

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗМІН КЛІМАТУ НА УМОВИ ВИРОЩУВАННЯ ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ ОЛІЙНОГО СОНЯШНИКУ В ПІВНІЧНОМУ ПРИЧОРНОМОР'І

ЖИГАЙЛО Т.С. – кандидат сільськогосподарських наук

orcid.org/0000-0002-9580-5922

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

ВОЖЕГОВА Р.А. – доктор сільськогосподарських наук, професор,

академік Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0002-3895-5633

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

ЖИГАЙЛО Д.С. – аспірант

orcid.org/0009-0002-6704-4019

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

ЖИГАЙЛО О.Л. – кандидат географічних наук

orcid.org/0000-0002-3552-327X

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

ПІЛЯРСКА О.О. – кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник

orcid.org/0000-0001-8649-0618

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

Постановка проблеми. Україна посідає третє місце у світі за посівними площами під соняшником, переважно розміщеними у степових і частково лісостепових регіонах, де переважають родючі чорноземи. Основними областями вирощування культури є Дніпропетровська (702,7 тис. га), Кіровоградська (643,4 тис. га), Миколаївська (486,5 тис. га), Харківська (463,9 тис. га) та Одеська (419,7 тис. га) (ДССУ, 2024). За сприятливих умов потенціал валового збору насіння в Україні може перевищувати 15 млн т. Проте, урожайність залишається вкрай нестабільною через зростаючий вплив кліматичних і погодних факторів.

У зв'язку з цим актуальним постає наукове завдання – встановлення закономірностей впливу очікуваних змін клімату на агрокліматичні умови вирощування соняшнику, його продуктивність та валовий збір урожаю, що дозволить сформулювати науково обґрунтовані підходи до адаптації технологій вирощування цієї культури в умовах Північного Причорномор'я.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Соняшник (*Helianthus annuus* L.) є однією з ключових сільськогосподарських культур в Україні, відіграючи стратегічну роль у формуванні продовольчої безпеки та експортного потенціалу держави. Україна стабільно утримує лідерські позиції у світовому виробництві цієї культури, а також є найбільшим експортером соняшникової олії, забезпечуючи понад половину її глобального експорту (5,6 млн т – 57%) [6, 4]. Потужна вітчизняна олійно-жирова промисловість демонструє сталу позитивну динаміку навіть в умовах економічної нестабільності, що підкреслює виняткову значущість галузі для національної економіки.

Насіння сучасних сортів та гібридів соняшнику характеризується високим вмістом жиру (50–54%),

зокрема якісної олії з приємним смаком. Крім того, культура є джерелом цінних мікроелементів, зокрема магнію, що необхідний для підтримання функціонування серцево-судинної системи людини [1].

У контексті глобального потепління питання адаптації агровиробництва до нових кліматичних умов набуває особливої актуальності. Численні дослідження, як зарубіжні [13], так і вітчизняні [12, 10], свідчать про те, що кліматичні зміни створюють серйозні виклики для сільського господарства, зокрема у контексті забезпечення стабільного врожаю. Прогнозування впливу кліматичних факторів є необхідним елементом стратегічного планування агровиробництва [5].

Мета досліджень полягала у вивченні впливу прогнозованих кліматичних змін на агрокліматичні умови росту, розвитку та формування продуктивності соняшнику в Північному Причорномор'ї для оптимізації технологічних процесів вирощування цієї культури та впровадження адаптивних заходів управління сучасними агротехнологіями з метою досягнення стабільних і високих показників урожайності в умовах кліматичних трансформацій.

Матеріали та методика дослідження. У ході дослідження було використано модифіковану математичну модель водно-теплогового режиму та продуктивності сільськогосподарських культур, адаптовану до особливостей біології соняшнику (Польовий, 2007). Розроблена модель, блок-схема якої наведена на рис. 1, ґрунтується на системі диференційованих рівнянь, що описують радіаційний, тепловий та водний баланс, а також біомасний обмін у рослинному покриві. У моделюванні враховано функціонування системи «ґрунт – рослина – атмосфера», де визначальними є процеси енергетичного та вологісного обміну.

Ріст і розвиток культурних рослин розглядаються як результат поєднання генетичних особливостей виду та впливу абіотичних чинників довкілля. Акумуляція сухої біомаси здійснюється за рахунок розподілу продуктів фотосинтезу між надземною та підземною частинами рослини з урахуванням їх функціональних потреб. За умов абіотичного стресу в моделі передбачено процеси старіння та ремобілізації асимілятів із вегетативних органів до репродуктивних структур. Особливу увагу приділено моделюванню впливу агрокліматичних умов на формування урожаю соняшнику в ключові міжфазні періоди його онтогенезу.

Розрахунок проводився на основі декадного (10-денного) кроку, що дозволило врахувати динаміку метеорологічних чинників та фаз розвитку культури.

Моделна система була реалізована у вигляді комп'ютерної програми, що дозволяє проводити розрахунки продуктивності соняшнику в різних природно-кліматичних умовах та виявляти критичні чинники, що обмежують врожай.

Для моделювання й аналізу потенційних змін агрокліматичних ресурсів у контексті глобальних кліматичних змін було використано сучасні кліматичні сценарії – Репрезентативні траєкторії концентрацій (Representative Concentration Pathways, RCP). Сценарії RCP охоплюють часові ряди емісій і концентрацій основних парникових газів, аерозолів і хімічно активних речовин в атмосфері, що дозволяє змодельовати можливі варіанти радіаційного впливу на кліматичну систему [19, 18, 11]. У дослідженні були застосовані два сценарії:

- RCP2.6 – сценарій зменшення викидів, що передбачає низький рівень радіаційного впливу ($2,6 \text{ Вт/м}^2$ до 2100 року відносно доіндустріального рівня 1750 р.);
- RCP6.0 – сценарій стабілізації з помірним впливом ($6,0 \text{ Вт/м}^2$ до 2100 року).

Для комплексної оцінки впливу кліматичних змін на умови вирощування соняшнику використовувалися агрокліматичні показники, що характеризують:

- радіаційний режим (сонячна інсоляція, фотосинтетична активна радіація);
- водно-теплові умови (температурний режим, атмосферні опади, випаровуваність);
- рівень вологозабезпеченості посівів упродовж вегетаційного періоду – від посіву до настання збиральної стиглості.

Аналіз змін проводився за двома часовими відрізками:

- **базовий період:** 1980–2010 рр.;
- **прогнозований період:** 2021–2050 рр. згідно зі сценаріями RCP2.6 та RCP6.0.

