



Землеробство, грунтознавство, агрохімія

УДК 631.417.1:631.417.2

© 2023

ВУГЛЕЦЕВО-СЕКВЕСТРАЦІЙНА ЗДАТНІСТЬ ЧОРНОЗЕМУ ТИПОВОГО В АГРОЦЕНОЗАХ

О.В. Демиденко

доктор сільськогосподарських наук

Черкаська державна сільськогосподарська дослідна станція

ННЦ «Інститут землеробства НААН»

вул. Докучаєва, 13, с. Холоднянське Смілянського р-ну Черкаської обл., 20731, Україна

e-mail: agrogumus@ukr.net

ORCID: 0000-0002-5334-1154

Надійшла 13.04.2023

Мета. Оцінити секвестраційні ґрунтові можливості чорнозему типового за довгострокового (45 років) застосування низьковуглецевих ґрунтозахисних способів обробітку і органо-мінеральних систем удобрення порівняно з оранкою в агроценозах центральної частини Лісостепу України. **Методи.** Польовий — для встановлення зміни кількісного і якісного станів гумусу в сівозмінах за різних систем удобрення і обробітку, лабораторно-аналітичний — для визначення вмісту загального та лабільної органічної речовини, математико-статистичний — для оцінювання достовірності отриманих даних. **Результати.** Вплив типу сівозміни на зростання вмісту гумусу залежить від удобрення і способу обробітку: у шарі ґрунту 0–20 см без внесення добрив надбавка гумусу в сівозміні А відносно сівозміни В становила +0,17%, тоді як за безполицевого та поверхневого способів обробітку надбавка була меншою в 1,7 та 2,1 рази. У разі внесення добрив надбавка гумусу за оранки та безполицевого обробітку становила +0,14–0,15%, а за поверхневого була вищою в 1,33–1,42 рази. У досліджуваних сівозмінах А і В в шарі ґрунту 0–20 см утворення С–СО₂ ЛОР за безполицевого і поверхневого обробітку було достовірно вищим порівняно з оранкою, а тому в шарі ґрунту 0–20 см без внесення добрив вплив сівозмінного фактора на запас С–СО₂ ЛОР був вищим. У разі внесення добрив за безполицевого обробітку ефективність впливу сівозмінного фактора на запас ЛОР знижувалась, а за поверхневого обробітку зроста порівняно з оранкою та безполицевим обробітком. **Висновки.** Чорноземи типові центральної частини Лісостепу України мають високу секвестраційну здатність в агроценозах короткочасних сівозмін, яка посилюється на 15–20% за систематичного застосування низьковуглецевих технологій обробітку: безполицевого та поверхневого способів обробітку порівняно з оранкою. За органо-мінеральної системи удобрення відбувається посилення секвестраційної здатності чорнозему в шарі ґрунту 0–20 см за

безполицевого обробітку та має тенденцію до її зниження за поверхневого обробітку порівняно з оранкою. Взаємодія факторів запасу гумусу та C–CO₂ ЛОР в сівозміні А була більш ефективною в 3, 12 разів порівняно з сівозміною В, що свідчить про визначальне значення типу сівозміни у формуванні секвестраційної здатності чорнозему. Система удобрення задає темпи зростання секвестрації, а спосіб обробітку — характер прояву накопичення оксиду карбону в чорноземі агроценозу.

Ключові слова: запас гумусу, чорнозем, безполицевий обробіток, оранка, кореляція, C–CO₂ ЛОР, секвестрація.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202306-01>

Численними дослідженнями встановлено [1–11], що масштаби мінералізації органічної речовини в ґрунті визначаються значною мірою гідротермічними умовами вегетаційного періоду, причому вплив температури значно сильніший, ніж вологості ґрунту. Меншою мірою вивчена роль різних фракцій ґрунтової органічної речовини в інтенсивності мінералізаційних процесів, що відбуваються в ґрунті [12–14].

Секвестраційні можливості орних земель обмежені й реалізуються за абсолютного приросту вмісту органічної речовини у верхньому шарі ґрунту 0,1% С. Для чорноземів Лісостепу це становить не більше 10% вмісту вуглецю органічної речовини, витраченої після залучення до ріллі та використання до досягнення рівноважного рівня вмісту органічної речовини [Шарков, Антипина, 2022 <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.175>]. Низька вуглецево-секвестраційна здатність ґрунтів агроценозів пояснюється, *по-перше*, різким, у 3 рази і більше, зменшенням надходження до них рослинних решток порівняно з цільними аналогами і, *по-друге*, нездатністю міцно закріплювати лабільні гумусові органічні речовини (ЛОР), роблячи їх важкодоступними для ґрунтових мікроорганізмів [15]. Вважається, що чим вища частка ЛОР у гумусі, то значніші його динаміка і втрати за інтенсивного обробітку й удобрення. За висновками Шаркова, 2009, та Кудеярова, 2019, при мінімалізації обробітку вуглецево-секвестраційна здатність ґрунтів зростає, але це зростання незначне.

Проте іншими дослідженнями [16–19] встановлено, що за оранки активізація гумусу відбувається за рахунок «з'їдання» його сталих форм, тоді як за ґрунтозахисних

технологій обробітку чорноземів відбувається, а точніше відтворюється біохімічний процес відтворення вмісту та запасів ЛОР у сезонному та річному циклах. Дефіцит ЛОР сприяє інтенсивнішому розкладу стійкого гумусу, тобто може бути причиною інтенсивної дегуміфікації. Саме тому систематичне поповнення чорнозему свіжою органічною речовиною сприяє збереженню вмісту і запасу загального гумусу чорноземів в агроценозах. Лабільні гумусові речовини є найактивнішим джерелом біофільних елементів та енергії для сільськогосподарських культур і мікроорганізмів, але водночас легкоокислювальними органічними сполуками, що інтенсивно мінералізуються, поповнюючи атмосферу C–CO₂ [20–24].

Наразі потрібно оцінити вплив зміни вуглецево-секвестраційної здатності та виявити темпи існуючих меж втрати загального і лабільного гумусу при формуванні родючості чорнозему типового у 5-пільних сівозмінах різного типу за довгострокового (понад 45 років) впливу різних способів обробітку й удобрення в центральній частині Лівобережного Лісостепу України.

Мета досліджень — оцінити секвестраційні ґрунтові можливості чорнозему типового за довгострокового (45 років) застосування низьковуглецевих ґрунтозахисних способів обробітку і органо-мінеральних систем удобрення порівняно з оранкою в агроценозах центральної частини Лісостепу України.

