



Землеробство, грунтознавство, агрохімія

УДК 631.43
© 2025

ВУГЛЕЦЕВИЙ КОНТРОЛЬ МІНЕРАЛІЗАЦІЙНО- ІММОБІЛІЗАЦІЙНОГО КОЛООБІГУ АЗОТУ В АГРОЦЕНОЗАХ ЛІСОСТЕПУ

О.В. Демиденко

доктор сільськогосподарських наук

Черкаська державна сільськогосподарська дослідна станція

Національного наукового центру «Інститут землеробства

Національної академії аграрних наук України»

вул. Докучаєва, 13, с. Холодниське Смілянського р-ну Черкаської обл., 29731, Україна

e-mail: agrogumys@ukr.net

ORCID: 0000-0002-5334-1154

Надійшла 11.03.2025

Мета. Встановити нормативні параметри комплексної моделі колообігу азоту та вуглецю за застосування різних типів сівозмін, використання альтернативних видів органічних добрив, виконання різних способів обробітку ґрунту. Виявити основні закономірності спрямування азотно-вуглецевого колообігу, природу та механізми відновлення природного ґрунтоутворення за застосування ґрунтовідновних адаптивних заходів в агроценозах сучасної кліматичної системи Лісостепу України (1976 – 2023 рр.). **Методи.** Польовий (для відбору зразків ґрунту, щоб визначити органічні речовини), лабораторний (для визначення вмісту органічних речовин у ґрунті), математико-статистичний та порівняльно-розрахунковий (для обґрунтування достовірності розроблених моделей азотно-вуглецевого колообігу за різних агротехнічних впливів). **Результати.** Вид органічного добрива впливає на емісію CO₂ в атмосферу залежно від мінералізації рослинних решток: за використання гною типовий інтервал викидів становить 25 – 85 т, тоді як за побічної продукції їх обсяги зростають до 80 – 160 т, що супроводжується посиленням виносом азоту порівняно з його надходженням в агроценози, у першому випадку, і, навпаки, лінійно зростаючим надходженням загального азоту порівняно з його виносом у процесі мінералізації побічної продукції, у другому випадку. Вплив типу агроценозу (сівозміни) на азотно-вуглецевий колообіг зводиться до того, що завдяки насиченню сівозмін культурами з високим виходом побічної продукції (сівозміна з горохом) забезпечується лінійне збільшення

надходження азоту в типовому інтервалі зростання продуктивності у процесі мінералізації побічної продукції та вивільнення азоту з неї. Підвищена емісія CO_2 в останньому разі супроводжується зростанням вуглецевого балансу в ґрунті та продуктивності агроценозу. Вплив способу обробітку чорнозему на азотно-вуглецевий колообіг зводиться до того, що за безполицевого обробітку, незалежно від виду органічного добрива та типу агроценозу, в інтервалі зростання продуктивності вуглецевий баланс у ґрунті додатньо-зростаючий порівняно з оранкою, де характер наростання дефіцитності підпорядкований параболічності. Інтервал емісії CO_2 в атмосферу у процесі мінералізації за оранки був більш широким порівняно з безполицевим обробітком, що свідчить про посилення мінералізаційних процесів у ґрунті за однотипності азотно-вуглецевого колообігу, що визначає обробіток ґрунту як підпорядковану регуляторну підсистему типу сівозміни й виду органічних добрив у загальному обігу. **Висновок.** Залишення та використання як органічного добрива подрібненої побічної продукції рослинництва з достатньою азотною компенсацією мінеральними добривами, яка загортається у поверхневий шар чорнозему за систематичного безполицевого обробітку, моделюють природний характер азотно-вуглецевого колообігу в агроценозах короткоротаційних сівозмін різного типу, а відтворення природної моделі ґрунтоутворення в агроценозах, на рівні з мікробіологічною активністю, забезпечується активізацією фотосинтетичної активності сільськогосподарських культур завдяки відтворенню стокових механізмів вуглецю за зростання вмісту CO_2 в атмосфері й теплового ресурсу в агроекосистемах загалом, що має бути базовою моделлю розширеного відтворення родючості чорноземів типових Лісостепу України.