Результати дослідження. Агрокліматичні умови Північного Причорномор'я. Результати моделювання показали чітку тенденцію до загального підвищення температурного фону в Північному Причорномор'ї за обома кліматичними сценаріями (RCP2.6 і RCP6.0). У зимовий період середня температура повітря зростатиме на $4,7^\circ\text{C}$ та $4,9^\circ\text{C}$ відповідно (табл. 1), що свідчить про послаблення зимового сезону і трансформацію кліматичних умов у напрямку помірно-тепліх. За обома сценаріями середньозимові температури

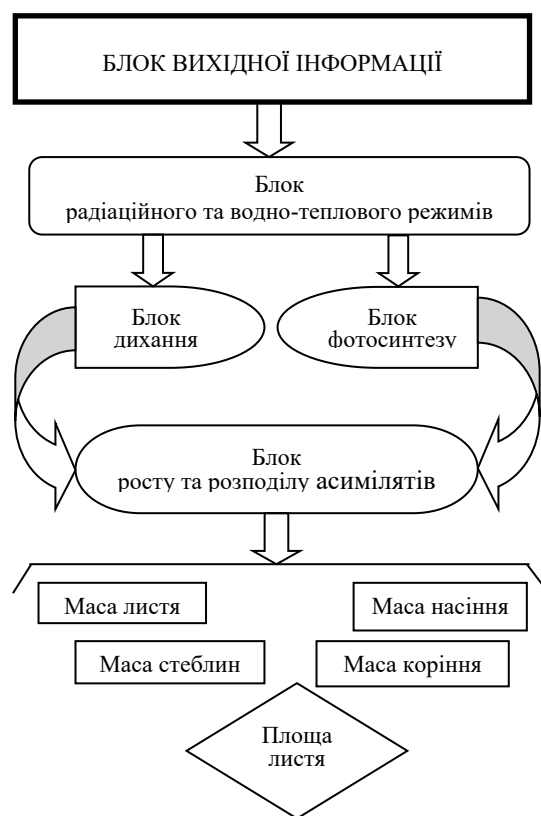


Рис. 1. Блок-схема математичної моделі водно-теплого режиму та продуктивності соняшнику

перевищуватимуть 0°C , що є нетиповим для базового кліматичного періоду. Найінтенсивніше потепління у зимовому сезоні прогнозується в грудні – на $4,2^\circ\text{C}$ (RCP2.6) та $5,4^\circ\text{C}$ (RCP6.0).

Весняний сезон також характеризується істотним приростом середньої температури: $12,4^\circ\text{C}$ та $12,7^\circ\text{C}$ порівняно з $9,7^\circ\text{C}$ у базовому періоді. Найбільше потепління спостерігатиметься у березні – на $3,9$ – $4,0^\circ\text{C}$, що свідчить про ймовірне зміщення початку активної вегетації культур.

Влітку прогнозується зростання середньосезонної температури на $2,9^\circ\text{C}$ за сценарієм RCP2.6 та на $3,4^\circ\text{C}$ за RCP6.0. Найвищі температурні аномалії очікуються у липні, коли температури перевищуватимуть базові значення на $3,9^\circ\text{C}$ і $3,7^\circ\text{C}$ відповідно. У серпні очікується підвищення на $1,5^\circ\text{C}$ (RCP2.6) та $3,1^\circ\text{C}$ (RCP6.0), що свідчить про можливу інтенсифікацію теплового стресу в рослин.

Осінній період демонструє тенденцію до подовження літнього тепла. У вересні температура повітря сягатиме $20,3^\circ\text{C}$, що на $3,4^\circ\text{C}$ вище за норму. У жовтні спостерігатиметься приріст на $4,9^\circ\text{C}$, у листопаді – на $3,6$ – $3,8^\circ\text{C}$, залежно від сценарію. Таким чином, традиційне осіннє зниження температур буде відтерміноване, що змінює умови завершення вегетації культур.

Загалом, аналіз середньомісячних температур свідчить про те, що зими як такої фактично не спостерігатиметься, літній період починатиметься вже в травні й триватиме до вересня включно.

Таблиця 1

Порівняння середніх місячних температур повітря по сезонах

Сезон	Місяці	Кліматичні періоди				
		1980-2010 рр.	2021-2050 рр.			
			Сценарії			
			RCP2.6	Різниця	RCP6.0	Різниця
		Середня температура повітря, °С				
Зима	грудень	0,1	4,3	4,2	5,5	5,4
	січень	-1,6	2,4	4,0	1,0	2,6
	лютий	-1,3	3,4	4,7	3,6	4,9
Середня за сезон		-0,9	3,4	4,3	3,4	4,3
Весна	березень	3,0	6,9	3,9	7,0	4,0
	квітень	9,9	12,2	2,3	12,4	2,5
	травень	16,1	18,2	2,1	18,8	2,7
Середня за сезон		9,7	12,4	2,8	12,7	3,1
Літо	червень	20,5	23,7	3,2	23,8	3,3
	липень	23,1	27,0	3,9	26,8	3,7
	серпень	22,5	24,0	1,5	25,6	3,1
Середня за сезон		22,0	24,9	2,9	25,4	3,4
Осінь	вересень	16,9	20,3	3,4	20,3	3,4
	жовтень	8,9	13,8	4,9	13,8	4,9
	листопад	4,5	8,1	3,6	8,3	3,8
Середня за сезон		10,1	14,1	4,0	14,1	4,0

Таблиця 2

Характеристики теплозабезпеченості сільськогосподарських культур

Характеристики теплозабезпеченості		Кліматичні періоди, роки				
		1980-2010	2021-2050			
			Сценарії			
			RCP2.6	Різниця	RCP6.0	Різниця
Дата переходу температури повітря через 5°C:	навесні	17.03	29.03	+12	25.03	+8
	восени	3.11	3.11	0	7.11	+4
Дата переходу температури повітря через 10°C:	навесні	14.04	16.04	+2	18.04	+4
	восени	18.10	18.10	0	18.10	0
Тривалість періоду з температурою вище:	5°C	230	220	-10	226	-4
	10°C	187	185	-2	183	-4
Суми температур за період з температурою:	>5°C	3773	3641	-132	3746	-27
	>10°C	3488	3428	-60	3341	-147

Оцінка забезпеченості тепловими ресурсами для холодостійких культур (період із середньодобовими температурами понад 5 °C) показала (табл. 2), що навесні перехід через 5 °C відбуватиметься пізніше, ніж у базовому періоді: на 12 днів за RCP2.6 та на 8 днів за RCP6.0. Восени ж, навпаки, повернення температур нижче 5 °C за RCP2.6 відбуватиметься у ті самі терміни, що й у базовому періоді, а за RCP6.0 – із затримкою на 4 дні. Це зумовлює скорочення тривалості цього періоду на 10 днів (RCP2.6) і 4 дні (RCP6.0), відповідно. Як наслідок, сумарне накопичення температур незначно, але зменшиться на 132 °C за RCP2.6 і на 27 °C за RCP6.0.

Для теплолюбних культур (температури вище 10 °C) весняний перехід через цю межу за RCP2.6 майже не відрізнятиметься від базового періоду, тоді як за RCP6.0 відбуватиметься із затримкою на чотири доби. Осінні переходи за обома сценаріями збігатимуться з базовими. Загальні суми ефективних температур

у цьому періоді також будуть дещо нижчими: 3428 °C за RCP2.6 і 3341 °C за RCP6.0 проти 3488 °C у контрольному періоді.

Оцінка динаміки зволоження на основі сезонного розподілу атмосферних опадів у Північному Причорномор'ї (табл. 3) в умовах прогнозованих кліматичних змін виявила характерні зміни у водному режимі агроєкосистем. За сценарієм RCP2.6 спостерігається загальне зниження річної суми опадів, яка становитиме близько 365 мм, що відповідає 84% від базової багаторічної норми (435 мм). Разом із тим простежується нерівномірний розподіл зволоження між сезонами.