Методика досліджень. Дослідження проводили в умовах центральної частини Лівобережного Лісостепу України в довгостроковому (понад 35 років) стаціонарному досліді Дробівського дослідного поля

Черкаської державної сільськогосподарської дослідної станції ННЦ «Інститут землеробства НААН». Ґрунт — чорнозем типовий малогумусний крупнопилувато-легкосуглинковий з вмістом гумусу 3,8–4,2%, рухомого фосфору — 120–140 мг на 1000 г Ґрунту, рухомого калію — 80–100 мг на 1000 г Ґрунту, $pH_{H_2O} = 6,8–7,0$. Площа посівної ділянки — 162 м², облікової — 100 м².

Дослідження проводили за 1976–2022 рр. у багатофакторному стаціонарному досліді Черкаської державної дослідної станції ННЦ «Інститут землеробства НААН». У досліді вивчали два типи 5-пільних сівозміни: А: багаторічні трави — пшениця озима — буряк цукровий — кукурудза — ячмінь + багаторічні трави (зернові — до 60%, технічні — до 20%; багаторічні трави — до 20%); В: горох — пшениця озима — буряк цукровий — кукурудза на зерно — кукурудза на зерно (зернові — до 60%, технічні — до 20%; зернобобові — до 20%). Система удобрення: 6,0 т/га побічної продукції; N₃₁P₃₃K₄₁ (середня доза); N₆₂P₆₆K₈₂ (подвійна доза) на 1 га сівозміної площі. До 1999 р. вносили 6 т/га гною, у 2000–2022 р. — 6–7 т/га побічної продукції.

Способи основного обробітку: різноглибинна оранка (22–25 см) під усі культури; безполицевий обробіток (22–25 см) під усі культури; поверхневий обробіток (8–12 см) під усі культури. В обох дослідях повторення триразове.

У лабораторних умовах Ґрунтові проби досліджували у триразовій повторності: визначали вміст гумусу за І.В. Тюрніним у модифікації В.М. Сімакова (ДСТУ 4289:2004) та лабільну органічну речовину (ДСТУ 4732:2007).

Узагальнення продуктивності сівозміни, показників режиму зволоження Ґрунту, кліматичні параметри і розрахунки результатів досліджень здійснювали методом дисперсійного аналізу з використанням програми «STATISTICA-10» і непараметричними методами статистики, кореляційного, факторного та кластерного аналізів.

Результати досліджень. *Динаміка загального гумусу.* Динаміку загального гумусу за 1976–2022 рр. залежно від типу сівозміни, удобрення та способу обробітку. Виявилось, що у сівозміні А за період

з 1976 по 1986 р. (10 років дослідження) без внесення добрив у шарі Ґрунту 0–20 см за систематичної оранки зниження вмісту загального гумусу становило –0,05% (або щорічно –0,0005%), а за безполицевого та поверхневого способів обробітку надбавка гумусу становила +0,03–0,05% (або щорічно +0,003–0,005%).

У шарі Ґрунту 0–30 см без добрив за безполицевого обробітку вміст гумусу зростав, а за оранки та поверхневого обробітку — не змінювався. У разі внесення добрив найвищою надбавка гумусу була за оранки (+0,04%) та безполицевого обробітку (+0,05%), тоді як за поверхневого обробітку — у 2–2,5 раза меншою (+0,02%).

У період з 1986 по 2022 р. (36 років дослідження) надбавка гумусу в шарі Ґрунту 0–20 см була найвищою (контроль без добрив) за оранки та безполицевого обробітку (+0,12–0,16%), тоді як за поверхневого обробітку — у 1,5–2 рази нижчою.

У шарі Ґрунту 0–30 см за зазначений період встановлена закономірність збереглась. На контролі без добрив вміст гумусу за безполицевого обробітку зріс на +0,19% (щорічно +0,0052%), за оранки зростання було меншим у 1,9 раза, а за поверхневого обробітку — у 3,5 раза. У разі внесення добрив за оранки вміст гумусу зменшився на –0,01%, тоді як за безполицевого та поверхневого способів обробітку — відповідно зріс на +0,12% та +0,07%. Зменшення надбавки гумусу в 1,7 раза за поверхневого обробітку відносно безполицевого обробітку зумовлено накопиченням гумусу в шарі Ґрунту 0–20 см та зниженням його запасу в шарі Ґрунту 0–30 см.

У період з 1976 по 2022 р. (46 років дослідження) на контролі без добрив загальна закономірність динаміки гумусу збереглась. Так, у шарі Ґрунту 0–20 см за безполицевого обробітку як на контролі без добрив, так і за внесення добрив гумусу накопичилось +0,19–0,22%, за оранки — у 2,7 та 1,7 раза менше, а за поверхневого обробітку — відповідно в 1,46 та 1,31 раза менше.

У шарі Ґрунту 0–30 см незалежно від способу обробітку та удобрення виявлено зростання вмісту гумусу. Найвищим зростання вмісту гумусу виявилось за безполицевого обробітку — +0,17–0,20% (або щорічно

+0,0036–0,043%). За оранки без внесення добрив зростання вмісту гумусу становило +0,10%, за внесення добрив — +0,03% (або щорічно +0,0021% та +0,0006%), за поверхневого обробітку — +0,05–0,09% (або щорічно +0,001% та 0,02%).

У сівозміні В зростання вмісту гумусу за 1976–1986 рр. у шарі ґрунту 0–20 см на контролі без добрив було найвищим за оранки (+0,05%) та безполицевого обробітку, тоді як за поверхневого обробітку вміст гумусу знизився на –0,08% та –0,04%.

За 36 років дослідження в шарі чорнозему 0–20 см без внесення добрив за оранки зниження вмісту гумусу становило –0,14%, а за безполицевого та поверхневого способів обробітку спостерігалось його зростання як без внесення добрив, так і за їх внесення. Найефективніше гумус накопичувався за поверхневого обробітку — +0,09–0,10%.

Упродовж довгострокового дослідження (46 років) у шарі ґрунту 0–20 см надбавка гумусу становила +0,01–0,02% за поверхневого та безполицевого способів обробітку без внесення добрив та +0,05–0,06% за внесення добрив, що відповідає темпам гуміфікації +0,0002–0,0004% без добрив та +0,0010–0,0013% з добривами. У шарі ґрунту 0–30 см за оранки без внесення добрив накопичення гумусу становило +0,02% (або щорічно +0,0004%) як і за безполицевого обробітку. За поверхневого обробітку збагачення гумусом становило +0,05% (або щорічно +0,001%). У разі внесення добрив темпи мінералізації гумусу за оранки становили –0,07% (або щорічно –0,015%), тоді як за безполицевого та поверхневого способів обробітку темпи гуміфікації становили +0,04–0,05% (або щорічно +0,0008–0,001%).

