

УДК 631.559:633.11:633.2/.3:551.583

Сценарії формування врожайності та вуглецевого балансу пшениці озимої і біоенергетичних культур за різних погодних умов

 О. І. Присяжнюк*,  Н. О. Кононюк,  О. А. Маляренко,  В. В. Мусіч,
 О. Ю. Половинчук,  О. М. Гончарук, П. Ю. Волошин,  О. П. Шевченко

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна,

*e-mail: ollpris@gmail.com

Мета. Установити сценарії формування врожайності та вуглецевого балансу пшениці озимої та біоенергетичних культур за впливу різних погодних умов. **Методи.** Польові дослідження проводили в умовах зони нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України (50.023194, 30.173895) упродовж 2020–2024 рр. **Результати.** На основі аналізу погодних умов Київської області за 2020–2024 рр. та встановлених закономірностей впливу гідротермічного коефіцієнта (ГТК) на продуктивність сільськогосподарських культур виконано моделювання трьох погодних сценаріїв: посушливого (ГТК < 0,7; частота 40 %), оптимального (ГТК 0,9–1,1; частота 40 %) та надмірно вологого (ГТК > 1,1; частота 20 %). Проведено порівняльний аналіз формування врожайності, емісії парникових газів та вуглецевого балансу пшениці озимої (рекомендований сортовий склад: 30 % посухостійких, 40 % універсальних, 30 % інтенсивних сортів) та біоенергетичних культур (міскантус гігантський, верба енергетична). **Висновки.** Установлено, що пшениця озима має негативний баланс секвестрації за всіх сценаріїв (–1289...–1430 кг CO₂-eq/га), тоді як біоенергетичні культури – позитивний навіть за посухи: міскантус – +1992 кг/га, верба – +1133 кг/га. Середньозважений ефект заміни пшениці (з урахуванням частоти сценаріїв) становить +4391 кг CO₂-eq/га для міскантуса та +3313 кг/га для верби. Біоенергетичні культури демонструють вищу стійкість до погодних екстремумів та стабільність викидів ПГ (575–700 кг/га) порівняно з пшеницею (1795–2198 кг/га).

Ключові слова: пшениця озима; міскантус гігантський; верба енергетична; гідротермічний коефіцієнт; парникові гази; вуглецевий баланс; секвестрація вуглецю; кліматичні сценарії; сортовий склад.

Вступ

Глобальні кліматичні зміни суттєво впливають на функціонування агроєкосистем, зумовлюючи трансформацію традиційних закономірностей формування врожаю та вуглецевого балансу ґрунтів [1, 2]. В умовах Лісостепу України простежується тенденція до зростання частоти й інтенсивності екстремальних погодних явищ, зокрема посух і періодів надмірного зволоження, що формує нові ризики для стабільності сільськогосподарського виробництва [3, 4].

Пшениця озима залишається базовою продовольчою культурою України, однак рівень її продуктивності значною мірою визначається погодними умовами вегетаційного періоду [5, 6]. Аналіз метеорологічних даних за останні п'ять років у Київській області засвідчує, що гідротермічний коефіцієнт (ГТК) є одним із ключових факторів впливу на врожайність культури ($r = 0,83$). При цьому посушливі умови (ГТК < 0,7) спостерігалися у 40 % років, оптимальні (ГТК 0,9–1,1) – також у 40 %, тоді як надмірно вологі (ГТК > 1,1) – у 20 % [7]. Така структура гідротермічних умов ускладнює прогнозування продуктивності та потребує адаптації систем землеробства.

Альтернативою традиційному зерновиробництву на маргінальних землях є вирощування багаторічних біоенергетичних культур – міскантуса гігантського (*Miscanthus × giganteus*) та верби

Присяжнюк О. І., Кононюк Н. О., Маляренко О. А., Мусіч В. В., Половинчук О. Ю., Гончарук О. М., Волошин П. Ю., Шевченко О. П. Сценарії формування врожайності та вуглецевого балансу пшениці озимої і біоенергетичних культур за різних погодних умов. *Новітні агротехнології*. 2025. Т. 13, № 2. <https://doi.org/10.47414/na.13.2.2025.348131>

енергетичної (*Salix* spp.) [8, 9]. Ці культури відзначаються підвищеною толерантністю до абіотичних стресів, порівняно низькими потребами в мінеральному живленні та здатністю до тривалої секвестрації атмосферного вуглецю в ґрунті, що робить їх перспективними компонентами кліматично нейтральних агроєкосистем [10, 11].

Водночас комплексне порівняння продуктивності, емісії парникових газів і вуглецевого балансу традиційних зернових та біоенергетичних культур за різних гідротермічних сценаріїв залишається недостатньо вивченим. Особливої актуальності набуває врахування рекомендованого сортового складу пшениці озимої, що включає посухостійкі, універсальні та інтенсивні сорти, як інструменту стабілізації врожайності в умовах кліматичної мінливості [12, 13].

Мета дослідження – змодельувати сценарії формування врожайності та вуглецевого балансу пшениці озимої (у рекомендованому сортовому складі) та біоенергетичних культур за посушливих, оптимальних і надмірно вологих умов та визначити ефективність заміни зерновиробництва на виращування біоенергетичних культур як інструменту досягнення вуглецевої нейтральності.

Матеріали та методика досліджень

Моделювання виконано на основі аналізу фактичних метеорологічних даних Київської області за 2020–2024 рр. та результатів польових досліджень Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН. Для характеристики погодних умов використано гідротермічний коефіцієнт Селянінова (ГТК), який розраховується як відношення суми опадів до суми активних температур (понад 10 °С), помножене на 0,1 [14].