Ключові слова: баланс азоту, гній, обробіток ґрунту, оксид карбону, оранка, побічна продукція, сівозміна, чорнозем.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202505-02>

Колообіги азоту та вуглецю є основними біогеохімічними циклами, які відбуваються в наземних еко- та агро-екосистемах [Л.Л. Голубятніков, 2013; Б.М. Когут, В.А. Семенов, Н.Н. Донченко, 2021]. До 55% асимільованого в рослинних тканинах вуглецю задіяно в метаболізмі азоту, а вуглець у складі органічних сполук і CO_2 є одним з головних природних регуляторів життєдіяльності ґрунтових мікроорганізмів [В.М. Семенов, 2020; В.Г. Сичов, А.Н. Наліухін, 2021; М.Н. Літов, 2024]. Дослідження останніх років засвідчують, що загальноприйнятим є включення вуглецевого циклу

агро- та екосистем до кліматичних моделей, а дефіцит мінеральних форм ґрунтового азоту негативно впливає на розвиток рослинних організмів, знижуючи депонування вуглецю з атмосфери [1–5]. Вилучення азотного циклу з розгляду наслідків змін клімату призводить до неповного оцінювання відгуку еко- та агроекосистем, де мінеральні форми ґрунтового азоту є лімітуючим фактором для розвитку наземної рослинності [6–8]. Чим сильніший зв'язок продуктивності природних ценозів і агроценозів з кількістю засвоєного азоту в ґрунті, тим швидше поглинаються

викиди CO_2 рослинними угрупованнями, а взаємодія між азотним і вуглецевим циклами істотно впливає на зміну вмісту азоту й вуглецю в рослинах, шарі детриту та органічній речовині ґрунту [9–11].

Потепління клімату веде до зменшення депонування CO_2 в еко- та агроєкосистемах, що пов'язано зі зростанням інтенсивності як продуктивного, так і деструктивного процесів. За надмірного прояву цих процесів інтенсивність ґрунтового дихання починає перевищувати швидкість акумуляції CO_2 з атмосфери рослинами, а еко- та агроєкосистеми перетворюються на джерела викидів вуглекислоти й закису азоту в атмосферу [11–13].

Урахування азотного циклу пов'язане зі зростанням вмісту вуглецю в наземній фітомасі за підвищення температури повітря, що зумовлене зростанням вмісту CO_2 в атмосфері та викликане посиленням мінералізаційних процесів у ґрунті, результатом яких є накопичення доступного мінерального азоту в ґрунті, що стимулює продуктивність еко- та агроєкосистем і посилює продуктивність фотосинтезу [9, 14–17].

Медіатором вуглецево-азотних взаємодій в еко- та агросистемах є мікробна біомаса, драйверами — кількість субстрату й його доступність мікроорганізмам за оптимального співвідношення $\text{C} : \text{N}$ у субстраті та мікробній біомасі. Безперервний процес росту й відмирання мікробної біомаси забезпечує постійне надходження органічного азоту до ґрунтової органічної речовини у вигляді лабільних компонентів, які швидко мінералізуються, є стійкими до розкладання і стабілізуються в гумусі [18, 19].

Установлено, що розкладання органічних субстратів зі співвідношенням $\text{C} : \text{N} < 20$ супроводжується нетто-мінералізацією, а із $\text{C} : \text{N} > 30$ — імобілізацією мінерального азоту, який міститься у ґрунті. В уточненій моделі мінералізаційно-імобілізаційної оборотності азоту частку мінералізованого з органічного

матеріалу азоту встановлюють за співвідношенням $\text{C} : \text{N}$ у мікробній біомасі та субстраті, що розкладається. Критичне співвідношення $\text{C} : \text{N}$ у рослинних рештках, за якого починається переважання імобілізації азоту в ґрунті, перевищує 18 [20–22]. Швидкість і кумулятивна величина емісії CO_2 характеризують гро- і нетто-потоки ґрунтового азоту лише за відсутності свіжих рослинних решток, які видозмінюють співвідношення процесів мінералізації та імобілізації [23–25].