Встановлено, що вплив сівозмінного фактора на зростання вмісту гумусу залежить від удобрення і способу обробітку. Так, у шарі ґрунту 0–20 см без унесення добрив надбавка гумусу в сівозміні А відносно сівозміни В становила +0,17%, тоді як за безполицевого та поверхневого способів обробітку була меншою відповідно в 1,7 та 2,1 раза. У разі внесення добрив надбавка гумусу за оранки та безполицевого обробітку становила +0,14–0,15%, а за поверхневого була вищою в 1,33–1,42 раза. У шарі ґрунту 0–30 см без внесення добрив надбавка гумусу від

типу сівозміни за безполицевого та поверхневого способів обробітку була вищою порівняно з оранкою в 1,29–1,48 раза. У разі внесення добрив за поверхневого обробітку надбавка гумусу була вищою за оранки і безполицевого обробітку в 1,88–2 рази.

Встановлено вплив сівозмінного фактора на зростання вмісту гумусу за оранки без унесення добрив, що становило 4,7%, за безполицевого обробітку — 2,6–6,7%, за поверхневого — 2,1–6,0%. У разі внесення добрив зростання вмісту гумусу за оранки становило 3,8–4,3%, за безполицевого обробітку — 3,9–4,5%, поверхневого — 5,3–8,8%, що найефективніше.

Згідно з оцінкою ефективності впливу сівозмінного фактора на зростання вмісту гумусу залежно від обробітку в шарі ґрунту 0–20 см без внесення добрив ефективнішою була оранка, а за безполицевого і поверхневого способів обробітку ефективність цього фактора знижувалася на 2,10–2,60%. У шарі ґрунту 0–30 см виявлено, що за оранки ефективність утворення гумусу знижується, за безполицевого та поверхневого способів обробітку — зростає на 0,10–1,50%. У шарі ґрунту 0–30 см як без внесення добрив, так і за їх внесення ефективність гумусонакопичення від сівозмінного фактора за безполицевого та поверхневого способів обробітку була вищою порівняно з оранкою відповідно на 0,5–2,10% та 1,40–4,51% (табл. 1).

Ефективність сівозмінного фактора залежно від внесених добрив була високою за безполицевого і поверхневого способів обробітку, найвищою — за поверхневого обробітку в шарі ґрунту 0–30 см (див. табл. 1). Слід зазначити, що гумусонакопичення на оранці незалежно від типу сівозміни відбувалось на нижчому кількісному рівні. Отже, на гумусонакопичення найбільшою мірою впливають: тип сівозміни — удобрення — спосіб обробітку ґрунту.

Динаміка запасу оксиду карбону. У сівозміні А за період 1976–1986 рр. на контролі без внесення добрив у шарі ґрунту 0–20 см накопичення С–СО₂ у гумусі за оранки та поверхневого обробітку було дефіцитним, тоді як за безполицевого обробітку не змінилось. За внесення добрив накопичення оксиду карбону зросло від оранки до поверхневого обробітку у 2,7–3,3 раза і становило

1. Ефективність впливу сізовмінного фактора на накопичення С–СО₂ гумусу залежно від обробітку та удобрення чорнозему типового

Удобрення	Надбавка С–СО ₂ гумусу в сізовміні А від сізовміни В, %	± від	
		оранки (контроль)	НРК
Шар ґрунту 0–20 см			
<i>Оранка</i>			
Без внесення добрив	+14,0	–	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+7,70	–	6,30
<i>Безполицевий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+4,50	–9,50	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+4,40	–9,60	–0,10
<i>Поверхневий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+4,11	–9,90	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+5,10	–8,90	–1,00
Шар ґрунту 0–30 см			
<i>Оранка</i>			
Без внесення добрив	+16,0	–	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+6,50	–	–9,50
<i>Безполицевий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+7,30	–8,70	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+5,50	–1,00	–1,80
<i>Поверхневий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+7,90	–8,10	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+7,50	+1,00	–0,40

близько 213 т/га проти 186 т/га за оранки, або в 1,15 раза більше (табл. 2).

У шарі ґрунту 0–30 см без внесення добрив було встановлено дефіцитність С–СО₂. Так, за оранки та поверхневого обробітку дефіцитність оксиду карбону становила –15–16 т/га, тоді як за безполицевого обробітку — у 15–16 разів меншою. У разі внесення мінеральних добрив запас С–СО₂ у зазначеному шарі виявився найвищим за безполицевого обробітку (+15 т/га), а за оранки та поверхневого обробітку — відповідно в 10 та 2 рази меншим.

За період з 1985 по 2022 р. в шарі ґрунту 0–20 см на контролі без добрив виявлено зростання запасу С–СО₂ незалежно від способу обробітку. За оранки зростання запасу С–СО₂ було найбільшим (+16 т/га), а за безполицевого та поверхневого способів обробітку — меншим відповідно в 1,6 та 3,2 раза. За внесення добрив встановлена закономірність збереглась: за оранки запас С–СО₂ був вищим у 4,5 раза порівняно з безполицевим та поверхневим способами обробітку.

Упродовж 1976–2022 рр. у шарі ґрунту 0–20 см на контролі без добрив зростання

запасу С–СО₂ за оранки було незначним (+1 т/га); найбільшим воно було за безполицевого обробітку — +10 т/га (або щорічно 0,22 т/га), що в 11 разів вище, ніж 0,02 т/га за оранки. За внесення добрив зростання запасу С–СО₂ незалежно від способу обробітку становило 10–12 т/га (або щорічно 0,22–0,26 т/га). У шарі ґрунту 0–30 см без внесення добрив найбільша надбавка С–СО₂ була за безполицевого обробітку (+0,22 т/га), що в 4,4 раза вище порівняно з оранкою. Щорічне зростання запасу С–СО₂ так само було вищим порівняно з оранкою в 4,4 раза, тоді як за поверхневого обробітку виявлено дефіцит запасу С–СО₂ — –3 т/га (або щорічно –0,06 т/га). У разі внесення добрив за безполицевого та поверхневого способів обробітку зростання запасу С–СО₂ становило відповідно 25 т/га та 20 т/га (або щорічно 0,54 т/га та 0,44 т/га), тоді як за оранки цей показник був у 2–2,5 раза меншим.

Загалом за безполицевого та поверхневого способів обробітку в шарі ґрунту 0–20 см запас С–СО₂ становив 210 т/га, тоді як за оранки — 196 т/га (–14 т/га). За внесення добрив запас оксиду карбону становив відповідно 215 т/га та 195 т/га. У шарі

2. Вплив системи обробітку, удобрення та сівозміни на запас С–СО₂ у чорноземі типовому за 1976–2022 рр.

