

УДК 63:551.5:633.11:551.583

Польовий А.М., д.г.н.,

Одеський державний екологічний університет,

Кульбіда М.І., к.г.н., Адаменко Т.І., к.г.н.,

Український гідрометеорологічний центр,

Трофімова І.В., к.ф.-м.н.,

Український інститут досліджень навколишнього середовища та ресурсів

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА АГРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ВИРОЩУВАННЯ ТА ФОТОСИНТЕТИЧНУ ПРОДУКТИВНІСТЬ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ В УКРАЇНІ

Розглядаються зміни агрокліматичних умов вирощування озимої пшениці в осінньо-зимовий та весняно-літній періоди за різними сценаріями зміни клімату та їх вплив на фотосинтетичну продуктивність культури.

Ключові слова: *фотосинтетична продуктивність, зміна клімату, кліматичні сценарії, модель, приріст, оцінка, урожай, озима пшениця.*

Постановка проблеми. Важливою ланкою проблеми зміни глобального клімату є вирішення агрометеорологічної задачі – оцінки зміни агрокліматичних умов вирощування сільськогосподарських культур та впливу цих змін на їх продуктивність. Сільське господарство є найбільш вразливою галуззю економіки України до коливань та змін клімату. Враховуючи інерційний характер сільського господарства та залежність його ефективності від погодних умов, уже зараз необхідне прийняття своєчасних та адекватних рішень щодо складних проблем, обумовлених змінами клімату. В зв'язку з очікуваним підвищенням температури повітря Північної півкулі продовольча безпека України в значній мірі буде залежати від того, наскільки ефективно адаптується сільське господарство до майбутніх змін клімату. Це передбачає завчасну оцінку впливу очікуваних змін клімату на агрокліматичні умови вирощування сільськогосподарських культур, серед яких найбільш поширеними є посіви озимої пшениці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій з проблеми. Результати розрахунків за різними кліматичними сценаріями показують, що процес зміни глобального клімату, який намітився, може привести до підвищення середньої річної температури повітря на 2-4 °С у Північній півкулі вже у 2025-2030 рр.

Моделювання впливу зміни клімату на продуктивність сільськогосподарських культур спирається, з одного боку, на побудову математичних моделей продукційного процесу, які враховують вплив факторів довкілля на формування продуктивності агроєкосистем, з іншого, – на отримані різними способами кліматичні сценарії, що проектуються на період вегетації культурних рослин.

Результати досліджень продукційного процесу рослин дозволяють судити про вплив підвищених концентрацій CO₂ в атмосфері на фотосинтетичний апарат, хімічний склад біомаси, параметри росту, розподіл асимілятів, морфогенез, швидкість розвитку рослин, показники стійкості до стресових умов [1, 2]. Найбільш однозначною реакцією рослин на тривале вирощування при підвищеному вмісті CO₂ в атмосфері є збільшення площі їхньої листової поверхні, зменшення відношення площі листя до сухої маси рослини, збільшення рівня чистої продуктивності фотосинтезу та відносної швидкості

росту сухої біомаси, особливо в період вегетативного росту [3]. Відзначається також вплив підвищених концентрацій CO₂ на ефективність використання води рослинами та їх стійкість до водяного стресу [4].

Дослідження впливу зміни клімату на майбутні агрокліматичні умови вирощування сільськогосподарських культур звичайно виконуються на основі якого-небудь сценарію зміни клімату. Найчастіше використовуються сценарії, в основу яких входять розрахунки за моделями загальної циркуляції атмосфери і палеокліматичної реконструкції.

Слід зазначити, що дослідження впливу зміни глобального клімату на сільське господарство уже охопили значний ареал розповсюдження світових продовольчих культур [5].

Зупинимось більш детально на дослідженнях, виконаних стосовно зміни агрокліматичних умов вирощування сільськогосподарських культур на Європейському континенті.

В умовах Скандинавії та Ісландії потепління клімату повинно призвести до підвищення рівня температурного режиму за період вегетації, збільшення приходу сонячної радіації і збільшення концентрації CO₂ та збільшення тривалості періоду вегетації культурної рослинності [6]. Підвищення температури та збільшення кількості опадів у північно-західній Європі призведе до зростання витрат води на сумарне випаровування, суттєво зменшиться тривалість періоду вегетації сільськогосподарських культур [7]. Поєднання підвищення температури і концентрації CO₂ в умовах Нідерландів [8] та в Німеччині [9] призведе до змін агрокліматичних умов вирощування зернових культур. Значне скорочення періоду вегетації при потепленні передбачається в умовах Словенії [10], Болгарії та Австрії [11]. В середземноморському регіоні передбачається аридизація клімату [12].

В умовах Білорусі потепління клімату призведе до погіршення умов зволоження ґрунтів та збільшення випаровуваності [13]. Для умов Росії [14-19] прогнозується значне зміщення меж природних зон на півночі та зменшення продуктивності зернових. Відзначається [18, 19], що до 2030 року почастишають посушливі явища вегетаційного періоду і несприятливі умови перехідних сезонів (весна і осінь). Це призведе до збільшення втрат урожаю практично всіх традиційних культур.

Таким чином, отримано досить багато оцінок впливу глобальної зміни клімату на світове сільське господарство як на глобальному, так і на регіональному рівнях, які потребують узагальнення та критичного підходу до інтерпретації результатів.

Мета дослідження. Основною метою дослідження є оцінка зміни агрокліматичних умов вирощування озимої пшениці та їх впливу на фотосинтетичну продуктивність культури в зв'язку з можливою зміною клімату за різноманітними сценаріями зміни клімату України.

Для досягнення цієї мети вирішувались наступні основні задачі:

- оцінка зміни агрокліматичних умов осінньої вегетації, перезимівлі та весняно-літньої вегетації озимої пшениці при різних сценаріях зміни клімату;
- оцінка фотосинтетичної продуктивності озимої пшениці за умови реалізації різних сценаріїв зміни клімату.

Методи і матеріали. Для вирішення задачі моделювання впливу зміни клімату на продуктивність озимої пшениці в Україні використовувалися кліматичні сценарії, які проектувалися на період вегетації культури, а також модель формування урожаю озимої пшениці, яка дозволяє кількісно оцінити реакцію рослин на зміну агрокліматичних умов їх вирощування.