Мета досліджень. Встановити нормативні параметри комплексної моделі колообігу азоту й вуглецю за застосування різних типів сівозмін і використання альтернативних видів органічних добрив, виконання різних способів обробітку ґрунту. Виявити основні закономірності спрямування азотно-вуглецевого колообігу, природу та механізми відновлення природного ґрунтоутворення за застосування ґрунтовідновних адаптивних заходів в агроценозах сучасної кліматичної системи Лісостепу України.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили в умовах центральної частини лівобережного Лісостепу України в довгостроковому (понад 46 років) стаціонарному досліді Драбівського дослідного поля Черкаської державної сільськогосподарської дослідної станції ННЦ «ІЗ НААН» у 1976–2023 рр. Ґрунт — чорнозем типовий грубопилувато-легкосуглинковий з вмістом: гумусу — 3,8–4,2%, рухомих сполук фосфору — 120–140 мг/кг ґрунту, рухомих сполук калію — 80–100 мг/кг ґрунту, $\text{pH}_{\text{вод.}}$ 6,8–7,0. Розмір посівної ділянки — 162 м², облікової — 100 м². У досліді вивчалися два типи 5-пільних сівозмін: А: горох — пшениця озима — буряк цукровий — кукурудза на зерно — кукурудза на зерно (сівозміна з горохом: зернові — до 60%, технічні — до 20, зернобобові — до 20%); В: багаторічні трави — пшениця озима — буряк цукровий — кукурудза — ячмінь + багаторічні трави (сівозміна з травами:

зернові — до 60%, технічні — до 20, багаторічні трави — до 20%. Система удобрення: 7,0 т/га побічної продукції; $N_{62}P_{66}K_{82}$ (подвійна доза — 2 НРК) на 1 га сівозмінної площі. До 1999 р. вносили 6 т/га ґною, а з 2000 р. по 2022 р. — 7 т/га побічної продукції. Способи основного обробітку: різноглибинна оранка (22–25 см) під усі культури, безполицевий обробіток (22–25 см) під усі культури. В обох дослідях — 3-разове повторення. Для дослідження змін агрохімічних, фізико-хімічних та агрофізичних показників при вивченні поживного режиму, гумусного та агрофізичного станів відбирали змішані зразки згідно з ДСТУ 7030:2009 (ГСТУ 46.001-96). Уміст загального гумусу визначали за Тюріним у модифікації Сімакова (ДСТУ 4289:2004). Баланс органічної речовини гумусу розраховували за посиланням [26].

Накопичення кількості оксиду карбону ($C_{\text{орг.}}-CO_2$) розраховували за:

- урожайністю культур у різноротаційних сівозмінах [27];
- виходом побічної продукції, післяжнивних решток і коренів культур у сівозмінах згідно з рівняннями регресії [28, 29], наведеними для низького й високого рівнів урожайності, оскільки кількість рослинних залишків не завжди залежить від збільшення врожаю;
- виходом сухої речовини з отриманої маси [28];
- умістом вуглецю в масі побічної продукції, стерні й коренях з перерахунком в оксид карбону ($C_{\text{орг.}}-CO_2$) (коефіцієнт 3,7);
- кількістю гумусу (C_r), утвореного як резервуар вуглецю залежно від рівня надходження в ґрунт соломи, побічної продукції та маси кореневої системи рослин [29].

Запропонований підхід до розрахунків щодо введення в обіг післяжнивних решток і коренів рослин міститься в керівних принципах міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) [30, 31]. На відміну від інших підходів [32], цей

метод ураховує надходження складових надземних і підземних залишків у ґрунт.

Згідно з методикою А.М. Лікова [1976], яка аналізується в роботі О.В. Харченко, В.І. Прасол, Н.К. Сенченко та ін. [33], розраховано баланс оксиду карбону з урахуванням виносу азоту в процесі мінералізації гумусу й того, що 50% азоту в гумусі йде на формування врожаю. Баланс органічного вуглецю розраховано:

$$B_{Cr} = [(A \times N_a + B \times N_b + C \times N_c + D \times N_d) - (C \times N_c \times K_1 + D \times N_d \times K_2 + N_{\text{мд}} \times K_2 + N_{\text{од}} \times K_3 + N_f)] \times K_p \times K_t \times 20, \text{ де}$$

A — врожайність основної культури, т/га; B — маса побічної продукції, т/га; C — маса поверхневих решток, т/га; D — маса кореневих решток, т/га; N_a, N_b, N_c, N_d — уміст азоту у відповідних частинах урожаю, %; N_f — азот фітомаси за азотфіксації, т/га; K_1, K_2, K_3 — коефіцієнт використання азоту з органічних і мінеральних добрив, рослинних решток; K_p, K_t — коефіцієнти впливу гранулометричного складу на технології та мінералізацію гумусу; 20 — коефіцієнт переходу азоту в гумус; $N_{\text{мд}}$ — азот з мінеральних добрив, $N_{\text{од}}$ — азот з органічних добрив.