Запас С–СО ₂ за сівозмінами та роками, т/га						Δ = С–А ± С–В у 2022 р., т/га
Сівозміна В (С–В)			Сівозміна А (С–А)			
1976 р.	1985 р.	2022 р.	1976 р.	1985 р.	2022 р.	
Шар ґрунту 0–20 см						
<i>Оранка — без добрив</i>						
192	181	172	195	187	196	+24,0
<i>НРК — Σ250–350 кг д.р.</i>						
180	177,5	181	183	186	195	+14,0
<i>Безполицевий обробіток — без добрив</i>						
199	200	201	198	200	210	+9,00
<i>НРК — Σ250–350 кг д.р.</i>						
198,5	205,5	206	198	207,5	215	+9,00
<i>Поверхневий обробіток — без добрив</i>						
155	182	205	210	205	210	+9,00
<i>НРК — Σ250–350 кг д.р.</i>						
191	185	197	203	208	215	+18,0
Шар ґрунту 0–30 см						
<i>Оранка — без добрив</i>						
280	273	255	291	285	296	+41,0
<i>НРК — Σ250–350 кг д.р.</i>						
271,5	269	277	282	284	295	+18,0
<i>Безполицевий обробіток — без добрив</i>						
297	295	302	296	295	318	+22,0
<i>НРК — Σ250–350 кг д.р.</i>						
297,5	303	308	294	303	325	+17,0
<i>Поверхневий обробіток — без добрив</i>						
245	272	292	315	312	315	+23,0
<i>НРК — Σ250–350 кг д.р.</i>						
282,5	279	294	298	303	316	+22,0

ґрунту 0–30 см на контролі без добрив запас С–СО₂ за оранки досягав 100 т/га, за безполицевого обробітку — 108 т/га, за поверхневого — 102 т/га, за внесення добрив — відповідно 100 т/га, 115 т/га та 104 т/га. У зазначеному шарі запас оксиду карбону за оранки становив відповідно 296 т/га, 318 т/га та 312 т/га (контроль без добрив), за способами обробітку — 295 т/га та 320 т/га (із внесенням добрив).

У сівозміні В у шарі ґрунту 0–20 см на контролі без добрив дефіцитність запасу С–СО₂ становила –17 т/га проти –5 т/га за поверхневого обробітку, що в 3,4 раза менше. За безполицевого обробітку встановлено зростання запасу С–СО₂ (+1 т/га). У разі внесення добрив за безполицевого та поверхневого способів обробітку запас С–СО₂ зріс відповідно на 6 т/га та 4 т/га,

а за оранки надбавки С–СО₂ не виявлено.

Середньорічний дефіцит С–СО₂ становив –0,37 т/га за оранки та –0,11 т/га — за поверхневого обробітку; за безполицевого обробітку щорічне зростання запасу С–СО₂ становило +0,022 т/га, що в 10 разів менше порівняно із сівозміною А. У разі внесення добрив щорічне зростання запасу С–СО₂ за безполицевого та поверхневого способів обробітку становило відповідно +0,13 т/га та +0,09 т/га, що менше порівняно із сівозміною А в 1,69 та 2,9 раза. За оранки зростання запасу С–СО₂ не виявлено.

Отже, вплив сівозмінного фактора на секвестраційну здатність гумусу за безполицевого та поверхневого способів обробітку був менш ефективним порівняно з оранкою, але рівень секвестрації С–СО₂ за оранки відбувався на нижчому кількісному рівні

в сівозміні В. Лише за поверхневого обробітку в шарі ґрунту 0–30 см спостерігалася незначна тенденція до зростання ефективності сівозмінного фактора. Проте ефективність добрив щодо посилення впливу сівозмінного фактора на секвестрацію С–СО₂ була вищою за безполицевого і поверхневого способів обробітку, а найбільшою мірою проявлялася за поверхневого обробітку.

Встановлено, що за безполицевого та поверхневого способів обробітку секвестраційна здатність С–СО₂ гумусу від сівозмінного фактора була нижчою порівняно з оранкою за рахунок вищих її темпів у сівозмінах А і В. Секвестраційна здатність у шарі ґрунту 0–20 см у сівозміні А без внесення добрив відносно сівозміні В була вищою на 24 т/га, а за безполицевого та поверхневого способів обробітку — нижчою у 2,67 раза. У разі внесення добрив за безполицевого обробітку секвестраційна здатність сівозміні А за оранки знизилася до +14 т/га, за безполицевого обробітку становила +9 т/га, тоді як за поверхневого обробітку зросла до +18 т/га (табл. 3).

У шарі ґрунту 0–30 см за оранки без внесення добрив приріст С–СО₂ у сівозміні А становив +41 т/га, що вище порівняно з безполицевим та поверхневим способами обробітку в 1,78–1,86 раза. У разі внесення добрив секвестрація С–СО₂ за оранки знизилась у 2,27 раза, за безполицевого обробітку — в 1,29 раза, тоді як за поверхневого обробітку залишалася найвищою і перевищувала оранку та безполицевий обробіток у 1,22–1,29 раза. Виявлено загальну закономірність зниження секвестраційної здатності за безполицевого та поверхневого способів обробітку на тлі високого вмісту як гумусу, так і запасу С–СО₂ гумусу в обох шарах ґрунту.

Вплив сівозмінного фактора на запас С–СО₂ гумусу був найвищим за оранки — 14–16% без добрив та 6,5–7,0% — за внесення добрив. За безполицевого обробітку сівозмінний фактор меншою мірою впливав на запас С–СО₂ гумусу: 4,5–7,3% без добрив та 4,4–5,5% за внесення добрив. За поверхневого обробітку сівозмінний фактор впливав на зростання запасу С–СО₂ на рівні 4,4–7,9% без добрив та 5,1–7,5% за внесення добрив.

Зниження впливу сівозмінного фактора на запас С–СО₂ гумусу за безполицевого обробітку більшою мірою та поверхневого обробітку меншою мірою пояснюється посиленням секвестрації С–СО₂ гумусу за зазначених видів обробітку в обох сівозмінах, тоді як за оранки в сівозміні В відбувається вища мінералізація гумусу, що знижує секвестраційну здатність чорнозему.

Динаміка запасу лабільного гумусу. За період з 1976 по 1986 р. у шарі ґрунту 0–20 см надбавка С–СО₂ ЛОР на контролі без добрив була від'ємною незалежно від способу обробітку ґрунту: за оранки виявлено дефіцитність ЛОР –2,41 т/га, тоді як за безполицевого обробітку дефіцитність була меншою в 3,44 раза, за поверхневого обробітку — у 2,19 раза. Внесення добрив сприяло зростанню запасу ЛОР за безполицевого обробітку до +1 т/га, за поверхневого — до +0,8 т/га. За оранки запас ЛОР був менший у 10 та 8 разів відносно зазначених способів обробітку (табл. 4).