Кліматичні сценарії. Як сценарії зміни кліматичних параметрів, нами були використані опубліковані в [20] результати побудови сценаріїв зміни клімату в Україні:

– розрахунків змін кліматичних показників за стаціонарними моделями загальної циркуляції атмосфери, які досліджують реакцію кліматичної системи на подвоєння вмісту CO₂: *GFDL* (модель Лабораторії геофізичної гідродинаміки США); *UKMO* (модель Метеорологічного бюро Сполученого Королівства);

– сценаріїв зміни температури повітря і кількості атмосферних опадів в Україні на основі результатів розрахунків за нестационарною моделлю, у якій моделюється відгук на поступове (як більш реалістичне) зростання вмісту парникових газів на 30 % (модель Лабораторії геофізичної гідродинаміки США – *GFDL-30* %).

При побудові сценаріїв зміни клімату в Україні [20] була проведена інтерполяція даних модельних розрахунків у місцях розташування метеорологічних станцій і комбінування цих даних з даними реальних метеорологічних спостережень. В результаті цього отримані характеристики зміни температури повітря і суми опадів для календарних місяців і для різних природно-кліматичних зон України: Полісся, Лісостепу і Степу. В середньому для території України ці дані наведені нами в табл. 1. Відповідно до цих сценаріїв за умови подвоєння вмісту CO₂ в атмосфері температура повітря в Україні підвищиться в усі сезони року. Найбільш істотно температура повітря зросте навесні. Кількість атмосферних опадів в середньому по Україні також буде збільшуватися. В окремі сезони це збільшення може перевищувати 20 %.

Для оцінки зміни агрокліматичних умов осінньої вегетації, перезимівлі і весняно-літньої вегетації озимої пшениці за різними сценаріями зміни клімату нами розглядалася зміна характеристик температури повітря і суми опадів у порівнянні з базовою кліматичною нормою за період 1961–1990 рр.

Модель формування урожаю озимої пшениці. Для оцінки реакції культури озимої пшениці на зміну агрокліматичних умов вирощування в зв'язку зі зміною клімату нами застосовувалася модель формування урожаю озимої пшениці [21-23]. В основі цієї моделі лежить система рівнянь радіаційного, теплового і водного балансів і балансу біомаси (вуглеводів та азоту) у рослинному покриві.

Моделюються радіаційний, тепловий і водний режими системи ґрунт – рослина – атмосфера, режим мінерального живлення рослин та вплив цих режимів на процеси фотосинтезу і дихання рослин, поглинання вологи й елементів мінерального живлення кореневою системою рослин, росту і розвитку рослин, фотосинтетичну продуктивність посівів озимої пшениці.

Основою біологічної частини моделі є моделювання *приросту біомаси рослин*. Він розглядається як баланс вуглеводів (продуктів фотосинтезу і розпаду старіючих тканин, витрат на дихання) і білків (поглинання азоту з ґрунту, продуктів розпаду тканин, витрат на відновлення життєдіяльних структур тканин) на кожному часовому кроці

$$\frac{dm}{dt} = \Phi + C_{hydr} - R + N_{abs} + N_{hydr} - N_{sen}, \quad (1)$$

де $\frac{dm}{dt}$ – приріст біомаси рослин;

Φ – сумарний фотосинтез рослин;

C_{hydr} – маса вуглеводів, що утворюються при розпаді старіючих тканин;

R – витрати вуглеводів на дихання;

N_{abs} – кількість поглиненого з ґрунту азоту;

N_{hydr} – кількість азоту, що утвориться при розпаді білків;

N_{sen} – витрати на відновлення білків.

Таблиця 1 – Розрахункові зміни величин температури повітря ΔT та опадів P в середньому по Україні, отримані на основі моделей загальної циркуляції атмосфери [20]

Показник	Місяць												Середня за рік
	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень	
Сценарій <i>GFDL-30 %</i> (період 2030–2040 рр.)													
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	3,79	2,16	3,71	1,99	1,12	1,87	0,63	2,25	2,42	2,56	1,68	2,53	2,22
P , відн. од.	0,95	1,15	1,25	0,89	1,20	1,27	1,48	0,96	0,80	0,95	1,20	0,93	1,07
Сценарій <i>GFDL</i>													
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	1,99	4,66	5,00	5,59	3,92	4,20	4,81	4,89	3,12	3,54	5,82	5,24	4,40
P , відн. од.	1,09	1,38	1,20	1,01	1,05	1,08	1,24	1,12	1,55	1,10	1,21	1,04	1,14
Сценарій <i>UKMO</i>													
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	5,85	8,07	7,93	8,00	4,02	3,67	3,85	3,99	4,03	5,11	5,85	5,83	5,52
P , відн. од.	1,05	1,33	1,01	1,04	1,10	1,00	1,15	1,29	1,02	0,88	1,36	1,15	1,09

Процес фотосинтезу листя опишемо формулою [24, 25], у якій крім таких факторів зовнішнього середовища як фотосинтетично активна радіація і концентрація CO_2 в атмосфері, враховується також вплив на фотосинтез рівня мінерального живлення, фази розвитку рослин, температурного режиму і вологозабезпеченості рослин [21]:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{1/\Phi_{pot}K_{\Phi}(N_{str}^L) + 1/a_C C_0 + 1/a_{\Phi}\Pi} \min\left\{\alpha_{\Phi}, \Psi_{\Phi}, \frac{ET}{ET_{pot}}\right\}, \quad (2)$$

де Φ_{pot} – інтенсивність потенційного фотосинтезу;

a_C – нахил вуглецевої кривої фотосинтезу;

C_0 – концентрація CO_2 в атмосфері;

a_{Φ} – нахил світлової кривої фотосинтезу;

Π – поглинена рослинним покривом фотосинтетично активна радіація;

α_{Φ} – онтогенетична крива фотосинтезу;

Ψ_{Φ} – температурна крива фотосинтезу;

$K_{\Phi}(N_{str}^L)$ – коефіцієнт забезпеченості рослин елементами мінерального живлення;

ET – сумарне випаровування,

ET_{pot} – випаровуваність.

При стресових умовах і старінні рослин відбуваються процеси розпаду тканин. Опишемо ці процеси рівняннями кінетики ферментативного каталізу. При досить високій концентрації субстрату швидкість розпаду може бути описана рівнянням реакції нульового порядку, а при досить низькій – рівнянням реакції першого порядку

$$\frac{dC_{hydr}}{dt} = K_{hydr}^0 K_{hydr}(T_a) K_{hydr}(W) \quad \text{при} \quad C \geq C_{crit} \quad (3)$$

і

$$\frac{dC_{hydr}}{dt} = K_{hydr}^1 K_{hydr}(T_a) C K_{hydr}(W) \quad \text{при} \quad C < C_{crit}, \quad (4)$$

де K_{hydr}^0 – константа швидкості реакції нульового порядку;

K_{hydr}^1 – константа швидкості реакції першого порядку;

$K_{hydr}(T_a), K_{hydr}(W)$ – функції впливу температури повітря T_a і вологості ґрунту W на швидкість розпаду старіючих тканин;

C_{crit} – критична кількість вуглеводів, яка визначає початок реакції розпаду як реакції першого порядку;

C – кількість вуглеводів старіючих тканин.