Узагальнення матеріалів і розрахунки результатів досліджень проводили за «Методом дисперсійного аналізу» та допомогою програми Statistica 10.

Результати досліджень. На основі проведених розрахунків встановлено нормативні опосередковані параметри азотно-вуглецевого колообігу в короткоротаційних сівозмінах для центральної частини Лісостепової зони.

У сівозміні з горохом у разі використання побічної продукції винос N урожаю зростає на 120%, а загальний винос N з агроценозу зменшується на 180 кг (36,0 кг/га) відносно середнього. Інтервальний винос N за використання побічної продукції зменшується, а за внесення ґною збільшується за типовим інтервальним розмахом в 1,68 раза

(табл. 1). Надходження N з побічною продукцією за використання гною зменшується у 2,02 раза, а за типовим розмахом — у 3 рази. Загальне надходження N збільшується в 1,42 раза, а за типовим розмахом — в 1,27 раза (див. табл. 1).

Баланс N в агроценозі за використання побічної продукції набув додатного значення (+97,8 кг), тоді як за внесення гною баланс N був від'ємним (-345 кг), а за типовим розмахом — +32,6 кг і -55 кг відповідно. Інтенсивність балансу (I_6) N становила, відповідно, 109 і 66,7% у разі зниження типового розмаху в 1,62 раза за використання побічної продукції. У сівозміні з багаторічними травами за використання побічної продукції винос N з урожаєм

був вищим, ніж за внесення гною, на 62 кг, або 113%, а загальний винос азоту був нижчим на 129 кг (25,8 кг/га).

Надходження N з побічної продукції в сівозміні з травами (див. табл. 1) було нижчим порівняно із сівозміною з горохом на 116 кг і на 36 кг — за використання гною та побічної продукції, але в сівозміні за використання гною надходження N знижувалося на 183 кг (36,6 кг/га), а за типовим розмахом — в 1,58 раза. Загальне надходження N в сівозміні з травами за використання побічної продукції знижувалося в 1,14 раза та зростало за використання гною в 1,13 раза порівняно із сівозміною з горохом. У сівозміні з горохом

1. Вплив типу сівозміни та виду органічних добрив на нормовані параметри азотно-вуглецевого обігу в агроценозах Лісостепу України

Параметри колообігу	Сівозміна з горохом				Сівозміна з травами			
	Гній, 6 т/га		Побічна продукція, 6 т/га		Гній, 6 т/га		Побічна продукція, 6 т/га	
	X_{cp}^{**}	Інтервал значень	X_{cp}^{**}	Інтервал значень	X_{cp}^{**}	Інтервал значень	X_{cp}^{**}	Інтервал значень
Вихід к.о.*, т	29,0	24,8–33,3	33,0	25,3–41,0	29,3	25,8–32,4	30,7	27,8–35,3
Винос азоту врожаєм разом, кг	601	501–721	718	551–895	502	356–644	564	370–718
Загальний винос азоту фітосою, кг	92,5	634–1204	745	563–921	717	450–981	588	384–749
Надходження N, кг, побічна продукція	330	265–389	665	473–849	366	314–387	549	379–669
N в агроценозі, кг	591	291–824	837	505–1096	667	387–875	767	441–1038
Баланс азоту, кг (\pm)	-345	-535 ÷ -215	97,8	-64 ÷ -188	-61,4	-176 ÷ -406	189	55,5–305
I_6 , % в агроценозі	66,5	47,0–76,0	109	89–124	97,0	79,0–95,5	130	115–137
Баланс $C_{орг}$ агроценозу, т	-25,8	-29,0 ÷ -22,5	-38,7	-38,0 ÷ -25,0	-30,2	-33,5 ÷ -23,8	-38,8	-46,3 ÷ -33,0
Баланс $C_{орг}$ ґрунту, т	-3,12	-5,88 ÷ -3,31	2,7	0,9 ÷ 4,0	-0,93	-0,63 ÷ -1,62	2,00	0,40 ÷ 2,7
I_6 , % ($C_{орг}$ агроценозу)	62,2	14,0–92,0	62,0	26,0–85,0	56,6	18,5–85,0	62,2	23,0–85,5
I_6 , % ($C_{орг}$ ґрунту)	59,4	54,0–65,0	114,2	109–129	102,2	94,5–112,5	107,6	103–117
$C_{орг}$ -CO ₂ , т	30,8	26,0–35,0	111	77,0–142	52,3	42,6–58,9	91,5	86,0–102

Примітка: *Вихід к.о — вихід кормових одиниць; ** X_{cp} — середнє значення (для табл. 1 і 2).

