

*В. В. ІВАНІНА, В. О. ЗУЗА, Р. В. ІВАНІНА,
О. П. СТІЛЕЦЬ, Н. С. ЗАЦЕРКОВНА*

ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ КАРБОНОВО НЕЙТРАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР В УКРАЇНІ

НАУКОВІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

КИЇВ 2026



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР І ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

**В. В. Іваніна, В. О. Зуза, Р. В. Іваніна,
О. П. Стрілець, Н. С. Зацерковна**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ
КАРБОНОВО НЕЙТРАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
КУЛЬТУР В УКРАЇНІ**

Наукові рекомендації

Київ • 2026

УДК 631.51:631.582:631.81:633
<https://doi.org/10.47414/978-617-8706-46-3>

*Рекомендовано до опублікування вченою радою
Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
(протокол № 8 від 8 квітня 2026 р.)*

Рецензенти:

В. А. Доронін, доктор с.-г. наук, професор;
О. Б. Хіврич, кандидат с.-г. наук, старший науковий співробітник
(Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН)

Іваніна В. В., Зуза В. О., Іваніна Р. В., Стрілець О. П., Зацерковна Н. С. Обґрунтування та впровадження карбоново нейтральних технологій вирощування сільськогосподарських культур в Україні : наукові рекомендації / НААН України, Ін-т біоенергет. культ. і цукр. буряків. Електрон. вид. Київ : ІБКіЦБ НААН, 2026. 24 с.

ISBN 978-617-8706-46-3 (PDF)

У науковій рекомендації обґрунтовано викладені дослідження вітчизняних та закордонних авторів з системи удобрення, структури сівозмін та способів обробітку ґрунту на обіг та баланс вуглецю в агроценозах сільськогосподарських культур. Рекомендації є невід'ємною частиною, яка спрямована виробничникам України із збереження карбоново нейтральних технологій з використанням у короткочасних сівозмінах з внесенням добрив та технологій обробітку ґрунту, що забезпечить збереження гумусу, зменшення викидів вуглецю та покращення структури ґрунту.

УДК 631.51:631.582:631.81:633
<https://doi.org/10.47414/978-617-8706-46-3>



Цей твір поширюється на умовах ліцензії CC BY-NC-SA 4.0
(Creative Commons «Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International)

ISBN 978-617-8706-46-3 (PDF)

© Інститут біоенергетичних культур
і цукрових буряків НААН, 2026
© Колектив авторів, 2026

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Вплив системи удобрення, структури сівозмін та способів обробітку ґрунту на обіг та баланс вуглецю в агроценозах сільськогосподарських культур	5
1.1. Сівозміна як основа формування карбоново нейтральних технологій у сучасному виробництві	5
1.2. Вплив добрив на обіг та баланс вуглецю у сівозмінах	9
1.3. Обробіток ґрунту у підвищенні секвестрації вуглецю у ґрунті	13
2. Обґрунтувати карбоново нейтральні технології вирощування сільськогосподарських культур в аграрному виробництві України	16
Структура сівозмін	16
Вплив добрив	16
Обробіток ґрунту	17
Рекомендації виробництву	18
Список використаних джерел	19

Вступ

Вуглець або карбон є головним хімічним елементом і найбільш поширеним на планеті. Він входить складовою частиною до всіх органічних молекул, всіх живих організмів. На Землі є встановлена кількість вуглецю, за оцінками 2011 року в атмосфері міститься 800 Гт⁴ (Гігатон) С, наземній фітомасі 550 Гт С, в ґрунті 2300 Гт С, який розміщений глибоко під землею у вигляді вугілля, нафти та газу.

Унаслідок дихання рослин надходить 60 Гт С, та дихання ґрунту і розкладання органіки 60 Гт С. Органічна речовина представляє собою – гетеротрофну суміш різноманітних компонентів біотичного походження (корені рослин, гіфи грибів, ґрунтові мікроорганізми). Ґрунтова секвестрація вуглецю є ефективною за впорядкованого ведення сільськогосподарства – внесення добрив, способів обробітку ґрунту, сівозмін, поглинання вуглецю рослинами з атмосфери, перетворення в тканинах рослини на органічні сполуки і зберігання в ґрунті як складової органічної речовини.

1. Вплив системи удобрення, структури сівозмін та способів обробітку ґрунту на обіг та баланс вуглецю в агроценозах сільськогосподарських культур

1.1. Сівозміна як основа формування карбоново нейтральних технологій у сучасному виробництві

Сучасне виробництво за надмірної інтенсифікації технологій спричинило значну деградацію ґрунтів. Фактором дестабілізації стало порушення балансу між обсягами надходження карбону органічної речовини у ґрунт та його втратами із ґрунту у процесі мінералізації органічної речовини та виділення вуглекислого газу.

За даними О. О. Бацули, Е. А. Головачова, Р. Г. Деревянко [2] у результаті порушення балансу між надходженням і мінералізацією органічної речовини у ґрунті втрати гумусу ґрунтами України за 100 років 20 століття становили 20%, а величина середньорічних втрат у Поліссі – 0,18 т/га, Лісостепу – 0,37, Степу – 0,31 т/га.

Зменшення кількості надходження рослинних решток у ґрунт є головною причиною дегуміфікації ґрунтів. За даними С. Ю. Булигіна, В. В. Дегтярьова, С. В. Крохіна [5] у цілих ґрунтах порівняно з орними чорноземами органічної речовини надходить у ґрунт у 2,5–3 рази більше, а з урахуванням і надземної біомаси ця різниця буде ще більшою. Гумус, що утворюється з пожнивних решток у агроценозах, які задіяні у сільськогосподарському виробництві здатен лише на 40–60% компенсувати його втрати у процесі мінералізації [8, 10, 18].

Перехід до карбоново нейтральних технологій, які передбачають збереження вмісту гумусу у ґрунті є регулювання обсягів надходження органічної речовини у ґрунт та процесів її трансформації у ґрунтового пулі.

Формування структури сівозмін є одним із головних чинників у механізмі декарбонізації агротехнологій. Сучасне аграрне виробництво сконцентроване на вирощуванні п'яти сільськогосподарських культур – пшениці озимої, ячменю ярого, кукурудзи на зерно, сояшнику і сої. При створенні біологічного врожаю вони формують різну біологічну масу у якій нетоварна частина врожаю (побічна продукція) за заробляння у ґрунт є джерелом карбону для стабілізації вмісту гумусу. Такими джерелами органіки у сучасних сівозмінах є солома пшениці, ячменю та сої, стебла кукурудзи та сояшнику.

Дослідження проведені Л. І. Мартинович, М. М. Мартиновичем [9] у стаціонарному польовому досліді показали, що без заробляння в ґрунт

нетоварного врожаю сільськогосподарських культур упродовж 50-ти років у чорноземі опідзоленому втрати гумусу становили 1,06% (37,94 т/га), за внесення мінеральних добрив – 0,85% (30,6 т/га). За цих умов джерелом відновлення гумусу у ґрунті слугували пожнивно-кореневі рештки, які здатні компенсувати втрати гумусу ґрунту лише на 24–40% [3, 4]. Тому основою відтворення гумусу і формування карбоново нейтральних технологій є заробляння у ґрунт додаткових джерел органіки, основним із яких є побічна продукція сільськогосподарських культур [6, 16].