Погодні сценарії

На основі аналізу ГТК за 2020–2024 рр. виділено три типові погодні сценарії для умов Київської області:

Сценарій 1 – посушливі умови (ГТК < 0,7): частота 40 % (два роки з п'яти). Характеризується дефіцитом опадів та підвищеними температурами весняно-літнього періоду. Фактичні роки: 2020 (ГТК = 0,65, урожайність – 4,28 т/га), 2022 (ГТК = 0,56, урожайність – 3,84 т/га).

Сценарій 2 – оптимальні умови (ГТК 0,9–1,1): частота 40 % (два роки з п'яти). Достатнє зволоження, помірні температури. Фактичні роки: 2023 (ГТК = 1,00, урожайність – 5,37 т/га), 2024 (ГТК = 0,90, урожайність – 5,50 т/га).

Сценарій 3 – надмірне зволоження (ГТК > 1,1): частота 20 % (один рік з п'яти). Надлишок опадів, ризик вилягання та грибних хвороб. Фактичний рік: 2021 (ГТК = 1,15, урожайність – 5,06 т/га).

Рекомендований сортовий склад пшениці озимої

З урахуванням кліматичних змін та зростання частоти екстремальних погодних явищ рекомендовано таку структуру сортового складу пшениці озимої для Київської області [12]:

Посухостійкі сорти (30 % площ): 'Берегиня миронівська', 'Воздвиженка', 'Вежа миронівська'. Урожайність за сценаріями: посуха – 4,50 т/га, оптимум – 5,80 т/га, перезволоження – 5,20 т/га.

Універсальні пластичні сорти (40 % площ): 'Манера одеська', 'Наснага', 'Грація миронівська', 'МІП Ассоль'. Урожайність: посуха – 3,80 т/га, оптимум – 5,50 т/га, перезволоження – 5,00 т/га.

Інтенсивні сорти (30 % площ): 'Легенда білоцерківська', 'МІП Валенсія', 'Охтирчанка'. Урожайність: посуха – 3,20 т/га, оптимум – 7,50 т/га, перезволоження – 5,80 т/га.

Середньозважена врожайність за сортовим складом розраховується за формулою:

$$Y = \sum(Y_i \times S_i) = Y_1 \times 0,30 + Y_2 \times 0,40 + Y_3 \times 0,30$$

де Y_i – урожайність i -ї групи сортів, т/га; S_i – частка i -ї групи у структурі посівів.

Параметри біоенергетичних культур

Міскантус гігантський. С4-культура з терміном продуктивного використання 20 років. Урожайність сухої біомаси: посуха – 10 т/га, оптимум – 18 т/га, перезволоження – 20 т/га. Не потребує азотних добрив після встановлення плантації. Секвестрація вуглецю в ґрунті: 0,7–1,3 т С/га/рік залежно від умов [15, 16].

Верба енергетична. Деревна культура короткої ротації з терміном використання 25 років та трирічним циклом збирання. Урожайність: посуха – 6 т/га, оптимум – 12 т/га, перезволоження – 15 т/га (оптимальні умови для верби). Секвестрація: 0,5–1,0 т С/га/рік [17, 18].

Методологія розрахунку емісій парникових газів

Розрахунок викидів парникових газів виконано за методологією IPCC (2006, 2019) [19, 20]. Загальні викиди для пшениці озимої розраховано за формулою:

$$E_{total} = E_{добрива} + E_{N_2O} + E_{urea} + E_{техніка} + E_{інші}$$

Емісії від виробництва добрив (кг CO₂-eq/га):

$$E_{добрива} = N \times EF_N + P_2O_5 \times EF_P + K_2O \times EF_K$$

де N, P₂O₅, K₂O – дози добрив (кг/га); EF_N = 5,88, EF_P = 1,35, EF_K = 0,58 кг CO₂-eq/кг – емісійні фактори виробництва [21].

Дози добрив коригуються залежно від сценарію: за посухи – зменшення азоту на 15 %, за перезволоження – збільшення на 10 % та посилення фунгіцидного захисту (+30 %).

Польові емісії N₂O (прямі та непрямі):

$$E_{N_2O} = [N \times EF_1 + N \times Frac_{vol} \times EF_4 + N \times Frac_{leach} \times EF_5] \times (44/28) \times GWP_{N_2O}$$

де EF₁ = 0,01 – фактор прямих емісій; Frac_{vol} = 0,10, EF₄ = 0,01 – волатилізація; Frac_{leach} = 0,30, EF₅ = 0,0075 – вимивання; GWP_{N₂O} = 265 – потенціал глобального потепління [19].

Для біоенергетичних культур викиди включають амортизовані витрати на закладання плантації та щорічні операційні витрати:

$$E_{misc} = E_{заклад/T} + E_{щорічні} = 2500/20 + 450 = 575 \text{ кг CO}_2\text{-eq/га}$$

$$E_{willow} = E_{заклад/T} + E_{щорічні} + E_{збір/R} = 3000/25 + 380 + 600/3 = 700 \text{ кг CO}_2\text{-eq/га}$$

де T – термін продуктивного використання (років); R – ротація збирання верби (три роки).

