

Викиди парникових газів та вуглецевий баланс сортів пшениці озимої за вирощування в умовах Лісостепу України

 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 України, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна, *e-mail: ollpris@gmail.com*

Мета. Установити викиди парникових газів та формування вуглецевого балансу пшениці озимої за вирощування в умовах Правобережного Лісостепу України. **Методи.** Дослідження проведено у 2020–2024 рр. на чорноземі типовому малогумусному. Об'єкт – 36 сортів пшениці озимої. Викиди парникових газів розраховували за методологією IPCC (Tier 1) з урахуванням виробництва добрив, польових емісій N₂O, гідролізу карбаміду, використання техніки, насіння та пестицидів. Вуглецевий баланс визначали як різницю між поглинанням CO₂ біомасою і антропогенними викидами; окремо оцінювали валовий, чистий баланс та баланс секвестрації з урахуванням гуміфікації рослинних решток. Проведено категоризацію сортів за вуглецевим слідом, валовим балансом і точкою беззбитковості секвестрації, змодельовано сценарії залишення соломи (0–100 %). **Результати.** Загальні викиди становили 1938,2 кг CO₂-eq/га, з яких 41,8 % припадало на виробництво добрив і 34,2 % – на польові емісії N₂O. Вуглецевий слід сортів варіював від 236,4 до 334,6 кг CO₂-eq/т зерна (різниця 41,5 %) і визначався рівнем урожайності. До високоефективних за вуглецевим слідом віднесено п'ять сортів із урожайністю 7,83–8,20 т/га. Усі сорти були нетто-поглиначами CO₂: валовий баланс становив +19,3...+28,2 т CO₂-eq/га, чистий – +2,1...+3,8 т CO₂-eq/га (за 30 % соломи). Баланс секвестрації за базового сценарію залишався від'ємним (–0,95...–1,24 т CO₂-eq/га). Збільшення частки залишеної соломи з 0 до 100 % підвищувало чистий баланс у середньому на 11,7 т CO₂-eq/га та баланс секвестрації – на 1,75 т CO₂-eq/га. Точка беззбитковості секвестрації для високоврожайних сортів становила 77–80 %, тоді як для 25 % низьковрожайних сортів вона була недосяжною навіть за повного залишення соломи. **Висновки.** Вибір високоврожайних сортів у поєднанні з оптимальним управлінням соломою є ключовим чинником зниження кліматичного навантаження та досягнення позитивної секвестрації вуглецю. Найефективнішою стратегією є вирощування сортів з високою вуглецевою ефективністю із залишенням не менше 80 % соломи; для низьковрожайних сортів необхідне застосування додаткових заходів секвестрації.

Ключові слова: пшениця озима; парникові гази; вуглецевий слід; секвестрація вуглецю; сорт.

Вступ

Глобальні кліматичні зміни, спричинені антропогенними викидами парникових газів (ПГ), є одним із найбільших викликів сучасності. За оцінками Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC), сільське господарство є відповідальним за 10–12 % глобальних антропо-

Як цитувати: Присяжнюк О. І., Кононюк Н. О., Маляренко О. А., Мусіч В. В., Половинчук О. Ю., Гончарук О. М., Волошин П. Ю., Шевченко О. П. Викиди парникових газів та вуглецевий баланс сортів пшениці озимої за вирощування в умовах Лісостепу України. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2025. Вип. 33. С. 95–107. <https://doi.org/10.47414/nr.33.2025.349400>



© 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.

генних викидів ПГ, при цьому виробництво зернових культур формує значну частку цих емісій [1, 2]. Пшениця є другою за значенням продовольчою культурою у світі, а її вирощування супроводжується викидами діоксиду вуглецю (CO_2), закису азоту (N_2O) та метану (CH_4), що мають різний потенціал глобального потепління [3].

Україна є одним із ключових експортерів пшениці на світовому ринку, забезпечуючи продовольчу безпеку країн Близького Сходу, Північної Африки та Європи [4]. В умовах посилення вимог Європейського Союзу щодо сталого розвитку сільського господарства та імплементації стратегії European Green Deal, українські агровиробники стикаються з необхідністю оцінки та зменшення вуглецевого сліду продукції [5]. Розроблення національних критеріїв сталого агровиробництва з урахуванням агрокліматичних умов України є нагальною потребою для збереження конкурентоспроможності на міжнародних ринках [6].

Основними джерелами емісії ПГ за вирощування пшениці є: виробництво та застосування мінеральних добрив (особливо азотних), польові емісії N_2O внаслідок мікробіологічних процесів у ґрунті, використання дизельного пального сільськогосподарською технікою та виробництво засобів захисту рослин [7, 8]. За даними досліджень, проведених у країнах Європи [9, 10], викиди CO_2 -еквіваленту за вирощування озимої пшениці варіюють від 2330 кг/га у Фінляндії до 2919 кг/га у Литві. Водночас дослідження вуглецевого балансу пшениці в Україні з урахуванням посортової диференціації практично відсутні.

Важливим аспектом оцінювання кліматичного впливу рослинництва є не лише облік викидів, але й урахування поглинання CO_2 рослинами у процесі фотосинтезу та секвестрації вуглецю в ґрунті [11, 15]. Пшениця, як культура з інтенсивним фотосинтезом, здатна поглинати значні обсяги атмосферного CO_2 , перетворюючи його на біомасу зерна, соломи, стерні та кореневих залишків. Управління рослинними рештками, зокрема соломою, суттєво впливає на вуглецевий баланс агроєкосистеми та довгострокове накопичення органічного вуглецю в ґрунті [12, 13].

Вибір сорту є потужним інструментом впливу на вуглецеву ефективність виробництва зерна. Високоврожайні сорти забезпечують меншу інтенсивність викидів на одиницю продукції та більший обсяг фіксованого атмосферного вуглецю [14]. Проте комплексних досліджень впливу генетичного потенціалу сучасних українських сортів пшениці озимої на формування вуглецевого балансу за різних сценаріїв використання побічної продукції досі не проводилось.