використання побічної продукції забезпечувало в 1,15 рази вище надходження N порівняно з використанням ґною.

При цьому баланс N в першому випадку становив +189 кг (37,8 кг/га) і –61,4 кг (–12,3 кг/га) — у другому. Відповідно, I_6 за використання побічної продукції була вищою в 1,34 рази. Додатність балансу N за внесення побічної продукції не забезпечувала додатність балансу органічного вуглецю (–38,8 т) в агроценозах сівозмін з горохом і травами, тоді як у зазначених сівозмінах із внесенням ґною формувалася від’ємний баланс вуглецю, який виявився менш дефіцитним в 1,3–1,5 рази.

Проте додатність балансу N за використання побічної продукції вплинула на баланс органічного вуглецю у ґрунті (+2,0–2,7 т, або +0,40–0,54 т/га) в сівозміні з горохом та багаторічними травами. За внесення ґною від’ємність балансу N визначала від’ємність балансу вуглецю у ґрунті: –3,12 т (–0,63 т/га) у сівозміні з горохом та –0,93 т (–0,06 т/га) у сівозміні

з багаторічними травами. При цьому I_6 з вуглецю в агроценозах сівозмін незалежно від виду органічних добрив становила 56,6–62,2%, а I_6 балансу вуглецю у ґрунті за використання побічної продукції у сівозміні з горохом була на рівні 114,2%, у сівозміні з багаторічними травами — 107,6%. За внесення ґною в першому випадку $I_6 = 59,4%$, а у другому — 102,2%, що свідчить про ефективність використання ґною та побічної продукції саме при насиченні сівозмін багаторічними травами.

Розрахунки показують, що обробіток так само впливав на колообіг N, як і вид органічних добрив, тип сівозміни (табл. 2).

Так, за систематичної оранки винос N урожаєм становив 645 кг, за безполіцевого обробітку — 628 кг, а за безполіцевого мілкого обробітку — 475 кг. За типовим розмахом винос N більш стабільним був за безполіцевого обробітку, тоді як за оранки й поверхневого обробітку винос N був вищим, відповідно, в 1,24 та 1,23 рази (табл. 2).

2. Вплив способів обробітку на нормовані параметри азотно-вуглецевого колообігу в агроценозах Лісостепу України

Параметри колообігу	Спосіб обробітку ґрунту					
	Оранка, на 22–25 см		Безполіцевий, на 22–25 см		Поверхневий, на 10–12 см	
	$X_{\text{ср}}^{**}$	Інтервал значень	$X_{\text{ср}}^{**}$	Інтервал значень	$X_{\text{ср}}^{**}$	Інтервал значень
Вихід к.о. *, т	31,7	27,4–34,2	31,0	27,0–34,6	28,1	23,5–31,6
Винос азоту урожаєм разом, кг	645	646–732	628	514–723	475	371–518
Загальний винос азоту фітомасою, кг	813	593–1005	796	650–979	561	452–648
Надходження N, кг, побічна продукція	488	339–638	488	340–657	450	371–525
N в агроценозі, кг	742	461–966	717	452–907	637	376–966
Баланс азоту, кг (±)	–68,4	–215 ÷ 115	–80,4	–245 ÷ 149	103	–93,0 ÷ 334
I_6 , % в агроценозі	94,6	77,5–117	94,1	71,0–122	122	83,0–102
Баланс $C_{\text{орг}}$ агроценозу, т	–39,8	–42,1 ÷ –26,9	–29,5	–34,1 ÷ –22,1	–27,3	–33,0 ÷ –22,0
Баланс $C_{\text{орг}}$ ґрунту, т	–0,75	–3,7 ÷ 1,2	1,4	–0,5 ÷ 3,8	0,71	–0,6 ÷ 2,8
I_6 , % ($C_{\text{орг}}$ агроценозу)	62,7	21,5–87,5	55,3	21,0–85,0	57,8	22,0–84,0
I_6 , % ($C_{\text{орг}}$ ґрунту)	93,9	71,0–110	97,3	69,0–127	93,6	59,0–116
$C_{\text{орг}}$ (CO_2), т	77,5	41,5–103	67,9	35,0–69,9	60,2	33,0–86,0

Загальний винос N з агроценозу був найвищим за оранки (813 кг), тоді як за безполицевого й поверхневого обробітків — нижчим на 3,4 кг/га та 50,4 кг/га відповідно.