За період з 1986 по 2022 р. у шарі ґрунту 0–20 см на контролі без добрив формується додатний запас С–СО₂ ЛОР незалежно від способу обробітку ґрунту. Зростання запасу С–СО₂ ЛОР було за оранки (+3 т/га), поверхневого обробітку (+2,20 т/га) та безполицевого (+1,90 т/га). Внесення добрив сприяло накопиченню С–СО₂ ЛОР за оранки і безполицевого обробітку (+1,3–1,5 т/га), що дещо нижче відносно контролю без добрив. За поверхневого обробітку С–СО₂ ЛОР відносно контролю без добрив було меншим в 11 разів, відносно глибокого обробітку — меншим у 6,5–7,5 раза. У шарі ґрунту 20–30 см виявлено зростання запасу С–СО₂ ЛОР за безполицевого обробітку (+1,3–1,4 т/га) на контролі без добрив та +1,4–1,7 т/га на удобреному тлі. За оранки запас С–СО₂ ЛОР без добрив не змінився, за внесення добрив становив 1,1 т/га. У шарі ґрунту 0–30 см зростання запасу С–СО₂ ЛОР становило 3,2–3,5 т/га (без внесення добрив), а на удобреному тлі запас С–СО₂ ЛОР знижувався від оранки (+3,3 т/га) до безполицевого обробітку в 1,32 раза, за поверхневого обробітку — в 1,74 раза.

У період з 1976 по 2022 р. зростання запасу С–СО₂ ЛОР за безполицевого та поверхневого способів обробітку становило

3. Ефективність впливу сівозмінного фактора на накопичення С–СО₂ гумусу залежно від способу обробітку та удобрення чорнозему типового

Удобрення	Надбавка С–СО ₂ гумусу в сівозміні А від сівозміні В, %	± від	
		оранки (контроль)	НРК
Шар ґрунту 0–20 см			
<i>Оранка</i>			
Без внесення добрив	+14,0	–	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+7,70	–	6,30
<i>Безполицевий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+4,50	–9,50	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+4,40	–9,60	–0,10
<i>Поверхневий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+4,11	–9,90	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+5,10	–8,90	–1,00
Шар ґрунту 0–30 см			
<i>Оранка</i>			
Без внесення добрив	+16,0	–	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+6,50	–	–9,50
<i>Безполицевий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+7,30	–8,70	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+5,50	–1,00	–1,80
<i>Поверхневий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+7,90	–8,10	–
НРК — Σ250–350 кг д.р.	+7,50	+1,00	–0,40

відповідно +1,25 т/га та 1,10 т/га, тоді як за оранки — в 1,1 та 1,8 рази. За внесення добрив найбільша надбавка С–СО₂ ЛОР була за безполицевого обробітку (+2,5 т/га), тоді як за оранки надбавка була меншою відповідно в 1,79 та 2,78 рази.

У шарі ґрунту 0–20 см щорічне збагачення С–СО₂ ЛОР становило: за оранки — +0,013 т/га, за безполицевого обробітку — +0,027 т/га, за поверхневого — +0,024 т/га (без внесення добрив). У разі внесення добрив збагачення С–СО₂ ЛОР за оранки було менше у 2,3 рази, за безполицевого обробітку — удвічі за та поверхневого обробітку — в 1,2 рази. У шарі ґрунту 0–30 см збагачення С–СО₂ ЛОР було найефективнішим за глибокого безполицевого обробітку. Запас С–СО₂ ЛОР зріс на +2,50 т/га за контролю без добрив та на 3,50 т/га за удобреного тла. Зростання запасу С–СО₂ ЛОР за оранки та поверхневого обробітку було меншим у 2,1 та 1,47 рази і 1,3 та 1,4 рази відповідно за способами обробітку. Встановлено, що запас С–СО₂ ЛОР за оранки у 2022 р. становив 20,0–20,5 т/га, за безполицевого обробітку — 21,0–22,5 т/га,

за поверхневого — 21,7–22,5 т/га. Щорічне зростання С–СО₂ ЛОР за оранки становило 0,026–0,059 т/га, за безполицевого обробітку — 0,54–0,077 т/га, за поверхневого — 0,037–0,054 т/га, що свідчить про ефективніше утворення С–СО₂ ЛОР за безполицевого та поверхневого способів обробітку відповідно в 1,11–1,42 та 2,96 рази.

Співвідношення С–СО₂ загального гумусу до С–СО₂ ЛОР у сівозміні А незалежно від удобрення і способу обробітку у шарі ґрунту 0–20 см на контролі без добрив становило 1,42–1,53 до 1, за удобрення — 14,3–15,1 до 1 при зростанні С–СО₂ ЛОР за безполицевого та поверхневого способів обробітку, у шарі ґрунту 0–30 см на контролі без добрив — 14,9–15,9 до 1 при зростанні С–СО₂ ЛОР за поверхневого обробітку. Найбільш консервативним є співвідношення за безполицевого обробітку (16,6 до 1), коли утворюється найменше С–СО₂ ЛОР. У шарі ґрунту 0–30 см на контролі без добрив співвідношення С–СО₂ гумусу до С–СО₂ ЛОР становило 14,4–15,1 до 1, за внесення добрив — 14,2–14,6 до 1, що оптимально незалежно від способу обробітку і удобрення.

4. Вплив способу обробітку, удобрення та сівозміни на запас С–СО₂ легкомінералізованої органічної речовини в чорноземі типовому за 1976–2022 рр.

Запас С–СО ₂ ЛОР за сівозмінами та роками, т/га						Δ = С–А ± С–В у 2022 р., т/га
Сівозміна В (С–В)			Сівозміна А (С–А)			
1976 р.	1985 р.	2022 р.	1976 р.	1985 р.	2022 р.	
Шар ґрунту 0–20 см						
<i>Оранка — без добрив</i>						
12,8	11,6	10,5	12	10,5	12,0	+1,50
NPK — Σ250–350 кг д.р.						
11,50	10,75	11,1	11,3	11,8	12,9	+1,80
<i>Безполицевий обробіток — без добрив</i>						
12,5	12,1	12,2	13,7	11,8	14,7	+2,50
NPK — Σ250–350 кг д.р.						
12,2	13,25	14,2	12,55	12,75	14,9	+0,70
<i>Поверхневий обробіток — без добрив</i>						
11,1	10,1	12,5	13,7	12,6	14,8	+2,30
NPK — Σ250–350 кг д.р.						
11,2	11,55	13,8	14,2	14,55	15,5	+1,70
Шар ґрунту 0–30 см						
<i>Оранка — без добрив</i>						
18,1	16,5	14,5	16,9	16,5	17,5	+3,00
NPK — Σ250–350 кг д.р.						
16,8	16,0	17,0	17,0	18,0	21,0	+3,00
<i>Безполицевий обробіток — без добрив</i>						
18,5	18,1	18,6	20,4	17,7	21,0	+2,40
NPK — Σ250–350 кг д.р.						
18,1	18,25	21,0	19,2	17,75	21,3	+0,30
<i>Поверхневий обробіток — без добрив</i>						
16,5	15,2	17,1	20,4	18,1	21,8	+4,70
NPK — Σ250–350 кг д.р.						
16,45	16,6	18,1	20,55	20,7	22,5	+4,40