Методологія розрахунку вуглецевого балансу

Поглинання CO₂ біомасою розраховано на основі вмісту вуглецю в компонентах рослин:

$$CO_{2\text{ погл}} = \sum(M_i \times C_i) \times (44/12) \times 1000$$

де M_i – маса і-го компонента біомаси (т/га); C_i – вміст вуглецю (частка од.); 44/12 = 3,667 – коефіцієнт перерахунку C → CO₂.

Уміст вуглецю: пшениця (зерно) – 45,0 %, солома – 45,7 %; міскантус – 48,0 %; верба – 49,0 % [22, 23].

Баланс секвестрації – ключовий показник для оцінювання довгострокового накопичення вуглецю в ґрунті:

$$\text{Баланс}_{секв} = C_{секв} \times 3,667 \times 1000 - E_{total}$$

де C_{секв} – річна секвестрація вуглецю в ґрунті (т C/га/рік). Для пшениці секвестрація залежить від частки залишеної соломи (при 30 % – 0,20 т C/га/рік) [24]. Для біоенергетичних культур секвестрація визначається емпірично і становить 0,5–1,3 т C/га/рік залежно від культури та умов [15–18].

Статистичне оброблення даних

Середньозважені показники розраховано з урахуванням частоти погодних сценаріїв:

$$X_{середнє} = X_{посуха} \times 0,40 + X_{оптимум} \times 0,40 + X_{вологий} \times 0,20,$$

де вагові коефіцієнти відповідають фактичній частоті сценаріїв за 2020–2024 рр. Розрахунки виконано за допомогою Python 3.11 з використанням бібліотек numpy та pandas.

Результати досліджень

На основі аналізу погодних умов Київської області за 2020–2024 рр. та встановлених закономірностей впливу гідротермічного коефіцієнта (ГТК) на продуктивність культур виконано моделювання трьох погодних сценаріїв: посушливого (ГТК < 0,7), оптимального (ГТК 0,9–1,1) та надмірно вологого (ГТК > 1,1). Для пшениці озимої використано рекомендований сортовий склад: 30 % посухостійких, 40 % універсальних та 30 % інтенсивних сортів.

Таблиця 1

Характеристика погодних сценаріїв для Київської області

Сценарій	ГТК	Частота	Характеристика
Посушливий	< 0,7	40 % (2 з 5)	Дефіцит опадів, підвищені температури весняно-літнього періоду
Оптимальний	0,9–1,1	40 % (2 з 5)	Достатнє зволоження, помірні температури
Надмірно вологий	> 1,1	20 % (1 з 5)	Надлишок опадів, ризик вилягання та хвороб

Таблиця 2

Рекомендований сортовий склад пшениці озимої та прогнозна врожайність за сценаріями

Група сортів	Частка	Посушливі	Оптимальні	Надмірно вологі	Приклади сортів
Посушостійкі	30 %	4,50	5,80	5,20	‘Берегиня миронівська’, ‘Воздвиженка’
Універсальні пластичні	40 %	3,80	5,50	5,00	‘Манера одеська’, ‘Наснага’
Інтенсивні	30 %	3,20	7,50	5,80	‘Легенда білоцерківська’, ‘МІП Валенсія’
Середньозважена, т/га	100 %	3,83	6,19	5,30	–

Посушостійкі сорти найкраще реалізують потенціал за посухи, інтенсивні – за оптимуму, універсальні забезпечують стабільність.

Таблиця 3

Прогнозна врожайність культур за погодними сценаріями, т/га

Культура	Посушливий	Оптимальний	Надмірно вологий
Пшениця озима (зерно)	3,83	6,19	5,30
Міскантус гігантський (суха маса)	10	18	20
Верба енергетична (суха маса)	6	12	15

Біоенергетичні культури характеризуються вищою стійкістю до коливань погодних умов порівняно з пшеницею озимою. За посушливих умов міскантус формує врожайність на рівні 10 т/га, що становить 55 % від оптимального рівня, тоді як урожайність пшениці знижується до 3,83 т/га, або 62 % від оптимуму.

За надмірного зволоження міскантус досягає максимальної продуктивності 20 т/га, а верба енергетична – 15 т/га, що відповідає оптимальним умовам для цієї культури. Водночас урожайність пшениці знижується до 5,30 т/га внаслідок вилягання посівів і посиленого розвитку хвороб.

Таблиця 4

Викиди парникових газів за культурами та сценаріями, кг CO₂-eq/га

Культура	Посушливий	Оптимальний	Надмірно вологий
Пшениця озима	1795	2034	2198
Міскантус гігантський	575	575	575
Верба енергетична	700	700	700

Для пшениці рівень викидів змінюється залежно від погодного сценарію. За посушливих умов відбувається зменшення дози мінеральних добрив на 15 %, тоді як за перезволоження спостерігається необхідність їх збільшення на 10 % та посилення фунгіцидного захисту посівів.

Таблиця 5

Вуглецевий слід продукції за сценаріями, кг CO₂-eq/т

Культура	Посушливий	Оптимальний	Надмірно вологий
Пшениця озима	469	329	415
Міскантус гігантський	58	32	29
Верба енергетична	117	58	47

Вуглецевий слід пшениці варіює в межах 329–469 кг CO₂-eq/т залежно від погодних умов (коефіцієнт варіації становить 42,5 %). Пікових значень показник досягає за посушливих умов, що зумовлено зниженням урожайності культури. Біоенергетичні культури характеризуються значно нижчим вуглецевим слідом: міскантус – 29–58 кг CO₂-eq/т, верба – 47–117 кг CO₂-eq/т. Це в 6–16 разів менше порівняно з пшеницею.