Витрати на дихання росту і дихання підтримки моделюються з використанням концепції [26] з врахуванням зміни інтенсивності дихання в онтогенезі [21] і під впливом температури повітря [27]

$$\frac{dR}{dt} = \alpha_R \left[C_G \frac{dm}{dt} + C_m m \varphi_R \right], \quad (5)$$

де α_R – онтогенетична крива дихання;
 C_G – коефіцієнт витрат на дихання росту;
 C_m – коефіцієнт витрат на дихання підтримки;
 m – маса рослин;
 Φ_R – температурна крива дихання.

Процес поглинання азоту рослиною з ґрунту йде активним шляхом і пасивним – винесенням азоту в процесі транспірації

$$\frac{dN_{abs}}{dt} = \frac{N_{abs}^{\max} \bar{N}_{s.r.} m_r}{K_{abs}^N + \bar{N}_{s.r.}} K^N(T_S) + T_r \bar{N}_{s.w.}, \quad (6)$$

де N_{abs}^{\max} – максимальна швидкість поглинання азоту кореневою системою рослин;
 $\bar{N}_{s.r.}, \bar{N}_{s.w.}$ – концентрація азоту відповідно на поверхні коренів і у ґрунтового розчині;
 m_r – маса коренів;
 K_{abs}^N – константа Міхаеліса-Ментен;
 $K^N(T_S)$ – функція впливу температури ґрунту на швидкість поглинання азоту кореневою системою;
 T_r – транспірація рослин.

Розпад білків в органах рослини описується рівняннями, аналогічними рівнянням (3) і (4).

Приймається, що швидкість відновлення білків кожного i -го органа рослин пропорційна вмісту азоту в тканинах цього органа

$$\frac{dN_{isen}}{dt} = \alpha_{sen} N_i, \quad (7)$$

$$i \in l, s, r, p,$$

де α_{sen} – відносна швидкість відновлення білків;

N_i – вміст азоту в тканинах i -го органа: l – листя; s – стебла; r – корені; p – колосся.

При моделюванні росту рослин розглядається, що рослина складається з двох функціонально пов'язаних частин: надземної і підземної. Надземна частина в свою чергу розділяється на окремі органи. Розподілення вуглеводів і азоту між окремими органами надземної частини рослини (листочками, стеблами, колоссям) відбувається з використанням концепції розподілу їх в міру потреби в період росту поділом і в період росту розтягуванням органів рослин [21].

Наведена вище система рівнянь (1)–(7) описує вплив факторів довкілля на основні процеси життєдіяльності рослин та формування їхньої фотосинтетичної продуктивності.

Результати дослідження. При виконанні досліджень як базові агрокліматичні величини розглядалися середні багаторічні характеристики за період 1961–1990 рр. Стосовно цих величин розглядалася зміна агрокліматичних умов осінньої вегетації, перезимівлі і весняно-літньої вегетації озимої пшениці при різних сценаріях зміни клімату. У відповідності з кліматичними сценаріями визначалася зміна темпів розвитку

рослин і термінів настання фаз розвитку рослин, агрокліматичних умов вирощування рослин, а також за допомогою моделі формування урожаю розраховувались запаси продуктивної вологи у ґрунті під культурою та вологозабезпеченість посівів.

Під впливом агрокліматичних умов вирощування формується цілком визначена динаміка показників фотосинтетичної продуктивності посівів озимої пшениці, які обумовлюють рівень її продуктивності. Такими показниками є: фотосинтезуюча площа і фотосинтетичний потенціал посівів, приріст рослинної біомаси на одиницю площі, чиста продуктивність фотосинтезу (ефективність процесу фотосинтезу на одиницю площі листової поверхні в одиницю часу), урожай загальної біомаси посівів, коефіцієнт господарської ефективності, який показує частку урожаю господарсько-цінної частини урожаю в урожаї загальної біомаси посівів.

Показники фотосинтетичної продуктивності озимої пшениці і урожай зерна розраховані за допомогою моделі формування урожаю культури на фоні:

- середніх багаторічних агрокліматичних характеристик за період 1961–1990 рр;
- змінених агрокліматичних умов відповідно до прийнятих сценаріїв зміни клімату.

Розглянемо зміну показників агрокліматичних умов вирощування озимої пшениці, обумовлених ними характеристик фотосинтетичної продуктивності цієї культури і рівнів урожайності в середньообласному розрізі для природно-кліматичних зон України при реалізації кліматичних сценаріїв *GFDL*, *GFDL-30 %* і *UKMO*.

Агрокліматичні умови і продуктивність озимої пшениці за умови реалізації кліматичних сценаріїв.

Кліматичний сценарій GFDL. Осіння вегетація озимої пшениці (посів – припинення вегетації) буде проходити в значно більш пізні терміни (табл. 2) в порівнянні з середніми багаторічними, в умовах зниженого на 0,2–1,4 °С температурного режиму (табл. 3). Зима стане значно теплішою. Температура повітря найхолоднішої зимової декади буде на 2–5 °С вище ніж звичайно. Сума негативних температур, яка характеризує умови перезимівлі, зменшиться у всіх природно-кліматичних зонах в 3–4 рази (на 280–320 °С). Тривалість періоду перезимівлі скоротиться на 1,5–2 місяці.

Кількість опадів за період осінньої вегетації зросте у всіх природно-кліматичних зонах: у Поліссі, Лісостепу і Північному Степу на 23–38 %, у Південному Степу, Прикарпатті та Закарпатті на 9–18 %. Зросте також кількість опадів і за зимовий період. Кількість опадів на один день періоду перезимівлі озимої пшениці у природно-кліматичних зонах становитиме від 1,6 до 1,9 мм за добу, а для Південного Степу – до 3,0 за добу.

Передбачається більш ранній (на одну-дві декади) початок відновлення вегетації озимої пшениці (табл. 2). Період від відновлення вегетації до колосіння буде протікати при трохи нижчих температурах (на 0,5–1,0 °С) у всіх природно-кліматичних зонах, крім Північного Степу, де вона підвищиться на 0,4 °С (табл. 4). Проходження другого періоду весняно-літньої вегетації (колосіння – воскова стиглість) буде відбуватися на фоні підвищених температур повітря (на 0,8–2,3 °С) і тільки у Південному Степу температура повітря збережеться практично на колишньому рівні. Відбудеться значне у бік більш ранніх термінів зміщення часу настання у рослин фази воскової стиглості (на 17-30 днів).

