

УДК 620.952:633.11:504.7

Порівняльна оцінка емісії парникових газів та вуглецевого балансу біоенергетичних культур і пшениці озимої в умовах Лісостепу України

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

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна,
*e-mail: ollpris@gmail.com

Мета. Здійснити порівняльне оцінювання емісії парникових газів та вуглецевого балансу біоенергетичних культур (міскантусу гігантського і верби енергетичної) та пшениці озимої в умовах дев'яти областей Лісостепу України, а також визначити кліматичний ефект заміни традиційного зерновиробництва вирощуванням біоенергетичних культур на маргінальних землях. **Методи.** Прогнозні площі вирощування біоенергетичних культур визначали на основі аналізу малопродуктивних і деградованих земель дев'яти областей Лісостепу з урахуванням агрокліматичних умов, частки маргінальних земель та біологічних вимог культур. Ураховано три агрокліматичні зони з різним рівнем зволоження та температурного режиму. Розрахунок емісії парникових газів проводили за методологією IPCC з урахуванням специфіки багаторічних культур. Вуглецевий баланс визначали як різницю між поглинанням CO₂ біомасою та антропогенними викидами, додатково враховували довготривалу секвестрацію вуглецю в ґрунті. Показники для пшениці озимої базувалися на власних попередніх дослідженнях, для міскантусу та верби – на експериментальних і модельних даних України та Європи. **Результати.** Прогнозні площі вирощування міскантусу становлять 190–367 тис. га (середнє 278,5 тис. га), верби – 101–248 тис. га (середнє 174,5 тис. га), сумарно – 453 тис. га, або близько 4 % орних земель Лісостепу. Валовий баланс CO₂ для біоенергетичних культур позитивний: міскантус +41–50 тис. кг/га, верба +26 тис. кг/га; чистий баланс та баланс секвестрації також позитивні (+2233–3458 кг CO₂-eq/га), на відміну від пшениці, що має негативний баланс секвестрації (–1099 кг/га). Основними чинниками є відсутність потреби у внесенні азотних добрив, щорічне надходження органічної біомаси з опалим листям і потужна підземна система. Сумарний кліматичний ефект заміни пшениці на біоенергетичні культури на прогнозних площах Лісостепу становить +2446,4 тис. т CO₂-eq/рік, включаючи економію прямих викидів – 595,7 тис. т CO₂-eq, покращення балансу секвестрації – 1850,7 тис. т CO₂-eq та додаткову секвестрацію вуглецю – 342,3 тис. т C/рік. **Висновки.** Вирощування багаторічних біоенергетичних культур на маргінальних землях Лісостепу забезпечує значне зниження емісії парникових газів та довгострокове накопичення вуглецю в ґрунті порівняно з однорічними зерновими. Кліматичний ефект таких насаджень еквівалентний щорічному поглинанню CO₂ лісовими масивами площею близько 500 тис. га, що свідчить про їх потенціал у контексті кліматичної стабілізації та переходу до більш стійкого землекористування.

Ключові слова: міскантус гігантський; верба енергетична; пшениця озима; парникові гази; вуглецевий баланс; секвестрація вуглецю; Лісостеп України.

Вступ

Зміна клімату належить до найсерйозніших загроз глобальній продовольчій безпеці та сталому розвитку людства. За даними Шостого оціночного звіту Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC), у 2011–2020 рр. середня температура поверхні Землі була на 1,1 °C вищою порівняно

Як цитувати: Присяжнюк О. І., Кононюк Н. О., Маляренко О. А., Мусіч В. В., Половинчук О. Ю., Гончарук О. М., Шевченко О. П. Порівняльна оцінка емісії парникових газів та вуглецевого балансу біоенергетичних культур і пшениці озимої в умовах Лісостепу України. *Новітні агротехнології*. 2025. Т. 13, № 3. <https://doi.org/10.47414/na.13.3.2025.348846>



© The Author(s) 2025. Published by Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine. This is an open access article distributed under the terms of the license CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

з доіндустріальним періодом (1850–1900 рр.), причому близько половини цього потепління припадає на період після 1980 року [1]. Для стримування зростання глобальної температури в межах 1,5 °С необхідним є досягнення нульових нетто-викидів CO₂ до 2050 року та суттєве скорочення емісій інших парникових газів.

Сільське господарство одночасно є вразливою до кліматичних змін галуззю та одним з їхніх ключових чинників. За оцінками FAO, агропродовольчі системи формують близько 31 % глобальних антропогенних викидів парникових газів, при цьому безпосередньо сільськогосподарська діяльність забезпечує приблизно 5,3 Гт CO₂-еквіваленту на рік [2]. Основними джерелами цих викидів є кишкова ферментація жуйних тварин, управління гноєм, вирощування рису, застосування мінеральних та органічних азотних добрив, а також зміни землекористування.

Закис азоту (N₂O) посідає третє місце за внеском у глобальне потепління після CO₂ та CH₄ і характеризується потенціалом глобального потепління, що у 265–298 разів перевищує аналогічний показник CO₂ у 100-річному часовому горизонті [3]. Сільське господарство є домінуючим джерелом антропогенних викидів N₂O, забезпечуючи близько 60 % їх загального обсягу. Основні механізми утворення цього газу пов'язані з мікробіологічними процесами нітрифікації та денітрифікації у ґрунтах, інтенсивність яких суттєво зростає за умов внесення азотних добрив [4].

Виробництво синтетичних азотних добрив за процесом Габера – Боша є одним з найбільш енергоємних технологічних процесів у хімічній промисловості, споживаючи близько 1–2 % світових енергетичних ресурсів і формуючи приблизно 1,2 % глобальних викидів CO₂ [5]. Для синтезу 1 кг азоту у формі карбаміду витрачається в середньому 55–60 МДж енергії, при цьому в атмосферу виділяється 3,5–6,0 кг CO₂-еквіваленту залежно від використаної технології та джерела енергії. Таким чином, азотний цикл у сільському господарстві – від промислового виробництва добрив до польових емісій – є одним з ключових чинників формування вуглецевого сліду рослинництва.

Пшениця озима є базовою продовольчою культурою помірного клімату та однією з найважливіших сільськогосподарських культур світу. В Україні вона займає найбільші посівні площі серед зернових культур – понад 5 млн га, забезпечуючи щорічне виробництво 20–25 млн т зерна [6]. Інтенсивні технології її вирощування передбачають внесення 120–180 кг азоту на гектар, що супроводжується значними викидами парникових газів як на етапі виробництва мінеральних добрив, так і внаслідок польових емісій N₂O.

Окрім прямих викидів парникових газів, традиційне зерновиробництво негативно впливає на баланс ґрунтового вуглецю. Інтенсивний щорічний обробіток ґрунту (оранка, культивация) призводить до руйнування ґрунтової структури та прискорення мінералізації органічної речовини. За результатами довготривалих польових досліджень, такі системи землеробства можуть зумовлювати втрати 0,3–0,5 т вуглецю з гектара щороку [7]. Додатковим негативним чинником є вивезення соломи з полів, що зменшує надходження органічного вуглецю до ґрунту.