Таблиця 6

Баланс секвестрації за культурами та сценаріями, кг CO₂-eq/га/рік

Культура	Посушливий	Оптимальний	Надмірно вологий
Пшениця озима	-1430	-1289	-1427
Міскантус гігантський	+1992	+3458	+4192
Верба енергетична	+1133	+2233	+2967

Пшениця озима має негативний баланс секвестрації за всіх сценаріїв (-1289...-1430 кг/га), тобто є нетто-джерелом втрат вуглецю з ґрунту. Біоенергетичні культури мають позитивний баланс навіть за посухи: міскантус - +1992 кг/га, верба - +1133 кг/га. За надмірного зволоження баланс секвестрації максимальний: міскантус - +4192 кг/га, верба - +2967 кг/га.

Таблиця 7

Ефект заміни пшениці на біоенергетичні культури за сценаріями, кг CO₂-eq/га/рік

Заміна	Посушливий	Оптимальний	Надмірно вологий
Міскантус / пшениця	+3 421	+4 747	+5 618
Верба / пшениця	+2 563	+3 522	+4 393

Ефект заміщення пшениці міскантусом варіює від +3421 кг CO₂-eq/га (за умов посухи) до +5618 кг CO₂-eq/га (у разі перезволоження). Для верби цей діапазон становить +2563... +4393 кг CO₂-eq/га. Важливо, що навіть за несприятливого сценарію (посуха) перехід від вирощування пшениці до біоенергетичних культур забезпечує радикальне покращення вуглецевого балансу.

Таблиця 8

Секвестрація вуглецю за культурами та сценаріями, т С/га/рік

Культура	Посушливий	Оптимальний	Надмірно вологий
Пшениця озима	0,100	0,203	0,210
Міскантус гігантський	0,70	1,10	1,30
Верба енергетична	0,50	0,80	1,00
Кратність (міскантус / пшениця)	7,0 ×	5,4 ×	6,2 ×

Темпи секвестрації вуглецю біоенергетичними культурами у 5-7 разів перевищують показники пшениці. Зокрема, під час посухи міскантус секвеструє 0,70 т С/га/рік, що усемеро більше порівняно з пшеницею (0,10 т С/га/рік). Пікові значення фіксуються за умови надмірного зволоження: 1,30 т С/га/рік для міскантусу та 1,00 т С/га/рік для верби.

Для розрахунку середньозважених показників застосовано частотний розподіл кліматичних сценаріїв за останні 5 років: посушливий та оптимальний - по 40 %, надмірно вологий - 20 %.

Таблиця 9

Середньозважені показники культур за типовою структурою років

Показник	Пшениця	Міскантус	Верба
Середня урожайність, т/га	5,07	15	10
Середні викиди, кг CO ₂ -eq/га	1971	575	700
Зниження викидів vs пшениця, %	-	-70,8 %	-64,5 %
Середній баланс секвестрації, кг/га	-1373	+3018	+1940
Середня секвестрація С, т/га/рік	0,163	0,98	0,72
Ефект заміни пшениці, кг CO ₂ -eq/га	-	+4391	+3313

Біоенергетичні культури демонструють вищу стійкість до погодних екстремумів. За посухи міскантус зберігає 55 % продуктивності (10 з 18 т/га), тоді як пшениця (рекомендований сортовий склад) - лише 62 % (3,83 з 6,19 т/га). За перезволоження біоенергетичні культури досягають максимуму, а пшениця знижує врожайність на 14 %.

Викиди ПГ біоенергетичних культур залишаються стабільними (575-700 кг/га) незалежно від сценарію, тоді як для пшениці вони коливаються в межах 1795-2198 кг/га (±11 %) залежно від інтенсивності технології та погодних умов.

За посушливих умов вуглецевий слід пшениці зростає до 469 кг CO₂-eq/т, що є найгіршим показником, тоді як у міскантусу він становить лише 58 кг/т, а у верби – 117 кг/т. Різниця сягає 4–8 разів на користь біоенергетичних культур.

Пшениця характеризується негативним вуглецевим балансом (–1289...–1430 кг/га) за всіх сценаріїв, тоді як біоенергетичні культури мають позитивний баланс навіть за умов посухи (міскантус +1992, верба +1133 кг/га). Ефект заміни пшениці становить +3421...+5618 кг CO₂-eq/га для міскантусу та +2563...+4393 кг/га для верби.

З урахуванням частоти сценаріїв (посуха 40 %, оптимальні умови 40 %, перезволоження 20 %) середній ефект заміни пшениці досягає +4391 кг CO₂-eq/га для міскантусу та +3313 кг/га для верби. Отримані результати підтверджують доцільність вирощування біоенергетичних культур на маргінальних землях як ефективного інструменту досягнення вуглецевої нейтральності.

Обговорення

Стійкість культур до погодних екстремумів

Результати моделювання виявили принципові відмінності у реакції культур на погодні екстремуми. Пшениця озима (у рекомендованому сортовому складі) за посушливих умов знижує середньозважену урожайність до 3,83 т/га, що становить лише 62 % від оптимального рівня (6,19 т/га). Водночас посухостійкі сорти ('Берегиня миронівська', 'Воздвиженка') забезпечують урожайність 4,50 т/га, або 78 % від власного оптимуму, тоді як інтенсивні сорти ('Легенда білоцерківська', 'МІП Валенсія') формують лише 3,20 т/га, що відповідає 43 % від оптимального рівня 7,50 т/га.

