22. <https://doi.org/10.15407/ugz2016.01.014> [in Ukrainian].
 4. Adamenko T. I. (2019) Zmina klimatu ta silske hospodarstvo v Ukraini: shcho varto znaty fermeram. [Climate Change and Agriculture in Ukraine: What Farmers Should Know]. Kyiv : Nimetsko-ukrainskyi ahropolitychnyi dialoh, 36. <https://dspace.organic-platform.org/items/3143ad68-8a9d-4a41-942a-798b2d7d72e5> [in Ukrainian].
 5. Danilova N. V. (2020) Vplyv zmin klimatu na produktyvnist prosa v Lisostepovii zoni Ukrainy. [Impact of Climate Change on Millet Productivity in the Forest-Steppe Zone of Ukraine.]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal*, 25, 63–73. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.06> [in Ukrainian].
 6. Vozhehova R. A., Netis I. T., Onufra L. I., Sakhatskyi H. I., Sharata N. H. (2021) Zmina klimatu ta arydyzatsiia Pivdennoho Stepu Ukrainy. [Climate Change and Aridization of the Southern Steppe of Ukraine]. *Ahrarni innovatsii*, 7, 16–24. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.7.3> [in Ukrainian].
 7. Lobell D. B., Schlenker W., Costa-Roberts J. (2011) Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
 8. Ortiz-Bobea A., Ault T. R., Carrillo C. M., Chambers R. G., Lobell D. B. (2021) Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>
 9. Rosenzweig C., Elliott J., Deryng D., Ruane A. C., Müller C., Arneth A., Boote K. J., Folberth C., Glotter M., Khabarov N. et al. (2014) Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
 10. Challinor A. J., Watson J., Lobell D. B., Howden S. M., Smith D. R., Chhetri N. (2014) A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), 287–291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
 11. Asseng S., Ewert F., Martre P., Rötter R. P., Lobell D. B., Cammarano D. et al. (2015) Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143–147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
 12. Zhao C., Liu B., Piao S., Wang X., Lobell D. B., Huang Y. et al. (2017) Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(35), 9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>
 13. IPCC. (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee, J. Romero (Eds.). Geneva : IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
 14. Zhyhailo O. L., Vovach O. V., Tolmachova A. V., Kostyukievych T. K. (2021) Vplyv zmin klimatu na urozhaivnist soniashnyku v Pivnichnomu Stepu Ukrainy: analiz i prohnoz. [Impact of Climate Change on Sunflower Yield in the Northern Steppe of Ukraine: Analysis and Forecast.]. *Naukovyi prohres ta innovatsii*, 1, 180–186. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.22> [in Ukrainian].
 15. Zhyhailo T. S., Zhyhailo O. L. (2026) Otsinka produktyvnosti posiviv soniashnyku v stepovii zoni Ukrainy za klimatichnymi stsennariiamy RCP. [Assessment of Sunflower Crop Productivity in the Steppe Zone of Ukraine under RCP Climate Scenarios]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk*, 148(1), 213–220. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.1.24> [in Ukrainian].

16. Zhyhailo, O. L., Zhyhailo, T.S. (2017) Modeliuvannia produktivnosti soniashnyku v umovakh maibutnikh zmin klimatu v Ukraini za stsensariamy antropohennoho vplyvu RCP. [Modeling Sunflower Productivity under Future Climate Change in Ukraine Based on RCP Anthropogenic Forcing Scenarios.] *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal*, 20, 71–78. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/2115> [in Ukrainian].
17. Zhyhailo T.S., Zhyhailo O.L. (2026) Optymizatsiia vyroshchuvannia pshenytsi ozymoi z urakhuvanniam stsensariu RCP8.5 v umovakh Pivdennoho Stepu Ukrainy. [Optimization of Winter Wheat Cultivation under the RCP 8.5 Scenario in the Southern Steppe of Ukraine]. *Ahrarni innovatsii*, 36, 113–119. <https://doi.org/10.32848/ahrar.innov.2026.36.16> [in Ukrainian].
18. Adamenko T.I., Kulbida M.I., Prokopenko A.L. (2019) Ahroklimatechnyi dovidnyk po terytorii Ukrainy: (1986–2015 rr.) [Agroclimatic Reference Book for the Territory of Ukraine (1986–2015)]. Zhytomyr : «Polissia», 82 p. [in Ukrainian].
19. Stepanenko S. M., Polovyi A. M. ta in. (2018) Klimatchni ryzyky funktsionuvannia haluzei ekonomiky Ukrainy v umovakh zminy klimatu: monohrafiia. [Climate Risks to the Functioning of Ukraine's Economic Sectors under Climate Change: Monograph]. Odesa : «TES», 546 p. [in Ukrainian].