Мета досліджень – оцінити викиди парникових газів та вуглецевий баланс сортів пшениці озимої української селекції в умовах Правобережного Лісостепу України.

Завдання досліджень: 1) розрахувати структуру викидів CO_2 -еквіваленту за основними джерелами емісії; 2) визначити посортову диференціацію вуглецевого сліду та категоризувати сорти за рівнем вуглецевої ефективності; 3) оцінити валовий вуглецевий баланс сортів з урахуванням поглинання CO_2 біомасою; 4) змодельовати сценарії впливу частки залишеної соломи (0–100 %) на чистий баланс та баланс секвестрації; 5) визначити точки беззбитковості секвестрації для кожного сорту та сформулювати практичні рекомендації.

Матеріали та методика досліджень

Умови проведення досліджень

Дослідження проводили протягом 2020–2024 рр. на базі ДП ДГ «Саливонківське» Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, розташованого в зоні Правобережного Лісостепу України (Київська область). Ґрунт дослідних ділянок – чорнозем типовий малогумусний на лесі з вмістом гумусу 3,8–4,2 %, рН сольової витяжки 6,2–6,8, забезпеченість рухомими формами азоту – середня, фосфору та калію – підвищена.

Об'єктом дослідження слугували 36 сортів пшениці озимої української селекції різних наукових установ: Миронівського інституту пшениці ім. В. М. Ремесла НААН, Інституту рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН, Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннезнавства та сортовивчення, Білоцерківської дослідно-селекційної станції та ін. Сорти представляли різні групи стиглості та морфотипи, що забезпечило репрезентативність вибірки для оцінювання генетичної варіабельності вуглецевої ефективності [16].

Технологія вирощування пшениці озимої була типовою для зони Лісостепу України. Попередник – чорний пар. Основний обробіток ґрунту включав оранку на глибину 25–27 см. Норма висіву становила 5,0 млн схожих насінин на гектар (220 кг/га). Система удобрення передбачала внесення азоту в дозі 120 кг/га д. р. (у формі карбаміду), фосфору – 60 кг/га д. р. (у формі амофосу) та калію – 40 кг/га д. р. (у формі калію хлористого). Захист рослин від бур'янів, хвороб та шкідників здійснювали згідно з рекомендаціями для зони вирощування із застосуванням пестицидів у сумарній дозі 2,5 кг д. р./га [17].

Методологія розрахунку емісії парникових газів

Розрахунок викидів ПГ виконували за методологією IPCC (2006, 2019) з використанням коефіцієнтів емісії першого рівня деталізації (Tier 1) [18, 19]. Загальні викиди CO₂-еквіваленту розраховували як суму емісій від виробництва добрив, польових емісій N₂O, викидів CO₂ від гідролізу карбаміду, використання сільськогосподарської техніки та виробництва інших матеріально-технічних ресурсів.

Емісії від виробництва мінеральних добрив розраховували з використанням коефіцієнтів: для азотних добрив – 5,88 кг CO₂-eq/кг N (включно з енергетичними витратами на синтез аміаку за процесом Габера – Боша), для фосфорних – 1,35 кг CO₂-eq/кг P₂O₅, для калійних – 0,58 кг CO₂-eq/кг K₂O [20, 21]. Загальні емісії від виробництва добрив склали 809,8 кг CO₂-eq/га (азотні – 705,6 кг, фосфорні – 81,0 кг, калійні – 23,2 кг).

Польові емісії N₂O включали прямі та непрямі викиди. Прямі емісії розраховували за формулою:

$$N_2O_{\text{прямі}} = N_{\text{внесено}} \times EF_1 \times 44/28 \times GWP_{N_2O}$$

де $N_{\text{внесено}}$ – доза азоту, кг/га; EF_1 – коефіцієнт емісії (0,01 кг N₂O-N/кг N за IPCC Tier 1); $44/28$ – коефіцієнт перерахунку N у N₂O; GWP_{N_2O} – потенціал глобального потепління N₂O (265 за AR5 IPCC для 100-річного горизонту) [22].

Непрямі емісії враховували втрати азоту внаслідок волатилізації (10 % від внесеного N, $EF_4 = 0,01$) та вимивання (30 % від внесеного N, $EF_5 = 0,0075$) [23]. Сумарні польові емісії N₂O склали 662,1 кг CO₂-eq/га.

Емісії CO₂ від гідролізу карбаміду розраховували за формулою:

$$CO_2_{\text{карбамід}} = M_{\text{карбамід}} \times 0,20 \times 44/12$$

де $M_{\text{карбамід}}$ – маса карбаміду, кг/га; $0,20$ – вміст вуглецю в карбаміді; $44/12$ – коефіцієнт перерахунку C у CO₂ [24]. За внесенні 261 кг/га карбаміду (еквівалент 120 кг N) емісії становили 95,6 кг CO₂/га.

Емісії від використання техніки розраховували на основі витрат дизельного палива на технологічні операції з коефіцієнтом 3,21 кг CO₂-eq/л (включно з викидами від спалювання та виробництва палива) [25]. Загальні витрати палива становили 85 л/га (основний обробіток – 25 л, передпосівний – 12 л, сівба – 8 л, внесення добрив – 6 л, захист рослин – 4 л, збирання – 22 л, транспортування – 8 л), що відповідає 272,9 кг CO₂-eq/га.

Інші джерела емісій включали виробництво насіння (70,4 кг CO₂-eq/га за норми 220 кг/га та коефіцієнта 0,32 кг CO₂-eq/кг) та пестицидів (27,4 кг CO₂-eq/га за норми 2,5 кг д. р./га та коефіцієнта 10,97 кг CO₂-eq/кг д. р.) [26, 27].