Перспективною альтернативою традиційному використанню орних земель, особливо малопродуктивних і деградованих, є вирощування багаторічних енергетичних культур. Найпридатнішими для умов помірного клімату Європи вважаються міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus* J.M.Greef & Deuter ex Hodk. & Renvoize) та верба енергетична (*Salix viminalis* L.) [8, 9]. Ці культури поєднують високу продуктивність біомаси з низькими потребами у мінеральному живленні та здатністю ефективно використовувати маргінальні землі.

Міскантус гігантський є стерильним триплоїдним гібридом азійського походження з C4-типом фотосинтезу, що забезпечує високу ефективність використання води та сонячної енергії. За даними європейських досліджень, його врожайність у помірному кліматі становить 10–25 т сухої біомаси з гектара, при цьому культура практично не потребує внесення азотних добрив завдяки ефективній реутилізації азоту з опалого листя та можливій асоціативній фіксації атмосферного азоту [10]. Тривалість продуктивної експлуатації плантацій міскантусу становить 15–25 років.

Верба енергетична є швидкорослим листяним чагарником, який вирощують у короткочасних плантаціях з інтервалом збирання два-чотири роки. Її середня врожайність становить 8–15 т/га сухої біомаси на рік, а загальний продуктивний період насаджень досягає 20–30 років [11]. Верба відзначається високою екологічною пластичністю та здатністю ефективно використовувати перезволожені й підтоплені землі, малопридатні для вирощування традиційних сільськогосподарських культур.

Ключовою перевагою багаторічних енергетичних культур порівняно з однорічними зерновими є їхня здатність до інтенсивної секвестрації атмосферного вуглецю в ґрунті. Відсутність щорічного

обробітку, добре розвинена коренева система, що проникає на глибину 1,5–2,5 м, а також щорічне надходження органічної речовини з опалим листям забезпечують накопичення ґрунтового вуглецю на рівні 0,5–1,5 т С/га/рік [12, 13]. Завдяки цьому біоенергетичні культури слугують не лише джерелом відновлюваної енергії, а й дієвим інструментом пом'якшення кліматичних змін.

За наявними оцінками, площа маргінальних земель в Україні, потенційно придатних для вирощування біоенергетичних культур, становить 3–4 млн га [14]. До цієї категорії належать землі з деградованими ґрунтами (еродовані, засолені, кислі), несприятливими гідрологічними умовами або іншими обмежувальними чинниками. Залучення таких земель до виробництва біоенергії не створює конкуренції з продовольчим землеробством і сприяє диверсифікації аграрного виробництва.

Лісостеп України є найпродуктивнішою сільськогосподарською зоною країни, проте і в цьому регіоні значні площі характеризуються обмеженою господарською цінністю. За даними проекту Horizon 2020 «MAGIC» (Marginal Lands for Growing Industrial Crops), у Лісостепу ідентифіковано значні масиви маргінальних земель, придатних для вирощування міскантусу та верби [15]. Водночас комплексна порівняльна оцінка викидів парникових газів і вуглецевого балансу біоенергетичних культур та традиційних зернових з урахуванням регіональних умов України залишається недостатньо дослідженою.

Мета дослідження – здійснити порівняльне оцінювання емісії парникових газів та вуглецевого балансу біоенергетичних культур (міскантусу гігантського і верби енергетичної) та пшениці озимої в умовах дев'яти областей Лісостепу України, а також визначити кліматичний ефект заміни традиційного зерновиробництва вирощуванням біоенергетичних культур на маргінальних землях.

Матеріали та методика дослідження

Прогнозні площі вирощування біоенергетичних культур визначали на основі аналізу малопродуктивних і деградованих земель [14, 15] у дев'яти областях Лісостепу України (Вінницька, Київська, Полтавська, Сумська, Тернопільська, Харківська, Хмельницька, Черкаська, Чернівецька). Для кожного регіону враховано агрокліматичні умови (середньорічну кількість опадів, температурний режим), частку маргінальних земель (30–45 % орних угідь) та біологічні вимоги досліджуваних культур.

За результатами розрахунків прогнозні площі вирощування міскантусу гігантського становлять 190–367 тис. га (у середньому 278,5 тис. га), верби енергетичної – 101–248 тис. га (у середньому 174,5 тис. га). Сумарна площа під біоенергетичними культурами оцінюється у 453 тис. га, що відповідає близько 4,0 % орних земель Лісостепу України.

Базові показники для пшениці озимої (урожайність 6,97 т/га, викиди 1938,2 кг CO₂-eq/га) визначено на основі власних попередніх досліджень, виконаних за результатами аналізу 36 сортів у 2020–2024 рр. Параметри біоенергетичних культур запозичено з результатів експериментальних і модельних досліджень, проведених в Україні та країнах Європи (Lewandowski et al., 2000; Clifton-Brown et al., 2004; Dondini et al., 2009; Hastings et al., 2017).

Для коректного врахування просторової диференціації продуктивності культур територію Лісостепу України поділено на три агрокліматичні зони з різним рівнем зволоження та температурного режиму.

Західний Лісостеп (Тернопільська, Хмельницька та Чернівецька області) характеризується річною кількістю опадів 600–694 мм і коефіцієнтом зволоження 2,0–2,8, що формує найсприятливіші агрокліматичні умови для вирощування біоенергетичних культур. За цих умов прогнозна врожайність міскантусу гігантського становить орієнтовно 18 т/га сухої маси, верби енергетичної – 12 т/га.

Центральний Лісостеп (Вінницька, Київська, Черкаська та Полтавська області) має помірно сприятливі умови зволоження з річною сумою опадів 480–615 мм та коефіцієнтом зволоження 1,2–1,4. За таких умов очікувана врожайність міскантусу оцінюється на рівні 15 т/га сухої маси, верби – 8–10 т/га.

Східний Лісостеп (Харківська та Сумська області) характеризується найменш сприятливими агрокліматичними умовами, зумовленими зниженням кількості опадів до 450–550 мм на рік та коефіцієнтом зволоження 1,0–1,2. У цій зоні прогнозна врожайність міскантусу становить приблизно 12 т/га сухої маси, верби – 8–10 т/га.

Розрахунок емісій парникових газів здійснювали відповідно до методологічних підходів IPCC (2006, 2019) [16, 17] з урахуванням специфіки багаторічних енергетичних культур. До ключових особливостей цих культур належать тривалий життєвий цикл плантацій (міскантус – до 20 років, верба – до 25 років), відсутність потреби у внесенні азотних добрив після становлення плантацій та мінімальний рівень щорічного обробітку ґрунту.