У зимовий період, навпаки, передбачається збільшення кількості опадів на 15% у порівнянні з базовими значеннями. Весняний сезон також характеризується певним приростом – до 108 мм проти 95 мм у контрольному періоді, що створює кращі умови для весняного відновлення вегетації. Водночас найбільш критичні

Таблиця 3

Характеристики водного режиму та умов зволоження сільськогосподарських культур

Характеристики	Сезон, рік	Кліматичні періоди, роки				
		1980- 2010	Сценарії			
			RCP2.6	Різниця	RCP6.0	Різниця
Опади, мм	Зима	83	95	115%	112	135%
	Весна	95	108	114%	120	126%
	Літо	148	59	40%	62	42%
	Осінь	109	103	94%	108	99%
	Рік	435	365	84%	402	92%
ГТК, від. од.	Період з температурами повітря вище 10 °С	0,8	0,6	75%	0,6	75%

Таблиця 4

Фази розвитку та тривалість вегетаційного періоду соняшнику

Фази розвитку, тривалість періоду	1986-2010	Кліматичний період, роки			
		2021-2050			
		Сценарії:			
		RCP2.6	Різниця	RCP6.0	Різниця
Сівба	26.04	09.04	-17	10.04	-16
Сходи	11.05	26.04	-15	27.04	-14
Цвітіння	09.07	02.07	-7	03.07	-6
Збиральна стиглість	29.08	16.08	-13	17.08	-12
Тривалість періоду	125	129	+4	129	+4

зміни відбуватимуться влітку – періоді активного росту та формування продуктивності культур: кількість опадів очікувано скоротиться до 40% від базового рівня, що посилює ризики посушливих умов у фазу наливу насіння. Восени опади дещо знижуватимуться, залишаючись на рівні 94% від контрольних значень.

У межах сценарію RCP6.0 також прогнозується скорочення річної суми атмосферних опадів – до 402 мм, що становить 92% від базового показника. Незважаючи на загальну тенденцію до зменшення опадів, річна сума за цим сценарієм є вищою порівняно з RCP2.6. Сезонна структура зволоження при цьому зберігає аналогічну динаміку: підвищення у зимово-весняний період та суттєве зменшення в літній сезон.

Таким чином, обидва сценарії змін клімату вказують на прогресуюче зменшення річного зволоження, з концентрацією дефіциту опадів у літній період, що може істотно ускладнювати формування врожаю без застосування заходів штучного зволоження, зокрема крапельного або дощувального зрошення.

Аналіз продуктивності посівів соняшнику в умовах агрокліматичних трансформацій за сценаріями RCP2.6 та RCP6.0. На основі фактичних агрокліматичних даних (табл. 4) встановлено, що в регіоні Північного Причорномор'я традиційні строки сівби соняшнику припадають на третю декаду квітня. Поява сходів зазвичай

відбувається через 12–14 днів після сівби, фаза цвітіння настає на початку липня, а збиральна стиглість – наприкінці серпня.

За умов реалізації кліматичного сценарію RCP2.6 очікується істотне зміщення строків фенологічного розвитку культури в бік більш ранніх. Зокрема, прогнозується, що терміни сівби змістяться приблизно на 17 днів раніше у порівнянні з базовим періодом, що спричинить також більш ранню появу сходів – на 15 днів. Цвітіння передбачається орієнтовно на 2 липня, що на один тиждень раніше від багаторічного середнього терміну. Збирання врожаю припадатиме на середину серпня – приблизно на 13 днів раніше за традиційні строки. Загальна тривалість періоду від сівби до досягнення збиральної стиглості становитиме 129 днів, що на 4 дні менше, ніж у базовому кліматичному періоді.

Результати моделювання за сценарієм RCP6.0 демонструють близьке до RCP2.6 зміщення фаз розвитку. Показники строків сівби, сходів, цвітіння та дозрівання насіння суттєво не відрізняються, що вказує на схожу динаміку фенологічних змін за обох сценаріїв.

За фактичними даними, тривалість вегетаційного періоду соняшнику в регіоні становить в середньому 125 днів. Попри те, що кліматичні зміни сприятимуть більш ранньому початку і завершенню розвитку рослин, загальна тривалість вегетації залишатиметься

практично незмінною. Це зумовлює необхідність переоцінки фаз критичної чутливості культури до погодних чинників у контексті адаптації технологічних прийомів вирощування.

Порівняльна оцінка агрокліматичних умов росту та розвитку соняшнику за сценаріями кліматичних змін RCP2.6 і RCP6.0. З метою оцінювання впливу прогнозованих кліматичних трансформацій на формування умов для росту та розвитку соняшнику, проведено порівняльний аналіз двох ключових міжфазних періодів: «сходи – цвітіння» та «цвітіння – збиральна стиглість», відповідно до сценаріїв кліматичних змін RCP2.6 та RCP6.0 (табл. 5).

У період «сходи – цвітіння» за реалізації сценарію RCP2.6 відзначається деяке зниження середньодобової температури повітря – 17,2 °C проти 19,8 °C у базовому періоді. Водночас кількість опадів у цей проміжок також зменшується – до 89% від багаторічної норми. З огляду на помірні температури та менше зволоження, очікується зниження сумарного випаровування (267 мм проти 334 мм у базовому періоді), що становить лише 79% від стандартного рівня. Проте баланс між вологоотриманням і вологоспоживанням залишатиметься стабільним, і коефіцієнт вологозабезпечення посівів сягатиме 0,57 від. од., що відповідає базовому значенню.

При моделюванні умов за сценарієм RCP6.0 спостерігається схожа динаміка: середньодобова температура

становить 17,4 °C, що також нижче за базову. Сума опадів у міжфазний період трохи зменшиться – до 100 мм проти 110 мм у контрольному періоді. При цьому показники вологоспоживання та вологопотребності знизяться до 82% і 72% відповідно до базових величин. Незважаючи на це, показник забезпеченості вологою дещо поліпшиться, досягнувши 0,60 від. од., що свідчить про потенційно сприятливіші умови вологозабезпечення на тлі загального зниження водного навантаження на культуру.

Таким чином, зміни агрокліматичних умов у фазі «сходи – цвітіння» за обома сценаріями характеризуються зниженими температурами та обмеженим зволоженням, однак коефіцієнт вологозабезпечення лишається достатнім для забезпечення нормального росту соняшнику в початковий період вегетації.

У дослідженні проаналізовано особливості агрокліматичного режиму в критичний для продуктивності період – від фази цвітіння до настання збиральної стиглості – відповідно до кліматичних сценаріїв RCP2.6 та RCP6.0 (табл. 6).

Згідно з результатами моделювання, за сценарієм RCP2.6 зазначений міжфазний період характеризуватиметься дещо вищими середніми температурами повітря (23,3 °C), що перевищує базове значення (22,5 °C). На тлі цього спостерігається істотне зниження кількості атмосферних опадів – лише 55% від багаторічної

Таблиця 5

Порівняльна характеристика агрокліматичних умов росту та розвитку соняшнику за міжфазний період сходи – цвітіння

Агрокліматичні показники	Кліматичний період, роки				
	1980-2010	2021-2050			
		Сценарії:			
		RCP2.6	Різниця	RCP6.0	Різниця
	період сходи - цвітіння				
Середня температура, °C	19,8	17,2	-2,6	17,4	-2,4
Сума опадів, мм	110	98	89%	100	91%
Сумарне випаровування, мм	189	153	81%	154	82%
Випаровуваність, мм	334	267	78%	258	77%
Дефіцит випаровування, мм	145	114	79%	104	72%
Вологозабезпеченість, від. од.	0,57	0,57	0	0,60	105%

Таблиця 6

Порівняльна характеристика агрокліматичних умов росту та розвитку соняшнику за міжфазний період цвітіння – збиральна стиглість

Агрокліматичні показники	Кліматичний період, роки				
	1980-2010	2021-2050			
		Сценарії:			
		RCP2.6	Різниця	RCP6.0	Різниця
	період цвітіння – збиральна стиглість				
Середня температура, °C	22,5	23,3	+0,8	23,7	+1,2
Сума опадів, мм	55	30	55%	25	46%
Сумарне випаровування, мм	57	72	126%	82	144%
Випаровуваність, мм	263	348	132%	365	139%
Дефіцит випаровування, мм	206	276	134%	283	137%
Вологозабезпеченість, від. од	0,22	0,21	95%	0,22	0

норми. В умовах підвищених температур суттєво зростатиме інтенсивність випаровування, яке досягне 126% порівняно з базовим періодом (348 мм проти 263 мм). Унаслідок цього дефіцит вологи у ґрунті також зростатиме – до 134% від базового рівня. Незважаючи на це, відносна вологозабезпеченість у фазі «цвітіння – збиральна стиглість» становитиме 95% від середнього багаторічного значення, що свідчить про лише часткове погіршення умов.