Методологія розрахунку вуглецевого балансу

Вуглецевий баланс розраховували як різницю між поглинанням CO₂ біомасою рослин та антропогенними викидами ПГ. Поглинання CO₂ визначали на основі вмісту вуглецю в різних компонентах біомаси пшениці з урахуванням коефіцієнта перерахунку вуглецю в CO₂ ($44/12 = 3,667$) [28].

Уміст вуглецю в компонентах біомаси приймали згідно з літературними даними: зерно – 45,0 %, солома – 45,7 %, полова – 42,6 %, стерня – 44,0 %, коріння – 34,9 % від сухої маси [29, 30]. Співвідношення компонентів наземної та підземної біомаси до урожаю зерна становило: солома – 1,0; полова – 0,10; стерня – 0,08; коріння – 0,05 [31].

Загальне поглинання CO₂ розраховували за формулою:

$$CO_2_погл = (Y \times C_зерно + S \times C_солома + Ch \times C_полова + St \times C_стерня + R \times C_коріння) \times 3,667 \times 1000$$

де Y – урожайність зерна, т/га; S , Ch , St , R – маса соломи, полови, стерні та коренів відповідно, т/га; C – вміст вуглецю у відповідному компоненті, частка од.

Валовий вуглецевий баланс визначали як різницю між загальним поглинанням CO_2 біомасою та викидами ПГ:

$$Баланс_валовий = CO_2_погл - Емісії_загальні$$

Чистий вуглецевий баланс поля враховував лише вуглець, що залишається на полі (стерня, коріння та частка соломи), за вирахуванням викидів:

$$Баланс_чистий = CO_2_залишено - Емісії_загальні$$

Баланс секвестрації розраховували з урахуванням коефіцієнтів гуміфікації рослинних решток: солома – 15 %, стерня – 20 %, коріння – 30 % [32, 33]:

$$Баланс_секв = (C_солома \times k_гум_с + C_стерня \times k_гум_ст + C_коріння \times k_гум_к) \times 3,667 \times 1000 - Емісії$$

Категоризація сортів за вуглецевою ефективністю

Сорти категоризували за двома критеріями: вуглецевим слідом (кг CO_2 -eq на тонну зерна) та валовим вуглецевим балансом (кг CO_2 -eq/га). За вуглецевим слідом виділено чотири категорії: високоефективні (< 250 кг/т), ефективні (250–280 кг/т), середні (280–310 кг/т) та низькоефективні (> 310 кг/т). За валовим балансом: високоефективні ($\geq +26\ 000$ кг/га), ефективні (+24 000...26 000 кг/га), середні (+22 000...24 000 кг/га) та низькоефективні (< +22 000 кг/га) [36].

Додатково сорти категоризували за точкою безбитковості секвестрації: високоефективні (≤ 80 % соломи), ефективні (81–90 %), середні (91–99 %) та низькоефективні (> 100 %, тобто не досягають позитивного балансу навіть за повного залишення соломи).

Статистична обробка даних

Статистично дані обробляли методами варіаційного аналізу з використанням програмного забезпечення Python 3.11 та бібліотек NumPy, Pandas, SciPy. Визначали середні значення, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації (CV, %), мінімальні та максимальні значення. Достовірність різниці між сортами оцінювали за критерієм Стьюдента за рівня значущості $P < 0,05$. Кореляційний аналіз проводили для оцінювання зв'язку між урожайністю та показниками вуглецевого балансу [37].

Результати досліджень

Структура викидів парникових газів

Загальні викиди парникових газів за вирощування пшениці озимої в умовах Правобережного Лісостепу України становили 1938,2 кг CO_2 -eq/га (табл. 1). Ця величина є фіксованою для всіх сортів, оскільки технологія вирощування була ідентичною. Отримані результати знаходяться в межах типових значень для виробництва озимої пшениці в Європі: нижче порівняно з Польщею (2378–2759 кг/га), Литвою (2686–2919 кг/га) та Фінляндією (2330 кг/га), що пояснюється меншими нормами внесення азотних добрив та сприятливішими ґрунтово-кліматичними умовами України.

Аналіз структури емісій показав, що найбільшу частку формує виробництво мінеральних добрив – 41,8 % (809,8 кг CO_2 -eq/га), з яких переважна більшість (87,1 %) припадає на азотні добрива. Друге місце посідають польові емісії N_2O – 34,2 % (662,1 кг CO_2 -eq/га), що є наслідком мікробіологічної трансформації азоту в ґрунті. Використання сільськогосподарської техніки формує 14,1 % викидів (272,9 кг CO_2 -eq/га). Менш значущими джерелами є гідроліз карбаміду (4,9 %), виробництво насіння (3,6 %) та пестицидів (1,4 %).

Таблиця 1

Структура викидів CO₂-еквіваленту за вирощування пшениці озимої

Джерело емісії	кг CO ₂ -eq/га	Частка, %
Виробництво мінеральних добрив	809,8	41,8
зокрема азотних	705,6	36,4
фосфорних	81,0	4,2
калійних	23,2	1,2
Польові емісії N ₂ O	662,1	34,2
зокрема прямі емісії	499,7	25,8
непрямі (волатилізація)	50,0	2,6
непрямі (вимивання)	112,4	5,8
CO ₂ від гідролізу карбаміду	95,6	4,9
Використання техніки	272,9	14,1
Виробництво насіння	70,4	3,6
Виробництво пестицидів	27,4	1,4
Разом	1938,2	100,0

Вуглецева ефективність сортів пшениці озимої

Оскільки технологічні викиди є фіксованими, посортна диференціація вуглецевого сліду визначається виключно урожайністю (табл. 2). За п'ятирічний період досліджень середня врожайність сортів варіювала від 5,79 ('Поліська 90') до 8,20 т/га ('Легенда білоцерківська'), що зумовило розмах вуглецевого сліду від 236,4 до 334,6 кг CO₂-eq/т зерна – різниця становить 41,5 %.