Сума опадів за період весняно-літньої вегетації зменшиться у Поліссі, Лісостепу і Прикарпатті до 66–83 % кліматичної норми, у степовій зоні вона залишиться практично на колишньому рівні. Це обумовить і відповідну динаміку запасів продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту.

Таблиця 2 – Фази розвитку озимої пшениці (середні багаторічні та за різними сценаріями зміни клімату)

Природно-кліматична зона	Дати настання фаз розвитку				
	посів	припинення вегетації	відновлення вегетації	воскова стиглість	тривалість весняно-літнього періоду вегетації
Середні багаторічні дані					
Полісся	6.09	7.11	31.03	13.07	105
Лісостеп	9.09	8.11	29.03	7.07	101
Північний Степ	11.09	12.11	27.03	2.07	98
Південний Степ	19.09	25.11	21.03	26.06	98
Прикарпаття	9.09	11.11	29.03	20.07	114
Сценарій <i>GFDL</i>					
Полісся	12.10	12.12	12.03	12.06	93
Лісостеп	8.10	10.12	12.03	20.06	101
Північний Степ	14.10	14.12	8.03	5.06	90
Південний Степ	23.10	28.12	1.03	31.05	92
Прикарпаття	15.10	14.12	8.03	16.06	101
Сценарій <i>GFDL-30 %</i>					
Полісся	28.09	30.11	1.03	9.06	101
Лісостеп	29.09	30.11	28.02	6.06	99
Північний Степ	13.10	13.12	25.02	1.06	97
Південний Степ	1.11	5.01	20.02	23.05	93
Прикарпаття	23.10	22.12	23.02	13.06	111
Сценарій <i>UKMO</i>					
Полісся	19.10	19.12	16.02	27.05	101
Лісостеп	14.10	12.12	17.02	29.05	102
Північний Степ	11.10	11.12	4.03	3.06	92
Південний Степ	20.10	25.12	22.02	30.05	98
Прикарпаття	14.10	23.12	25.01	25.05	120

Зміна агрокліматичних умов вирощування озимої пшениці призведе у Поліссі до більш раннього формування площі листя і скорочення часу її функціонування в порівнянні з середньою багаторічною динамікою площі листя озимої пшениці (рис. 1). Підвищення чистої продуктивності фотосинтезу від 5,4 до 8,5 г/м² за добу призведе до збільшення в 1,2 рази найбільших за вегетацію приростів загальної біомаси – до 220,3 г/м² за декаду, що наступить на 2–3 декади раніше звичайного (рис. 2).

В умовах Лісостепу, Північного і Південного Степу відносна площа листя буде в 1,2–1,4 рази вище звичайного рівня (табл. 5). Зросте фотосинтетичний потенціал посівів, що в поєднанні з підвищенням чистої продуктивності фотосинтезу від 6,2–6,8 до 7,2–7,8 г/м² за добу призведе до збільшення в 1,4 рази найбільших за вегетацію приростів загальної біомаси до 341–435 г/м² за декаду. Урожай загальної біомаси зросте в 1,2–1,4 рази.

У Прикарпатті та Закарпатті скорочення періоду вегетації озимої пшениці на 13 днів і деяке погіршення умов вологозабезпеченості посівів (табл. 4) приведе до формування менших розмірів площі листя і скорочення часу її функціонування, що призведе до зниження урожаю загальної біомаси до 905 г(с.р.)/м².

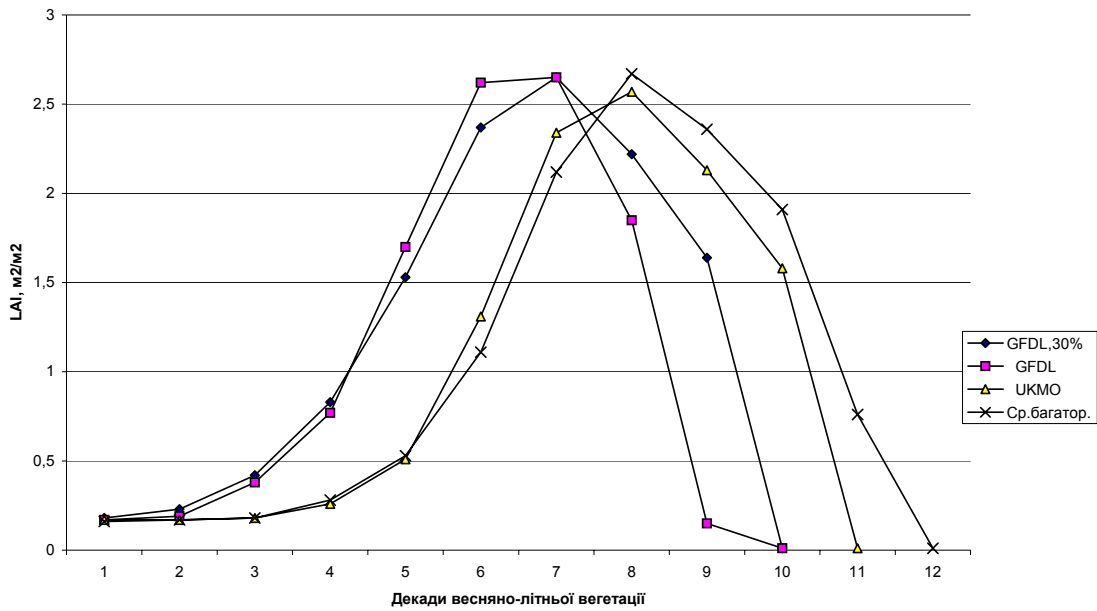


Рисунок 1 - Динаміка відносної площі листя (LAI) озимої пшениці за умови реалізації різних сценаріїв зміни клімату в порівнянні з середньою багаторічною. Полісся.