За умов сценарію RCP6.0 зростання температур буде ще більш вираженим – середній показник для періоду сягне 23,7 °C, що перевищує як базове значення, так і відповідний показник RCP2.6. Дефіцит опадів буде більш значимим: лише 46% від базового рівня, що ще нижче у порівнянні з попереднім сценарієм (25 мм проти 30 мм). На тлі інтенсивнішого випаровування (144% від базового) і підвищеного випаровувального тиску атмосфери (139%), дефіцит вологи сягне 137%, що свідчить про різке погіршення гідротермічного режиму в другій половині вегетації. Такі умови можуть критично обмежувати налив і масу насіння, без додаткового зволоження.

Сумарний аналіз засвідчує, що у Північному Причорномор'ї і в базовий період 1980–2010 рр., і у прогнозованому періоді 2021–2050 рр., агрокліматичні умови в період «цвітіння – збиральна стиглість» залишаються несприятливими з точки зору вологозабезпечення. Навіть при зміні кліматичних сценаріїв не спостерігається поліпшення ситуації – зростання температурного фону і зменшення кількості опадів підсилюють ризик розвитку посушливих явищ. Це свідчить про необхідність застосування адаптаційних заходів, зокрема впровадження зрошення в критичні фази розвитку соняшнику для стабілізації рівня врожайності.

Сукупна характеристика агрокліматичних умов вегетаційного періоду соняшнику за сценаріями кліматичних змін. Аналіз сумарних агрокліматичних параметрів на протязі повного вегетаційного періоду – від сходів до збиральної стиглості (табл. 7) – свідчить про певні зміни водно-теплогового режиму під впливом кліматичних трансформацій за сценаріями RCP2.6 та RCP6.0.

Зокрема, середньодобова температура протягом вегетації в обох сценаріях виявляється дещо нижчою у порівнянні з базовим періодом: на 1,0 °C за сценарієм

RCP2.6 та на 0,9 °C за RCP6.0. При цьому сумарна кількість опадів впродовж вегетаційного циклу зменшиться, становлячи лише 78% (RCP2.6) та 76% (RCP6.0) від базових кліматичних значень.

Ці зміни супроводжуються зниженням сумарного випаровування – до рівня 91–92% від багаторічної норми. Водночас випаровуваність, навпаки, демонструє зростання до 103–104%, що є наслідком підвищеного атмосферного попиту на вологу. У результаті цього дефіцит випаровування зростає до 390–396 мм, що перевищує базове значення (352 мм), поглиблюючи ризики посух і стресів в умовах вегетації.

Наявні фактичні дані свідчать, що за сучасних умов вологозабезпечення культури в Північному Причорномор'ї становить лише близько 40% від її фізіологічних потреб. У прогнозованому періоді 2021–2050 рр. ситуація залишатиметься подібною, і за жодним із розглянутих сценаріїв не очікується суттєвого поліпшення водного режиму. Отже, відсутність тенденції до зростання природної вологозабезпеченості підкреслює необхідність впровадження адаптивних агротехнологічних заходів – передусім, зрошення – як ключового чинника стабілізації врожайності в умовах посилення кліматичних викликів.

Оцінювання продуктивності агробіоценозу та урожайності насіння соняшнику в умовах сценаріїв кліматичних змін RCP2.6 і RCP6.0. У разі реалізації кліматичного сценарію RCP2.6 очікується суттєве зміщення термінів основних фенологічних фаз розвитку соняшнику. Зокрема, посів культури передбачатиметься приблизно на дві декади раніше у порівнянні з базовим періодом, що зумовлює відповідне прискорення всього вегетаційного циклу. Формування фотосинтетичного апарату та розвиток листової поверхні в початкові етапи росту відбуватимуться більш повільно (рис. 2а), проте до початку цвітіння (перша декада липня) площа листя сягатиме 2,5 м²/м², що становить 114% від середньої багаторічної норми.

Саме на цю фазу припадатиме пік розвитку культури. У цей період чиста продуктивність фотосинтезу (табл. 8) відповідатиме 103% від базової, а фотосинтетичний потенціал зростає до 111%. Приріст сухої біомаси вже на другу декаду травня становитиме 19,5 г/м² – в той час як

Таблиця 7

Порівняльна характеристика агрокліматичних умов росту та розвитку соняшнику за вегетаційний період від сходів до збиральної стиглості

Агрокліматичні показники	Кліматичний період, роки				
	1980-2010	2021-2050			
		Сценарії:			
		RCP2.6	Різниця	RCP6.0	Різниця
	період від сходів до збиральної стиглості				
Середня температура, °C	21,5	20,5	-1,0	20,6	-0,9
Сума опадів, мм	165	128	78%	125	76%
Сумарне випаровування, мм	246	225	91%	227	92%
Випаровуваність, мм	598	615	103%	623	104%
Дефіцит випаровування, мм	352	390	111%	396	113%
Вологозабезпеченість, від. од.	0,40	0,39	98%	0,41	103%