Надходження N з побічною продукції за оранки й безполицевого обробітку було однаковим (488 кг), а за поверхневого обробітку — нижчим на 38 кг. Загальне надходження N в агроценоз за глибоких обробітків становило 717–742 кг (143–148 кг/га), а за неглибокого безполицевого обробітку знижувалося на 80 і 105 кг відповідно.

Баланс N за оранки і безполицевого обробітку був від'ємним: відповідно, –68,4 та –80,4 кг, тоді як за неглибокого безполицевого обробітку виявився додатним: +103 кг (+20,6 кг/га). Інтенсивність балансу за глибоких обробітків становила 94,1–94,6%, а за неглибокого безполицевого обробітку — 122%. Інтенсивність балансу вуглецю з агроценозу та ґрунту була нижчою за 100% незалежно від способу обробітку ґрунту: 55,3–62,7% для вуглецю з агроценозу та 93,6–97,3% з ґрунту. При цьому викиди CO₂ за мінералізації органічних речовин мають стійку тенденцію до зниження від оранки (77,5 т, або 15,5 т/га) до безполицевого (67,9 т, або 13,5 т/га) та неглибокого безполицевого обробітку (60,2 т, або 12,4 т/га). На величину викидів NO₂ спосіб обробітку впливав мало: 21–23 кг (4,2–4,6 т/га).

Використання побічної продукції як органічного добрива у разі поверхневої її локалізації за систематичного виконання безполицевого обробітку є моделлю природного колообігу органічного вуглецю в агроценозах, що при довгостроковому виконанні сприяє відновленню запасів C_{орг.} як в агроценозі, так і в ґрунті, наближаючи їх уміст до природного рівня, що підтверджується дослідженнями [1, 9], де показано, що сумарна емісія CO₂ зменшується в ряду: цілина — переліг — рілля.

Взаємодія вуглецевого та азотного колообігів в агроценозах істотно впливає на вміст азоту й вуглецю в сільськогосподарських культурах, детриті та органічній речовині ґрунту, а інтенсивність колообігу N і C визначається співвідношенням C : N як у ґрунті, так і в агроценозах загалом [11]. Використання різних видів органічних добрив впливає на винос як азоту, так і вуглецю.

За внесення гною винос азоту за межі агроценозів перевищує його надходження на 154 кг, тоді як у разі використання побічної продукції, навпаки, надходження азоту в агроценоз перевищує його винос на 145 кг завдяки надходженню азоту з побічної продукції, яке перевищує надходження за внесення гною в 1,75 раза. Відповідно, винос C_{орг.} за внесення побічної продукції зростає на 7,6 т, а надходження C_{орг.} — у 2,10 раза порівняно з використанням гною (табл. 3).

Незалежно від виду органічних добрив в агроценозах сівозмін залучено від 1424 до 1468 кг азоту (зростання за використання побічної продукції), а вуглецю в останньому випадку залучається в 1,48 раза більше, ніж за використання гною. Співвідношення C : N за загальним виносом у разі використання побічної продукції в середньому становило 67 : 1 проти 45 : 1 за використання гною, а за статтями надходження співвідношення C : N становило, відповідно, 53 : 1 та 28 : 1. За загальним обігом — 54 : 1 й 37 : 1 відповідно. Вплив типу сівозміни на співвідношення C : N мав певні особливості: у сівозміні з горохом загальний винос азоту був вищим в 1,19 раза порівняно із сівозміною з травами. Надходження азоту з побічної продукції було вищим в 1,10 раза, загальне надходження — в 1,05 раза, а кількість азоту в загальному обігу — в 1,15 раза порівняно із сівозміною з травами.