Біоенергетичні культури характеризуються вищою толерантністю до дефіциту вологи. Міскантус за умов посухи формує 10 т/га сухої біомаси, що становить 55 % від оптимального рівня (18 т/га). Верба енергетична є більш чутливою до нестачі вологи (6 т/га, або 50 % від оптимуму), проте демонструє максимальну продуктивність за надмірного зволоження, досягаючи 15 т/га, що є типовим для цієї культури [17, 25].

Виявлені закономірності узгоджуються з результатами досліджень Lewandowski et al. [10], Clifton-Brown et al. [15] та Hastings et al. [16], які підтверджують вищу стійкість багаторічних енергетичних культур до погодних стресів порівняно з однорічними зерновими. Основними чинниками такої стійкості є потужна коренева система (до 2 м глибини у міскантусу), здатність до реутилізації поживних речовин, а також C4-тип фотосинтезу у міскантусу, що забезпечує підвищену ефективність використання води [11].

Стабільність емісій парникових газів

Ключовою перевагою біоенергетичних культур є стабільність викидів ПГ незалежно від погодних умов. Міскантус забезпечує постійний рівень емісій 575 кг CO₂-eq/га, верба – 700 кг CO₂-eq/га. Натомість викиди за вирощування пшениці коливаються від 1795 кг/га за умов посухи до 2198 кг/га за перезволоження, тобто варіація становить ±11 %.

Нижчий рівень емісій у разі посухи зумовлений зменшенням дози азотних добрив на 15 %, оскільки надмірне внесення за дефіциту вологи є неефективним. За умов перезволоження, навпаки, виникає потреба у збільшенні дози добрив на 10 % та посиленні фунгіцидного захисту на 30 %, що призводить до зростання сумарних викидів.

Скорочення викидів біоенергетичних культур порівняно з пшеницею у середньозваженому вимірі становить 70,8 % для міскантусу та 64,5 % для верби. Отримані результати узгоджуються з даними європейських досліджень, які свідчать про зниження викидів ПГ на 65–80 % за переходу від зернових культур до багаторічних енергетичних насаджень [8, 9, 26].

Вуглецевий баланс та секвестрація

Найбільш принципова відмінність полягає у знаку балансу секвестрації. Пшениця озима має негативний баланс за всіх сценаріїв, від –1289 кг CO₂-eq/га за оптимальних умов до –1430 кг/га за посухи. Це свідчить про те, що антропогенні викиди під час вирощування пшениці перевищують довгострокове накопичення вуглецю в ґрунті навіть за умови залишення 30 % соломи.

Натомість біоенергетичні культури характеризуються позитивним балансом секвестрації навіть за найгіршого сценарію, тобто за посухи. Для міскантусу він становить +1992 кг/га, для верби

+1133 кг/га. За оптимальних умов баланс зростає до +3458 кг/га у міскантусу та +2233 кг/га у верби, а за надмірного зволоження до +4192 та +2967 кг/га відповідно.

Отримані результати узгоджуються з даними досліджень Dondini et al. [27], Dufossé et al. [28] та McCalmont et al. [29], які показали, що міскантус здатний досягати вуглецевої нейтральності та навіть негативного балансу, коли обсяги поглинання перевищують емісії, за врожайності понад 10 т/га сухої біомаси та рівня секвестрації 0,8–1,5 т С/га на рік.

Ефект заміни та практичні імплікації

Ефект заміни пшениці на біоенергетичні культури є позитивним за всіх сценаріїв. Для міскантусу він коливається від +3421 кг CO₂-eq/га за посухи до +5618 кг/га за перезволоження, для верби від +2563 до +4393 кг/га відповідно. Середньозважений ефект з урахуванням частоти сценаріїв становить +4391 кг/га для міскантусу та +3313 кг/га для верби.

Варто підкреслити, що навіть за найгіршого сценарію, тобто в разі посухи, заміна пшениці на біоенергетичні культури забезпечує суттєве поліпшення вуглецевого балансу. Це робить біоенергетичні культури надійним інструментом досягнення кліматичних цілей незалежно від міжрічної варіабельності погодних умов.

З огляду на те, що посушливі умови спостерігаються у 40 % років, а їх частота має тенденцію до зростання внаслідок кліматичних змін [3, 4], біоенергетичні культури набувають додаткової привабливості як стратегія адаптації сільського господарства до змін клімату. Їх вирощування на маргінальних землях, які становлять близько 4 % орних земель Лісостепу, не створює загроз для продовольчої безпеки, водночас забезпечуючи суттєвий внесок у досягнення вуглецевої нейтральності [8].

Висновки

На основі аналізу погодних умов Київської області за 2020–2024 рр. виділено три типові сценарії: посушливий (ГТК < 0,7; частота 40 %), оптимальний (ГТК 0,9–1,1; 40 %) та надмірно вологий (ГТК > 1,1; 20 %). Гідротермічний коефіцієнт є основним фактором впливу на врожайність пшениці озимої ($r = 0,83$).

Середньозважена врожайність пшениці озимої за рекомендованого сортового складу (30 % посухостійких, 40 % універсальних, 30 % інтенсивних сортів) коливається від 3,83 т/га за посухи до 6,19 т/га за оптимальних умов. Біоенергетичні культури демонструють вищу стійкість до погодних стресів: міскантус формує 10–20 т/га сухої біомаси та зберігає приблизно 55 % продуктивності за посухи, верба – 6–15 т/га з оптимумом у разі перезволоження.