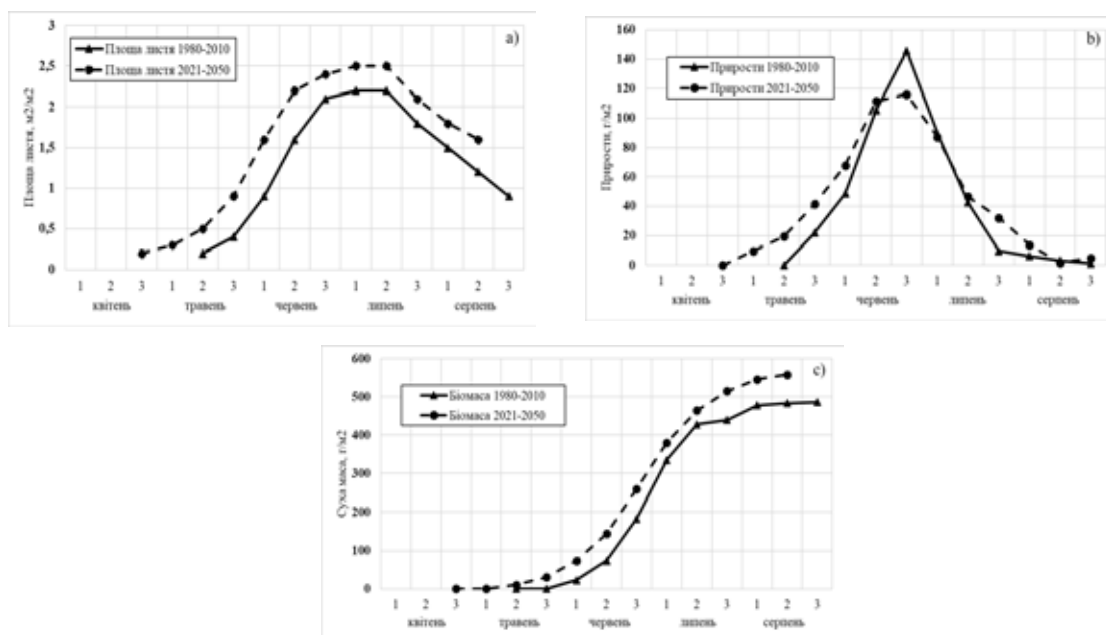


Рис. 2. Динаміка показників продуктивності посівів соняшнику за сценарієм RCP2.6

Таблиця 8

Показники продуктивності посівів і врожаю насіння соняшнику

Показники	1980-2010 базовий	Кліматичний період 2021-2050			
		Сценарії:			
		RCP2.6	Різниця	RCP6.0	Різниця
Максимальна площа листя, m^2/m^2	2,2	2,5	114%	3,4	155%
Чиста продуктивність фотосинтезу, g/m^2	79	81	103%	86	109%
Максимальний приріст біомаси, g/m^2	146,5	156,1	107%	171,7	117%
Суха загальна біомаса на кінець вегетації, g/m^2	486	559	155%	757,1	156%
Фотосинтетичний потенціал за вегетаційний період, m^2/m^2	157	174	111%	220	140%
Урожай насіння, т/га	1,3	1,6	160%	2,2	169%

у базовому періоді лише спостерігалось з'явлення сходів (рис. 2b). Найбільший приріст біомаси, що припадає на фазу цвітіння, прогнозується на рівні 156,1 g/m^2 .

Акумуляція асимілятів у вегетативних і генеративних органах рослини зумовлює формування сумарної біомаси, динаміка якої є індикатором ефективності функціонування фотосинтезуючого апарату. Пікові прирости загальної біомаси фіксуватимуться на шосту, сьому та восьму декади вегетації. До фази повної стиглості сумарна маса сухої речовини досягне 559 g/m^2 (рис. 2c).

Таким чином, за умов реалізації сценарію RCP2.6, з урахуванням зростання фотосинтетичної активності та нарощування біомаси, урожайність насіння соняшнику може підвищитися до 1,6 т/га, що на 0,3 т/га більше від середньої багаторічної врожайності базового періоду (1,3 т/га).

У разі розвитку подій за сценарієм RCP6.0, аналогічно до сценарію RCP2.6, спостерігатиметься тенденція до суттєвого зсуву строків сівби соняшнику на більш ранні терміни – орієнтовно на дві декади. Відповідно,

уповільниться стартовий розвиток фотосинтетичного апарату, а формування листкової поверхні триватиме поступово (рис. 3a). До початку фази цвітіння, яка традиційно припадатиме на першу декаду липня, площа листя досягне свого максимального значення – 3,4 m^2/m^2 , що на 50% перевищуватиме багаторічний середній показник.

Фотосинтетична активність у цей період зростатиме значно: чиста продуктивність фотосинтезу становитиме 109% від базового рівня, а фотосинтетичний потенціал – 140%, що свідчить про посилену біоенергетичну ефективність листкового апарату. Інтенсивність росту рослин упродовж вегетації демонструватиме вищі показники порівняно з базовим періодом. Зокрема, на шосту декаду вегетаційного циклу прогнозується приріст сухої біомаси на рівні 145 g/m^2 , тоді як у базових умовах пік приросту спостерігався на п'ятій декаді. За RCP6.0 максимум нарощування біомаси відбуватиметься на сьомій декаді, досягаючи 117% від базового значення (рис. 3b).

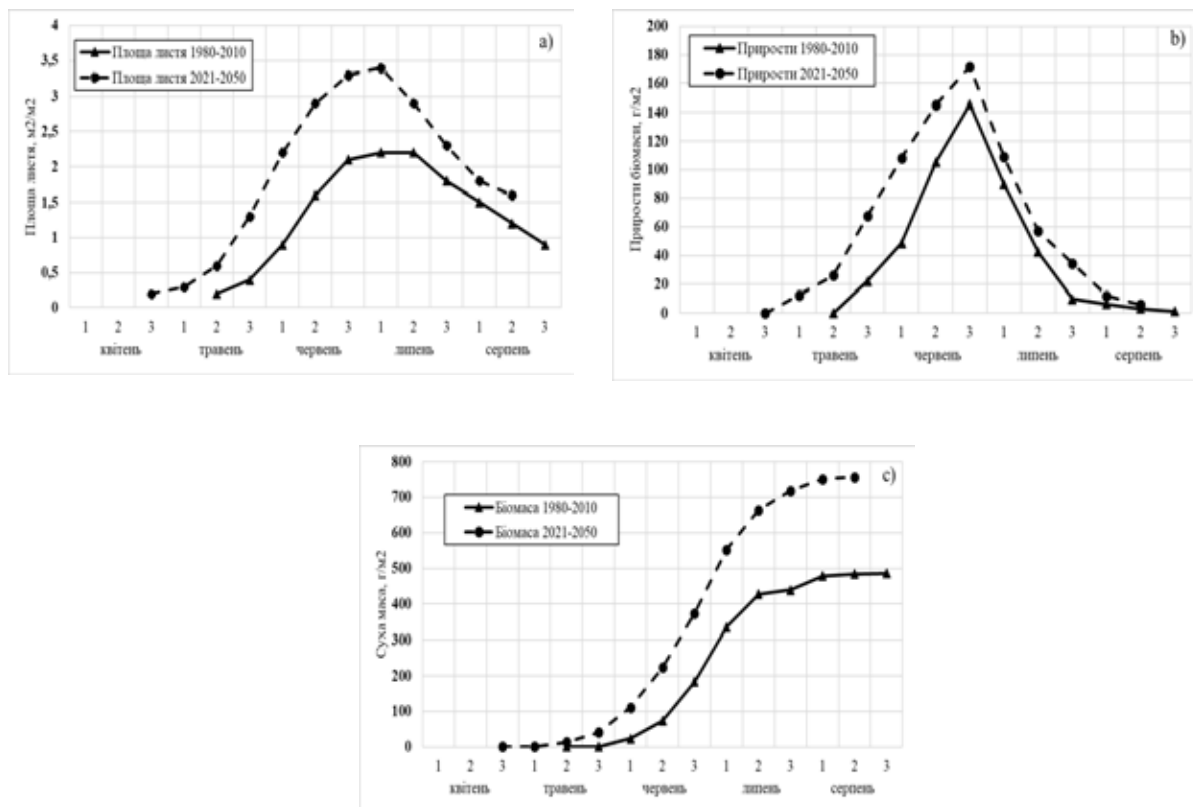


Рис. 3. Динаміка показників продуктивності посівів соняшнику за сценарієм RCP6.0

Динаміка загальної сухої речовини свідчить про значне накопичення біомаси у рослинах за умов сценарію RCP6.0. Уже на п'ятій декаді (перша декада червня) її рівень досягатиме 111 г/м², а до початку фази цвітіння (восьма декада вегетації) зростатиме до 553 г/м². На час повної стиглості соняшнику прогнозується максимальне накопичення біомаси на рівні, що становить 156% від показника базового періоду (рис. 3с).