Таблиця 2

Вуглецева ефективність сортів пшениці озимої (2020–2024 рр.)

Сорт	Урожайність, т/га	CV, %	CO ₂ -eq/т	Діапазон	Категорія
'Легенда білоцерківська'	8,20	24,8	236,4	172–335	Високоэффект.
'Охтирчанка'	8,15	18,0	237,8	192–329	Високоэффект.
'Привітна'	7,95	27,1	243,9	163–332	Високоэффект.
'Оптіма одеська'	7,94	26,1	244,2	170–335	Високоэффект.
'МПП Валенсія'	7,83	21,0	247,7	208–367	Високоэффект.
'Естафета миронівська'	6,06	9,3	319,7	287–379	Низькоэффект.
'Аналог'	5,86	12,3	330,5	276–399	Низькоэффект.
'Поліська 90'	5,79	9,5	334,6	292–392	Низькоэффект.

За результатами категоризації до групи високоэффективних сортів (вуглецевий слід < 250 кг CO₂-eq/т) увійшли п'ять сортів: 'Легенда білоцерківська', 'Охтирчанка', 'Привітна', 'Оптіма одеська' та 'МПП Валенсія'. Ці сорти характеризуються найвищою середньою врожайністю (7,83–8,20 т/га) та забезпечують найменше навантаження на клімат за виробництва одиниці продукції. Група ефективних сортів (250–280 кг CO₂-eq/т) налічує 13, середніх (280–310 кг CO₂-eq/т) – 14, низькоэффективних (> 310 кг CO₂-eq/т) – чотири сорти.

Важливим показником є стабільність урожайності, що характеризується коефіцієнтом варіації (CV). Найстабільнішими виявилися сорти 'Водограй' (CV = 7,7 %), 'Водограй білоцерківський' (8,2 %), 'Соловушка' (8,8 %) та 'Сприятлива' (8,5 %). Високоврожайні сорти групи «Високоэффективних» мають вищу варіабельність (CV = 18,0–27,1 %), що свідчить про їх сильнішу реакцію на погодні умови року.

Вуглецевий баланс сортів пшениці озимої

Усі досліджені сорти пшениці озимої є нетто-поглиначами атмосферного CO₂ (табл. 3). Валовий вуглецевий баланс (поглинання біомасою мінус викиди) варіював від +19 340 кг ('Поліська 90') до +28 196 кг CO₂-eq/га ('Легенда білоцерківська'). Співвідношення погли-

нання до викидів становило 11,0–15,5 раза, що підтверджує значний потенціал пшениці як культури для зв'язування атмосферного вуглецю.

Таблиця 3

Вуглецевий баланс сортів пшениці озимої (базовий сценарій – 30 % соломи)

Сорт	т/га	Поглин.	Валовий	Чистий	Секвестр.	Категорія
‘Легенда білоцерківська’	8,20	30 134	+28 196	+3767	–951	Високоефект.
‘Охтирчанка’	8,15	29 951	+28 012	+3732	–957	Високоефект.
‘Привітна’	7,95	29 216	+27 277	+3593	–981	Високоефект.
‘Поліська 90’	5,79	21 278	+19 340	+2090	–1241	Низькоефект.
Середнє	6,97	25 610	+23 672	+2910	–1099	–

Примітка. Усі показники – кг CO₂-eq/га. Категорії за валовим балансом: високоефективний ($\geq +26\ 000$), ефективний (+24 000...26 000), середній (+22 000...24 000), низькоефективний ($< +22\ 000$).

Чистий вуглецевий баланс поля (вуглець, що залишається на полі мінус викиди) за базового сценарію (30 % соломи) був позитивним для всіх сортів і становив від +2090 до +3767 кг CO₂-eq/га. Однак баланс секвестрації (довгострокове накопичення вуглецю в ґрунті через гуміфікацію) залишався негативним для всіх сортів (від –951 до –1 241 кг CO₂-eq/га), що свідчить про недостатність 30 % соломи для компенсації антропогенних викидів гумусом.

Вплив сценаріїв управління соломою на вуглецевий баланс

Моделювання різних сценаріїв використання соломи виявило суттєвий вплив цього фактора на вуглецевий баланс (табл. 4). Збільшення частки залишеної соломи з 0 до 100 % призводить до зростання чистого балансу на 11 678 кг CO₂-eq/га (в середньому по сортах) та балансу секвестрації – на 1752 кг CO₂-eq/га. При цьому валовий баланс залишається незмінним, оскільки залежить лише від загальної біомаси, а не від її розподілу.

Таблиця 4

Чистий баланс за різної частки залишеної соломи, кг CO₂-eq/га

Сорт	т/га	0 %	30 %	50 %	80 %	100 %	Точка 0
‘Легенда білоцерківська’	8,20	–355	+3767	+6515	+10 637	+13 385	77 %
‘Охтирчанка’	8,15	–365	+3732	+6463	+10 561	+13 292	77 %
‘Привітна’	7,95	–403	+3593	+6257	+10 254	+12 918	80 %
‘Поліська 90’	5,79	–820	+2090	+4031	+6941	+8882	> 100 %
Середнє	6,97	–593	+2910	+5246	+8749	+11 085	90 %

Примітка. Точка 0 – мінімальна частка соломи для досягнення позитивного балансу секвестрації.

Критичним показником є точка безбитковості секвестрації – мінімальна частка соломи, за якої гуміфікація рослинних решток компенсує антропогенні викиди ПГ. Для високоврожайних сортів (‘Легенда білоцерківська’, ‘Охтирчанка’) ця точка становить 77 %, для середньоврожайних – 85–98 %, а для дев'яти низьковрожайних сортів (‘Романівна’, ‘Світанкова’, ‘Оранта одеська’, ‘Здобна’, ‘Соловушка’, ‘Сприятлива’, ‘Естафета миронівська’, ‘Аналог’, ‘Поліська 90’) позитивний баланс секвестрації не досягається навіть у разі повного, 100 %-го залишення соломи (табл. 5).