Дослідження проведені на Верхняцькій дослідно-селекційній станції показали, що вирощування культур у зерно-буряковій сівозміні (30% просапних, 30% бобових) без заорювання побічної продукції було недостатнім для збереження вмісту гумусу у ґрунті. За таких умов карбон у ґрунт надходив у складі пожнивних і кореневих решток і його обсяги становили 0,41 т/га. За 20 років такої практики дефіцит балансу органічної речовини у ґрунті у перерахунку на карбон рівнявся 0,36 т/га. Аналогічні дані отримано в дослідженнях Г. Я. Чесняка [12], де за 60 років вирощування сільськогосподарських культур без внесення добрив щорічні втрати гумусу в шарі 20–40 см становили 0,4 т/га, за 100 років – 0,9 т/га. Надходження органічної речовини з пожнивними і кореневими рештками у ґрунт щорічно в кількості 0,44 т/га вуглецю обумовило дефіцит його балансу у ґрунті – 0,41 т/га в рік.

У 10-пільній зерно-буряковій сівозміні (40% просапних, в т.ч. 20% цукрових буряків) за тривалого упродовж 10 років вирощування сільськогосподарських культур на сірому лісовому ґрунті без внесення органічних добрив призвело до зменшення запасів гумусу у середньому на 0,3–0,5 т/га в рік, а вміст загального гумусу зменшився у 1,1–1,3 рази [10].

Думка науковців з питань впровадження карбоново нейтральних технологій сьогодні однозначна – вони мають базуватись на заорюванні нетоварної частини врожаю сільськогосподарських культур. У цьому процесі структура сівозміни є не тільки джерелом карбону, але фактором інтенсивності трансформації органічних сполук у ґрунті [8].

Чисельні дослідження свідчать, що мінералізація гумусу в ґрунті посилюється за збільшення частки просапних культур у сівозміні. Під ярими зерновими (пшениця, ячмінь та овес) втрати гумусу з кореневмісного шару у середньому за рік становили 0,5–0,6 т/га, пшеницею озимою – 0,7 т/га, горохом та кукурудзою – 1,0 т/га, буряками цукровими – 1,5 т/га. Збільшення у сівозміні частки просапних культур на 10% призводило до збільшення втрат гумусу на 0,2–0,4 т/га [7, 15, 17].

У дослідженнях Я. П. Цвея, О. І. Недашківського, М. О. Кісілевської [14] за 24-річного використання ріллі без внесення добрив в умовах недостатнього зволоження вміст гумусу в чорноземі типовому слабко-

солонцювату зменшився у плодозмінній сівозміні на 0,16%, просапній – на 0,40%, зерно – просапній – на 0,10%. За нестійкого зволоження збільшення частки просапних культур у сівозміні з 30 до 50% за внесення 6 т гною + $N_{36}P_{24}K_{36}$ на 1 га ріллі збільшило втрати гумусу в чорноземі вилугуваному по завершенню 3-х ротацій зерно – просапної сівозміни на 0,08–0,20% [13].

Дослідження проведені на Верхняцькій дослідно-селекційній станції показали, що внесення $N_{50}P_{42,5}K_{50}$ + побічна продукція на 1 га сівозмінної площі по завершенню другої ротації сівозміни підвищило вміст гумусу у ґрунті до початкового висхідного на 0,09%, який становив 3,05%. За заорювання нетоварної частини врожаю щорічні обсяги надходження карбону у ґрунт становили 1,75 т/га, що порівняно з традиційною на основі гною органо-мінеральною системою удобрення було більшим на 0,17 т/га, внесенням лише мінеральних добрив – на 1,31 т/га. Поєднане внесення мінеральних добрив і побічної продукції за стабілізуючим впливом на ґрунт не поступалось поєднаному внесенню мінеральних добрив і гною. Баланс вуглецю у ґрунті становив +0,11 т/га в рік, коефіцієнт гуміфікації – 34,6%.

На Білоцерківській дослідно-селекційній станції вплив систем удобрення на вміст гумусу у ґрунті у третій ротації вивчали у зерно – просапній сівозміні (просапні 40%, бобові 10%), четвертій – плодозмінній сівозміні (просапні 16,7%, бобові 33%). Результати досліджень показали, що за вирощування культур без внесення добрив у зерно-просапній сівозміні (третя ротація) вмісту гумусу зменшився у шарі 0–30 см на 0,27%, 30–40 см – 0,10%, 40–60 см – 0,02%. Щорічні втрати гумусу у чорноземі вилугуваному у шарі 0–60 см у третій ротації становили у вуглецевому еквіваленті 1,14 т/га, за обсягів надходження вуглецю органічної речовини у ґрунт – 0,23 т/га в рік. Ці дані узгоджуються з результатами досліджень Л. А. Барштейна, І. С. Шкаредного, В. М. Якименка [1], де вирощування культур без внесення добрив упродовж 20-ти років призвело до зменшення вмісту гумусу в орному шарі чорнозему вилугуваного: у плодозмінній сівозміні – на 0,14%, зерно – просапній з 50% просапних на – 0,43% і зерно – просапній з 25% просапних – на 0,36%.

У плодозмінній сівозміні (четверта ротація) за вирощування культур без внесення добрив вміст гумусу упродовж ротації зменшився переважно в орному (0–30 см) та підорному (30–40 см) – відповідно на 0,07% та 0,03%. Щорічні втрати гумусу в шарі 0–60 см у четвертій ротації становили у вуглецевому еквіваленті 0,48 т/га, що порівняно з зерно-просапною сівозміною було менше на 0,66 т/га. За поєднаного внесення $N_{43}P_{43}K_{43}$ + побічна продукція на 1 га сівозмінної площі досягалось щорічне підвищення запасів гумусу у ґрунті у шарі 0–60 см – 0,28 т/га. Це свідчить про те, що у сівозмінах з низьким насиченням просапними

культурами і високою часткою бобових культур внесення середніх доз мінеральних та органічних добрив, або мінеральних добрив поєднано з побічною продукцією може бути достатнім для стабілізації гумусного стану ґрунту. Зменшення частки буряків цукрових у сівозміні удвічі та насичення сівозміни бобовими культурами до 33% майже удвічі знизило втрати гумусу у ґрунті. Це вказує також на важливість введення до складу сівозмін бобових культур з метою збереження та відновлення вуглецевого пулу та формування вуглецево нейтральних технологій [8].

На Уладово-Люлинецькій дослідно-селекційній станції вивчали вплив поєданого внесення мінеральних добрив, побічної продукції та зеленої маси гірчиці білої ($N_{50}P_{20}K_{30}$ + сидерат + побічна продукція на 1 га ланки сівозміни). Щорічні обсяги надходження органічної речовини в ґрунт у вуглецевому еквіваленті становили 2,17 т/га. Така кількість органічної речовини підвищила вміст гумусу по завершенню ланки сівозміни до початкового рівня в орному (0–30 см) шарі – на 0,06%, підорному (30–40 см) – на 0,02%. Запаси гумусу у шарі ґрунту 0–40 см при цьому збільшились у вуглецевому еквіваленті на 1,28 т/га, що відповідало 0,43 т/га щорічного підвищення.

У дослідженнях Zheng F. та ін. провели метааналіз 2199 парних спостережень з 53 досліджень щодо впливу заорювання нетоварної частини врожаю та обробітків ґрунту на агрегатний його стан. Виявлено, що внесення побічної продукції та проведення нульового обробітку формували найкращий агрегатний стан ґрунту. У ґрунті збільшилась частка макроагрегатів ($> 0,25$ мм) – на 7–14%, зросла їх стабільність – на 7–9%, підвищився вміст органічної речовини – на 7–8 відсотків.