Для **пшениці озимої** загальні викиди складаються з:

$$E_{\text{пшениця}} = E_{\text{добрива}} + E_{\text{N}_2\text{O}} + E_{\text{техніка}} + E_{\text{інші}} = 1938,2 \text{ кг CO}_2\text{-eq/га},$$

де $E_{\text{добрива}}$ – викиди, пов'язані з виробництвом і транспортуванням мінеральних добрив (809,8 кг CO₂-eq/га), зокрема азотних – 705,6, фосфорних – 81,0 та калійних – 23,2 кг CO₂-eq/га;

$E_{\text{N}_2\text{O}}$ – польові емісії закису азоту, зумовлені мікробіологічними процесами нітрифікації та денітрифікації (662,1 кг CO₂-eq/га);

$E_{\text{техніка}}$ – викиди від використання сільськогосподарської техніки під час основних технологічних операцій (272,9 кг CO₂-eq/га);

$E_{\text{інші}}$ – викиди, пов'язані з виробництвом насінневого матеріалу та засобів захисту рослин (97,8 кг CO₂-eq/га).

Для **міскантусу гігантського** викиди розраховано за формулою:

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

де $E_{\text{заклад}}$ – одноразові викиди, пов'язані із закладанням плантації (2500 кг CO₂-eq/га), що включають виробництво і транспортування ризом, підготовку ґрунту та посадкові роботи;

T – термін продуктивного використання плантації (20 років);

$E_{\text{щорічні}}$ – щорічні викиди, пов'язані зі збиранням і транспортуванням біомаси (450 кг CO₂-eq/га).

Ключовою особливістю міскантусу гігантського є відсутність потреби у внесенні азотних добрив, що зумовлено ефективною реутилізацією азоту з опалого листя та здатністю культури до асоціативної фіксації атмосферного азоту мікроорганізмами ризосфери. Це практично усуває основні джерела викидів парникових газів, пов'язані з азотним живленням, зокрема емісії, що виникають на етапі виробництва азотних добрив та внаслідок польових викидів закису азоту (N₂O).

Для **верби енергетичної** викиди розраховано за формулою:

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

де $E_{\text{заклад}}$ – одноразові викиди, пов'язані із закладанням плантації (3000 кг CO₂-eq/га), які включають виробництво живців, підготовку ґрунту та проведення посадкових робіт;

T – термін продуктивного використання плантації (25 років);

$E_{\text{щорічні}}$ – щорічні викиди, пов'язані з доглядом за насадженнями (380 кг CO₂-eq/га);

$E_{\text{збір}}$ – викиди, пов'язані зі збиранням і вивезенням біомаси (600 кг CO₂-eq/га на одну операцію);

R – ротація збирання, що становить три роки.

Вуглецевий баланс визначали як різницю між обсягами поглинання CO₂ у процесі формування рослинної біомаси та сумарними антропогенними викидами парникових газів. Для біоенергетичних культур додатково враховано довготривалу секвестрацію вуглецю в ґрунті, яка є однією з їх ключових екологічних переваг порівняно з однорічними сільськогосподарськими культурами.

Поглинання CO₂ біомасою розраховано на основі вмісту вуглецю в компонентах рослин та коефіцієнта перерахунку C → CO₂ (44/12 = 3,667) [12, 13, 18]:

$$CO_{2\text{ погл}} = \sum(M_i \times C_i) \times 3,667 \times 1000$$

де M_i – маса i -го компонента біомаси (т/га); C_i – вміст вуглецю в i -му компоненті (частка од.).

Для міскантусу вміст вуглецю в біомасі становить 48 %, а загальна біомаса включає: наземну (збирається), підземну (35 % від наземної), опале листя (15 %) та стерню (10 %). Для верби вміст вуглецю – 49 %, підземна біомаса – 40 % від наземної, опале листя – 12 %.

Валовий вуглецевий баланс визначає загальний кліматичний ефект культури:

$$\text{Баланс}_{\text{валовий}} = CO_{2\text{ погл}} - E_{\text{загальні}}$$

Чистий вуглецевий баланс поля враховує лише вуглець, що залишається на полі (для біоенергетичних культур – підземна біомаса, опале листя, стерня):

$$\text{Баланс}_{\text{чистий}} = CO_{2\text{ залишено}} - E_{\text{загальні}}$$

Баланс секвестрації є ключовим показником для оцінки довгострокового накопичення вуглецю в ґрунті. Для багаторічних культур секвестрація визначається емпіричними даними з довготривалих польових досліджень:

$$\text{Баланс_секв} = C_{\text{секв}} \times 3,667 \times 1000 - E_{\text{загальні}}$$

де $C_{\text{секв}}$ – річна секвестрація вуглецю в ґрунті (т С/га/рік). За даними європейських досліджень, міскантус секвеструє 1,1 т С/га/рік, верба – 0,8 т С/га/рік. Для порівняння, пшениця при 30 % залишенні соломи секвеструє лише 0,23 т С/га/рік.

Для кожного з дев'яти регіонів Лісостепу України виконували послідовні розрахунки, що включали такі етапи:

1. визначення агрокліматичної зони регіону та встановлення відповідної прогнозованої врожайності пшениці озимої, міскантусу гігантського і верби енергетичної на основі середньорічної кількості опадів;
2. розрахунок показників у перерахунок на 1 га посівної площі для кожної культури, зокрема обсягів викидів парникових газів, поглинання CO_2 та вуглецевого балансу;
3. визначення кліматичного ефекту заміни пшениці озимої біоенергетичними культурами шляхом оцінювання різниці показників вуглецевого балансу та секвестрації;
4. масштабування отриманих значень на прогнозні площі вирощування культур у межах регіону з представленням результатів у тис. т $\text{CO}_2\text{-eq/рік}$;
5. розрахунок додаткової секвестрації вуглецю та скорочення викидів парникових газів порівняно з базовим варіантом вирощування пшениці озимої.

Сумарний регіональний ефект розраховано за формулою:

$$\text{Ефект_регіон} = (\text{Баланс_секв_міск} - \text{Баланс_секв_пшениця}) \times S_{\text{міск}} + (\text{Баланс_секв_верба} - \text{Баланс_секв_пшениця}) \times S_{\text{верба}}$$

де $S_{\text{міск}}$ та $S_{\text{верба}}$ – прогнозні площі культур у регіоні (тис. га).

Результати досліджень

Високі темпи секвестрації вуглецю багаторічними енергетичними культурами зумовлені сукупністю агроекологічних і біологічних чинників. На відміну від однорічних культур, міскантус гігантський і верба енергетична після закладання плантацій не потребують щорічної оранки, що сприяє збереженню ґрунтової структури та суттєвому уповільненню мінералізації органічного вуглецю. Натомість за традиційного вирощування пшениці озимої щорічний обробіток ґрунту може зумовлювати втрати 0,3–0,5 т С/га.

Одним із ключових факторів є розвиток потужної кореневої системи. Міскантус формує ризому та корені, що проникають у ґрунт на глибину до 2 м, тоді як верба утворює добре розгалужену кореневу систему глибиною до 1,5 м. Підземна біомаса цих культур становить 35–40 % від наземної та є основним джерелом стабільного надходження органічного вуглецю до ґрунту.