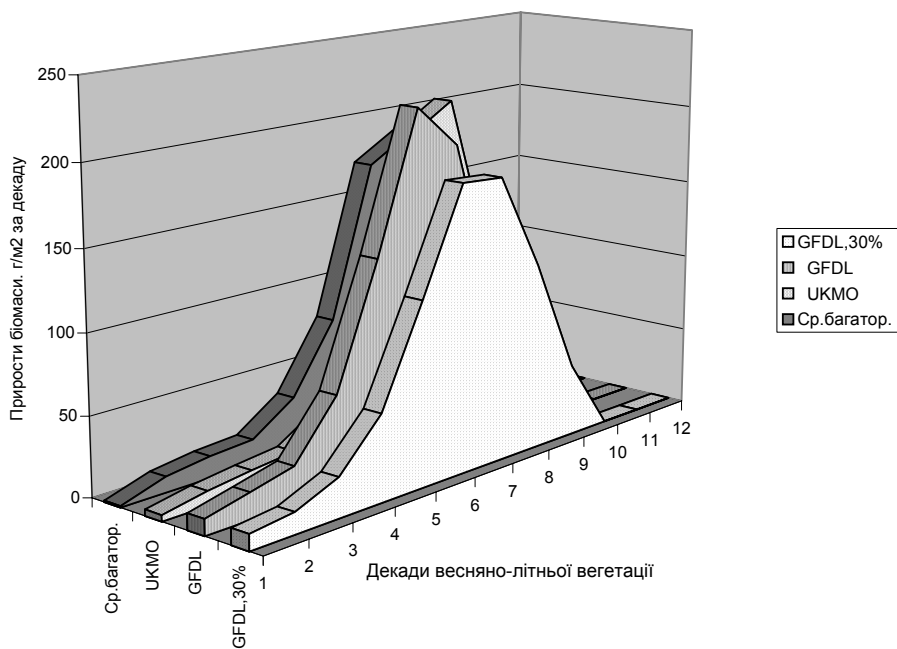


Рисунок 2 - Динаміка приростів загальної біомаси озимої пшениці за умови реалізації різних сценаріїв зміни клімату в порівнянні з середніми багаторічними. Полісся.

Таблиця 3 – Агрокліматичні умови вирощування озимої пшениці в осінньо-зимовий період

Природно-кліматична зона	Період				
	посів – припинення вегетації		перезимівля		
	середня температура повітря, °С	кількість опадів, мм	сума від'ємних температур, °С	середня температура найхолоднішої декади, °С	кількість опадів, мм
Середні багаторічні дані					
Полісся	8,8	87	445	-6,8	211
Лісостеп	9,2	71	440	-6,5	198
Північний Степ	9,2	66	415	-6,4	200
Південний Степ	8,6	65	195	-4,0	182
Прикарпаття	9,0	92	335	-5,9	190
Сценарій <i>GFDL</i>					
Полісся	8,5	108	116	-4,6	144
Лісостеп	9,0	98	119	-4,8	164
Північний Степ	7,8	81	99	4,4	160
Південний Степ	8,3	77	32	-9,1	189
Прикарпаття	8,0	100	79	-3,7	132
Сценарій <i>GFDL-30 %</i>					
Полісся	10,8	97	–	+0,4	122
Лісостеп	11,7	82	–	+0,4	151
Північний Степ	8,4	84	–	+1,5	123
Південний Степ	7,1	93	–	+3,5	53
Прикарпаття	9,7	83	–	+1,8	95
Сценарій <i>UKMO</i>					
Полісся	7,2	116	–	+0,7	123
Лісостеп	8,3	91	5,0	-0,5	128
Північний Степ	8,8	84	31	-1,9	143
Південний Степ	8,7	86	–	+0,4	96
Прикарпаття	7,4	102	–	+1,6	70

Кліматичний сценарій GFDL-30 %. Передбачається, що осіння вегетація озимої пшениці в порівнянні з середніми багаторічними строками буде проходити в значно пізніші терміни (табл. 2) в умовах підвищеного на 0,7–2,0 °С температурного режиму (табл. 3). Тривалість періоду перезимівлі у Поліссі та Лісостепу скоротиться на 1,5 місяця, а у Прикарпатті та Закарпатті, Північному і Південному Степу – практично вдвічі. Середня температура повітря найбільш холодної зимової декади підвищиться на 6–8 °С і стане позитивною.

Кількість опадів за період від посіву озимої пшениці до припинення вегетації може збільшитися у Поліссі та Лісостепу на 12–16 %, а в Північному і Південному Степу на 27–43 %. Тільки у Прикарпатті та Закарпатті ймовірно зменшення кількості опадів до 90 % від кліматичної норми. Кількість опадів на один день періоду зимівлі у Прикарпатті та Закарпатті, Лісостепу і Північному Степу зросте до 1,5–1,7 мм за добу, а в Поліссі та Південному Степу зменшиться до 1,2–1,3 мм за добу.

Початок відновлення вегетації озимої пшениці настане (табл. 2) на місяць раніше багаторічних термінів. В період від відновлення вегетації до колосіння буде спостерігатися (табл. 4) знижений на 0,8–2,1 °С температурний режим у всіх природно-кліматичних зонах. У Поліссі, Лісостепу і Північному Степу період колосіння – воскова стиглість буде протікати практично на фоні середніх багаторічних температур повітря, а в Південному Степу, Прикарпатті та Закарпатті температура повітря знизиться в порівнянні з нормою на 0,9–2,3 °С.

Таблиця 4 – Агрокліматичні умови вирощування озимої пшениці у весняно-літній період

Природно-кліматична зона	Кількість опадів, мм	Середня температура повітря за період, °С		Середні запаси вологи у метровому шарі ґрунту за період, мм		Сума ФАР за вегетаційний період, ккал/см ²	Сумарне випаровування за вегетаційний період, мм	Дефіцит вологи за вегетаційний період, мм
		відновлення вегетації – колосіння	колосіння – воскова стиглість	відновлення вегетації – колосіння	колосіння – воскова стиглість			
Середні багаторічні дані								
Полісся	260	13,2	17,1	207	166	21,8	312	64
Лісостеп	189	12,9	18,1	146	123	21,2	252	52
Північний Степ	147	13,3	18,7	111	90	20,5	220	101
Південний Степ	114	13,3	19,4	87	51	21,6	192	175
Прикарпаття	444	12,3	17,1	251	236	24,1	428	212
Сценарій GFDL								
Полісся	194	12,7	19,4	215	156	18,4	251	81
Лісостеп	157	13,3	19,5	162	100	19,4	245	19
Північний Степ	144	12,5	20,3	149	75	18,2	226	42
Південний Степ	107	12,4	19,2	128	68	17,5	193	73
Прикарпаття	291	11,3	17,9	234	196	20,6	313	135
Сценарій GFDL-30 %								
Полісся	196	11,1	17,4	238	166	18,8	268	90
Лісостеп	172	11,2	18,3	165	96	20,0	236	34
Північний Степ	151	13,0	18,5	132	77	18,3	217	35
Південний Степ	111	11,5	17,1	122	64	17,3	173	81
Прикарпаття	346	11,5	16,2	232	209	20,9	318	191
Сценарій UKMO								
Полісся	186	11,6	18,5	242	165	17,7	253	93
Лісостеп	174	12,3	19,0	187	108	18,3	245	16
Північний Степ	131	13,1	20,1	105	65	18,2	171	98
Південний Степ	106	10,6	18,5	120	63	18,4	177	104
Прикарпаття	265	12,4	17,8	237	189	20,6	291	121

В усіх природно-кліматичних зонах буде спостерігатися зсув часу настання дозрівання (фази воскової стиглості) у бік більш ранніх термінів (на 30–37 днів).