У США з 1850 по 2015 рік площа сільськогосподарських угідь зросла на 110%, що викликало занепокоєння щодо збіднення ґрунтів на органічну речовину у результаті порушення балансу карбону у системі ґрунт – рослина [19, 28]. Це спонукало до проведення досліджень з пошуку та тестування «найкращих практик управління» вуглецевим пилотом ґрунтів та формування вуглецево нейтральних технологій виробництва сільськогосподарської продукції [20, 21, 29].

Значна увага була прикута до кукурудзяного поясу, де основними культурами є кукурудза на зерно та соя [26, 27, 31]. Було встановлено, що включення цих культур до складу сівозмін сприяє взаємному росту їх продуктивності, а за заробляння на добриво побічної продукції – посилює секвестрацію вуглецю у ґрунті [23]. Сівозміни, які включали кукурудзу і сою більше накопичували карбону у ґрунті порівняно з монокультурою кукурудзи [24, 30, 33]. Це пояснюється тим, що соя збагачує ґрунт азотом, який посилює гуміфікацію рослинних решток кукурудзи у ґрунті. Результатом такої практики є зменшення газоподібних втрат вуглецю, посилення трансформації вуглецю у гумусові сполуки, а сіво-

зміна, яка включає ці дві культури, формує основи карбоново нейтрального вирощування сільськогосподарських культур [22, 25, 32].

Отже, максимальне зменшення частки просапних культур у сівозмінах, введення до їх складу бобових культур та заробляння на добриво усієї нетоварної частини врожаю є основою формування карбоново нейтральних технологій вирощування сільськогосподарських культур.

1.2. Вплив добрив на обіг та баланс вуглецю у сівозмінах

Система удобрення є головним важелем впливу на вуглецевий баланс, оскільки вона визначає співвідношення між надходженням органіки в ґрунт та швидкістю її мінералізації.

Результати впливу балансу органічного вуглецю в ґрунті й систем удобрення на формування сталої конкурентоспроможності з базою даних 5597 аграрних підприємств України. Оцінено вплив балансу гумусу на рівень сталої конкурентоспроможності аграрних підприємств на ринках трьох основних культур – пшениці озимої, кукурудзи на зерно та сояшника.

У результаті дослідження Кучер А. В. [35] вперше визначено та кількісно оцінено вплив балансу органічного вуглецю в ґрунті на формування сталої конкурентоспроможності аграрних підприємств і залежності балансу гумусу в ґрунті від урожайності побічної продукції та обсягу внесення органічних добрив в аграрних підприємств України.

Установлено, що третина (33,0%) досліджуваних аграрних підприємств України мали дефіцитний баланс гумусу (у середньому 0,273 т/га), решта (67,0%) мали позитивний баланс гумусу, зокрема 15,9% суб'єктів господарювання забезпечили баланс гумусу понад 1 т/га (у середньому 1,608 т/га).

У дослідженнях Гуцол Г. В. [36] наводить аналіз щодо процесу тривалого накопичення та утримання певних речовин ґрунті чи екосистемі, що вилучає карбон з активного обігу в умовах інтенсивного землеробства та його впливу на ступінь врожайності. Перетворення природних ландшафтів у агроландшафти порушує баланс обігу карбону та призводить до інтенсифікації його вивільнення в атмосферу з верхніх шарів ґрунту. За умов зміни підходів до організації ведення сільського господарства, процес депонування карбону у ґрунті може перейти зі статусу виклику (баланс акумуляції вивільнення карбону є негативним) у статус одного з ключових факторів запобігання негативним проявам кліматичних змін (баланс акумуляції вивільнення карбону є позитивним).

Стрімке зростання CO_2 в атмосфері за останні десятиліття добре задокументовано, і зараз зростає занепокоєння, оскільки це призводить до змін клімату Землі через «посилений парниковий ефект». Як

наслідок, існує зростаючий попит на зниження рівня CO₂ в атмосфері шляхом зменшення антропогенних викидів в атмосферу та видалення вуглецю з атмосфери шляхом секвестрації в біосфері. Вчені оцінюють [37], що сільське господарство, засноване на рослинництві, займає 1,7 млрд га у всьому світі, із запасом карбону у ґрунті приблизно 170 Pg (пентаграм). За оцінками, окислення органічної речовини ґрунту в культивованих ґрунтах вносить в атмосферу приблизно 50 Pg карбону. Повернення втраченого вуглецю в ґрунті шляхом збільшення накопичення карбону у ґрунтах є очевидною можливістю депонування [38]. Перетворення природних ландшафтів на землі сільськогосподарського призначення майже незмінно призводить до виснаження природних запасів вуглецю в ґрунті. Наприклад, оцінки середньої втрати органічного ґрунтового вуглецю у верхньому метровому шарі протягом 2–8 років після перетворення місцевої природної рослинності на сільське господарство коливаються від 15 до 40% [39]. На початку 1980-х років зміни у землекористуванні, за оцінками, призвели до перенесення від 1 до 2 Pg карбону на рік із наземних екосистем в атмосферу. Від 15 до 17% цього карбону утворюється в результаті окислення органічної речовини ґрунту [40]. Фактичний рівень депонування карбону у ґрунтах: у цьому випадку мова йде про кількість вуглецю, який міститься у ґрунті у певний момент часу.

Дослідження впливу норм добрив на баланс гумусу та елементів мінерального живлення культур 5-пільної зерно просапної сівозміни на дерново-підзолистому ґрунті і застосовувані норми удобрення під сільськогосподарські культури 5-пільної зерно просапної сівозміни (овес – люпин – тритикале яре – буряки кормові – кукурудза на зерно) і фактор сівозміни мали значний вплив на позитивний баланс гумусу та елементів НРК, особливо фосфору й калію. Зокрема, застосування одинарної норми добрив забезпечувало бездефіцитний баланс гумусу за ротацію сівозміни на рівні +0,07 т/га (інтенсивність балансу – 99%) із найвищими значеннями за вирощування кукурудзи на зерно (+0,67 т/га). Відзначено негативний баланс азоту за ротацію сівозміни на фоні без добрив (–255,4 кг/га), тоді як за внесення одинарної норми добрив вдалося стабілізувати баланс азоту до 0,6 кг/га, двійної норми – до 6,6 кг/га. Фосфор і калій виявилися найбільш стабільними елементами, їх баланс у середньому по сівозміні за внесення одинарної норми добрив становив 37,7 і 18,5 кг/га, двійної норми – 71,8 і 101,2 кг/га відповідно [41].

У дослідженнях встановлено, що на чорноземах типових глибоких найвищої продуктивності ріллі досягли за мінеральної системи удобрення, а істотне зниження її спостерігається на фоні без застосування добрив і органічної системи. Органо-мінеральна система удобрення істотно не відрізняється від мінеральної.

Застосування диференційованого та полицево-безполицевого обробітку забезпечило найбільшу продуктивність сівозміни. Використання мінеральної системи удобрення в польовій сівозміні забезпечувало найбільший збір кормових одиниць (9,3 т/га), адекватний біокліматичному потенціалу (9 т/га). Органо-мінеральна система удобрення порівняно з нею несуттєво (на 5,3%) знижувала продуктивність ріллі в сівозміні [42].