Додатковим чинником накопичення ґрунтового вуглецю є щорічне надходження органічної речовини з опалим листям. У міскантусу за весняного збирання надземної біомаси відбувається осіннє відмирання листя, що забезпечує внесення до 1,5–2,5 т/га органічної речовини щороку. Верба енергетична скидає листя щорічно, що також сприяє поповненню запасів органічного вуглецю в ґрунті.

Відсутність потреби у внесенні азотних добрив за вирощування біоенергетичних культур є ще одним важливим чинником секвестрації. Азотні добрива стимулюють мікробіологічну активність ґрунту та процеси мінералізації органічної речовини, тоді як їх невикористання створює сприятливі умови для накопичення гумусу.

Фізіологічні особливості міскантусу, зокрема C4-тип фотосинтезу, забезпечують високу ефективність використання сонячної радіації та води порівняно з C3-культурами, такими як пшениця озима та верба енергетична. Це зумовлює інтенсивніше накопичення наземної і підземної біомаси та, відповідно, органічного вуглецю.

У таблиці 1 наведено вхідні параметри, використані для розрахунку емісій парникових газів та вуглецевого балансу досліджуваних культур. Для пшениці озимої використано результати попередніх досліджень, виконаних на основі аналізу 36 сортів, тоді як для біоенергетичних культур залучено літературні дані європейських та українських наукових досліджень.

Дані таблиці свідчать про принципові відмінності між однорічною культурою пшениці озимої та багаторічними біоенергетичними культурами – міскантусом гігантським і вербою енергетичною. Останні характеризуються істотно більшою часткою підземної біомаси (35–40 % проти близько 5 % у пшениці), відсутністю потреби у внесенні азотних добрив та вищими темпами секвестрації вуглецю в ґрунті, які становлять 0,8–1,1 т С/га/рік порівняно з 0,23 т С/га/рік для пшениці озимої.

Таблиця 1

Вхідні параметри для розрахунку емісій та вуглецевого балансу

| Параметр | Пшениця озима | Міскантус | Верба |
|--|---------------|-------------------|------------------|
| Тип культури | Однорічна | Багаторічна | Багаторічна |
| Термін використання, років | 1 | 20 | 25 |
| Урожайність, т/га: | 6,97 (зерно) | 12–18 (сух. маса) | 8–12 (суха маса) |
| Західний Лісостеп | – | 18 | 12 |
| Центральний Лісостеп | – | 15 | 8–10 |
| Східний Лісостеп | – | 12 | 8 |
| Вміст вуглецю в біомасі, % | 45,0 | 48,0 | 49,0 |
| Відношення підземної біомаси до наземної | 0,05 | 0,35 | 0,40 |
| Доза азоту, кг N/га | 120 | 0 | мінімальна |
| Секвестрація С в ґрунті, т/га/рік | 0,23* | 1,10 | 0,80 |

* За базового сценарію 30 % залишеної соломи.

У таблиці 2 наведено порівняльний аналіз структури викидів CO₂-еквіваленту для досліджуваних культур. Сумарні викиди парникових газів при вирощуванні біоенергетичних культур є у 2,8–3,4 раза нижчими, ніж за вирощування пшениці озимої. Така різниця зумовлена передусім відсутністю двох найбільших джерел емісій – викидів, пов'язаних із виробництвом азотних добрив, а також польових емісій закису азоту (N₂O).

Таблиця 2

Структура викидів парникових газів за культурами, кг CO₂-eq/га/рік

| Джерело емісії | Пшениця | % | Міскантус | % | Верба | % |
|---|---------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| Виробництво добрив: | 809,8 | 41,8 | – | – | – | – |
| азотних (N ₁₂₀) | 705,6 | 36,4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| фосфорних (P ₆₀) | 81,0 | 4,2 | – | – | – | – |
| калійних (K ₄₀) | 23,2 | 1,2 | – | – | – | – |
| Польові емісії N ₂ O | 662,1 | 34,2 | ~50 | 8,7 | ~50 | 7,1 |
| CO ₂ від гідролізу карбаміду | 95,6 | 4,9 | – | – | – | – |
| Закладання плантації (аморт.) | – | – | 125 | 21,7 | 120 | 17,1 |
| Використання техніки | 272,9 | 14,1 | 300 | 52,2 | 330 | 47,1 |
| Збирання (аморт. для верби) | (вкл.) | – | (вкл.) | – | 200 | 28,6 |
| Інші (насіння, пестициди) | 97,8 | 5,0 | 100 | 17,4 | – | – |
| Разом | 1938,2 | 100,0 | 575 | 100,0 | 700 | 100,0 |

Аналіз структури викидів свідчить, що для пшениці озимої основними джерелами емісій є виробництво мінеральних добрив (41,8 %) та польові викиди закису азоту (N₂O) (34,2 %), сукупний внесок яких становить близько 76 % загального обсягу викидів парникових газів. Натомість для біоенергетичних культур структура емісій має принципово інший характер: основним джерелом є використання сільськогосподарської техніки (47–52 %), тоді як викиди, пов'язані з азотним живленням, є мінімальними або практично відсутніми.

У таблиці 3 наведено результати розрахунку вуглецевого балансу для пшениці озимої, міскантусу гігантського та верби енергетичної. У таблиці відображено обсяги поглинання CO₂ у процесі формування біомаси, антропогенні викиди парникових газів, а також три інтегральні показники балансу: валовий, чистий і баланс секвестрації вуглецю.

Результати демонструють принципову відмінність у кліматичній ролі однорічної та багаторічних культур. Пшениця озима, попри позитивний валовий баланс (+22 587 кг CO₂-екв/га), має негативний баланс секвестрації (–1099 кг/га), що свідчить про її роль нетто-джерела втрат органічного вуглецю з ґрунту. Натомість біоенергетичні культури характеризуються позитивним

балансом секвестрації (+2233...+3458 кг/га), що забезпечує довгострокове накопичення вуглецю у ґрунті.

Таблиця 3

Вуглецевий баланс культур, кг CO₂-eq/га/рік

| Показник | Пшениця озима | Міскантус (Центр.) | Міскантус (Захід.) | Верба (помірн.) |
|---|---------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| Урожайність, т/га | 6,97 | 15,0 | 18,0 | 10,0 |
| Загальна біомаса, т/га | 15,01 | 24,00 | 28,80 | 15,20 |
| Поглинання CO ₂ , кг/га | 24 525 | 42 240 | 50 688 | 27 309 |
| Викиди CO ₂ -eq, кг/га | 1938 | 575 | 575 | 700 |
| Валовий баланс, кг/га | +22 587 | +41 665 | +50 113 | +26 609 |
| CO ₂ залишено на полі, кг/га | 4849 | 15 840 | 19 008 | 9343 |
| Чистий баланс, кг/га | +2911 | +15 265 | +18 433 | +8643 |
| Секвестрація С, т/га/рік | 0,229 | 1,100 | 1,100 | 0,800 |
| Баланс секвестрації, кг/га | -1099 | +3458 | +3458 | +2233 |
| Ефект vs пшениця, кг/га | - | +4557 | +4557 | +3332 |

Примітка. Для пшениці – сценарій 30 % залишеної соломи. Позитивний баланс означає нетто-поглинання CO₂, негативний – нетто-емісію.