Жигайло Т.С., Жигайло О.Л., Барсукова О.А.
Вплив прогнозованих змін клімату на продуктивність соняшнику в умовах природного та регульованого вологозабезпечення Півдня України

Мета дослідження – оцінити вплив прогнозованих змін агрокліматичних умов на формування продуктивності посівів і врожайності соняшнику в Південному регіоні України за умов природного та регульованого вологозабезпечення із застосуванням математичного моделювання та визначити ефективність зрошення як адаптаційного заходу до змін клімату. **Методи.** Дослідження виконано із застосуванням математичних моделей MODSON-7 («Водно-тепловий режим і продуктивність соняшнику») та MODSOL-6 («Формування продуктивності сільськогосподарських культур в умовах зрошення»). Моделювання проведено для базового кліматичного періоду 1986–2015 рр. та прогнозованого періоду 2026–2050 рр. за сценарієм RCP 8.5 для природно-кліматичних підзон Північного і Південного Степу України. Оцінювали агрокліматичні умови вегетації, показники водного режиму посівів, індекс листової поверхні, накопичення сухої біомаси, формування генеративних органів та врожайність соняшнику. Для умов зрошення виконано оцінювання ефективності розрахункового режиму зрошення за різних рівнів посушливості. **Результати.** Встановлено, що прогнозовані зміни клімату зумовлюють істотну просторову диференціацію умов вирощування соняшнику. У Північному Степу очікується покращення вологозабезпечення на початкових етапах вегетації, що сприятиме збільшенню індексу листової поверхні з 1,35 до 2,19 м²/м², загальної сухої біомаси – з 426,07 до 624,71 г/м² та врожайності насіння – з 1,7 до 2,3 т/га. У Південному Степу, навпаки, посилення аридизації клімату призведе до зниження

індексу листової поверхні до 0,69 м²/м², скорочення накопичення біомаси та зменшення врожайності до 0,6 т/га. Показано, що підтримання оптимального рівня зволоження ґрунту протягом вегетаційного періоду забезпечує стабілізацію водного режиму посівів, сприяє повнішій реалізації продукційного потенціалу соняшнику та дозволяє підвищити врожайність у 2,5–3,0 рази порівняно з неполивними умовами навіть за розвитку надзвичайної посухи. **Висновки.** Реакція соняшнику на прогнозовані кліматичні зміни визначається насамперед рівнем природного вологозабезпечення території. Зрошення є ефективним адаптаційним заходом, що забезпечує стабілізацію продукційного процесу, зменшує негативний вплив водного стресу та підвищує стійкість агровиоробництва до подальшої аридизації клімату.

Ключові слова: математичне моделювання, агрокліматичні умови, аридизація клімату, водний режим, адаптаційні заходи, продукційний процес, урожайність, степова зона.

Zhygailo T.S., Zhygailo O.L., Barsukova O.A.
Impact of projected climate change on sunflower productivity under rainfed and irrigated conditions in Southern Ukraine

Purpose. To assess the impact of projected agroclimatic changes on sunflower crop productivity and yield in Southern Ukraine under natural and regulated water supply using mathematical modelling, and to determine the effectiveness of irrigation as an adaptation measure to climate change. **Methods.** The study employed the MODSON-7 (Water-Thermal Regime and Sunflower Productivity) and MODSOL-6 (Crop Productivity Formation under Irrigation) simulation models. Calculations were performed for the baseline climate period (1986–2015) and the projected period (2026–2050) under the RCP 8.5 climate scenario for the Northern and Southern Steppe subzones of Ukraine. Agroclimatic conditions, crop water regime, leaf area index, dry biomass accumulation, reproductive organ formation and seed yield were evaluated. Irrigation efficiency was additionally assessed under different drought intensities. **Results.** The simulations revealed pronounced spatial differences in sunflower response to projected climate change. In the Northern Steppe, improved moisture availability during the early growing season is expected to increase leaf area index from 1.35 to 2.19 m²/m², total dry biomass from 426.07 to 624.71 g/m² and seed yield from 1.7 to 2.3 t/ha. In contrast, intensified aridisation in the Southern Steppe will reduce leaf area index to 0.69 m²/m², substantially decrease biomass accumulation and lower seed yield to 0.6 t/ha. The study demonstrated that maintaining optimal soil moisture throughout the growing season stabilises the crop water regime, enhances the realization of sunflower production potential, and increases seed yield by 2.5–3.0-fold compared with rainfed conditions, even under extreme drought. **Findings.** The response of sunflower to projected climate change is primarily controlled by natural moisture availability. Irrigation is an effective climate adaptation measure that stabilises crop productivity, mitigates water stress and enhances the resilience of agricultural production under increasing climatic aridity.

Key words: mathematical modelling, agroclimatic conditions, climatic aridisation, water regime, adaptation measures, crop production process, seed yield, steppe zone.

Дата першого надходження статті до видання: 20.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.08.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.09.2026