О. А. Литвинова [43] у результатах досліджень з вивчення впливу систематичного застосування органічних і мінеральних добрив на родючість сірого лісового ґрунту та формування врожаю кукурудзи становила, що в п'ятипільній сівозміні під час вирощування сільськогосподарських культур відбувалося формування ґрунтових фонів з різними фізико-хімічними властивостями. Внесення підстилкового гною (прямої дії) в дозі 60 т/га на фоні помірних норм добрив ($N_{40-80}P_{30-60}K_{40-80}$) сприяло нейтралізації ґрунтового розчину до значень слабокислої реакції, тоді як за відсутності гною (мінеральна система удобрення) рН залишався в межах середньокислої реакції.

Найефективнішою з точки зору гумусового стану ґрунту була органо-мінеральна система удобрення (12 т/га гною + $N_{80}P_{60}K_{80}$) та органічна (12 т/га гною на 1 га сівозмінної площі), відповідно, загальний вміст гумусу становив 1,35 та 1,37% або у відсотковому відношенні на 25–27% більше порівняно з контролем (без добрив) – 1,08 т/га. Оптимізацію показників поживного режиму (гідролізований азот, рухомі форми фосфору і калію) ґрунту в кінці ротації забезпечила органо-мінеральна система удобрення ($N_{100}P_{60}K_{100}$ проти 60 т/га гною). Найвищу продуктивність кукурудзи на зерно (9,49 т/га) забезпечила органо-мінеральна система удобрення (60 т/га гною + $N_{100}P_{60}K_{100}$), що на 86% перевищує контрольний варіант (без добрив), за таких умов отримано найвищий вихід сірого протеїну – 0,98 т/га

Вмісту органічного вуглецю в чорноземі типовому залежно від 28-річного застосування різних систем удобрення культур польової сівозміни в Лісостепу Лівобережного України. Встановлено, що за унесення добрив відбувається повільне депонування $C_{орг}$. За мінеральної системи удобрення з унесенням одинарних і подвійних норм повного добрива вміст $C_{орг}$ збільшується з 2,94–2,96 до 3,09–3,10%. За органічної системи, якою передбачено періодичне внесення гною під просапні культури сівозміни, вміст $C_{орг}$ зростає з 2,80 до 3,09%, тоді як поєднане внесення гною і мінеральних добрив зумовлює збільшення $C_{орг}$ з 2,71–2,79 до 3,09–3,16%. Запаси $C_{орг}$ зростають із 5 за мінеральної до 10 та 13 т/га за органічної та органо-мінеральної систем удобрення відповідно [44].

Застосування органічних і мінеральних добрив норм дозволяє в значних межах регулювати параметри основних агрохімічних показників родючості ґрунту, але при застосуванні високих норм мінеральних доб-

рив значно підвищується його кислотність. Для господарства з обмеженими ресурсними можливостями краще застосувати $N_{45}P_{45}K_{45}$, а з високими – $N_{90}P_{90}K_{90}$. Подальше збільшення норм мінеральних добрив не призводить до збільшення врожайності та виходу побічної продукції яка наростає у ґрунт [45].

Подано результати вивчення впливу тривалого (45 років) застосування добрив на фізико-агрохімічні та агрофізичні властивості чорнозему опідзоленого важкосуглинкового встановлено, що застосування добрив дає змогу зберегти показник обмінної кислотності ґрунту на рівні $pH = 4,6-5,4$. У залежності від варіантів удобрення, забезпеченість рослин азотом змінювалася, проте залишалася на низькому рівні, забезпеченість фосфором змінювалася від середнього до досить високого, калію – від підвищеного до високого рівня. Ґрунт характеризується високим вмістом агрономічно цінних агрегатів – 74,2–88,2%. Поєднане застосування органічних і мінеральних добрив сприяє збереженню водостійкої структури агрегатів ґрунту [46].

Із досліджень Господаренка Г. М. [47] за впливу 11 річного застосування фосфорних добрив у поєднанні з різними дозами азотних і калійних добрив в умовах Правобережного Лісостепу України на продуктивність культур польової сівозміни. Систематичне застосування повного мінерального добрива в сівозміні сприяло підвищенню врожайності зерна на 1,95–2,06 т/га залежно від дози, ячмінь ярий може ефективно використовувати післядію добрив, внесених під попередник і не потребує високих доз фосфорних добрив. Фосфорні добрива на азотно – калійному тлі в дозі 30 кг/га д. р. сприяли підвищенню врожайності пшениці озимої, кукурудзи, ячменю ярого та сої відповідно на 9, 14, 9 і 7%, а продуктивності сівозміни у цілому – на 10%.

Досліджено врожайність і якісні показники зерна гороху, сої та водо-фізичний і поживний стан ґрунту під їх посівами у різних видах сівозмін за інтенсивної й альтернативної систем удобрення. Максимальну врожайність зерна гороху (2,51–2,64 т/га) і сої (2,13–2,25 т/га) отримано в умовах використання безпосередньо під горох і сою $N_{45}P_{45}K_{45}$. Вищу врожайність формували рослини гороху у зерновій сівозміні із 50-відсотковим насиченням зерновими колосовими. У сівозміні, насиченій 75% колосових, урожайність гороху була нижчою на 0,13 т/га. Кращим попередником для сої був ячмінь ярий, після якого на неудобреному варіанті сформувався врожай на 3,5% вищий, ніж після гречки і на 4,3–5,3% при застосуванні органо-мінеральних систем удобрення [48].

За досліджень Саверин І. В., Качмар О. Й. [49] з внесення безпосередньо під культуру мінеральних добрив у дозі $N_{120}P_{100}K_{100}$ на фоні комплексного застосування побічної продукції пшениці озимої і зеленої маси післяжнивної редьки олійної в раціональній системі удобрення

сприяло підвищенню досліджуваних показників до рівня 19,3–20,0% і 35,4–36,9 мм в орному та 21,1–21,6% і 41,1–42,5 мм у підорному шарах. Застосування $N_{150}P_{120}K_{120}$ і аналогічних органічних удобрювальних складових у інтенсивній системі забезпечувало найвищі значення вологості ґрунтового середовища: 20,1–20,7% і 36,7–38,0 мм (пласт ґрунту 0–20 см) та 21,8–22,2% і 42,3–43,4 мм (20–40 см). Вищу продуктивність за виходом зернових одиниць отримано за вирощування кукурудзи у зернових сівозмінах з попередником пшениця озима. На неудобрених варіантах цей показник становив 4,50–4,64 т/га.

Наведено аналіз експериментальних даних, одержаних Десятник Л. М., Шевченко М. С., Швець Н. В. [50] в стаціонарному польовому дослід з вивчення ефективності мінеральних добрив на фоні мінімізації обробітку ґрунту та використання побічної органічної продукції. Встановлено, що вищий приріст урожайності за таких умов забезпечили пшениця озима і кукурудза на зерно, в той час як горох і ячмінь ярий суттєво поступалися їм за показниками продуктивності. Мінімізація основного обробітку ґрунту шляхом заміни мілким розпушуванням ґрунту дисковими знаряддями і прямою сівбою супроводжувалась зниженням фізичної окупності мінеральних добрив внаслідок локалізації їх у верхньому шарі чорнозему звичайного. У результаті проведених досліджень встановлено, що ефективність мінеральних добрив залежала не тільки від дози їх внесення, але й від культури, наявності органічних решток як сировини для гуміфікації та агрофізичної моделі орного шару. Фізіологічні можливості сільськогосподарських культур щодо засвоєння елементів живлення залежали від тривалості вегетаційного періоду та здатності формувати загальну біологічну масу агроценозу.