Завдяки вищій фотосинтетичній продуктивності та покращеному нарощуванню біомаси посіви демонструватимуть підвищений рівень продуктивності. Урожайність насіння, за умов реалізації кліматичного сценарію RCP6.0, може збільшитися у 1,5 рази порівняно з типовими для регіону значеннями базового періоду.

Аналіз впливу кліматичних змін на продуктивність соняшнику є об'єктом численних вітчизняних і зарубіжних наукових досліджень. Зокрема, у роботі Гудзя та співавторів (Гудзь та ін., 2024) за допомогою математичних моделей, які описують довготривалі тенденції продуктивності соняшнику, продемонстровано, що зміни погодних умов суттєво впливають на динаміку врожайності в різних регіонах України. Авторами встановлено, що середньострокові прогнози свідчать про певну стабільність виробництва, однак із регіональними коливаннями, обумовленими агрокліматичними особливостями.

У дослідженні Польового А.М. з колегами [8], присвяченому вирощуванню соняшнику в умовах півдня України, зокрема на Одещині, акцент зроблено на агрокліматичних ризиках, що зумовлені змінами температурного

режиму та дефіцитом опадів. Дослідження підтверджують, що у період 2000–2021 рр. спостерігалось підвищення температурного фону на фоні зниження річної суми опадів у середньому на 17%, що призвело до суттєвого зниження коефіцієнта зволоження ГТК та підвищення ризику розвитку атмосферної посухи.

Кривохижа Є.М. зі співавторами [7] також фіксують тривалі температурні зміни та зменшення опадів на території України, що викликає зростання частоти посух. У межах їхнього аналізу простежено залежність врожайності соняшнику від агрокліматичних параметрів і ринкових чинників. Значна роль відводиться просторовому розподілу вологи, що визначає кінцевий агрономічний результат.

Міжнародний досвід також підтверджує тенденцію до погіршення агрокліматичних умов для вирощування соняшнику. Так, у Туреччині колектив вчених [16], використовуючи модель HadGEM2-ES у рамках сценарію RCP8.5, дійшли висновку, що в другій половині XXI століття прогнозується суттєве зниження врожайності соняшнику, особливо в регіонах інтенсивного виробництва, як-от Текірдаг і Конья.

Результати моделювання за допомогою системи AquaCrop, представлені Gürkan H. [15], свідчать про скорочення врожайності в незрошуваних умовах на 21–50% залежно від сценарію RCP4.5 або RCP8.5. Натомість у разі використання зрошення врожайність, навпаки, зростатиме в межах 10–33%.

У Південній Азії, зокрема в регіоні Пенджаб (Пакистан), вчені [20] продемонстрували, що підвищення

температури на 1–2 °C уже у 2020–2050-х роках призведе до зниження врожайності на 15–25%. Подібні висновки отримано в моделюваннях науковців [17] за допомогою моделі CSM-CROPGRO-Sunflower: прискорення фенологічного розвитку за умов глобального потепління зменшує період ефективної вегетації культури.

У країнах Європейського Союзу проведені дослідження [14] на основі сценаріїв SRES (A1, A2, B1, B2), встановлено, що південні та східні регіони Європи можуть зіткнутися з різким падінням врожайності, зниженням вмісту олії в насінні та трансформацією жирно-кислотного складу через збільшення температур і дефіцит вологи.

Порівняння результатів нашого дослідження з наведеними літературними джерелами свідчить про підтвердження загальної тенденції до зростання температурного режиму та зниження кількості опадів у період вегетації соняшнику. Водночас, наш підхід відрізняється деталізацією аналізу міжфазних періодів: «сходи – цвітіння» та «цвітіння – збиральна стиглість», що дозволяє глибше оцінити критичні етапи водоспоживання та фотосинтетичної активності культури.

Встановлено, що за сценаріями RCP2.6 та RCP6.0 в умовах Північного Причорномор'я, попри загальне зменшення кількості опадів, період «сходи – цвітіння» характеризується відносно задовільною вологозабезпеченістю (індекс 0,57–0,60 від. од.), що сприятиме формуванню достатньо високої листової поверхні та активному фотосинтезу. Це створює основу для інтенсивного накопичення біомаси на ранніх етапах онтогенезу.

Натомість, у другій частині вегетації – від цвітіння до збиральної стиглості – очікується істотне зниження вологозабезпечення (0,21–0,22 від. од.), що ускладнює налив насіння і стримує реалізацію генетичного потенціалу урожайності. У таких умовах прогнозується збільшення урожайності насіння на 25% (RCP2.6) та на 69% (RCP6.0) порівняно з базовим періодом. Однак досягнення максимально можливої продуктивності на рівні 4–5 т/га залишається малоімовірним без впровадження адаптивних заходів, зокрема зрошення, що підтверджується також зарубіжними дослідженнями.

Висновки. За кліматичними сценаріями RCP2.6 та RCP6.0 на території Північного Причорномор'я в усі пори року прогнозується зростання температур повітря. Таке потепління забезпечуватиме достатній рівень теплозабезпеченості як для холодостійких, так і для теплолюбних культур, що сприятиме прискоренню їх розвитку.

У літній період відзначатиметься дефіцит атмосферної вологи. Зниження сезонної суми опадів, особливо в поєднанні з високими температурами, призведе до суттєвого погіршення умов вологозабезпечення, що підтверджується зниженими значеннями гідротермічного коефіцієнта ($GTK \leq 0,6$). Це створює ризики для водного балансу агроєкосистем у критичні фази розвитку рослин.

У період «сходи – цвітіння» за обома сценаріями спостерігатиметься відносно помірний температурний режим і покращене, порівняно з базовим періодом,

зволоження (вологозабезпеченість на рівні 60%). Це створює передумови для інтенсивного росту й розвитку культури на початкових етапах.

У другій половині вегетації очікується значне підвищення температури та зменшення кількості опадів майже вдвічі. Через зростання дефіциту вологи забезпечення посівів соняшнику вологою знизиться до критичних 21–22%, що негативно впливатиме на налив насіння і потенційну продуктивність.

Загалом, протягом усього вегетаційного періоду від «сходів до збиральної стиглості» не прогнозується суттєвого покращення водного режиму. Посушливі умови літа залишаються головним обмежувальним чинником для реалізації потенціалу врожайності соняшнику на рівні 4–5 т/га.

При розрахункових значеннях загальної біомаси посівів на рівні 559 г/м² (RCP2.6) та 757 г/м² (RCP6.0), очікувана врожайність насіння становитиме відповідно 1,6 т/га та 2,2 т/га, що перевищує базовий рівень, однак залишається нижчим за потенційно можливий.

Для забезпечення стабільного виробництва та досягнення високих врожаїв у регіоні доцільно впроваджувати системи зрошення. Рациональне управління водними ресурсами є ключовим фактором адаптації до кліматичних викликів у Північному Причорномор'ї.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Вакал А. П., Литвиненко Ю. І. Рослинництво: навчальний посібник. Суми: ФОП Цьома С.П., 2021. 128 с.
2. Гудзь М., Чухліб А., Симоненко О. Прогностична оцінка впливу кліматичних змін на виробництво соняшнику: аналіз рядів динаміки та моделювання трендів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2024. № 1. С. 438–445. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-67>
3. Державна служба статистики України. 2024. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 16.06.2025).
4. Довгаль О. В. Стан і перспективи розвитку олійно-продуктового підкомплексу АПК України. *Український журнал прикладної економіки*. 2020. Том 5, № 1. С. 359–370.
5. 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(100). С. 180–186. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.22>.
6. Ільків Л.А. Економічні аспекти виробництва соняшнику. *Young Scientist*. 2019. № 10 (74). С. 661–665. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-10-74-139>
7. Кривохижа Є. М., Матвіїшин А. І., Бринь В. Т. Вплив зміни клімату на врожайність основних сільськогосподарських культур в Україні. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2024. Вип. 3 (44). С. 33–37. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-3.5>
8. Польовий А. М., Божко Л. Ю., Барсукова О. А. Агрокліматичні аспекти продуктивності соняшника Одещині в умовах потепління клімату. *Науково-практичний журнал Екологічні науки*. 2022. № 5(44).