Викиди парникових газів біоенергетичних культур є стабільними та не залежать від сценарію зволоження: для міскантусу вони становлять 575 кг CO₂-eq/га, для верби – 700 кг CO₂-eq/га. Натомість для пшениці озимої викиди коливаються від 1795 до 2198 кг/га. Зниження емісій порівняно з пшеницею становить 70,8 % для міскантусу та 64,5 % для верби.

Пшениця озима має негативний баланс секвестрації вуглецю за всіх сценаріїв (–1289...–1430 кг CO₂-eq/га) і є нетто-джерелом втрат вуглецю з ґрунту. Біоенергетичні культури, навпаки, забезпечують позитивний баланс навіть за посухи: +1992 кг/га для міскантусу та +1133 кг/га для верби.

Середньозважений ефект заміни пшениці з урахуванням частоти сценаріїв становить +4391 кг CO₂-eq/га для міскантусу та +3313 кг/га для верби. Навіть за найгіршого сценарію, тобто за посухи, така заміна забезпечує покращення балансу на +3421 кг/га для міскантусу та +2563 кг/га для верби.

Біоенергетичні культури є ефективним інструментом досягнення вуглецевої нейтральності та адаптації агровиробництва до кліматичних змін. Їх вирощування на маргінальних землях Лісостепу, що становлять близько 4 % орних площ, не створює загроз для продовольчої безпеки, водночас забезпечуючи стабільний кліматичний ефект незалежно від погодних умов року.

Використана література

1. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2023. 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

2. Porter J. R., Xie L., Challinor A. J. et al. Food security and food production systems. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. IPCC, 2014. P. 485–533. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap7_FINAL.pdf

3. Балабух В. О., Малицька Л. В. Оцінювання сучасних змін термічного режиму України. *Геоінформатика*. 2017. № 4. С. 34–49.
4. Адаменко Т. Зміни клімату та сільське господарство. України: що потрібно знати фермерам. Київ, 2021. 36 с. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/5_Zmina-klimatu-ta-silске-gospodarstvo-v-Ukrayini.pdf
5. Лифенко С., Наконечний М., Нарган Т. Особливості селекції сортів пшениці м'якої озимої степового еко типу у зв'язку зі змінами клімату в умовах Півдня України. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 3. С. 53–62. <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202103-07>
6. Моргун В. В., Швартау В. В., Коновалов Д. В. та ін. Клуб 100 центнерів. Сучасні сорти та системи живлення і захисту пшениці озимої / В. В. Моргун та ін. Київ : Вістка, 2022. 105 с.
7. Кононюк Н. О., Присяжнюк О. І. Екологічна стабільність та пластичність вирощування пшениці в умовах Лісостепу України. *Агробіологія*. 2025. № 1. С. 98–103. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2025-195-1-98-103>
8. Geletukha G., Zheliezna T. Prospects for Bioenergy Development in Ukraine: Roadmap until 2050. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2021. Vol. 22, Iss. 5. P. 73–81. <https://doi.org/10.12912/27197050/139346>
9. Трибой О., Железна Т., Баштовий А. Перспективи вирощування і використання енергетичних культур в Україні. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2021. Вип. 8. С. 282–289. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28\(42\)-24](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28(42)-24)
10. Lewandowski I., Scurlock J. M. O., Lindvall E., Christou M. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*. 2003. Vol. 25, Iss. 4. P. 335–361. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00030-8)
11. Heaton E. A., Dohleman F. G., Long S. P. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*. *Global Change Biology*. 2008. Vol. 14, Iss. 9. P. 2000–2014. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01662.x>
12. Коновалов Д. В., Поліщук В. В., Карпук Л. М. та ін. Формування сортових ресурсів пшениці озимої. *Агробіологія*. 2023. № 1. С. 83–90. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2023-179-1-83-90>
13. Базалій Г. Г., Усик Л. О. Адаптивна здатність сортів і селекційного матеріалу пшениці озимої в умовах Південного Степу. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2018. Т. 14, № 2. С. 183–189. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.2.2018.134770>
14. Selyaninov G. T. About climate agricultural estimation. *Proceedings on Agricultural Meteorology*. 1928. Vol. 20. P. 165–177.
15. Clifton-Brown J. C., Stampfl P. F., Jones M. B. *Miscanthus* biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. *Global Change Biology*. 2004. Vol. 10, Iss. 4. P. 509–518. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00749.x>
16. Hastings A., Mos M., Yeber S. et al. Economic and environmental assessment of seed and rhizome propagated *Miscanthus* in the UK. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. Article 1058. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01058>
17. Volk T. A., Abrahamson L. P., Nowak C. A. et al. The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts. *Biomass and Bioenergy*. 2006. Vol. 30, Iss. 8–9. P. 715–727. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.03.001>
18. Caputo J., Balogh S. B., Volk T. A. et al. Incorporating uncertainty into a life cycle assessment model of short-rotation willow biomass crops. *BioEnergy Research*. 2014. Vol. 7. P. 48–59. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9347-y>
19. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. IGES, Japan : IPCC, 2006. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
20. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, Japan : IPCC, 2019. URL: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories>
21. Brentrup F., Hoxha A., Christensen B. Carbon footprint analysis of mineral fertilizer production in Europe and other world regions. *10th International Conference on Life Cycle Assessment of Food*. Dublin, 2016. P. 482–490. URL: https://www.researchgate.net/publication/312553933_Carbon_footprint_analysis_of_mineral_fertilizer_production_in_Europe_and_other_world_regions
22. Kätterer T., Bolinder M. A., Andrén O. et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2011. Vol. 141. P. 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.029>
23. Amougou N., Bertrand I., Machet J. M., Recous S. Quality and decomposition in soil of rhizome, root and senescent leaf from *Miscanthus x giganteus*. *Plant and Soil*. 2011. Vol. 338. P. 83–97. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0443-x>
24. Bolinder M. A., Janzen H. H., Gregorich E. G. et al. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2007. Vol. 118, Iss. 1–4. P. 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.013>