1.3. Обробіток ґрунту у підвищенні секвестрації вуглецю у ґрунті

Обробіток ґрунту є критичним чинником у секвестрації вуглецю: перехід від традиційної оранки до мінімального обробітку (No-till, Strip-till) підвищує накопичення органічного вуглецю на 10 Mg/га і більше, зменшуючи емісію. Зменшення інтенсивності обробітку зменшує руйнування ґрунтової структури та дегуміфікацію, запобігаючи ерозії.

Вітчизняні та зарубіжні вчені зазначають, що оцінка вмісту вуглецю в ґрунтах відіграє ключову роль у сучасному сільському господарстві.

За даними С. М. Рижук, Г. М. Кочик, А. О. Мельничук та ін. основним завданням в землеробстві є збереження ґрунтового органічного вуглецю внаслідок взаємодії динамічних процесів фотосинтезу, розкладання органічної речовини та дихання ґрунту [51]. У дослідженнях Бедернічек Т. Ю., Lal R. одним із важливих завдань сьогодення є змен-

шення концентрації парникових газів в атмосфері і передусім CO₂. В умовах глобальних і регіональних змін клімату важливим джерелом парникових газів, з якого вони надходять в атмосферу, є ґрунт [58, 59].

На 12-й сесії Конференції Сторін Конвенції у 2015 р. (м. Анкара, Туреччина) та 13-й сесії в 2017 р. (м. Ордос, Китай) було запропоновано затвердити добровільні національні завдання щодо досягнення нейтрального рівня деградації земель. Україна приєдналася до Конвенції, про що свідчить затвердженням Розпорядженням Кабінету Міністрів України Національного плану дій щодо боротьби з деградацією земель з опустелюванням. Зміни клімату помітно відображаються на процесах і режимах функціонування ґрунтів [61, 52].

Сільськогосподарська діяльність історично та сучасно сприяє зміні клімату. Для пом'якшення наслідків зміни клімату шляхом зменшення викидів CO₂ та збільшення секвестрації вуглецю в ґрунті необхідні значні зміни в технологіях вирощування сільськогосподарських культур [53].

Дослідженнями Балюка С. А. та ін. встановлено, що напруженість гумусного балансу зростає на фоні оранки порівняно з безполицевими способами основного обробітку ґрунту. Щороку темпи гуміфікації за оранки вищі і становлять 0,09 т/га, за безполицевих способів обробітку нижчі – 0,24–0,26 т/га. На користь застосування мінімального обробітку ґрунту з використанням знарядь безполицевого типу свідчить його ґрунтозахисний ефект за рахунок наявності післяжнивних залишків на поверхні. Найбільший потенціал для секвестрації (аккумуляції) вуглецю в ґрунтах – застосування органічних добрив у комплексі з мінеральними і хімічними меліорантами.

Органічні добрива є основою окультурювання ґрунтів і відтворення ґрунтового вуглецю та провідним фактором сталого розвитку екологічно збалансованих систем землеробства. Вважається, що 10-та частина внесеного гною трансформується в гумус, тобто з 10 т гною утворюється 1 т гумусу. Оптимальною разовою нормою органічних добрив для забезпечення найвищого коефіцієнта гуміфікації одиниці добрива є 30–40 т/га (еквівалент гною великої рогатої худоби напівперепрілого підстилкового на солом'яній підстилці) з оптимальною глибиною 10–15 см. У зоні Полісся для досягнення бездефіцитного або позитивного балансу гумусу слід вносити 14 т/га сівозмінної площі органічних добрив і не менше 150 кг д. р. мінеральних [60].

Оцінювання запасів органічного вуглецю в ґрунтах та його втрат дає змогу визначати стійкість останніх до природних та антропогенних навантажень. Органічний вуглець, основний компонент органічної речовини – гумусу, відіграє важливу роль у всіх процесах, що відбуваються в ґрунті. Ґрунти в усьому світі містять майже 2344 Гігатон (Гт) органічного вуглецю [55]; у ґрунтах Європейського Союзу його запаси оцінено

на рівні 17,63 Гт [56]; в орних ґрунтах України запаси органічного вуглецю – 7 Гт [54]. З досліджень Балюка С. А., Медведєва В. В., Кучера А. В. на зазначене ґрунт є поглиначем вуглецю за умови рівноважного стану динамічних процесів фотосинтезу рослин, розкладання органічної речовини та емісії CO_2 з ґрунту. Тому запаси (секвестрація) вуглецю в генетичному профілі ґрунту, зокрема в органічній речовині – гумусі, є індикатором і визначальним показником властивостей, що зумовлюють рівень родючості і надання екосистемних послуг.

Оцінювання запасів органічного вуглецю в ґрунтах та його втрат дає змогу визначати стійкість останніх до природних та антропогенних навантажень. Органічний вуглець, основний компонент органічної речовини – гумусу, відіграє важливу роль у всіх процесах, що відбуваються в ґрунті. Ґрунтовий покрив України генетично неоднорідний через різноманітність кліматичних, орографічних, літогранулометричних та інших екологічних факторів. Ґрунти України характеризуються середнім (2–3%) і підвищеним (3–4%) умістом гумусу в орному шарі ґрунту. Ґрунти з низьким (1–2%) і дуже низьким (< 1%) умістом гумусу сушіщеного та піщаного гранулометричного складу поширені в зоні Полісся. Найвищий уміст гумусу – в орному шарі чорноземних ґрунтів (3,5–6,0%), залежно від гранулометричного складу та гідротермічних умов, і в чорноземно – лучних ґрунтах (3,0–7,2%), які характеризуються кращою вологозабезпеченістю порівняно з чорноземами. Запас гумусу в профілі цих ґрунтів змінюється з 200–360 до 550–720 т/га, що в перерахунку на органічний вуглець становить 116–418 т/га [54].

Науковцями Скрильник Є. В., Гетманенко В. А, Кутова А. М. також розроблено нормативи мінералізації гумусу в ґрунті з урахуванням урожайності сільськогосподарських культур, поправних коефіцієнтів залежно від гранулометричного складу та обробітку ґрунту. Втрати гумусу під час вирощування сільськогосподарських культур зростають у ряду: зернобобові, зернові, ріпак, картопля, соняшник, кукурудза на зерно, цукрові буряки [58].

Органічна речовина ґрунту є основним накопичувачем вуглецю, збільшує вологоутримувальну здатність і зміцнюють структуру ґрунту, що сприяє підвищенню продуктивності сільського господарства, зменшення випадків посухи та хвороб [63]. Тому, сільськогосподарська діяльність, яка сприяє накопиченню органічної речовини в ґрунті, є необхідною для обмеження надходження CO_2 у доквілля. Діяльність, пов'язана з управлінням ґрунтом, є важливою для збереження та відновлення вуглецю в ґрунті. Але багато сільськогосподарських земель, мають значний дефіцит вуглецю через процеси деградації ґрунту [64]. Тому мають бути вжиті всі можливі заходи для стимулювання екологічно стійких методів ведення землеробства для збереження вуглецю в ґрунті.

В Україні за даними Національного кадастру антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів загальні викиди парникових газів у 2019 році склали 332,2 млн т CO₂-екв. Тоді як на рівні ЄС загальна кількість викидів парникових газів у 2019 році становила 3637 Мт CO₂ [65].