- C. 249-254. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.38>
9. Польовий А. М. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроєкосистем. Київ: КНТ, 2007. 344 с.
 10. 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. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201909-04>
 11. Степаненко С. М. 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.
 12. 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. <https://doi.org/10.15407/ugz2016.01.014>
 13. 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. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.024>
 14. Debaeke P., Casadebaig P., Flenet F., Langlade N. Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *Oilseeds and fats, Crops and Lipids*. 2017. № 24(1). D102. <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>
 15. Gürkan H. Evaluation of the Impacts of Climate Change on Sunflower with Aquacrop Model. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*. 2023. № 20(4). Pp. 933-947. <https://doi.org/10.33462/jotaf.1240401>
 16. Hudaverdi G., Yasin O., Nilgun B., Huseyin B., Mustafa Y. Possible Impacts of Climate Change on Sunflower Yield in Turkey. *Agronomy – Climate Change & Food Security*. 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91062>
 17. Muhammad T., Shakeel A., Shah F. et al. The impact of climate warming and crop management on phenology of sunflower-based cropping systems in Punjab, Pakistan. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. Vol. 256–257. P. 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.015>
 18. Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K. et al. The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
 19. Vuuren van D. P., Edmonds J.A., Kainuma M., Riahi K. et al. The representative concentration pathways: an overview. *Climate Change*. 2011. Vol. 109. No. 1-2. P.1-27.
 20. Wajid N. J., Hatem B., Ashfaq A. et. al. Modelling Climate Change Impacts and Adaptation Strategies for Sunflower in Pakistan. *Outlook on Agriculture*. 2016. № 45(1). P. 39-45. <https://doi.org/10.5367/oa.2015.0226>
 1. Vakal, A.P., & Lytvynenko, Yu.I. (2021). *Roslynnytstvo [Crop production]*. Sumy: FOP Tsoma S.P., 128 [in Ukrainian].
 2. Hudz, M., Chukhlib, A., & Symonenko, O. (2024). Prohnostychna otsinka vplyvu klimatychnykh zmin na vyrobnytstvo soniashnyku: analiz riadiv dynamiky ta modeliuvannya trendiv [Prognostic assessment of the impact of climate change on sunflower production: analysis of dynamic series and trend modelin]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 1, 438-445. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-67> [in Ukrainian].
 3. *Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]*. (2024). URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian].
 4. Dovhal, O.V. (2020). Stan i perspektyvy rozvytku oliino-produktovoho pidkompleksu APK Ukrainy [State and prospects for the development of the oil-product subcomplex of the agricultural complex of Ukraine]. *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky*, 5(1), 359-370 [in Ukrainian].
 5. Zhyhailo, O.L., Volvach, O.V., Tolmachova, A.V., & Kostiukevych, T.K. (2021). Vplyv zmin klimatu na urozhainist soniashnyku v Pivnichnomu Stepu Ukrainy: analiz i prohnoz [The impact of climate change on sunflower yield in the Northern Steppe of Ukraine: analysis and forecast]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi akademii*, 1(100), 180-186. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.22> [in Ukrainian].
 6. Ilkiv, L.A. (2019). Ekonomichni aspekty vyrobnytstva soniashnyku [Economic aspects of sunflower production]. *Young Scientist*, 10 (74), 661-665. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-10-74-139> [in Ukrainian].
 7. Kryvokhyzha, Ye.M., Matviishyn, A.I., & Bryn, V.T. (2024). Vplyv zminy klimatu na vrozhaunist osnovnykh silskohospodarskykh kultur v Ukraini [The impact of climate change on the yield of major agricultural crops in Ukraine]. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika*, 3 (44), 33-37. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-3.5> [in Ukrainian].
 8. Polovyi, A.M., Bozhko, L.Yu., & Barsukova, O.A. (2022). Ahroklimatychni aspekty produktyvnosti soniashnyka Odeshchyni v umovakh poteplinnia klimatu [Agroclimatic aspects of sunflower productivity in the Odessa region under conditions of climate warming]. *Naukovo-praktychnyi zhurnal Ekolohichni nauky*, 5(44), 249-254. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.38> [in Ukrainian].
 9. Polovyi, A.M. (2007). *Modeliuvannya hidrometeorologichnoho rezhymu ta produktyvnosti ahroekosystem [Modeling of hydrometeorological regime and productivity of agroecosystems]*. Kyiv: KNT, 344 [in Ukrainian].
 10. Polovyi, V.M., Lukashchuk, L.Ya., & Lukianyk, M.M. (2019). Vplyv zmin klimatu na rozvytok roslynnytstva v umovakh Zakhidnoho rehionu [The impact of climate change on the development of crop production in the conditions of the Western region]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 9(798), 29-34. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201909-04> [in Ukrainian].
 11. Stepanenko, S.M., & Polovoho, A.M. (Eds.). (2018). *Klimatychni ryzyky funktsionuvannya haluzei ekonomiky Ukrainy v umovakh zminy klimatu [Climate risks of the functioning of the branches of the economy of Ukraine in the context of climate change]*. Odessa: «TES», 259-497 [in Ukrainian].

REFERENCES:

1. Vakal, A.P., & Lytvynenko, Yu.I. (2021). *Roslynnytstvo [Crop production]*. Sumy: FOP Tsoma S.P., 128 [in Ukrainian].

12. Tarariko, O.H., Iliencko, T.V., & Kuchma, T.L. (2016). Vplyv zmin klimatu na produktyvnist ta valovi zbory zernovykh kultur: analiz ta prohnoz [The impact of climate change on productivity and gross yields of grain crops: analysis and forecast]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*, 1, 14-22. <https://doi.org/10.15407/ugz2016.01.014> [in Ukrainian].
13. Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Hirich, A., & Bouabid, R. et al. (2018). Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. *Agricultural Systems*. Vol. 162. P. 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.01.024> [in Ukrainian].
14. Debaeke, P., Casadebaig, P., Flenet, F., & Langlade, N. (2017). Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *Oilseeds and fats, Crops and Lipids*. № 24(1). D102. <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>
15. Gürkan, H. (2023). Evaluation of the Impacts of Climate Change on Sunflower with Aquacrop Model. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*. № 20(4). Pp. 933-947. <https://doi.org/10.33462/jotaf.1240401>
16. Hudaverdi, G., Yasin, O., Nilgun, B., Huseyin, B., & Mustafa, Y. (2020). Possible Impacts of Climate Change on Sunflower Yield in Turkey. *Agronomy – Climate Change & Food Security*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91062>
17. Muhammad, T., Shakeel, A., & Shah, F. et al. (2018). The impact of climate warming and crop management on phenology of sunflower-based cropping systems in Punjab, Pakistan. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 256–257. P. 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.015>
18. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., & Tignor, M. et al. (2013). The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535 p.
19. Vuuren van, D.P., Edmonds, J.A., Kainuma, M., & Riahi, K. et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climate Change*. Vol. 109. No. 1-2. P. 1-27.
20. Wajid, N.J., Hatem, B., & Ashfaq, A. et. al. (2016). Modelling Climate Change Impacts and Adaptation Strategies for Sunflower in Pakistan. *Outlook on Agriculture*. № 45(1). P. 39-45. <https://doi.org/10.5367/oa.2015.0226>