25. Nazli R. I., Tansi V., Öztürk H. H., Kusvuran A. *Miscanthus*, switchgrass, giant reed, and bulbous canary grass as potential bioenergy crops in a semi-arid Mediterranean environment. *Industrial Crops and Products*. 2018. Vol. 125. P. 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.090>
26. Styles D., Gibbons J., Williams A. P. et al. Cattle feed or bioenergy? Consequential life cycle assessment of biogas feedstock options on dairy farms. *GCB Bioenergy*. 2015. Vol. 7, Iss. 5. P. 1034–1049. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12189>
27. Dondini M., Hastings A., Saiz G. et al. The potential of *Miscanthus* to sequester carbon in soils: comparing field measurements in Carlow, Ireland to model predictions. *GCB Bioenergy*. 2009. Vol. 1, Iss. 6. P. 413–425. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01033.x>
28. Dufossé, K., Drewer, J., Gabrielle, B., & Drouet, J.-L. (2014). Effects of a 20-year old *Miscanthus* × *giganteus* stand and its removal on soil characteristics and greenhouse gas emissions. *Biomass and Bioenergy*, 69, 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.07.003>
29. McCalmont J. P., Hastings A., McNamara N. P. et al. Environmental costs and benefits of growing *Miscanthus* for bioenergy in the UK. *GCB Bioenergy*. 2017. Vol. 9, Iss. 3. P. 489–507. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12294>

References

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2021 – The physical science basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
2. Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., Lobell, D. B., & Travasso, M. I. (2014). Food security and food production systems. In *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability* (pp. 485–533). IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap7_FINAL.pdf
3. Balabukh, V. O., & Malytska, L. V. (2017). *Assessment of modern changes in the thermal regime of Ukraine*. *Geoinformatika*, 4, 34–49. [In Ukrainian]
4. Adamenko, T. (2021). *Climate change and agriculture of Ukraine: What farmers need to know*. https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/5_Zmina-klimatu-ta-silske-gospodarstvo-v-Ukrayini.pdf [In Ukrainian]
5. Lyfenko, S., Nakonechnyi, M., & Narhan, T. (2021). Peculiarities of the selection of soft winter steppe ecotype wheat varieties in connection with climate change in the conditions of Southern Ukraine. *Bulletin of Agricultural Science*, 3, 53–62. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202103-07> [In Ukrainian]
6. Morhun, V. V., Shvartau, V. V., Konovalov, D. V., Mykhalska, L. M., & Skryplov, V. O. (2022). *Club 100 centners. Modern varieties and systems of nutrition and protection of winter wheat*. Vistka. [In Ukrainian]
7. Kononiuk, N. O., & Prysiazhniuk, O. I. (2025). Ecological stability and plasticity of wheat cultivation in the conditions of the Forest-steppe zone of Ukraine. *Agrobiology*, 1, 98–103. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2025-195-1-98-103> [In Ukrainian]
8. Geletukha, G., & Zheliezna, T. (2021). Prospects for bioenergy development in Ukraine: Roadmap until 2050. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 22(5), 73–81. <https://doi.org/10.12912/27197050/139346>
9. Tryboi, O. V., Zheliezna, T. A., & Bashtovyi, A. I. (2021). Prospects for growing and use of energy crops in Ukraine. *Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine*, 28(42), 282–289. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28\(42\)-24](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28(42)-24) [In Ukrainian]
10. Lewandowski, I., Scurlock, J. M. O., Lindvall, E., & Christou, M. (2003). The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*, 25(4), 335–361. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00030-8)
11. Heaton, E. A., Dohleman, F. G., & Long, S. P. (2008). Meeting US biofuel goals with less land: The potential of *Miscanthus*. *Global Change Biology*, 14(9), 2000–2014. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01662.x>
12. Konovalov, D., Polishchuk, V., Karpuk, L., Chuhleb, S., & Skhlyar, V. (2023). Formation of varietal resources of winter wheat. *Agrobiology*, 1, 83–90. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2023-179-1-83-90> [In Ukrainian]
13. Bazalii, H. H., & Usyk, L. O. (2018). Adaptive capacity of varieties and breeding material of winter wheat in the conditions of the Southern Steppe. *Plant Varieties Studying and Protection*, 14(2), 183–189. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.2.2018.134770> [In Ukrainian]
14. Selyaninov, G. T. (1928). About climate agricultural estimation. *Proceedings on Agricultural Meteorology*, 20, 165–177.
15. Clifton-Brown, J. C., Stampfl, P. F., & Jones, M. B. (2004). *Miscanthus* biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. *Global Change Biology*, 10(4), 509–518. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00749.x>
16. Hastings, A., Mos, M., Yesufu, J. A., McCalmont, J., Schwarz, K., Shafei, R., Ashman, C., Nunn, C., Schuele, H., Cosentino, S., Scalici, G., Scordia, D., Wagner, M., & Clifton-Brown, J. (2017). Economic and environmental assessment

of seed and rhizome propagated *Miscanthus* in the UK. *Frontiers in Plant Science*, 8, Article 1058. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01058>