2. Обґрунтувати карбоново нейтральні технології вирощування сільськогосподарських культур в аграрному виробництві України

Структура сівозмін

Оскільки основними сільськогосподарськими культурами у структурі аграрного виробництва України є солома пшениці, ячменю та сої, стебла кукурудзи та соняшнику, а впроваджувані сівозміни мають коротку ротацію, переважно чотири роки, то досягнення вуглецево нейтральних технологій потребує сівозмін, які у своїй структурі містять не більше однієї просапної культури та обов'язково містять зерно-бобову культуру. Прикладами ефективних сівозмін є:

- пшениця озима – кукурудза на зерно – ячмінь ярий – соя;
- пшениця озима – соняшник – ячмінь ярий – соя;
- пшениця озима – пшениця озима – кукурудза на зерно – соя;
- пшениця озима – пшениця озима – соняшник – соя.

Досягнення карбоново нейтральних технологій вирощування сільськогосподарських культур у зазначених сівозмінах потребує заробляння у ґрунт усієї нетоварної частини врожаю. За таких умов щорічні обсяги карбону, які надходять у ґрунт залежно від врожайності культур становлять 1,6–1,8 т/га. Цього достатньо, щоб покрити щорічні втрати гумусу у процесі його мінералізації та досягти карбоново нейтрального вирощування сільськогосподарських культур.

Вплив добрив

З економічної точки зору в польових сівозмінах з метою досягнення високої окупності добрив, сприятливого поживного режиму і фізико-хімічних та агрофізичних його властивостей необхідно вносити на 1 га площі польової сівозміни органічні добрива у нормі, еквівалентній не менше 9 т/га напівперепрілого гною великої рогатої худоби в поєднанні з мінеральними добривами.

Внесення мінеральних добрив N₄₀₋₆₀P₆₀₋₈₀K₃₀₋₄₀ сприяє стабілізації балансу гумусу, формуванню бездефіцитного або позитивного балансу поживних елементів. Застосування підвищеної дози фосфорних і калій-

них добрив забезпечує значне поліпшення балансу фосфору та калію, однак не завжди компенсує дефіцит азоту, особливо за вирощування високопродуктивних культур.

Найбільше сприяє депонуванню вуглецю у ґрунті систематичне застосування мінеральних і періодичне внесення органічних добрив.

П'ять основних факторів встановлюють фактичний рівень зниження рівня балансу гумусу:

- перше, втрата ґрунтового матеріалу через ерозію зменшує вміст карбону у ґрунті, об'єм ґрунту та/або вміст глини;
- друге, посилене окислення, наприклад, обробкою ґрунту або підвищенням температури ґрунту через видалення рослинного покриву може швидко знизити рівень органічної речовини;
- третє, забирання з поля органічних залишків зменшує надходження вуглецю;
- четверте, порушення біотичних процесів у ґрунті, відповідальних за розщеплення органічних надходжень, зменшить доступність фракцій органічної речовини, придатних для формування стабільних органо-мінеральних комплексів
- п'яте, більш дреновані ґрунти збільшують «дихання», що сприяє окисленню органічної речовини.

Обробіток ґрунту

Обробітку ґрунту базується на здатності створити оптимальні умови для росту рослин та відтворення родючості через механічне втручання а раціональна система обробітку вирішує комплекс завдань:

- регулювання водно-повітряного режиму, що дозволяє накопичувати та зберігати вологу в кореневому шарі, покращити аерацію та водопроникну здатність ґрунту;
 - оптимізувати фізичний стан ґрунту за для оптимальної щільності складання та дрібнокомкової структури посівного шару ґрунту, що забезпечить якісний контакт насіння з ґрунтом;
 - контроль шкодочинних бур'янів, а механічна дія знизить сходи бур'янів, а також збудників хвороб і шкідників, які зимують у ґрунті або на пожнивних рештках;
 - посилення біологічної активності і за допомогою аерації активізується ґрунтова мікрофлора, що прискорює мінералізацію органічних речовин та кругообіг поживних елементів;
 - передпосівний обробіток вирівнює поверхню поля та формує ущільнене ложе на заданій глибині, що гарантує дружну появу сходів.
-

Рекомендації виробництву

1. Для господарств, які ведуть сільськогосподарську практику з використання традиційного обробітку ґрунту, глибокої оранки, рекомендується вирощувати сільськогосподарські культури у чотирипільних сівозмінах з дотриманням такої структури:

- пшениця озима – кукурудза на зерно – ячмінь ярий – соя;
- пшениця озима – соняшник – ячмінь ярий – соя;
- пшениця озима – пшениця озима – кукурудза на зерно – соя;
- пшениця озима – пшениця озима – соняшник – соя.

2. За традиційного обробітку ґрунту у сівозмінах рекомендується заорювати на добриво негосподарську частину врожаю усіх культур та вносити мінеральні добрива в дозі $N_{50-60}P_{20}K_{20-25}$ на 1 га сівозмінної площі.

3. Для господарств, які вирощують сільськогосподарські культури з використанням мілкого обробітку чи No-till, ґрунтоощадні технології, рекомендуються чотирипільні сівозміни з внесенням мінеральних добрив у дозі $N_{50-60}P_{20}K_{20-25}$ на 1 га сівозмінної площі. При впровадженні ґрунтоощадних технологій рекомендується застосовувати технічні засоби, які передбачають мілке подрібнення нетоварної продукції.

4. Найкращий варіант впровадження у виробництво, це органо-мінеральна система у поєднанні гною – сидератів – 10 т/га з мінеральним фоном $N_{60}P_{40}K_{50}$, що створює позитивний баланс, де швидкість депонування вуглецю перевищує його втрати. Накопичення вуглецю в ґрунті сприяє зменшенню концентрації CO_2 в атмосфері та виступає одним із механізмів боротьби з глобальним потеплінням.

5. За для стимуляції мінералізації гумусу за системою No-till використовувати збільшену норму азотних добрив N_{80} та перетворити агроценоз із джерела викидів CO_2 на накопичення вуглецю, що покращить структуру ґрунту та його родючість.

6. Для максимального використання секвестраційного потенціалу ґрунтів (збільшення поглинання та зберігання вуглецю) необхідно впроваджувати практики вуглецевого землеробства: мінімізувати обробіток ґрунту (No-till), вирощувати покривні культури, вносити органічні добрива (компост, гній), застосовувати сівозміни та уникати ерозії. Це підвищує рівень гумусу, покращує структуру ґрунту та біоактивність.

7. Мінеральна система удобрення $N_{40}P_{30}K_{40}$ часто веде до дефіцитного балансу, особливо за відсутності повернення рослинних решток в ґрунт.

8. За для зменшення спалення палива і технологічних операцій з обробки ґрунту використовувати технологічні комплекси у яких за один прохід агрегату виконуються кілька технологічних операцій.

9. Оранка або глибоке підґрунтове рихлення насичує ґрунт киснем, що провокує «спалювання» гумусу мікробами.