Жигайло Т.С., Вожегова Р.А., Жигайло Д.С., Жигайло О.Л., Пилирська О.О. Оцінка впливу змін клімату на умови вирощування та продуктивність олійного соняшнику в Північному Причорномор'ї

Мета. Провести оцінку впливу прогнозованих кліматичних змін на агрокліматичні умови росту, розвитку та формування продуктивності соняшнику в Північному Причорномор'ї для оптимізації технологічних процесів вирощування цієї культури та впровадження адаптивних заходів управління сучасними агротехнологіями з метою досягнення стабільних і високих показників урожайності в умовах кліматичних трансформацій. **Методика.** Для оцінки процесів росту, розвитку та формування продуктивності соняшнику використано модифіковану математичну модель водно-теплогового режиму та продуктивності сільськогосподарських культур, адаптовану

до біологічних особливостей культури. З метою моделювання і аналізу потенційних змін агрокліматичних умов у контексті глобального потепління були використані сучасні кліматичні сценарії – Репрезентативні траєкторії концентрацій (Representative Concentration Pathways, RCP). **Результати.** У межах дослідження проведено комплексний аналіз агрокліматичних умов Північного Причорномор'я у період 2021–2025 рр., з урахуванням прогнозованих змін клімату за сценаріями RCP2.6 та RCP6.0. Оцінку здійснено за фазами вегетаційного циклу соняшнику: «сходи – цвітіння», «цвітіння – збиральна стиглість» та повним періодом «сходи – збиральна стиглість». Результати моделювання свідчать про тенденцію до підвищення температурного режиму впродовж усього року за обома сценаріями. Найбільш суттєвий дефіцит вологи спостерігатиметься в літній період, що підтверджується зниженням гідротермічного коефіцієнта ($ГТК \leq 0,6$), що є індикатором посушливих умов у фазу активної вегетації. Кліматичні зміни зумовлюють істотне зміщення фенологічних фаз культури. Зокрема, очікується, що строки сівби соняшнику зміщуюватимуться на 16–17 днів раніше, що, відповідно, призведе до більш ранньої появи сходів (на 14–15 днів), цвітіння (на 6–7 днів) та збирання врожаю (на 12–13 днів). У першому міжфазному періоді вегетації (сходи – цвітіння) за обох сценаріїв створюються сприятливі умови для формування достатньо високої продуктивності посівів. Максимальна площа листової поверхні на початок цвітіння становитиме $2,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (RCP2.6) та $3,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (RCP6.0), максимальний приріст сухої біомаси – відповідно $156 \text{ г}/\text{м}^2$ та $171 \text{ г}/\text{м}^2$. Однак у другому міжфазному періоді вегетації (цвітіння – збиральна стиглість), коли відбувається формування та налив насіння, очікується зростання аридизації кліматичних умов, що негативно впливає на врожайність. Прогнозована урожайність насіння соняшнику за умов RCP2.6 становитиме близько $1,6 \text{ т}/\text{га}$, а за RCP6.0 – $2,2 \text{ т}/\text{га}$, що у 2–3 рази нижче потенційної продуктивності культури в регіоні. Отримані результати свідчать про необхідність адаптації технологічних підходів до вирощування соняшнику з урахуванням кліматичних викликів найближчого майбутнього. **Висновки.** Для забезпечення стабільного та високого рівня врожайності насіння соняшнику в умовах зростаючої аридизації клімату Північного Причорномор'я доцільним є впровадження адаптивних заходів, зокрема застосування зрошення. Результати дослідження засвідчили, що за прогнозованих кліматичних сценаріїв (RCP2.6 та RCP6.0) без використання додаткових джерел вологи потенціал продуктивності культури істотно не реалізується. Впровадження сучасних систем зрошення дозволить частково компенсувати дефіцит вологи в критичні фази розвитку рослин та забезпечити формування стабільних урожаїв в умовах кліматичних змін.

Ключові слова: соняшник олійний, моделювання, сценарії кліматичних змін, теплозабезпеченість, вологозабезпеченість, міжфазний період, урожайність.

Zhyhailo T.S., Vozhehova R.A., Zhyhailo D.S., Zhyhailo O.L., Piliarska O.O. Assessment of climate change impact on the growing conditions and yield of oilseed sunflower in the Northern Black Sea region

Objective. To assess the impact of projected climate change on the agroclimatic conditions for growth, development, and yield formation of sunflower in the Northern Black Sea region, with the aim of optimizing cultivation technologies and implementing adaptive management

measures in modern agricultural practices to ensure stable and high yields under conditions of climate transformation. **Methodology.** A modified mathematical model of the water–thermal regime and crop productivity, adapted to the biological characteristics of sunflower, was used to assess growth, development, and yield formation processes. To simulate and analyse potential changes in agroclimatic conditions in the context of global warming, contemporary climate change scenarios–Representative Concentration Pathways (RCP)–were applied. **Results.** The study presents a comprehensive analysis of the agroclimatic conditions in the Northern Black Sea region for the period 2021–2025, taking into account projected climate changes under the RCP2.6 and RCP6.0 scenarios. The assessment was conducted for the following sunflower growth stages: “emergence – flowering,” “flowering – physiological maturity,” and the full “emergence – maturity” period. Modelling results indicate a consistent trend toward increasing temperatures throughout the year under both scenarios. The most pronounced moisture deficit is expected during the summer months, as evidenced by a decrease in the hydrothermal coefficient ($HTC \leq 0.6$), which signals drought-prone conditions during active vegetation. Climate change is projected to cause a significant shift in the crop’s phenological stages. Specifically, sowing dates are expected to occur 16–17 days earlier, resulting in earlier emergence (by 14–15 days), flowering (by 6–7 days), and harvesting (by 12–13 days). During the first interphase period (“emergence – flowering”), favourable conditions are expected for achieving relatively high crop productivity under both scenarios. The maximum leaf area index at

the onset of flowering is projected at $2.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ (RCP2.6) and $3.4 \text{ m}^2/\text{m}^2$ (RCP6.0), while the maximum increase in dry biomass will reach $156 \text{ g}/\text{m}^2$ and $171 \text{ g}/\text{m}^2$, respectively. However, in the second interphase period (“flowering – maturity”), when seed formation and filling occur, increasing aridisation of the climate is anticipated, negatively affecting yield. The projected sunflower seed yield is estimated at approximately 1.6 t/ha under RCP2.6 and 2.2 t/ha under RCP6.0—two to three times lower than the crop’s potential productivity in the region. These results highlight the necessity of adapting cultivation technologies to the anticipated climatic challenges in the near future. **Conclusions.** To ensure stable and high sunflower seed yields under the increasing aridisation of the Northern Black Sea climate, the introduction of adaptive measures, particularly irrigation, is advisable. The findings demonstrate that under the projected climate scenarios (RCP2.6 and RCP6.0), without supplementary water sources, the productivity potential of the crop cannot be fully realised. The adoption of modern irrigation systems would partially offset moisture deficits during critical growth stages and ensure stable yields under changing climatic conditions.

Key words: oilseed sunflower, modelling, climate change scenarios, thermal regime, moisture availability, interphase period, yield.

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.10.2025

Дата публікації: 28.11.2025