Кількість опадів за період вегетації озимої пшениці зменшиться у Поліссі, Лісостепу, Прикарпатті та Закарпатті до 75–91 % в порівнянні з кліматичною нормою. У Північному і Південному Степу сума опадів збережеться практично на колишньому рівні. Середні за період відновлення вегетації – колосіння запаси продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту в Поліссі, Лісостепу й у Північному Степу складатимуть 113–119 % від середніх багаторічних величин (рис. 3). У Північному Степу в перші 6–7 декад весняно-літньої вегетації запаси продуктивної вологи утримуватимуться на

Таблиця 5 – Фотосинтетична продуктивність озимої пшениці (середні багаторічні дані та за різними кліматичними сценаріями)

Природно-кліматична зона	Період максимального росту		За період вегетації			
	площа листової поверхні, м ² /м ²	приріст загальної сухої маси, г/м ² за декаду	фотосинтетичний потенціал, м ²	чиста продуктивність фотосинтезу, г/м ² за добу	урожай загальної біомаси, г(с.р.)/м ²	коефіцієнт господарської ефективності
Середні багаторічні дані						
Полісся	2,67	187,2	123,1	5,45	750,7	0,35
Лісостеп	3,97	313,3	173,9	6,25	1193,2	0,32
Північний Степ	2,98	251,0	130,7	6,53	929,1	0,33
Південний Степ	2,73	246,9	117,3	6,80	900,8	0,32
Прикарпаття	3,35	243,8	161,2	5,49	1026,2	0,30
Сценарій <i>GFDL</i>						
Полісся	2,65	220,3	106,8	8,53	805,0	0,34
Лісостеп	4,90	435,4	186,3	7,24	1390,8	0,30
Північний Степ	3,89	340,6	144,3	7,17	1165,9	0,31
Південний Степ	3,70	351,0	140,1	7,77	1222,8	0,33
Прикарпаття	2,83	230,7	130,4	5,88	905,4	0,31
Сценарій <i>GFDL-30 %</i>						
Полісся	2,65	179,3	122,9	5,38	755,3	0,32
Лісостеп	4,40	322,9	192,6	6,38	1239,1	0,33
Північний Степ	4,32	324,2	182,1	7,34	1293,1	0,33
Південний Степ	3,41	265,8	159,4	5,94	1112,4	0,36
Прикарпаття	2,92	202,8	150,1	5,22	896,5	0,32
Сценарій <i>UKMO</i>						
Полісся	2,57	211,9	111,8	5,62	736,2	0,35
Лісостеп	3,81	340,1	155,1	6,79	1215,1	0,32
Північний Степ	3,27	270,8	130,4	6,74	1016,3	0,31
Південний Степ	2,52	296,4	122,9	7,50	1066,7	0,32
Прикарпаття	2,89	233,8	137,2	5,20	871,5	0,29

істотно більш високому рівні. Особливо сприятливими будуть умови вологозабезпеченості у Південному Степу. Очікується, що в Прикарпатті та Закарпатті запаси продуктивної вологи в період весняно-літньої вегетації становитимуть 88–92 % від середніх багаторічних значень.

Максимальна площа листа озимої пшениці сформується у Поліссі на дві декади раніше багаторічних термінів (рис. 1) і залишиться на рівні норми (табл. 5). На такому ж рівні сформується і фотосинтетичний потенціал посівів (до 122,9 м²/м² за вегетаційний період). Найбільші за вегетацію прирости загальної біомаси (до 179,3 г/м² за декаду), будуть спостерігатися на 2-3 декади раніше багаторічних (рис. 2). Урожай загальної біомаси буде практично на рівні середньої багаторічної.

Більш сприятливі умови для фотосинтетичної продуктивності посівів озимої пшениці складуться у Лісостепу, Північному і Південному Степу. Особливо сприятливі умови очікуються в степовій зоні, де значно зміниться динаміка площі листа в порівнянні з середньою багаторічною динамікою. Очікується її більш високий рівень в період максимального розвитку рослин (у 1,2–1,4 рази вище звичайного рівня) і в 1,4 рази зросте фотосинтетичний потенціал посівів, що призведе до значного підвищення загальної продуктивності.

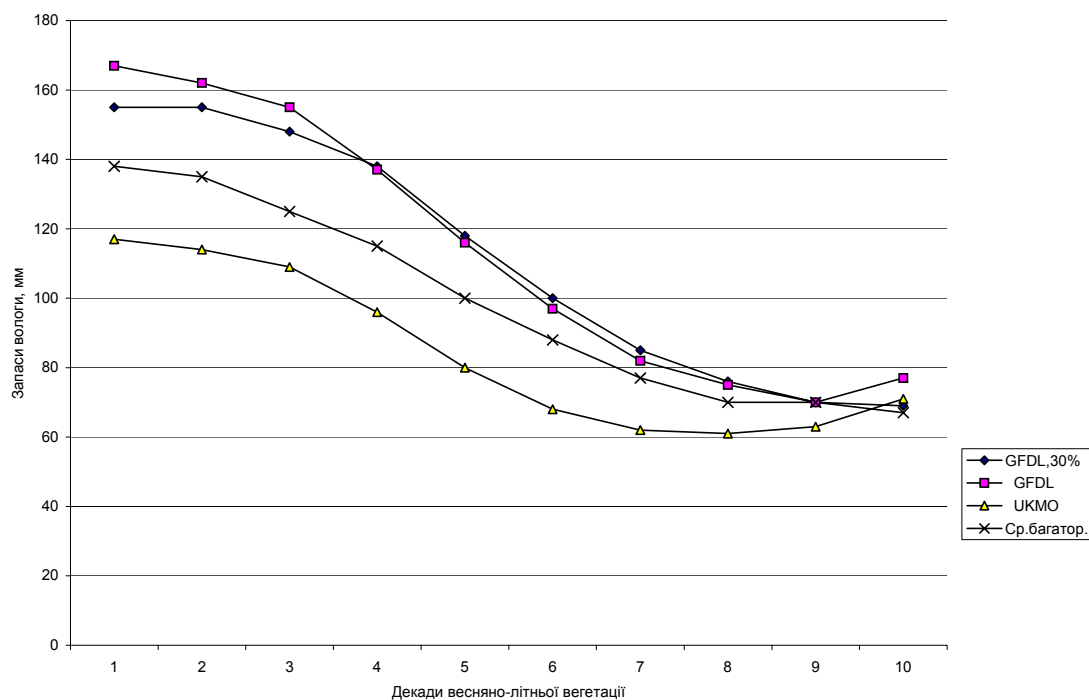


Рисунок 3 - Динаміка запасів продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту під озимою пшеницею за умови реалізації різних сценаріїв зміни клімату в порівнянні з середніми багаторічними даними. Північний Степ.