Таблиця 5

Категоризація сортів за точкою безбитковості секвестрації

Категорія	Кількість	Сорти
Високоефективні ($\leq 80\ %$)	4	‘Легенда білоцерківська’, ‘Охтирчанка’, ‘Привітна’, ‘Оптіма одеська’
Ефективні (81–90 %)	8	‘МІП Валенсія’, ‘Зорепад білоцерківський’, ‘Мудрість одеська’, ‘Марія’, ‘Краєвид’, ‘Грація білоцерківська’, ‘МІП Дніпрянка’, ‘Співанка Поліська’

Категорія	Кількість	Сорти
Середні (91–99 %)	15	‘Кесарія Поліська’, ‘Бургунка’, ‘Воздвиженка’, ‘Берегиня миронівська’, ‘Вежа миронівська’, ‘Грація миронівська’, ‘МІП Ассоль’, ‘Наснага’, ‘Анатолія’, ‘Манера одеська’, ‘Водограй’, ‘Катруся одеська’, ‘Водограй білоцерківський’, ‘Конка’, ‘МІП Вишиванка’
Низькоефективні (> 100 %)	9	‘Романівна’, ‘Світанкова’, ‘Оранта одеська’, ‘Здобна’, ‘Соловушка’, ‘Сприятлива’, ‘Естафета миронівська’, ‘Аналог’, ‘Поліська 90’

Порівняння крайніх комбінацій «сорт + управління соломою» демонструє значний потенціал оптимізації вуглецевого балансу (табл. 6). Найкраща комбінація (‘Легенда білоцерківська’ + 100 % соломи) забезпечує чистий баланс +13 385 кг CO₂-eq/га та позитивну секвестрацію +492 кг CO₂-eq/га. Найгірша комбінація (‘Поліська 90’ + 0 % соломи) дає негативний чистий баланс –820 кг CO₂-eq/га та секвестрацію –1678 кг CO₂-eq/га. Різниця становить 14 205 кг CO₂-eq/га для чистого балансу та 2170 кг CO₂-eq/га для балансу секвестрації.

Таблиця 6

Порівняння крайніх комбінацій «сорт + солома»

Показник	Найкраща комбінація	Найгірша комбінація
Комбінація	‘Легенда білоцерківська’ + 100 %	‘Поліська 90’ + 0 %
Чистий баланс, кг CO ₂ -eq/га	+13 385	–820
Баланс секвестрації, кг CO ₂ -eq/га	+492	–1678
Різниця чистого балансу	+14 205 кг CO ₂ -eq/га	–
Різниця секвестрації	+2170 кг CO ₂ -eq/га	–

Обговорення результатів

Отримані результати щодо структури викидів ПГ узгоджуються з даними європейських досліджень, які також вказують на домінуючу роль азотних добрив та польових емісій N₂O у формуванні вуглецевого сліду зернових культур [3, 7, 8]. Сумарний внесок цих двох джерел у нашому дослідженні становить 70,6 % від загальних викидів, що відповідає діапазону 65–75 %, установленому в мета-аналізах для помірного кліматичного поясу [9, 10].

Нижчий рівень загальних викидів (1938,2 кг CO₂-eq/га) порівняно з європейськими країнами пояснюється кількома факторами. По-перше, доза азотних добрив 120 кг/га є помірною порівняно з 150–200 кг/га, типовими для інтенсивного землеробства Західної Європи. По-друге, чорноземи України характеризуються вищою природною родючістю та кращим азотним режимом, що зменшує потребу в мінеральних добривах. По-третє, менша інтенсивність механізованих операцій та нижчі витрати палива на гектар знижують емісії від використання техніки [15, 17].

Значна посортна диференціація вуглецевого сліду (236,4–334,6 кг CO₂-eq/т) підтверджує важливість селекційного прогресу для досягнення цілей кліматичної нейтральності. Різниця у 41,5 % між крайніми сортами є суттєвою з практичного погляду: перехід від низькодо високоврожайного сорту дає змогу виробляти ту саму кількість зерна з на третину меншим навантаженням на клімат. Подібні закономірності встановлені й для інших регіонів світу [3, 14], що підтверджує універсальність принципу «більший урожай – менший вуглецевий слід на одиницю продукції».

Особливий інтерес являє виявлена закономірність щодо точок беззбитковості секвестрації. Для 25 % досліджених сортів (9 із 36) позитивний баланс секвестрації недосяжний навіть за повного залишення соломи на полі. Це означає, що для цих сортів пшениці вирощування за будь-яких умов призводить до нетто-втрат органічного вуглецю ґрунту. Для компенсації цього дефіциту необхідні додаткові заходи: впровадження покривних культур (+1,7–2,4 т CO₂-eq/га

за даними [12]), внесення органічних добрив, застосування біовугілля або заміна низьковрожайних сортів на високоврожайні альтернативи [32, 34].

Виявлений ефект управління соломою (+11 678 кг CO₂-eq/га чистого балансу при переході від 0 до 100 % залишення) є більшим за ефект вибору сорту (+4504 кг CO₂-eq/га різниці між крайніми сортами). Це свідчить про пріоритетність агротехнічних рішень над генетичними для досягнення кліматичних цілей у короткостроковій перспективі. Водночас комбінування обох факторів дає синергетичний ефект: різниця між найкращою та найгіршою комбінаціями становить 14 205 кг CO₂-eq/га, що еквівалентно 14,2 т CO₂ на гектар за один сезон вирощування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні науково обґрунтованих рекомендацій для різних категорій сортів. Високоєфективні сорти ('Легенда білоцерківська', 'Охтирчанка', 'Привітна', 'Оптіма одеська') досягають позитивної секвестрації при залишенні $\geq 80\%$ соломи, що є цілком реалістичним з агрономічного погляду. Ефективні сорти потребують $\geq 90\%$ соломи, що обмежує можливості її використання для інших потреб. Для середніх та низькоєфективних сортів рекомендовано повне залишення соломи з обов'язковим впровадженням додаткових заходів секвестрації.