Список використаних джерел

1. Барштейн Л. А., Шкаредний І. С., Якименко В. М. Результати вивчення сівозмін на Білоцерківській дослідно-селекційній станції. *Система землеробства у буряківництві*. Київ : Аграрна наука, 1997. С. 21–32.
2. Бацула О. О., Головачов Е. А., Дерев'яноко Р. Г. Забезпечення бездефіцитного балансу гумусу в ґрунті. К.: Урожай, 1987. 127 с.
3. Бацула О. О., Скрильник Є. В., Кравець Т. Ф. Вплив добрив і рослинних решток на гумусовий стан ґрунтів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2002. № 59. С. 115–121.
4. Бердніков О. М., Нимитюк Ю. А. Роль сидерації в сучасному землеробстві. *Вісник аграрної науки*. 2004. № 3. С. 12–15.
5. Булигін С. Ю., Дегтярьов В. В., Крохін С. В. Гумусний стан чорноземів України. *Вісник аграрної науки*. 2007. № 2. С. 13–16.
6. Городний Н. М., Сердюк А. Г., Каленский В. П. Влияние длительного применения удобрений в севообороте Лесостепи Украины на воспроизводство плодородия почв и продуктивность сельскохозяйственных культур. *Натуралис*. 1996. № 2. С. 6–8.
7. Єрмолаєв М. М., Шиліна Л. І., Літвінов Д. В. Вплив сівозміни й удобрення на родючість чорнозему типового. *Вісник аграрної науки*. 2011. № 10. С. 49–53.
8. Заришняк А. С., Іваніна В. В., Колібабчук Т. В. Трансформація вуглецю в чорноземі опідзоленому за різних систем удобрення зернобурякової сівозміни. *Вісник аграрної науки*. 2012. № 8. С. 12–17.
9. Мартинович Л. І., Мартинович Н. М. Вплив 50-річного застосування органічних та мінеральних добрив на родючість чорнозему опідзоленого Центрального Лісостепу Правобережжя УРСР. Повідомлення 1. Вплив систематичного внесення добрив на баланс поживних речовин та органічної речовини ґрунту в зернобуряковій сівозміні. *Агрохімія*. 1989. № 1. С. 30–39.
10. Полупан Н. І. Кількісні та якісні зміни гумусу в ґрунтах півдня України в умовах інтенсивного землеробства. *Вісник сільськогосподарської науки*. 1980. № 11. С. 9–15.
11. Сеньків Г. Й., Дука Л. В., Мацишин М. М. Формування балансу гумусу в різних типах сівозмін Західного Лісостепу України. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Х., 1998. Ч. 2. С. 58–59.
12. Чесняк Г. Я. Закономірність вмісту гумусу і шляхи забезпечення його бездефіцитного балансу в чорноземах типових при інтенсифікації землеробства. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 1982. Вип. 43. С. 18–23.
13. Цвей Я. П., Кісілевська М. О., Ременюк Ю. О. Залежність родючості чорноземних ґрунтів від системи удобрення і чергування культур у сівозміні. *Вісник аграрної науки*. 2007. № 11. С. 5–7.

14. Цвей Я. П., Недашківський О. І., Кісілевська М. О. Родючість ґрунту у короткоротаційних сівозмінах Лісостепу. *Вісник аграрної науки*. 2003. № 10. С. 11–16.
 15. Тараріко Ю. О., Глущенко Л. Д. Вплив систематичного застосування органічних і мінеральних добрив на біологічні процеси та гумусний стан чорнозему типового. *Вісник аграрної науки*. 2002. № 11. С. 18–20.
 16. Цвей Я. П., Касянчук Ф. П. Використання поживної гірчиці при вирощуванні цукрових буряків. *Цукрові буряки*. 2004. № 3. С. 14–15.
 17. Чесняк Г. Я., Чесняк О. Я., Степаненко О. Я. Зміст рухомих органічних речовин у чорноземах потужних Лісостепу УРСР як показник окультуреності. *Наукові праці Харківського СІП*. 1970. Т. 87 (124). С. 29–36.
 18. Campbell C. A., Lafond G. P., Zentner R. P. Influence of fertilizer on soil organic matter in a thin black chernozem in western Canada. *Soil Biology and Biochemistry*. 1991. Vol. 23, No. 5. P. 443–446.
 19. DeFries R. S., Field C. B., Fung I., Collatz G. J., Bounoua L. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*. 1999. Vol. 13. P. 803–815. <https://doi.org/10.1029/1999GB900037>
 20. Dick W. A., Blevins R. L., Frye W. W., Peters S. E., Christenson D. R., Pierce F. J., Vitosh M. L. Impacts of agricultural management practices on C sequestration in forest-derived soils of the eastern corn belt. *Soil Tillage Research*. 1998. Vol. 47. P. 235–244. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00112-3)
 21. Fargione J. E., Basset S., Boucher T., Bridgham S. D., Conant R. T., Cook-Patton S. C., Ellis P. W. Natural climate solutions for the United States. *Science Advances*. 2018. Vol. 4. Article eaat1869. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1869>
 22. Hall S. J., Russell A. E., Moore A. R. Do corn-soybean rotations enhance decomposition of soil organic matter? *Plant and Soil*. 2019. Vol. 444. P. 427–442. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04292-7>
 23. Hennessy D. A. On monoculture and the structure of crop rotations. *American Journal of Agricultural Economics*. 2006. Vol. 88. P. 900–914. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2006.00905.x>
 24. Khan S. A., Mulvaney R. L., Ellsworth T. R., Boast C. W. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*. 2007. Vol. 36. P. 1821–1832. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0099>
 25. Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. Vol. 42. P. 1363–1371. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.003>
-

26. Liebig M. A., Varvel G. E., Doran J. W., Wienhold B. J. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *Soil Science Society of America Journal*. 2002. Vol. 66. P. 596–601. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.5960>
 27. Livingston M., Roberts M. J., Zhang Y. Optimal sequential plantings of corn and soybeans under price uncertainty. *American Journal of Agricultural Economics*. 2015. Vol. 97. P. 855–878. <https://doi.org/10.1093/ajae/aau055>
 28. Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A. Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. *Frontiers in Climate*. 2019. Vol. 1. P. 1–8.
 29. Paustian K., Lehmann J., Ogle S., Reay D., Robertson G. P., Smith P. Climate smart soils. *Nature*. 2016. Vol. 532. P. 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
 30. Poffenbarger H. J., Barker D. W., Helmers M. J., Miguez F. E., Olk D. C., Sawyer J. E., Six J., Castellano M. J. Maximum soil organic carbon storage in Midwest U.S. cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized. *PLOS ONE*. 2017. Vol. 12. Article e0172293. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172293>
 31. Porter P. M., Lauer J. G., Lueschen W. E., Ford J. H., Hoverstad T. R., Oplinger E. S., Crookston R. K. Environment affects the corn and soybean rotation effect. *Agronomy Journal*. 1997. Vol. 89. P. 442–448. <https://doi.org/10.2134/agronj1997.00021962008900030012x>
 32. Qin Z., Guan K., Zhou W., Peng B., Tang J., Jin Z., Grant R., Hu T., Villamil M. B., DeLucia E., Margenot A. J., Umakant M., Chen Z., Coppess J. Assessing long-term impacts of cover crops on soil organic carbon in the central US. *Global Change Biology*. 2023. Vol. 29. P. 2572–2590. <https://doi.org/10.1111/gcb.16632>
 33. Russell A. E., Laird D. A., Parkin T. B., Mallarino A. P. Impact of nitrogen fertilization and cropping system on carbon sequestration in midwestern mollisols. *Soil Science Society of America Journal*. 2005. Vol. 69. P. 413–422. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0413>
 34. Zheng F., Liu X., Ding W., Song X., Li S., Wu X. Positive effects of crop rotation on soil aggregation and associated organic carbon are mainly controlled by climate and initial soil carbon content: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2023. Vol. 355. Article 108600. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108600>
 35. Кучер А. В. Вплив балансу органічного вуглецю в ґрунті на формування сталого конкурентоспроможності аграрних підприємств. *Agricultural and Resource Economics*. 2019. Vol. 5, No. 4. P. 111–136. <https://doi.org/10.51599/are.2019.05.04.07>
 36. Гуцол Г. В. Депонування вуглецю в ґрунтах та його вплив на врожайність сільськогосподарських культур: основні концепції. *Таврій-*
-