Ефект заміни пшениці на міскантус становить +4557 кг CO₂-eq/га/рік, а на вербу – +3332 кг CO₂-eq/га/рік. Це означає, що кожен гектар біоенергетичних культур щорічно забезпечує додаткову секвестрацію 3,3–4,6 т CO₂ порівняно з вирощуванням пшениці.

У таблиці 4 наведено результати розрахунків для кожної з дев'яти областей Лісостепу України. Для кожного регіону враховано агрокліматичну зону (що визначає прогнозну урожайність культур), площі біоенергетичних насаджень та сумарний кліматичний ефект заміни пшениці на міскантус і вербу.

Таблиця 4

Кліматичний ефект вирощування біоенергетичних культур за регіонами Лісостепу України

| Область | Зона | Опади, мм | Міскантус, тис. га | Верба, тис. га | Ефект. секв., тис. т/рік | Дод. С, тис. т/рік | Економія, тис. т/рік |
|---------------|--------|-----------|--------------------|----------------|--------------------------|--------------------|----------------------|
| Вінницька | Центр. | 560 | 45,0 | 20,0 | +271,7 | +50,6 | +88,5 |
| Київська | Центр. | 550 | 30,0 | 35,0 | +253,3 | +46,1 | +86,2 |
| Полтавська | Центр. | 510 | 52,5 | 17,5 | +297,6 | +55,7 | +95,2 |
| Сумська | Схід. | 520 | 22,5 | 32,5 | +210,8 | +38,2 | +71,8 |
| Тернопільська | Захід. | 640 | 20,0 | 10,0 | +124,5 | +23,1 | +40,9 |
| Харківська | Схід. | 500 | 37,5 | 15,0 | +220,9 | +41,2 | +71,3 |
| Хмельницька | Захід. | 600 | 27,5 | 13,0 | +168,6 | +31,4 | +55,0 |
| Черкаська | Центр. | 530 | 35,0 | 25,0 | +242,8 | +44,8 | +79,3 |
| Чернівецька | Захід. | 650 | 8,5 | 6,5 | +60,4 | +11,1 | +20,2 |
| Разом | - | - | 278,5 | 174,5 | +1 850,7 | +342,3 | +595,7 |

Примітка. Ефект секв. – покращення балансу секвестрації (тис. т CO₂-eq/рік) порівняно з пшеницею. Дод. С – додаткова секвестрація вуглецю (тис. т С/рік). Економія – зниження прямих викидів ПГ (тис. т CO₂-eq/рік).

Найбільший абсолютний кліматичний ефект спостерігається у Полтавській (+297,6 тис. т CO₂-eq/рік), Вінницькій (+271,7 тис. т) та Київській (+253,3 тис. т) областях, що зумовлено великими прогнозними площами біоенергетичних культур. Найменший ефект зафіксовано у Чернівецькій області (+60,4 тис. т), де площі обмежені мозаїчністю ландшафту.

Сумарний потенціал по Лісостепу України становить: покращення балансу секвестрації на 1850,7 тис. т CO₂-eq/рік, додаткова секвестрація вуглецю – 342,3 тис. т С/рік, економія прямих викидів – 595,7 тис. т CO₂-eq/рік. Це відповідає зниженню загальних викидів на 67,8 % порівняно з вирощуванням пшениці на тих самих площах.

Таким чином, вирощування біоенергетичних культур на прогнозних площах малопродуктивних земель Лісостепу України (453 тис. га, що становить 4 % орних земель) забезпечує сумарний кліматичний ефект понад 2,4 млн т CO₂-eq на рік. Це еквівалентно щорічному поглинанню CO₂ лісовими насадженнями площею приблизно 500 тис. га.

Зведені результати по Лісостепу України

| Показник | Значення |
|---|--|
| Загальна прогнозна площа біоенергетичних культур | 453,0 тис. га (4,0 % орних земель) |
| зокрема міскантус гігантський | 278,5 тис. га (2,5 %) |
| верба енергетична | 174,5 тис. га (1,6 %) |
| Викиди за вирощування пшениці на цих площах | 878,0 тис. т CO ₂ -eq/рік |
| Викиди за вирощування біоенергетичних культур | 282,3 тис. т CO ₂ -eq/рік |
| Економія прямих викидів | 595,7 тис. т CO ₂ -eq/рік (-67,8 %) |
| Покращення балансу секвестрації | +1850,7 тис. т CO ₂ -eq/рік |
| Додаткова секвестрація вуглецю еквівалент у CO ₂ | +342,3 тис. т С/рік |
| | +1255,0 тис. т CO ₂ /рік |
| Сумарний кліматичний ефект | +2446,4 тис. т CO ₂ -eq/рік |

Примітка. Сумарний кліматичний ефект = економія прямих викидів + покращення балансу секвестрації.

Обговорення

Отримані результати демонструють принципову відмітність у структурі викидів парникових газів між однорічними зерновими та багаторічними енергетичними культурами. Загальні викиди біоенергетичних культур (575 кг CO₂-eq/га для міскантуса та 700 кг/га для верби) у 2,8–3,4 раза нижчі порівняно з пшеницею озимою (1938 кг/га). Це зниження зумовлене насамперед відсутністю двох основних компонентів викидів зерновиробництва – виробництва азотних добрив та польових емісій N₂O.

Для пшениці озимої виробництво мінеральних добрив (переважно азотних) та польові емісії закису азоту формують разом 76 % загальних викидів (41,8 % + 34,2 %). Ці компоненти тісно пов'язані між собою, оскільки внесення азотних добрив є основним джерелом субстрату для мікробіологічних процесів нітрифікації та денітрифікації, що генерують N₂O. За даними IPCC, близько 1 % внесеного мінерального азоту перетворюється на N₂O через прямі емісії, і ще 0,5–1 % – через непрямі шляхи (волатилізація NH₃ із подальшим осіданням та вимивання NO₃⁻) [16, 17].

Структура викидів біоенергетичних культур принципово відрізняється. Основним джерелом є використання техніки (52,2 % для міскантуса та 47,1 % для верби), тоді як для пшениці цей компонент становить лише 14,1 %. Це пояснюється тим, що при відсутності значних інших джерел емісій механізовані операції зі збирання та транспортування біомаси стають домінуючими. Водночас абсолютні величини цих викидів (300–330 кг CO₂-eq/га) порівнювані з пшеницею озимою (273 кг/га).