Отримані дані мають важливе значення для розроблення національних критеріїв сталого агровиробництва, що є актуальним в контексті євроінтеграційних процесів України [5, 6]. Запропонована методологія розрахунку вуглецевого балансу з урахуванням посортової диференціації та сценаріїв управління соломою може бути використана для сертифікації низьковуглецевої продукції та участі у вуглецевих ринках. Крім того, результати дослідження надають інструментарій для моніторингу виконання зобов'язань України за Паризькою кліматичною угодою в частині сільськогосподарського сектору.

Висновки

Загальні викиди парникових газів за вирощування пшениці озимої в умовах Правобережного Лісостепу України становлять 1938,2 кг CO₂-eq/га. Основними джерелами емісій є виробництво мінеральних добрив (41,8 %, зокрема азотних – 36,4 %) та польові емісії N₂O (34,2 %). Отримані значення нижчі за європейські аналоги (2330–2919 кг/га), що пояснюється помірними дозами добрив та сприятливими ґрунтово-кліматичними умовами.

Встановлено значну посортову диференціацію вуглецевого сліду – від 236,4 кг CO₂-eq/т ('Легенда білоцерківська') до 334,6 кг CO₂-eq/т ('Поліська 90'). За результатами категоризації 36 сортів: 5 – високоєфективні (< 250 кг/т), 13 – ефективні (250–280 кг/т), 14 – середні (280–310 кг/т), 4 – низькоєфективні (> 310 кг/т). Вибір високоврожайного сорту дає змогу зменшити вуглецевий слід продукції на 29,3 %.

Усі досліджені сорти є нетто-поглиначами атмосферного CO₂ з валовим балансом від +19,3 до +28,2 т CO₂-eq/га (співвідношення поглинання до викидів 11,0–15,5 раза). За базового сценарію (30% соломи) чистий баланс поля становить +2,1...+3,8 т CO₂-eq/га, проте баланс секвестрації залишається негативним (–0,95...–1,24 т CO₂-eq/га) для всіх сортів.

Збільшення частки залишеної соломи з 0 до 100 % підвищує чистий баланс на 11,7 т CO₂-eq/га та баланс секвестрації на 1,75 т CO₂-eq/га. Точка беззбитковості секвестрації (перехід балансу в позитивну зону) для високоврожайних сортів становить 77–80 % соломи, для середньоврожайних – 81–99 %, а для дев'яти низьковрожайних сортів (25 % вибірки) позитивний баланс недосяжний навіть у разі 100 %-го залишення.

Комбінований ефект «сорт + управління соломою» забезпечує різницю між крайніми варіантами 14,2 т CO₂-eq/га для чистого балансу та 2,2 т CO₂-eq/га для балансу секвестрації. Оптимальною стратегією є вирощування високоврожайних сортів ('Легенда білоцерківська', 'Охтирчанка', 'Привітна', 'Оптіма одеська') із залишенням $\geq 80\%$ соломи, що забезпечує позитивний баланс секвестрації +0,3...0,5 т CO₂-eq/га на рік.

Для низьковрожайних сортів, які не досягають позитивної секвестрації, рекомендовано:

- а) повне залишення соломи (100 %);
- б) упровадження покривних культур;

- в) унесення органічних добрив;
- г) заміну на високоврожайні альтернативи.

Запропонована методологія може бути використана для сертифікації низьковуглецевої продукції та участі у вуглецевих ринках.

Використана література

1. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva : IPCC, 2023. 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
2. Tubiello F. N., Salvatore M., Rossi S. et al. The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters*. 2013. Vol. 8, Iss. 1. Article 015009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015009>
3. Gan Y., Liang C., Hamel C. et al. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production. *Nature Communications*. 2014. Vol. 5, Iss. 1. Article 5012. <https://doi.org/10.1038/ncomms6012>
4. Великоіваненко Г. І., Ткач О. В. Роль України у глобальній продовольчій безпеці. *Агросвіт*. 2025. № 1. С. 33–38. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2025.1.33>
5. Communication from the Commission: The European Green Deal. COM (2019) 640 final / European Commission. Brussels, 2019. 24 p.
6. The criterion of sustainability for Ukrainian agribusiness products based on the guidelines of FAO and the EU Taxonomy / EY Ukraine. Kyiv : EY, 2024. 45 p.
7. Snyder C. S., Bruulsema T. W., Jensen T. L., Fixen P. E. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2009. Vol. 133, Iss. 3–4. P. 247–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
8. Chataut G., Bhatta B., Joshi D. et al. Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023. Vol. 11. Article 100533. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100533>
9. Rajaniemi M., Mikkola H., Ahokas J. Greenhouse gas emissions from oats, barley, wheat and rye production in Finland. *Biosystems Engineering*. 2011. Vol. 110, Iss. 2. P. 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.002>
10. Holka M., Bieńkowski J. Carbon footprint and life-cycle costs of maize production in conventional and non-inversion tillage systems. *Agronomy*. 2020. Vol. 10, Iss. 12. Article 1877. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121877>
11. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 2004. Vol. 304, Iss. 5677. P. 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
12. Poeplau C., Don A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2015. Vol. 200. P. 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
13. Song X., Liu M., Ju X. et al. Carbon footprint of maize-wheat cropping system after 40-year fertilization. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 926. Article 172082. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172082>
14. Berry P. M., Kindred D. R., Paveley N. D. Quantifying the effects of fungicides and disease resistance on greenhouse gas emissions associated with wheat production. *Plant Pathology*. 2008. Vol. 57, Iss. 6. P. 1000–1008. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2008.01899.x>
15. Польовий А. М., Божко Л. Ю. Моделювання емісії парникових газів із ґрунтів агроєкосистем. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія : Геологія. Географія. Екологія*. 2021. Вип. 54. С. 329–344. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-25>
16. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2024 рік. Київ : Український інститут експертизи сортів рослин, 2024. 520 с.
17. Лихочвор В. В., Петриченко В. Ф. Рослиництво. Сучасні інтенсивні технології вирощування основних польових культур. Львів : Українські технології, 2006. 730 с.

18. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use / IPCC. Hayama : IGES, 2006. 673 p.
19. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use / IPCC. Geneva : IPCC, 2019. 110 p.
20. Brentrup F., Pallière C. GHG emissions and energy efficiency in European nitrogen fertiliser production and use. *Proceedings of the International Fertiliser Society*. 2008. No. 639. P. 1–25.
21. Wood S., Cowie A. A review of greenhouse gas emission factors for fertiliser production. *IEA Bioenergy Task 38*. 2004. 20 p.
22. Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M. et al. Anthropogenic and natural radiative forcing. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* / ed. by T. F. Stocker et al. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. P. 659–740. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
23. Rochette P., Worth D. E., Lemke R. L. et al. Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada. I. Development of a country-specific methodology. *Canadian Journal of Soil Science*. 2008. Vol. 88, Iss. 5. P. 641–654. <https://doi.org/10.4141/CJSS07025>
24. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P. et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge : Cambridge University Press, 2007. P. 129–234.
25. Audsley E., Stacey K., Parsons D. J., Williams A. G. Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use. Cranfield : Cranfield University, 2009. 24 p. URL: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/server/api/core/bitstreams/78cd42ff-e564-4112-ab50-e5e7fc4da80a/content>
26. Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environment International*. 2004. Vol. 30, Iss. 7. P. 981–990. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005>
27. West T. O., Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2002. Vol. 91, Iss. 1–3. P. 217–232. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00233-X)
28. 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>
29. 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, Iss. 1–2. P. 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.029>
30. Johnson J. M.-F., Allmaras R. R., Reicosky D. C. Estimating source carbon from crop residues, roots and rhizodeposits using the national grain-yield database. *Agronomy Journal*. 2006. Vol. 98, Iss. 3. P. 622–636. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0179>
31. Сябряк О. П. Оцінка втрат вуглецю з чорнозему типового за різних способів обробітку та систем удобрення. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2013. Вип. 80. С. 140–146.
32. Vleeshouwers L. M., Verhagen A. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Global Change Biology*. 2002. Vol. 8, Iss. 6. P. 519–530. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00485.x>
33. Lemke R. L., VandenBygaart A. J., Campbell C. A. et al. Crop residue removal and fertilizer N: effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2010. Vol. 135, Iss. 1–2. P. 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.08.010>
34. Liu C., Lu M., Cui J. et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20, Iss. 5. P. 1366–1381. <https://doi.org/10.1111/gcb.12517>
35. Polevoy A., Mykytiuk O., Barsukova O., Husieva K. Climate change and greenhouse gas emissions from soils under the winter wheat agroecosystem in Ukraine. *Agrology*. 2024. Vol. 7, Iss. 3. P. 107–111. <https://doi.org/10.32819/202414>

36. Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol. 4, Iss. 1. P. 1–9. URL: https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf

37. Присяжнюк О. І., Климович Н. М., Полуніна О. В. та ін. Методологія і організація наукових досліджень в сільському господарстві та харчових технологіях. Київ : Нілан-ЛТД, 2021. 300 с. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2>

References

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

2. Tubiello, F. N., Salvatore, M., Rossi, S., Ferrara, A., Fitton, N., & Smith, P. (2013). The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters*, 8(1), Article 015009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015009>

3. Gan, Y., Liang, C., Chai, Q., Lemke, R. L., Campbell, C. A., & Zentner, R. P. (2014). Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production. *Nature Communications*, 5(1), Article 5012. <https://doi.org/10.1038/ncomms6012>

4. Velykoivanenko, H. I., & Tkach, O. V. (2025). The role of Ukraine in global food security. *Agrosvit*, 1, 33–38. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2025.1.33>

5. European Commission. (2019). *Communication from the Commission: The European Green Deal* (COM (2019) 640 final).

6. EY Ukraine. (2024). *The criterion of sustainability for Ukrainian agribusiness products based on the guidelines of FAO and the EU Taxonomy*. EY.

7. Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133(3–4), 247–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>

8. Chataut, G., Bhatta, B., Joshi, D., Subedi, K., & Kafle, K. (2023). Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, Article 100533. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100533>

9. Rajaniemi, M., Mikkola, H., & Ahokas, J. (2011). Greenhouse gas emissions from oats, barley, wheat and rye production in Finland. *Biosystems Engineering*, 110(2), 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.002>

10. Holka, M., & Bieńkowski, J. (2020). Carbon footprint and life-cycle costs of maize production in conventional and non-inversion tillage systems. *Agronomy*, 10(12), Article 1877. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121877>

11. 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>

12. Poepflau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>

13. Shao, G., Zhou, J., Liu, B., Alharbi, S. A., Liu, E., & Kuzyakov, Y. (2024). Carbon footprint of maize-wheat cropping system after 40-year fertilization. *Science of the Total Environment*, 926, Article 172082. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172082>

14. Berry, P. M., Kindred, D. R., & Paveley, N. D. (2008). Quantifying the effects of fungicides and disease resistance on greenhouse gas emissions associated with wheat production. *Plant Pathology*, 57(6), 1000–1008. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2008.01899.x>

15. Poloviyi, A. M., & Bozhko, L. Yu. (2021). Modeling of greenhouse gas emissions from soils of agroecosystems. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology*, 54, 329–344. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-25>

16. Ukrainian Institute for Plant Variety Examination. (2024). State register of plant varieties suitable for dissemination in Ukraine for 2024. [In Ukrainian]