- ський науковий вісник. 2024. № 140. С. 119–124. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.140.15>
37. Paustian K., Six J., Elliott E. T., Hunt H. W. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*. 2000. Vol. 48, No. 1. P. 147–163.
 38. Lal R., Kimble J. M., Follett R. F., Stewart B. A. Soil Processes and the Carbon Cycle. Boca Raton: CRC Press, 1998. 609 p.
 39. Sanchez P. A., Palm C. A., Szott L. T., Cuevas E., Lal R. Organic input management in tropical agroecosystems. Honolulu: University of Hawaii Press, 1989. P. 125–152.
 40. Houghton R. A., Hackler J. L. The net flux of carbon from deforestation and degradation in South and Southeast Asia. New York: Springer, 1994. P. 301–327.
 41. Паламарчук Р. В. Вплив норм удобрення культур 5-пільної сівозміни на баланс гумусу та елементів мінерального живлення дерново-підзолистого ґрунту в умовах Полісся. *Вісник аграрної науки*. 2025. № 10. С. 69–79. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202510-08>
 42. Гамаюнова В. В., Хоненко Л. Г., Бакланова Т. В. та ін. Сучасні підходи до застосування мінеральних добрив за збереження ґрунтової родючості в умовах зміни клімату. *Наукові горизонти*. 2020. № 2. С. 90–101.
 43. Литвинова О. А. Вплив систематичного внесення добрив на родючість ґрунту при вирощуванні кукурудзи на зерно. *Plant and Soil Science*. 2021. Т. 12, № 3. <https://doi.org/10.31548/agr2021.03.0076>
 44. Ревтьє-Уварова А. В. Параметризація змін умісту органічного вуглецю залежно від системи удобрення. *Вісник аграрної науки*. 2020. № 11. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202011-02>
 45. Черно О. Д., Стасієвич О. Ю. Вплив тривалого застосування добрив у польовій сівозміні на продуктивність кукурудзи на зерно в умовах правобережного Лісостепу. *Вісник Уманського національного університету садівництва*. 2012. № 1–2. С. 59–63.
 46. Господаренко Г. М., Трус О. М. Вплив тривалого застосування добрив на показники родючості чорнозему опідзоленого та продуктивність польової сівозміни. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2011. № 1. С. 17–21.
 47. Господаренко Г. М. Вплив різних видів і доз добрив на продуктивність зернової сівозміни. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series Agronomy and Biology*. 2022. Т. 48, № 2. С. 46–50. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.2.7>
 48. Щерба М. М., Качмар О. Й., Дубицька А. О., Вавринович О. В., Таравська О. В. Вплив систем удобрення на формування продуктивності зернобобових культур у короткоротаційних сівозмінах. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2022. Т. 71, № 2. С. 202–227. [https://doi.org/10.32636/01308521.2022-\(71\)-2-13](https://doi.org/10.32636/01308521.2022-(71)-2-13)
-

49. Саверин І. В., Качмар О. Й. Продуктивність кукурудзи за різних систем удобрення в короткоротаційних сівозмінах. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2023. Т. 73, № 2. С. 91–109. [https://doi.org/10.32636/01308521.2023-\(73\)-2-7](https://doi.org/10.32636/01308521.2023-(73)-2-7)
50. Десятник Л. М., Шевченко М. С., Швец Н. В. Ефективність використання добрив у сівозміні залежно від способів основного обробітку ґрунту. *Зернові культури*. 2018. № 2. С. 324–329. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0043>
51. Рижок С. М., Кочик Г. М., Мельничук А. О., Кучер Г. А., Савчук О. І. Обґрунтування підходів і стратегічних напрямів щодо секвестрації й збільшення органічного вуглецю в ґрунтах зони Полісся. *Вісник аграрної науки*. 2022. № 5. С. 20–32.
52. Конвенція Організації Об'єднаних Націй про боротьбу з опустелюванням у тих країнах, що потерпають від серйозної посухи та/або опустелювання, особливо в Африці від 17.06.1994. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_120#Text
53. Gworek B., Baczewska-Dąbrowska A. H., Samson-Breń I., Artyszak A., Dmuchowski W. The influence of agricultural tillage practices on soil carbon sequestration. *Journal of Water and Land Development*. 2026. No. 68. P. 26–38. <https://www.jwld.pl/files/2026-01-JWLD-03.pdf>
54. Балюк С. А., Медведєв В. В., Кучер А. В. та ін. Управління органічним вуглецем ґрунту в контексті продовольчої безпеки й змін клімату. *Вісник аграрної науки*. 2017. № 9. С. 11–18.
55. Stockmann U., Adams M. A., Crawford J. W. та ін. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013. Vol. 164. P. 80–99.
56. Pan-European SOC stock of agricultural soils. European Commission Joint Research Centre, 2013. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/pan-european-soc-stock-agricultural-soils>
57. Скрильник Є. В., Гетманенко В. А., Кутова А. М. Оновлені нормативи мінералізації гумусу в ґрунті. *Актуальність впровадження системних заходів щодо попередження та захисту ґрунтів від деградації*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. Київ, 2018. С. 51–53.
58. Бедернічек Т. Ю. Вуглець, ґрунт і парникові гази. Чернівці: Друк Арт, 2021. Вип. 23. С. 32.
59. Lal R. Sequestering atmospheric carbon dioxide. *Critical Reviews in Plant Science*. 2009. Vol. 28, No. 3. P. 90–96. <https://doi.org/10.1080/07352680902782711>
60. Балюк С. А., Греков В. О., Лісовий М. В., Комариста А. В. Розрахунок балансу гумусу і поживних речовин у землеробстві України на різних рівнях управління. Харків: ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», 2011. С. 28.
61. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.03.2016 № 271-р «Про затвердження Національного плану дій щодо боротьби з деградацією земель та опустелюванням (зі змінами)».

62. Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.-F., Ferrer A., Peigné J. Agroecological practices for sustainable agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*. 2014. Vol. 34. P. 1–20.
 63. Vincent-Caboud L., Peigné J., Casagrande M., Silva E. M. Overview of organic cover crop-based no-tillage technique in Europe: farmers' practices and research challenges. *Agriculture*. 2017. Vol. 7. P. 42.
 64. EEA. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2019 and inventory report 2021. Copenhagen: European Environment Agency, 2021. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-inventory-2021>
-

Наукове видання

Автори:

Вадим Віталійович Іваніна,
Віктор Олексійович Зуза,
Роман Вадимович Іваніна,
Оксана Петрівна Стрілець,
Наталія Сергіївна Зацерковна

ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ КАРБОНОВО НЕЙТРАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР В УКРАЇНІ

Наукові рекомендації

Електронне видання

Технічне редагування та верстка
О. Ю. Половинчук

Погоджено до опублікування 10.04.2026.
Формат: PDF. Гарнітура: Georgia

Видавець

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
03110, м. Київ, вул. Клінічна, 25
Тел.: (044) 275-50-00; e-mail: sugarbeet@ukr.net
<https://bio.gov.ua>

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 5713 від 19.10.2017