У сівозміні В за період 1976–1986 рр. надбавка С–СО₂ ЛОР у шарі ґрунту 0–20 см без внесення добрив була дефіцитною за оранки та поверхневого обробітку (–1,1–1,8 т/га), тоді як на удобреному тлі за безполицевого та поверхневого способів обробітку надбавка була додатною (+1,0–2,5 т/га), а за оранки — дефіцитною (–1,0 т/га). У шарі ґрунту 0–30 см без внесення добрив дефіцитність С–СО₂ ЛОР становила 1,2–1,8 т/га за оранки та поверхневого обробітку, а за безполицевого обробітку була у 2,4–3,6 раза меншою. За внесення добрив надбавка С–СО₂ ЛОР була додатною за поверхневого та безполицевого способів обробітку, тоді як за оранки було виявлено дефіцитність С–СО₂ ЛОР, що був меншим відносно контролю без добрив у 2,25 раза.

У період з 1986 по 2022 р. у шарі ґрунту 0–20 см без внесення добрив найвищою

додатність С–СО₂ ЛОР була за поверхневого обробітку (+3 т/га), тоді як за оранки було виявлено дефіцитність — –0,7 т/га. За внесення добрив надбавка С–СО₂ ЛОР становила 0,6 т/га за оранки, за безполицевого обробітку була в 16,5 раза вищою, за поверхневого — в 1,67 раза вищою.

Упродовж 1976–2022 рр. у шарі ґрунту 0–20 см на контролі без добрив дефіцит С–СО₂ ЛОР становив –2,5 т/га (або щорічно –0,054 т/га), за поверхневого обробітку — +1,30 т/га (або щорічно +0,028 т/га). За внесення добрив надбавка С–СО₂ ЛОР за безполицевого та поверхневого способів обробітку становила 4,0–4,3 т/га (або щорічно 0,087–0,09 т/га).

У шарі ґрунту 0–30 см без внесення добрив за оранки було виявлено дефіцитність — –3,5 т/га, тоді як за безполицевого та поверхневого способів обробітку

встановлено додатність ЛОР на рівні запасу С–СО₂ — +0,2–1,0 т/га. За внесення добрив незалежно від системи обробітку виявлено додатність С–СО₂ ЛОР. За оранки запас С–СО₂ становив +0,3 т/га, за безполицевого і поверхневого способів обробітку запас С–СО₂ ЛОР був відповідно у 4,67 та 13,3 раза більшим. Щорічна надбавка С–СО₂ ЛОР без внесення добрив за безполицевого та поверхневого способів обробітку становила відповідно +0,0043 т/га і 0,0217 т/га, за внесення добрив — зростала в 4 рази за поверхневого обробітку. За оранки без добрив виявлено дефіцитність С–СО₂ ЛОР (щорічно –0,083 т/га), тоді як за внесення добрив надбавка становила 0,0065 т/га, що нижче в 4,6–13,3 раза порівняно з безполицевим і поверхневим способами обробітку. У шарі ґрунту 0–20 см на контролі без внесення добрив співвідношення С–СО₂ гумусу до С–СО₂ ЛОР за оранки та безполицевого обробітку становило 16,7–16,9 до 1, тоді як за поверхневого обробітку було ширшим, досягаючи 15,7 до 1. За внесення добрив за оранки співвідношення збереглося як і на контролі без добрив, а за безполицевого та

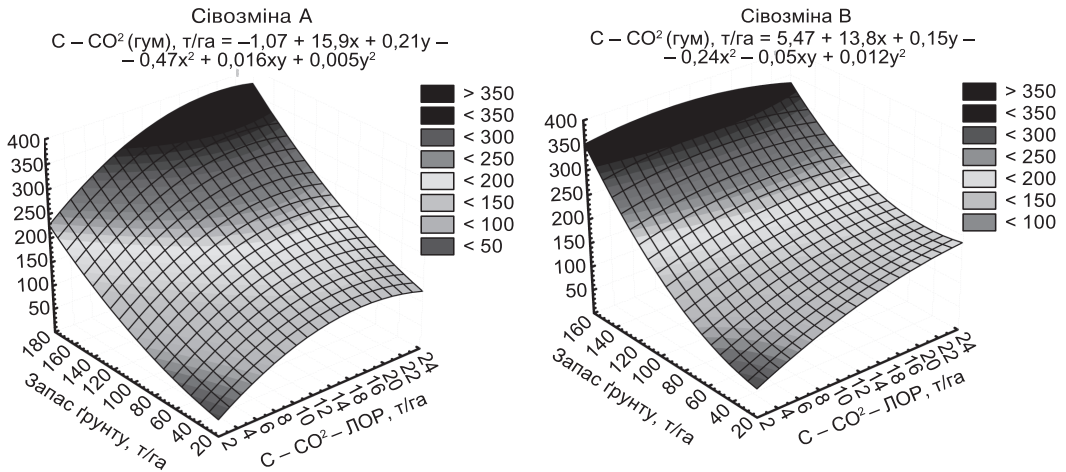
поверхневого способів обробітку було ширшим — 12,9–13,2 до 1.

У шарі ґрунту 0–30 см на контролі без добрив за оранки співвідношення С–СО₂ складових гумусу звузилося до 18,9 до 1, тоді як за безполицевого та поверхневого способів обробітку становило 17,1–17,2 до 1. Внесення добрив сприяло розширенню співвідношення С–СО₂ гумусу до С–СО₂ ЛОР за безполицевого та поверхневого способів обробітку відповідно до 15,9 до 1 та 14,3 до 1, за оранки співвідношення становило 16,2 до 1. Порівняно із сівозміною А співвідношення в сівозміні В було ширшим і в шарі ґрунту 0–30 см у середньому на контролі без добрив та удобреному тлі було нижчим за 15 до 1. Це засвідчує, що в сівозміні А утворюється більше частин гумусу з С–СО₂ ЛОР, що сприяє прояву вищої родючості чорнозему типового.

Встановлено, що запас С–СО₂ ЛОР у шарі ґрунту 0–20 см за сівозмінного фактора за оранки без внесення добрив у сівозміні А відносно сівозміни В зростав на +1,5 т/га, або на 14,3%, за безполицевого обробітку — на 20%, за поверхневого — на 18,4%.