17. Lykhochvor, V. V., & Petrychenko, V. F. (2006). *Plant growing. Modern intensive technologies of cultivation of main field crops*. Ukrainski tekhnolohii. [In Ukrainian]
18. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use*. IGES.
19. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use*.
20. Brentrup, F., & Pallière, C. (2008). GHG emissions and energy efficiency in European nitrogen fertiliser production and use. *Proceedings of the International Fertiliser Society*, 639, 1–25.
21. Wood, S., & Cowie, A. (2004). *A review of greenhouse gas emission factors for fertiliser production*. IEA Bioenergy Task 38.
22. Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, 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 T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 659–740). Cambridge University Press.
23. Rochette, P., Worth, D. E., Lemke, R. L., McConkey, B. G., Pennock, D. J., Wagner-Riddle, C., & Desjardins, R. J. (2008). Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada. I. Development of a country-specific methodology. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(5), 641–654. <https://doi.org/10.4141/CJSS07025>
24. Forster, P., Ramaswamy, V., & Artaxo, P. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In *Climate change 2007: The physical science basis* (pp. 129–234). Cambridge University Press.
25. Audsley, E., Stacey, K., Parsons, D. J., & Williams, A. G. (2009). *Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use*. Cranfield University. <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/server/api/core/bitstreams/78cd42ff-e564-4112-ab50-e5e7fc4da80a/content>
26. Lal, R. (2004). Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 30(7), 981–990. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005>
27. West, T. O., & Marland, G. (2002). A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91(1–3), 217–232. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00233-X)
28. Bolinder, M. A., Janzen, H. H., Gregorich, E. G., Angers, D. A., & Van den Bygaart, 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>
29. 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(1–2), 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.029>
30. Johnson, J. M.-F., Allmaras, R. R., & Reicosky, D. C. (2006). Estimating source carbon from crop residues, roots and rhizodeposits using the national grain-yield database. *Agronomy Journal*, 98(3), 622–636. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0179>
31. Siabriuk, O. P. (2013). Estimation of carbon losses from typical chernozem under different tillage methods and fertilization systems. *AgroChemistry and Soil Science*, 80, 140–146. [In Ukrainian]
32. Vleeshouwers, L. M., & Verhagen, A. (2002). Carbon emission and sequestration by agricultural land use: A model study for Europe. *Global Change Biology*, 8(6), 519–530. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00485.x>
33. Lemke, R. L., VandenBygaart, A. J., Campbell, C. A., Lafond, G. P., & Grant, B. (2010). Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation

experiment on a Udic Boroll. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(1–2), 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.08.010>

34. Liu, C., Lu, M., Cui, J., Li, B., & Fang, C. (2014). Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 20(5), 1366–1381. <https://doi.org/10.1111/gcb.12517>

35. Polevoy, A., Mykytiuk, O., Barsukova, O., & Husieva, K. (2024). Climate change and greenhouse gas emissions from soils under the winter wheat agroecosystem in Ukraine. *Agrology*, 7(3), 107–111. <https://doi.org/10.32819/202414>

36. Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1–9. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf

37. Prysiazniuk, O. I., Klymovych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2> [In Ukrainian]

UDC 620.952:633.11:504.7

Prysiazniuk, O. I.*, **Kononiuk, N. O.**, **Maliarenko, O. A.**, **Musich, V. V.**, **Polovynchuk, O. Yu.**, **Honcharuk, O. M.**, **Voloshyn, P. Yu.**, & **Shevchenko, O. P.** (2025). Greenhouse gas emissions and carbon balance of winter wheat varieties cultivated in the Forest Steppe of Ukraine. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, 33, 95–107. <https://doi.org/10.47414/np.33.2025.349400>

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

Aim. To determine greenhouse gas emissions and the formation of carbon balance of winter wheat cultivated in the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** The study was conducted in 2020–2024 on typical low-humus chernozem. The object comprised 36 winter wheat varieties. Greenhouse gas emissions were calculated according to IPCC methodology (Tier 1), taking into account fertiliser production, field N₂O emissions, urea hydrolysis, use of machinery, seed, and pesticides. Carbon balance was defined as the difference between CO₂ absorption by biomass and anthropogenic emissions; gross, net, and sequestration balances were separately assessed, considering humification of plant residues. Varieties were categorised by carbon footprint, gross balance, and sequestration break-even point, and scenarios of straw retention (0–100%) were modelled. **Results.** Total emissions amounted to 1938.2 kg CO₂-eq/ha, of which 41.8% was attributed to fertiliser production and 34.2% to field N₂O emissions. The carbon footprint of varieties ranged from 236.4 to 334.6 kg CO₂-eq/t grain (a difference of 41.5%) and was determined by yield level. Five varieties with yields of 7.83–8.20 t/ha were classified as highly efficient in terms of carbon footprint. All varieties acted as net CO₂ sinks: gross balance was +19.3...+28.2 t CO₂-eq/ha, net balance +2.1...+3.8 t CO₂-eq/ha (with 30% straw retained). The sequestration balance under the baseline scenario remained negative (–0.95...–1.24 t CO₂-eq/ha). Increasing the proportion of retained straw from 0 to 100% raised the net balance by an average of 11.7 t CO₂-eq/ha and the sequestration balance by 1.75 t CO₂-eq/ha. The sequestration break-even point for high-yielding varieties was 77–80%, whereas for 25% of low-yielding varieties it was unreachable even at 100% straw retention. **Conclusions.** The choice of high-yielding varieties combined with optimal straw management is a key factor in reducing climate load and achieving positive carbon balance. The most effective strategy is cultivation of varieties with high carbon efficiency while retaining at least 80% of straw; for low-yielding varieties, additional sequestration measures are required.

Keywords: winter wheat; greenhouse gases; carbon footprint; carbon sequestration; variety.

Надійшла / Received 08.10.2025

Погоджено до друку / Accepted 24.11.2025

Опубліковано онлайн / Published online 29.12.2025