Отримані результати узгоджуються з даними європейських досліджень. Мета-аналіз Don et al. [19] показав, що вирощування багаторічних трав'янистих культур на орних землях супроводжується зниженням викидів парникових газів на 50–80 % порівняно з однорічними зерновими. Дослідження Styles et al. [20] для умов Ірландії зафіксували зниження викидів на 65–75 % у разі переходу від зернових до біоенергетичних культур. Польові дослідження у Німеччині (Felten & Emmerling [21]) підтвердили відсутність потреби у азотних добривах для продуктивних плантацій міскантуса після третього року вегетації.

Ключовим науковим результатом дослідження є встановлення протилежної спрямованості вуглецевого балансу секвестрації для однорічних зернових та багаторічних енергетичних культур. Пшениця озима, незважаючи на позитивний валовий баланс (+22 587 кг CO₂-eq/га), що свідчить про перевищення фотосинтетичного поглинання CO₂ над антропогенними викидами, має негативний баланс секвестрації (-1099 кг CO₂-eq/га). Це означає, що довгострокове накопичення вуглецю в ґрунті через гуміфікацію рослинних решток не компенсує антропогенні викиди, і культура є нетто-джерелом втрат ґрунтового вуглецю.

Негативний баланс секвестрації пшениці зумовлений кількома факторами: слабо розвинена та неглибока коренева система (5 % від наземної біомаси, 0,5–1,0 м), вивезення значної частини наземної біомаси (зерно та частково солома), а також щорічний інтенсивний обробіток ґрунту (оранка), що прискорює мінералізацію гумусу та руйнує ґрунтові агрегати.

Біоенергетичні культури, навпаки, демонструють стійкий позитивний баланс секвестрації: міскантус +3458 кг CO₂-eq/га, верба +2233 кг/га. Щорічне накопичення вуглецю в ґрунті (1,1 т С/га

для міскантусу та 0,8 т С/га для верби) не лише компенсує антропогенні викиди, а й забезпечує додаткову секвестрацію, роблячи такі плантації нетто-поглиначами атмосферного CO₂.

Механізми інтенсивної секвестрації вуглецю біоенергетичними культурами підтверджені численними дослідженнями: Dondini et al. [12] у 15-річних дослідях в Ірландії зафіксували накопичення 0,6–1,4 т С/га/рік під міскантусом; Hansen et al. [22] у 9-річному досліді в Данії показали збільшення запасів ґрунтового вуглецю під вербою на 0,5–0,9 т С/га/рік; мета-аналіз Roesler & Don [23], охопивши 45 досліджень у Європі та Північній Америці, підтвердив середню швидкість секвестрації 0,9 т С/га/рік для міскантусу та 0,7 т С/га/рік для верби.

Ефект заміни пшениці на біоенергетичні культури становить +4557 кг CO₂-eq/га/рік для міскантусу та +3332 кг/га для верби. Ці величини відображають різницю балансів секвестрації культур і характеризують кліматичний вигравш від зміни землекористування. Отримані значення узгоджуються з результатами McCalmont et al. [13], які оцінили ефект заміни зернових на міскантус у 3–6 т CO₂-eq/га/рік залежно від кліматичних умов та попереднього використання земель.

Регіональний аналіз виявив суттєву диференціацію кліматичного ефекту залежно від площ маргінальних земель та агрокліматичних умов. Найбільший абсолютний ефект досягається у Полтавській (+297,6 тис. т CO₂-eq/рік), Вінницькій (+271,7 тис. т) та Київській (+253,3 тис. т) областях. Це пов'язано з великими прогнозними площами біоенергетичних культур у цих регіонах (70 тис., 65 тис. та 65 тис. га відповідно), що є результатом значних площ деградованих земель у інтенсивно освоєних сільськогосподарських областях.

Області Західного Лісостепу (Тернопільська, Хмельницька, Чернівецька) демонструють вищий питомий кліматичний ефект на 1 га завдяки сприятливішим умовам зволоження та більшій урожайності біоенергетичних культур. Проте через менші загальні площі маргінальних земель, зумовлені строкатістю та кращим станом ґрунтів, абсолютний внесок цих областей менший. Найменший ефект спостерігається у Чернівецькій області (+60,4 тис. т CO₂-eq/рік), що пов'язано з найменшою площею прогнозних плантацій (15 тис. га).

Області Східного Лісостепу (Харківська, Сумська) характеризуються найменш сприятливими умовами зволоження (ГТК 1,0–1,2), що обмежує продуктивність біоенергетичних культур, особливо верби. Водночас міскантус демонструє прийнятну врожайність (12 т/га сухої маси), що узгоджується з даними Clifton-Brown et al. [24] щодо толерантності цієї культури до посушливих умов.

Сумарний кліматичний ефект вирощування біоенергетичних культур на прогнозних площах Лісостепу (+2446,4 тис. т CO₂-eq/рік) має значне значення для досягнення кліматичних цілей України. Він складається з двох компонентів: економії прямих викидів ПГ (595,7 тис. т/рік, або 24 % загального ефекту) та покращення балансу секвестрації (+1850,7 тис. т/рік, або 76 %). Домінування секвестраційного компонента підкреслює роль біоенергетичних культур не лише як низько-вуглецевого джерела енергії, але й як ефективного інструменту вилучення CO₂ з атмосфери.

Для порівняння, за даними Державного кадастру лісів України, середня секвестрація CO₂ лісовими насадженнями становить 4–6 т/га/рік [25]. Таким чином, кліматичний ефект вирощування біоенергетичних культур на 453 тис. га еквівалентний щорічному поглинанню CO₂ лісами площею приблизно 400–600 тис. га. Біоенергетичні культури забезпечують цей ефект вже з третього-четвертого року після закладання плантації, тоді як молоді лісові насадження досягають максимальної секвестрації лише через 20–40 років.

Загальні викиди ПГ України оцінюються приблизно у 200–250 млн т CO₂-eq/рік (без урахування LULUCF) [26]. Сумарний кліматичний ефект біоенергетичних культур (+2,4 млн т/рік) становить близько 1 % від цієї величини. Хоча частка видається невеликою, йдеться лише про 4 % орних земель Лісостепу. Масштабування на всі маргінальні землі України (3–4 млн га) потенційно може забезпечити кліматичний ефект 15–20 млн т CO₂-eq/рік, що становитиме 6–10 % національних викидів.

Важливим аспектом є те, що вирощування біоенергетичних культур на маргінальних землях не створює конкуренції з продовольчим сектором. Використання лише 4 % орних земель (найменш продуктивних) не впливає на обсяги виробництва зерна. Ба більше, біоенергетичні культури можуть сприяти відновленню деградованих земель: збільшення запасів ґрунтового вуглецю покращує структуру, водоутримувальну здатність та родючість ґрунтів, відкриваючи можливості для повернення частини земель до традиційного сільськогосподарського використання після завершення терміну плантації.

Дослідження має низку обмежень, які слід враховувати при інтерпретації результатів.