5. Ефективність впливу сівозмінного фактора на секвестраційну здатність ЛОР гумусу залежно від способу обробітку та удобрення чорнозему типового

Удобрення	Надбавка С–СО ₂ гумусу в сівозміні А від сівозміни В, %	± від	
		оранки (контроль)	НПК
Шар ґрунту 0–20 см			
<i>Оранка</i>			
Без внесення добрив	+1,50	–	–
НПК — Σ250–350 кг д.р.	+1,80	–	+3,00
<i>Безполицевий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+2,50	+6,00	–
НПК — Σ250–350 кг д.р.	+0,70	–11,0	–15,1
<i>Поверхневий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+2,30	+4,40	–
НПК — Σ250–350 кг д.р.	+1,70	–4,40	–6,40
Шар ґрунту 0–30 см			
<i>Оранка</i>			
Без внесення добрив	+3,00	–	–
НПК — Σ250–350 кг д.р.	+3,00	–	–3,10
<i>Безполицевий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+2,40	–7,20	–
НПК — Σ250–350 кг д.р.	+0,30	–3,30	+1,10
<i>Поверхневий обробіток</i>			
Без внесення добрив	+4,70	+12,9	–
НПК — Σ250–350 кг д.р.	+4,40	+7,00	–9,00



Залежність секвестраційної здатності ґрунту від типу сівозміни за період досліджень 1976–2022 рр.

За внесених добрив запас $C - CO_2$ ЛОР за оранки зріс на 16,2%, за безполицевого обробітку — на 4,9%, за поверхневого — на 12,3% за вищих абсолютних значень запасу $C - CO_2$ ЛОР.

У шарі ґрунту 0–30 см на контролі без добрив запас $C - CO_2$ ЛОР зріс на 21,6%, за безполицевого обробітку — на 12,9%, за поверхневого — на 27,5%. За внесення добрив запас $C - CO_2$ ЛОР зріс на 17,7%, за безполицевого обробітку — на 14,3%, за поверхневого — на 24,4%, що вище порівняно з глибокими способами обробітку відповідно в 1,38 та 1,71 раза. Найвищим приріст запасу $C - CO_2$ ЛОР був за поверхневого обробітку, тоді як за безполицевого обробітку за вищого запасу $C - CO_2$ ЛОР у сівозміні В накопичення лабільного гумусу було менш вираженим на тлі більших запасів $C - CO_2$ ЛОР.

Від сівозмінного фактора найменше зростання було за безполицевого обробітку, що свідчить про високу ефективність впливу безполицевого обробітку на формування запасу $C - CO_2$ ЛОР порівняно з оранкою та поверхневим обробітком незалежно від типу сівозміни.

У досліджуваних сівозмінах А і В у шарі ґрунту 0–20 см утворення $C - CO_2$ ЛОР за безполицевого і поверхневого способів обробітку було достовірно вищим порівняно з оранкою, а тому в шарі ґрунту 0–20 см без внесення добрив вплив сівозмінного фактора на запас $C - CO_2$ ЛОР був вищим. У разі

внесення добрив за безполицевого обробітку ефективність впливу сівозмінного фактора на запас ЛОР знижувалась, а за поверхневого обробітку зростала порівняно з оранкою та безполицевим обробітком. Зростання від поверхневого обробітку становило 7,0–12,9%. Сівозмінний фактор за внесених добрив найефективнішим був за оранки — +3,0%. За безполицевого і поверхневого способів обробітку сівозмінний фактор був менш ефективним, але процеси утворення ЛОР були на достовірно вищому рівні (табл. 5).

Залежність секвестраційної здатності (за накопиченням $C - CO_2$ гумусу) від запасу гумусу і $C - CO_2$ ЛОР показано на рисунку. На просторових графіках видно, що площина зміни запасу $C - CO_2$ гумусу в сівозміні А і В має різний характер: у сівозміні А площина випукло зростаюча, а в сівозміні В — вигнуто площинно зростаюча. Зростання секвестраційної здатності в сівозміні А відбувається за парабоїдально площинним характером, тоді як у сівозміні В — площинно паралельним. Встановлено, що в сівозміні А на одиницю зростання $C - CO_2$ припадає близько 15,5 т/га запасу загального гумусу, тоді як у сівозміні В на зростання запасу оксиду карбону припадає зростання запасу загального гумусу менше в 1,2 раза. Відповідно зростання секвестраційної здатності залежно від запасу $C - CO_2$ ЛОР у сівозміні А було вищим порівняно із сівозміною В.

Висновки

Чорнозemi типові центральної частини Лісостепу України мають високу секвестраційну здатність в агроценозах короткоротаційних сівозмін, яка посилюється на 15–20% за систематичного застосування низьковуглецевих технологій обробітку: безпліцевого та поверхневого способів обробітку порівняно з оранкою. За органо-мінеральної системи удобрення відбувається посилення секвестраційної здатності чорнозему типового в шарі ґрунту 0–20 см за безпліцевого обробітку та

має тенденцію до зниження за поверхневого обробітку порівняно з оранкою.

Взаємодія факторів запасу гумусу та C–CO₂ ЛОР у сівозміні А була ефективною в 3,12 рази порівняно із сівозміною В, що свідчить про визначальне значення типу сівозміни у формуванні секвестраційної здатності чорнозему. Система удобрення задає темпи зростання секвестрації, а спосіб обробітку — характер прояву накопичення оксиду карбону в чорноземі типовому агроценозу.

Demydenko O.

Cherkasy State Agricultural Experimental Station of the National Research Center «Institute of Agriculture of NAAS»; 13 Dokuchayeva Str., vil. Kholodnianske, Smeliansky district, Cherkasy oblast, 20731, Ukraine; e-mail: agrogumus@ukr.net; ORCID: 0000-0002-5334-1154