Погіршення умов вологозабезпеченості посівів у Прикарпатті та Закарпатті (табл. 4) призведе до зниження всіх показників фотосинтетичної продуктивності посівів (табл. 5). Сформується менша площа листя – $2,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$ в порівнянні з $3,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$ і менший фотосинтетичний потенціал посівів (0,93 від багаторічного).

Кліматичний сценарій UKMO. Посів і припинення вегетації рослин озимої пшениці будуть спостерігатися (табл. 2) на місяць пізніше багаторічних термінів. Практично у всіх природно-кліматичних зонах, за винятком крайнього півдня, осіння вегетація буде проходити на фоні більш низьких (на $0,4\text{--}1,6 \text{ }^\circ\text{C}$) температур в порівнянні з кліматичною нормою (табл. 3). Відбудеться значне підвищення температури в зимовий період. Середня температура повітря найбільш холодної зимової декади підвищиться на $4\text{--}6 \text{ }^\circ\text{C}$, при цьому тривалість зимового спокою рослин скоротиться більш ніж у 2-3 рази.

Сума опадів за період від посіву до припинення вегетації озимої пшениці зросте у Поліссі, Лісостепу, Північному і Південному Степу на $27\text{--}33 \%$. Менш значним це збільшення буде у Прикарпатті та Закарпатті – до 11% .

Кількість опадів на один день періоду перезимівлі трохи збільшиться і становитиме майже у всіх природно-кліматичних зонах (за винятком Південного Степу) від $1,8$ до $2,1 \text{ мм}$ за добу.

Відновлення вегетації озимої пшениці буде спостерігатися на 1–2 місяці раніше багаторічних строків (табл. 2). Проходження періоду від відновлення вегетації до колосіння у Поліссі, Лісостепу і Південному Степу буде відбуватися на фоні знижених на $0,6\text{--}2,7 \text{ }^\circ\text{C}$ температур повітря (табл. 4). У Північному Степу, Прикарпатті та Закарпатті температура повітря збережеться на середньому багаторічному рівні. За період колосіння – воскова стиглість у Поліссі, Лісостепу, Північному Степу,

Прикарпатті та Закарпатті відбудеться підвищення на 0,9–2,4 °С температури повітря. У Південному Степу очікується негативна аномалія температури повітря (–0,9 °С). Настання у рослин фази воскової стиглості зміститься у бік більш ранніх термінів.

Очікується зменшення суми опадів за період весняно-літньої вегетації у всіх природно-кліматичних зонах до 60–93 % кліматичної норми. За період відновлення вегетації – колосіння середні запаси продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту в Північному Степу, Прикарпатті та Закарпатті досягнуть 94 % від середніх багаторічних значень, а в період колосіння – воскова стиглість знизяться до 72–80 % норми. У Південному Степу протягом усієї вегетації складуться сприятливі умови вологозабезпеченості посівів.

Показники фотосинтетичної продуктивності посівів озимої пшениці в умовах Полісся, Лісостепу і Північного Степу будуть близькими до середніх багаторічних. Це обумовить відповідно і близькі до звичайного рівня значення урожайності загальної біомаси (табл. 5). Тільки в умовах Південного Степу поєднання більшої величини фотосинтетичного потенціалу і більш високого рівня чистої продуктивності фотосинтезу призведе до підвищення в 1,2 рази урожаю загальної біомаси. Для Прикарпаття і Закарпаття буде характерним зменшений рівень показників фотосинтетичної продуктивності посівів озимої пшениці.

Така динаміка показників фотосинтетичної продуктивності посівів озимої пшениці показує, що реалізація кліматичного сценарію *УКМО* буде менш сприятливою для формування продуктивності озимої пшениці в Україні в порівнянні з іншими кліматичними сценаріями.

Висновки. За умови реалізації розглянутих сценаріїв зміни клімату є підстави думати, що очікувані погодні умови будуть більш сприятливими для вирощування озимої пшениці в Україні:

1. На основі оцінки агрокліматичних умов осінньої вегетації озимої пшениці встановлено, що сприятливі умови осінньої вегетації внаслідок зміни клімату дозволять на 40–50 днів змістити терміни сівби озимої пшениці, що дозволить більш ефективно використовувати сприятливі умови осінньої вегетації.

2. Оцінка агрокліматичних умов перезимівлі озимої пшениці показала, що очікуються більш сприятливі умови перезимівлі рослин. Період зимового спокою буде проходити за умови підвищених на 4–8 °С температур повітря. Сума негативних температур, які характеризують умови перезимівлі, зменшиться більш ніж у 3–4 рази в порівнянні з кліматичною нормою сумм зимових температур. Тривалість періоду зимівлі зменшиться на 1,5–2 місяці.

3. Відновлення вегетації озимої пшениці відбудеться більш ніж на місяць раніше середньобагаторічних термінів. Період від відновлення вегетації до колосіння буде проходити за умови зниженого (на 1–2 °С) температурного режиму. При реалізації кліматичних сценаріїв *GFDL*, *GFDL-30 %* у Лісостепу, Північному і Південному Степу складуться сприятливі умови для фотосинтетичної продуктивності посівів: відносна площа листя буде в 1,2–1,4 рази більше норми, зросте в 1,1–1,4 рази фотосинтетичний потенціал посівів, що призведе до підвищення загальної продуктивності посівів у 1,2–1,4 рази. Терміни настання фази воскової стиглості змістяться у бік більш ранніх термінів на один-два місяці.

Список літератури

1. *Фотосинтез*, продукционный процесс и продуктивность растений. /Б.И. Гуляев, И.И. Рожко, А.Д. Рогаченко и др. – Киев: Наукова думка, 1989. –151 с.
2. *Kimball B.A.* Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of

430 prior observations. – *Agron. J.*, 1981. – 75, # 6. P. 779-787.