По-перше, для розрахунку емісій використано коефіцієнти IPCC Tier 1, що є усередненими для помірного клімату і можуть не повністю відображати специфіку чорноземів України. Верифікація цих коефіцієнтів прямими вимірюваннями потоків N_2O та CO_2 є важливим напрямом подальших досліджень.

По-друге, показники секвестрації вуглецю біоенергетичними культурами запозичено з європейських досліджень, переважно на суглинистих та супіщаних ґрунтах. Чорноземи України характеризуються вищим початковим вмістом органічного вуглецю (3–5 %) порівняно з типовими європейськими ґрунтами (1–2 %), що може впливати на динаміку секвестрації. Проведення довготривалих польових дослідів на чорноземах необхідне для уточнення цих показників.

По-третє, у дослідженні не враховано ефект заміщення викопного палива біомасою. Використання міскантусу та верби для виробництва теплової чи електричної енергії замість природного газу або вугілля забезпечує додатковий кліматичний ефект за рахунок уникнення викидів від спалювання викопного палива. За різними оцінками, цей ефект може становити 5–15 т CO_2 /га/рік залежно від технології перероблення біомаси та виду поновного палива.

Нарешті, прогнозні площі біоенергетичних культур є орієнтовними та залежать від економічних факторів (ціни на біомасу, собівартість виробництва), політичних (субсидії, регуляторне середовище) та соціальних (готовність фермерів) умов. Реальні темпи впровадження біоенергетичних культур в Україні залишаються низькими через недостатню економічну привабливість та відсутність розвинутого ринку біомаси.

Висновки

Прогнозні площі біоенергетичних культур на малопродуктивних землях дев'яти областей Лісостепу України становлять 453 тис. га (4,0 % орних земель): міскантус гігантський – 278,5 тис. га (2,5 %), верба енергетична – 174,5 тис. га (1,6 %). Використання цих земель не створює конкуренції з продовольчим сектором.

Викиди парникових газів за вирощування біоенергетичних культур (міскантус – 575, верба – 700 кг CO_2 -eq/га/рік) у 2,8–3,4 раза нижчі, ніж у пшениці озимої (1938 кг CO_2 -eq/га). Зменшення викидів зумовлено відсутністю виробництва азотних добрив та польових емісій N_2O , які разом формують 76 % викидів у системах зерновиробництва.

Установлено фундаментальну різницю у вуглецевому балансі: пшениця озима демонструє негативний баланс секвестрації (–1099 кг CO_2 -eq/га), тобто виступає нетто-джерелом втрат ґрунтового вуглецю, тоді як біоенергетичні культури мають позитивний баланс: міскантус +3458 кг/га, верба +2233 кг/га, що забезпечує довгострокове накопичення вуглецю в ґрунті.

Ефект заміни пшениці озимої на біоенергетичні культури становить +4557 кг CO_2 -eq/га/рік для міскантусу та +3332 кг/га для верби. Таким чином, кожен гектар біоенергетичних культур щорічно забезпечує додаткову секвестрацію 3,3–4,6 т CO_2 порівняно з пшеницею.

Сумарний кліматичний ефект вирощування біоенергетичних культур на прогнозних площах Лісостепу оцінюється у +2446,4 тис. т CO_2 -eq/рік, включно з економією прямих викидів у розмірі 595,7 тис. т (–67,8 %) та покращенням балансу секвестрації на 1850,7 тис. т/рік, що еквівалентно поглинанню CO_2 лісами площею близько 500 тис. га.

Найбільший регіональний ефект спостерігається у Полтавській (+297,6 тис. т CO_2 -eq/рік), Вінницькій (+271,7 тис. т) та Київській (+253,3 тис. т) областях. Використання біоенергетичних культур на маргінальних землях є ефективним інструментом для досягнення вуглецевої нейтральності та підвищення адаптивності сільського господарства до кліматичних змін.

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. Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D. et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*. 2021. Vol. 2, Iss. 3. P. 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>

3. Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M. et al. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 659–740. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf

4. Reay D. S., Davidson E. A., Smith K. A. et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature Climate Change*. 2012. Vol. 2, Iss. 6. P. 410–416. <https://doi.org/10.1038/nclimate1458>
5. Erismann J. W., Sutton M. A., Galloway J. et al. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*. 2008. Vol. 1, Iss. 10. P. 636–639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
6. Сільське господарство України 2023 : статистичний збірник / Державна служба статистики України. Київ, 2024. 230 с.
7. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 2004. Vol. 304. P. 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
8. 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)
9. Karp A., Shield I. Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist*. 2008. Vol. 179, Iss. 1. P. 15–32. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02432.x>
10. 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>
11. Volk T. A., Verwijst T., Tharakan P. J. et al. Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2004. Vol. 2. P. 411–418. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0411:GFASAO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0411:GFASAO]2.0.CO;2)
12. 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>
13. 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>
14. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А. Перспективи виробництва та використання біопалив в Україні : Аналітична записка БАУ № 23. Київ : Біоенергетична асоціація України, 2020. 42 с.
15. Fernando A. L., Costa J., Barbosa B. et al. Environmental impact assessment of perennial crops cultivation on marginal soils in the Mediterranean Region. *Biomass and Bioenergy*. 2018. Vol. 111. P. 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.04.005>
16. 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>
17. 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>
18. 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>
19. Don A., Osborne B., Hastings A. et al. Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. *GCB Bioenergy*. 2012. Vol. 4, Iss. 4. P. 372–391. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01116.x>
20. 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>
21. Felten D., Emmerling C. Effects of bioenergy crop cultivation on earthworm communities – A comparative study of perennial (*Miscanthus*) and annual crops with consideration of graded land-use intensity. *Applied Soil Ecology*. 2011. Vol. 49. P. 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.06.001>
22. Hansen E. M., Christensen B. T., Jensen L. S., Kristensen K. Carbon sequestration in soil beneath long-term *Miscanthus* plantations as determined by abundance. *Biomass and Bioenergy*. 2004. Vol. 26, Iss. 22. P. 97–105. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00102-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00102-8)
23. Poeplau C., Don A. Soil carbon changes under *Miscanthus* driven by C4 accumulation. *GCB Bioenergy*. 2014. Vol. 6, Iss. 4. P. 327–335. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12043>
24. Clifton-Brown J. C., Lewandowski I., Andersson B. et al. Performance of 15 *Miscanthus* Genotypes at Five Sites in Europe. *Agronomy Journal*. 2001. Vol. 93, Iss. 5. P. 1013–1019. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.9351013x>
25. Лакида П. І., Білоус А. М., Блищик В. І. та ін. Нормативи оцінки компонентів надземної фітомаси дерев головних лісотвірних порід України. Київ : ЕКО-інформ, 2011. 192 с.
26. Національний кадастр антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990–2021 роки / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Київ, 2023. 756 с.