Carbon-sequestration capacity of typical chernozem in agroecosystems

Goal. To assess the soil sequestration capabilities of typical chernozem under long-term (45 years) use of low-carbon soil-protective methods of cultivation and organo-mineral fertilizer systems compared to plowing in the agroecosystems of the central part of the Forest-Steppe of Ukraine. **Methods.** Field — to determine changes in the quantitative and qualitative state of humus in crop rotations under different fertilizer and cultivation systems, laboratory-analytical — to determine the content of total and labile organic matter, mathematical-statistical — to assess the reliability of the data obtained. **Results.** The influence of the type of crop rotation on the growth of humus content depends on the fertilizer system and the method of cultivation: in the 0–20 cm soil layer without fertilizer application, the humus increase in crop rotation A relative to crop rotation B was +0.17%, while in the case of no-shelf and surface cultivation methods, the increase was smaller 1.7 and 2.1 times. In the case of fertilizing, the addition of humus for plowing and tillage was +0.14–0.15%, and for surface cultivation, it was 1.33–1.42 times higher. In the researched crop rotations A and B in the 0–20 cm soil layer,

the formation of C–CO₂ LOR under shelfless and surface cultivation was significantly higher compared to plowing, and therefore in the 0–20 cm soil layer without fertilizer application, the effect of the crop rotation factor on the stock of C–CO₂ SOC was higher. In the case of applying fertilizers under no-tillage, the effectiveness of the crop rotation factor on the stock of SOC decreased, and under surface tillage, it increased compared to plowing and tillage. **Conclusions.** Typical chernozems of the central part of the Forest-Steppe of Ukraine have a high sequestration capacity in agroecosystems of short crop rotations, which increases by 15–20% with the systematic use of low-carbon cultivation technologies: shelfless and surface cultivation methods compared to plowing. Under the organo-mineral fertilizer system, the sequestration capacity of chernozem in the 0–20 cm soil layer increases under plowless tillage and tends to decrease under surface tillage compared to plowing. The interaction of the factors of humus stock and C–CO₂ SOC in crop rotation A was 3.12 times more effective compared to crop rotation B, which testifies to the determining importance of the type of crop rotation in the formation of the sequestration capacity of chernozem. The fertilizer system determines the rate of growth of sequestration, and the method of cultivation determines the nature of the manifestation of carbon monoxide accumulation in the chernozem of the agroecosystem.

Key words: humus stock, chernozem, shelfless cultivation, plowing, correlation, C–CO₂ SOC, sequestration.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202306-01>

Бібліографія

1. Петриченко В.Ф., Балюк С.А., Носко Б.С. Підвищення стійкості землеробства в умовах глобального потепління. *Вісник аграрної науки*. 2013. № 9. С. 5–12.

2. 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. doi:

10.31073/agrovisnyk201709-02

3. Позняк С.П., Гнатишина М.А. Глобальна ініціатива «4PER 1000» та можливості її реалізації в Україні. *Укр. геогр. журн.* 2021. № 2(14). С. 11–19. doi: 10.15407/ugz2021.02.011]

4. Giardina C.P., Litton C.M., Crow S.E., Asner G.P. Warming-related increases in soil CO₂ efflux are explained by increased below-ground carbon flux. *Nature Climate Change*. 2014. V. 4. P. 822–827.

5. Jong E., Schappert H.J.V., Macdonald K.B. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate. *Can. J. soil sci.* 1974. V. 54. № 3. P. 299–307.

6. Singh J.S., Gupta S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Bot. Rev.* 1977. V. 43. № 4. P. 449–528.

7. Buyanovsky C.A., Wagner C.H. Annual cycles of carbon dioxide level in soil air. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1983. V. 47. № 6. P. 1139–1145.

8. Макаров Б.Н. Газовый режим почвы, 1988. 104 с.

9. Kurganova I.N., Kudayarov V.N., Lopes De Gerenyu V.O. Updated estimate of carbon balance on Russian territory. *Tellus, series B: chemical and physical meteorology*. 2010. V. 62. № 5. P. 497–505.

10. Lecki N.A., Creed I.F. Forest soil CO₂ efflux models improved by incorporating topographic controls on carbon content and sorption capacity of soils. *Biogeochemistry*. 2016. V. 129. P. 307–323.

11. Giardina C.P., Litton C.M., Crow S.E., Asner G.P. Warming-related increases in soil CO₂ efflux are explained by increased below-ground carbon flux. *Nature Climate Change*. 2014. V. 4. P. 822–827.

12. Qiao N., Schaefer D., Blagodatskaya E. et al. Labile carbon retention compensates for CO₂ released by priming in forest soils. *Global Change Biology*. 2013; 20(6):1943–1954. doi: 10.1111/gcb.12458

13. Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W. et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013; 164:80–99. doi: 10.1016/j.agee.2012.10.001

14. Riley W.J., Maggi F., Kleber M. et al. Long residence times of rapidly decomposable soil organic matter: application of a multi-phase, multicomponent, and vertically resolved model (BAMS1) to soil carbon dynamics. *Geosci. Model*

Dev. 2014; 7:1335–1355. doi: 10.5194/gmd-7-1335-2014

15. Paterson E., Sim A. Soil-specific response functions of organic matter mineralization to the availability of labile carbon. *Global Change Biology*. 2013. V. 19. № 5. P. 1562–1571.

16. Демиденко О.В., Шаповал І.С., Тонха О.Л. та ін. Гумусний стан чорнозему типового за різних способів обробітки в агроценозах Лівобережного Лісостепу. *Вісник аграрної науки*. 2014. № 4. С. 58–63.

17. Демиденко О.В., Тонха О.Л., Величко В.А. Про мінливість запасів органічного вуглецю та азоту за різних способів обробітки чорноземів. *Зерно і хліб*. 2015. № 2 (78). С. 16–18 (50% авторства: проведення експериментальних досліджень, підготовка статті до друку).

18. Тонха О.Л., Балаєв А.Д., Вітвіцький С.В. Біологічна активність і гумусний стан чорноземів Лісостепу і Степу України: монографія. Київ: НУБіП України, 2017. 354 с.

19. Балаєв А.Д., Тонха О.Л., Піковська О.В., Демиденко О.В. Лабільні органічні речовини як основа родючості чорноземів. Київ: НУБіП України. 2019. 144 с.

20. Bardgett R.D., Mommer L., De Vries F.T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends ecol. evol.* 2014. № 29. P. 692–699. doi: 10.1016/j.tree.2014.10.006

21. Bisen N., Rahangdale C.P. Crop residues management option for sustainable soil health in rise – wheat system: a review. *Intern. J. of Chemic. Stud.* 2017. N 5. P. 1038–1042. https://www.researchgate.net/publication/318959582_residues_management_option_for_sustainable_soil_health_in_rise-wheat_sustem_a_review (accessed 05.12.2019).

22. Hirte J., Leifeld J., Abiven S. et al. Overestimation of crop root biomass in field experiments due to extraneous organic matter. *Front Plant Sci.* 2017. № 8. P. 284. doi: 10.3389/fpls.2017.00284

23. Philippot L., Raaijmakers J.M., Lemanceau P., Van der Putten W.H. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nat. Rev. Microbiol.* 2013. № 11. P. 789–799. doi: 10.1038/nrmicro3109

24. Torma S., Vilček J., Lošak T. et al. Residual plant nutrients in crop residues — an important resource. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Sci.* 2017. P. 358–366. doi: 10.1080/09064710.2017.1406134