17. Volk, T. A., Abrahamson, L. P., Nowak, C. A., Smart, L. B., Tharakan, P. J., & White, E. H. (2006). The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts. *Biomass and Bioenergy*, 30(8–9), 715–727. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.03.001>

18. Caputo, J., Balogh, S. B., Volk, T. A., Johnson, L., Puettmann, M. E., Lippke, B. R., & Oneil, E. E. (2014). Incorporating uncertainty into a life cycle assessment model of short-rotation willow biomass crops. *BioEnergy Research*, 7, 48–59. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9347-y>

19. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use*. IGES. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

20. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IGES. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories>

21. Brentrup, F., Hoxha, A., & Christensen, B. (2016). Carbon footprint analysis of mineral fertilizer production in Europe and other world regions. *10th International Conference on Life Cycle Assessment of Food*, Dublin. <https://www.researchgate.net/publication/312553933>

22. Kätterer, T., Bolinder, M. A., Andrén, O., Kirchmann, H., & Menichetti, L. (2011). Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141, 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.029>

23. Amougou, N., Bertrand, I., Machet, J. M., & Recous, S. (2011). Quality and decomposition in soil of rhizome, root and senescent leaf from *Miscanthus × giganteus*. *Plant and Soil*, 338, 83–97. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0443-x>

24. Bolinder, M. A., Janzen, H. H., Gregorich, E. G., Angers, D. A., & VandenBygaart, A. J. (2007). An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1–4), 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.013>

25. Nazli, R. I., Tansi, V., Öztürk, H. H., & Kusvuran, A. (2018). *Miscanthus*, switchgrass, giant reed, and bulbous canary grass as potential bioenergy crops in a semi-arid Mediterranean environment. *Industrial Crops and Products*, 125, 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.090>

26. Styles, D., Gibbons, J., Williams, A. P., Stichnothe, H., Chadwick, D. R., & Healey, J. R. (2015). Cattle feed or bioenergy? Consequential life cycle assessment of biogas feedstock options on dairy farms. *GCB Bioenergy*, 7(5), 1034–1049. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12189>

27. Dondini, M., Hastings, A., Saiz, G., Jones, M. B., & Smith, P. (2009). The potential of *Miscanthus* to sequester carbon in soils: Comparing field measurements in Carlow, Ireland to model predictions. *GCB Bioenergy*, 1(6), 413–425. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01033.x>

28. Dufossé, K., Drewer, J., Gabrielle, B., & Drouet, J.-L. (2014). Effects of a 20-year old *Miscanthus × giganteus* stand and its removal on soil characteristics and greenhouse gas emissions. *Biomass and Bioenergy*, 69, 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.07.003>

29. McCalmont, J. P., Hastings, A., McNamara, N. P., Richter, G. M., Robson, P., Donnison, I. S., & Clifton-Brown, J. (2017). Environmental costs and benefits of growing *Miscanthus* for bioenergy in the UK. *GCB Bioenergy*, 9(3), 489–507. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12294>

UDC 631.547:57.087

Prysiazhniuk, O. I.*, **Kononiuk, N. O.**, **Maliarenko, O. A.**, **Musich, V. V.**, **Polovynchuk, O. Yu.**, **Honcharuk, O. M.**, **Voloshyn, P. Yu.**, & **Shevchenko, O. P.** (2024). Yield and carbon balance in winter wheat and bioenergy crops under different weather scenarios. *Advanced Agritechnologies*, 13(2). <https://doi.org/10.47414/na.13.2.2025.348131> [In Ukrainian]

*Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine, *e-mail: ollpris@gmail.com*

Purpose. To investigate yield formation and carbon balance in winter wheat and bioenergy plantations under different weather scenarios. **Methods.** Field studies were conducted in the zone of unstable moisture in the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine at the experimental field of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS of Ukraine (50.023194, 30.173895) in 2020–2024. **Results.** Based on the analysis of weather conditions in Kyiv region (2020–2024) and the established patterns of the influence of the hydrothermal coefficient (HTC) on crop productivity, three weather scenarios were modelled: dry (HTC < 0.7; frequency 40%), optimal (HTC 0.9–1.1; frequency 40%), and excessively wet (HTC > 1.1; frequency 20%). A comparative analysis of yield formation, greenhouse gas emissions, and carbon balance of winter wheat (recommended varietal composition: 30% drought-tolerant, 40% universal, 30% intensive varieties) and bioenergy crops (*Miscanthus giganteus*, energy willow) was carried out. **Conclusions.** Winter

wheat was found to have a negative sequestration balance under all studied weather scenarios (-1289 to -1430 kg CO₂-eq/ha), whereas bioenergy crops maintained a positive balance even under drought: *M. giganteus* +1992 kg/ha, willow +1133 kg/ha. The weighted average substitution effect of replacing wheat (considering scenario frequency) amounted to +4391 kg CO₂-eq/ha for *M. giganteus* and +3313 kg/ha for willow. Bioenergy crops demonstrated higher resilience to weather extremes and stability of greenhouse gas emissions (575–700 kg/ha) compared with wheat (1795–2198 kg/ha).

Keywords: winter wheat; *Miscanthus giganteus*; energy willow; hydrothermal coefficient; greenhouse gases; carbon balance; carbon sequestration; climate scenarios; varietal composition.

Надійшла / Received 25.07.2025

Погоджено до друку / Accepted 17.09.2025