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. Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
3. Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In *Climate change 2013: The physical science basis* (pp. 659–740). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
4. Reay, D. S., Davidson, E. A., Smith, K. A., Smith, P., Melillo, J. M., Dentener, F., & Crutzen, P. J. (2012). Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature Climate Change*, 2(6), 410–416. <https://doi.org/10.1038/nclimate1458>
5. Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z., & Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1(10), 636–639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
6. State Statistics Service of Ukraine. (2024). *Agriculture of Ukraine 2023: Statistical yearbook*. [In Ukrainian]
7. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
8. 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)
9. Karp, A., & Shield, I. (2008). Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist*, 179(1), 15–32. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02432.x>
10. 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>
11. Volk, T. A., Verwijst, T., Tharakan, P. J., Abrahamson, L. P., & White, E. H. (2004). Growing fuel: A sustainability assessment of willow biomass crops. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(8), 411–418. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0411:GFASAO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0411:GFASAO]2.0.CO;2)
12. 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>
13. 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>
14. Heletukha, H. H., & Zheliezna, T. A. (2020). *Prospects for production and use of biofuels in Ukraine: Analytical note of BAU No. 23*. Bioenergy Association of Ukraine. [In Ukrainian]
15. Fernando, A. L., Costa, J., Barbosa, B., Monti, A., & Rettenmaier, N. (2018). Environmental impact assessment of perennial crops cultivation on marginal soils in the Mediterranean Region. *Biomass and Bioenergy*, 111, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.04.005>
16. 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>
17. 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>
18. 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>
19. Don, A., Osborne, B., Hastings, A., Skiba, U., Carter, M. S., Drewer, J., Flessa, H., Freibauer, A., Hyvönen, N., Jones, M. B., Lanigan, G. J., Mander, Ü., Monti, A., Djomo, S. N., Valentine, J., Walter, K., Zegada-Lizarazu, W., & Zenone, T. (2012). Land-use change to bioenergy production in Europe: Implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. *GCB Bioenergy*, 4(4), 372–391. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01116.x>
20. 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>

21. Felten, D., & Emmerling, C. (2011). Effects of bioenergy crop cultivation on earthworm communities – A comparative study of perennial (*Miscanthus*) and annual crops with consideration of graded land-use intensity. *Applied Soil Ecology*, 49, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.06.001>
22. Hansen, E. M., Christensen, B. T., Jensen, L. S., & Kristensen, K. (2004). Carbon sequestration in soil beneath long-term *Miscanthus* plantations as determined by ¹³C abundance. *Biomass and Bioenergy*, 26(2), 97–105. [https://doi.org/10.1016/s0961-9534\(03\)00102-8](https://doi.org/10.1016/s0961-9534(03)00102-8)
23. Poeplau, C., & Don, A. (2014). Soil carbon changes under *Miscanthus* driven by C4 accumulation. *GCB Bioenergy*, 6(4), 327–335. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12043>
24. Clifton-Brown, J. C., Lewandowski, I., Andersson, B., Basch, G., Christian, D. G., Kjeldsen, J. B., Jørgensen, U., Mortensen, J. V., Riche, A. B., Schwarz, K.-U., Tayebi, K., & Teixeira, F. (2001). Performance of 15 *Miscanthus* genotypes at five sites in Europe. *Agronomy Journal*, 93(5), 1013–1019. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.9351013x>
25. Lakyda, P. I., Bilous, A. M., Blyshchuk, V. I., Vasylyshyn, R. D., Vasylyshyn, O. M., Domashovets, H. S., Kovalevskyi, S. S., Lakyda, I. P., Lashchenko, A. H., Mateiko, I. M., Matushevych, L. M., Moroziuk, O. V., Fomin, V. I., & Shvets, Yu. P. (2011). *Standards for estimating components of aboveground phytomass of trees of the main forest-forming species of Ukraine*. EKO-inform. [In Ukrainian]
26. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2023). *National inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases in Ukraine for 1990–2021*. [In Ukrainian]

UDC 620.952:633.11:504.7

Prysiachniuk, O. I.*, **Kononiuk, N. O.**, **Maliarenko, O. A.**, **Musich, V. V.**, **Polovynchuk, O. Yu.**, **Honcharuk, O. M.**, & **Shevchenko, O. P.** (2024). Comparative assessment of greenhouse gas emissions and carbon balance of bioenergy crops and winter wheat in the Forest-Steppe of Ukraine. *Advanced Agritechnologies*, 13(3). <https://doi.org/10.47414/na.13.3.2025.348846> [In Ukrainian]

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

Purpose. Comparative assessment of greenhouse gas emissions and carbon balance of bioenergy crops (*Miscanthus giganteus* and energy willow) and winter wheat in nine regions of the Forest Steppe of Ukraine and determination of the climatic effect of replacing traditional grain production with bioenergy crops on marginal lands. **Methods.** Suitable areas for bioenergy crop cultivation were determined based on analysis of low-productivity and degraded lands in nine regions of the Forest Steppe, taking into account agro-climatic conditions, the share of marginal lands, and biological requirements of the crops. Three agro-climatic zones with different levels of soil moisture and temperature regimes were considered. Greenhouse gas emissions were calculated according to IPCC methodology, taking into account the specifics of perennial crops. Carbon balance was defined as the difference between CO₂ absorption by biomass and anthropogenic emissions, with additional consideration of long-term carbon sequestration in soil. Indicators for winter wheat were based on previous own studies, and indicators for miscanthus and willow were derived from experimental and modelling data from Ukraine and Europe. **Results.** Suitable cultivation areas for miscanthus amounted to 190–367 thousand ha (average 278.5 thousand ha), for willow 101–248 thousand ha (average 174.5 thousand ha), totalling 453 thousand ha, or about 4% of arable land in the Forest Steppe. The gross CO₂ balance for bioenergy crops was positive: miscanthus +41–50 thousand kg/ha, willow +26 thousand kg/ha; net balance and sequestration balance were also positive (+2233–3458 kg CO₂-eq/ha), unlike wheat, which had a negative sequestration balance (–1099 kg/ha). The main factors were the absence of nitrogen fertiliser requirements, annual input of organic biomass with litter, and a strong underground root system. The total climatic effect of replacing wheat with bioenergy crops amounted to +2446.4 thousand t CO₂-eq/year, including savings in direct emissions 595.7 thousand t CO₂-eq, improvement of sequestration balance 1850.7 thousand t CO₂-eq, and additional carbon sequestration – 342.3 thousand t C/year. **Conclusions.** Cultivation of perennial bioenergy crops on marginal lands of the Forest Steppe ensures significant reduction of greenhouse gas emissions and long-term carbon accumulation in soil compared with annual cereal crops. The climatic effect of such plantations is equivalent to the annual CO₂ absorption of forest stands covering about 500 thousand ha, highlighting their potential in the context of climate stabilisation and transition to more sustainable land use.

Keywords: *giant miscanthus; energy willow; winter wheat; greenhouse gases; carbon balance; carbon sequestration; Forest Steppe of Ukraine.*

*Надійшла / Received 05.11.2025
Погоджено до друку / Accepted 12.12.2025*