3. *Imai K., Murata Y.* Effect of carbon dioxide concentration on growth and dry matter production of crop plants. 1. Effect on leaf area, dry matter tillering, dry matter distribution ratio and transpiration. – *Proc. Crop Sci. Soc. Jap.*, 1976.– 45, # 4. – P. 598-606.

4. *Sionit N., Hellmers H., Strain B.R.* Growth and yield of wheat under CO₂ enrichment and water stress. – *Crop Sci.*, 1980. – 20, # 6, p. 687–690.

5. *Climate Change. Impacts, Adaptations and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton J.T. et al., editors) – Cambridge University Press, 2001. – 1032 p.

6. *Carter T.R., Parry M.L., Harasawa H., Nisioka S.* IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations. Environmental Change Unit, University College London and Center for Global Environmental Research, 1994. – 59 p.

7. *Butterfield R.E. and Morison J.I.* Modeling the impact of climatic warming on winter cereal development. // *Agr. And Forest Meteorol.* – 1992. – Vol. 12. – No. 3-4. – P. 241-261.

8. *Sanderine N.* Effects of Changes in Temperature and CO₂ Concentration on Simulated Spring Wheat Yields in the Netherlands. // *Climatic Change*, 1993. – Vol. 24. – No.4. – P. 311–329.

9. *Cherhilfewski F.M., Lieth M.* Der Einflub von Klimaschwankungen auf die Kornertrage des Winterroggen in Halle von 1901 bis 1980. – *Wiss. Z. Humboldt Univ. Berlin. R. Math. Naturwiss.* – 1992. – Vol. 41. – No. 2. – P. 55-67.

10. *Kajfez-Bogataj L.* Impact of future climate change effects on spring barley and maize yield in Slovenia. // *Agr. Met.*, 1992. – Vol. 48. – No. 5. – P. 627-630.

11. *Александров В.А.* Влияние изменений климата на экосистемы Балканского полуострова и Центральной Европы. // *Метеорология и гидрология.* – 2006. – № 9. – С. 88-98.

12. *Izrael Yu.A.* Potential impacts of climate change. – Report from Working Group II to IPCC. IPCC, June 1990. – 250 p.

13. *Логонов В.Ф.* Уязвимость и адаптация сельского хозяйства Беларуси к изменяющемуся климату. // В сб.: "Изменение природно-территориальных комплексов в зонах антропогенного воздействия". – Москва: "Медиа-прес", 2006. – С. 238-249.

14. *Израэль Ю.А., Антохин Ю.А. и др.* Последствия изменения климата для России. // В сб.: Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. – М.: Наука, 2001. – С. 40-64.

15. *Бобылев С.Н.* Воздействие изменения климата на сельское хозяйство и водные ресурсы России. – М.: Фонд "Защиты природы". – 2003. – 35 с.

16. *Сиротенко О.Д.* Будущее сельского хозяйства России в связи с ожидаемыми изменениями климата. // В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2000. – Т. XVII. – С. 258-274.

17. *Сиротенко О.Д., Абашина Е.В.* Агроклиматические ресурсы и физико-географическая зональность территории России при глобальном потеплении. // *Метеорология и гидрология.* – 1998. – № 3. – С. 94-102.

18. *Сиротенко О.Д., Грингоф И.Г.* Оценки влияния ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство Российской Федерации. // *Метеорология и гидрология.* – 2006. – № 8. – С. 92-101.

19. *Жуков В.А., Святкина О.А.* Стохастическое моделирование и прогноз агроклиматических ресурсов при адаптации сельского хозяйства к региональным изменениям климата на территории России. // *Метеорология и гидрология.* – 2000. – № 1. – С. 100-109.

20. *Україна та глобальний парниковий ефект. Книга 2. Вразливість і адаптація екологічних та економічних систем до зміни клімату.* //За ред. В.В. Васильченка, М.В. Рапцуна, І.В. Трофимової. – Київ: 1998. – 208 с.
21. *Полевой А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 318 с.
22. *Полевой А.Н.* Методы оценки агрометеорологических условий формирования продуктивности и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в Украине. //“Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища – 2002”. Доповіді до ювілейної міжнародної конференції, присвяченій 70-ти річчю утворення Одеського державного екологічного університету, ч. 1. – Одеса: 2003. – С. 13-18.
23. *Полевой А.Н., Кульбида Н.И.* Моделирование формирования урожая озимой пшеницы в период весенне-летней вегетации в Украине. //Метеорологія, кліматологія і гідрологія. – Одеса: 2001. – Вип. 43. – С. 127-135.
24. *Менжулин Г.В.* Методы расчета фотосинтеза растительных сообществ при достаточном увлажнении. //Труды ГГО. – 1986. – Вып. 229. – С. 81-103.
25. *Росс Ю.К., Бихеле З.Н.* Расчет фотосинтеза растительного покрова. //В кн.: Фотосинтез и продуктивность растительного покрова. – Тарту: Изд-во ИФА АН ЭССР, 1968. – С. 46-72.
26. *McCree K.J.* Anequation for the rate of respiration of white clover plants growth under controlled condition. //In: Prediction and measurement of photosynthetic productivity. – Wageningen, Pudoc, 1970. – P. 221-229.
27. *Curry R.B.* Dynamic simulation of plant growth. //1.Development of a model. – Trans. ASAE, 1971. – Vol. 14, #5. – P. 946-959.

Моделирование влияния изменений климата на агроклиматические условия возделывания и фотосинтетическую продуктивность озимой пшеницы в Украине. Полевой А.Н, Кульбида Н.И., Адаменко Т.И., Трофимова И.В.

Рассматриваются изменения агроклиматических условий возделывания озимой пшеницы в осенне-зимний и весенне-летний периоды по разным сценариями изменения климата и их влияние на фотосинтетическую продуктивность культуры.

Ключевые слова: фотосинтетическая продуктивность, изменения климата, климатические сценарии, модель, прирост, оценка, урожай, озимая пшеница.

Modelling of influence of changes of a climate on agroclimatic conditions of cultivation and photosynthetic productivity of a winter wheat in Ukraine. Polevoy A., Kulbida N., Adamenko T., Trofimova I.

Changes of agroclimatic conditions of cultivation of a winter wheat during the autumn-winter and spring-summer period on different by scripts of change of a climate and their influence on photosynthetic productivity cultures are considered.

Key words: photosynthetic efficiency, changes of a climate, climatic scripts, model, a gain, an estimation, a crop, a winter wheat.