У сівозміні з горохом винос C_{орг.} з агроценозів незалежно від типу становив 36,0–39,0 т, а надходження C_{орг.} було вищим в 1,23 раза, хоча загальна

3. Співвідношення вуглецю до азоту в агроценозах різного типу за використання різних видів органічних добрив і способів обробітку чорнозему

Параметри колообігу	X_{cp}^*	Інтервал значень*	X_{cp}	Інтервал значень*
	Види органічних добрив			
	ґній, 6 т/га		ППр**	
$C_{орг.}$ (винос) до N (винос)	44,7	34,0–49,0	67,4	52,0–75,0
$C_{орг.}$ (надходження) до N (надходження)	28,0	17,5–39,5	53,2	37,0–64,0
$C_{орг.}$ (агроценозу) до N (агроценозу)	36,9	27,5–40,5	54,2	38,0–57,0
	Сівозміна з			
	горохом		травами	
$C_{орг.}$ (винос) до N (винос)	44,3	34,0–53,5	67,8	45,0–76,5
$C_{орг.}$ (надходження) до N (надходження)	41,7	18,0–58,5	39,5	28,5–44,5
$C_{орг.}$ (агроценозу) до N (агроценозу)	40,6	27,5–52,5	50,5	34,5–63,5
	Способи обробітку			
	оранка, на 22–25 см		безполицевий	
$C_{орг.}$ (винос) до N (винос)	57,7	41,0–56,5	55,1	41,0–60,0
$C_{орг.}$ (надходження) до N (надходження)	42,4	33,5–54,0	39,0	23,5–57,0
$C_{орг.}$ (агроценозу) до N (агроценозу)	47,7	35,5–54,0	44,3	32,5–53,5
Примітка: * X_{cp} — середнє значення; **ППр — 7 т/га побічної продукції.				

кількість $C_{орг.}$ в агроценозах з горохом і травами було у межах 59,4–60,8 т. Співвідношення C : N за виносом у сівозміні з травами було вищим в 1,53 раза. Надходження азоту й вуглецю було в межах 39,5–41,7 т незалежно від типу агроценозу, хоча обсяг загального колообігу C і N в сівозміні з травами був вищим в 1,24 раза порівняно із сівозміною з горохом. Вплив способу обробітку ґрунту на колообіг N зводився до того, що за безполицевого обробітку загальний винос, надходження та обсяг N в агроценозах

зменшувалися, відповідно, в 1,05, 1,03 й 1,09 раза. Надходження $C_{орг.}$ мало стійку тенденцію до зниження в 1,14, 1,12 та 1,13 раза відповідно до оранки, безполицевого та поверхневого обробітку, що впливало на співвідношення C : N, значення якого за безполицевого обробітку зменшувалося в 1,05–1,09 раза порівняно з використанням гною та соломи у процесі оранки, що свідчить про зниження інтенсивності колообігу C і N за безполицевого обробітку як у ґрунті, так і в агроценозі загалом.

Висновки

Вид органічного добрива впливає на емісію CO_2 в атмосферу залежно від мінералізації: за використання гною типовий інтервал викидів становить 25–85 т, тоді як за побічної продукції викиди зростають до 80–160 т, що супроводжується посиленням виносом азоту порівняно з його надходженням в агроценози, у першому випадку, і, навпаки, лінійно зростаючим

надходженням загального азоту порівняно з його виносом за мінералізації побічної продукції, у другому випадку. Водночас відбувається зростання дефіцитності балансу вуглецю у ґрунті за внесення гною та зростання його додатності за використання побічної продукції, тобто відбувається розширене відтворення родючості чорнозему за безполицевого обробітку.

Вплив типу агроценозу (сівозміни) на азотно-вуглецевий колообіг зводиться до того, що насичення сівозмін культурами з високим виходом побічної продукції (сівозміна з горохом) забезпечується лінійним зростанням надходження азоту в типовому інтервалі збільшення продуктивності за мінералізації побічної продукції та вивільнення азоту з неї. Якщо не використовувати багаторічні трави, темпи вилучення та надходження азоту вирівнюються, а за максимальної врожайності не компенсуються залишеною побічною продукцією та азотфіксацією, що призводить до зростання дефіцитності балансу вуглецю за оберненою лінійною залежністю, тоді як у сівозміні з горохом наростання дефіцитності вуглецю змінюється параболічно в типовому інтервалі зростання продуктивності. Підвищена емісія CO_2 за сівозміни

з горохом супроводжується зростаючим балансом вуглецю з ґрунту та підвищеною продуктивністю агроценозу.

Вплив способу обробітку чорнозему типового на азотно-вуглецевий колообіг зводиться до того, що за безполіцевого обробітку, незалежно від виду органічного добрива та типу агроценозу, у інтервалі зростання продуктивності баланс вуглецю у ґрунті додатно-зростаючий порівняно з оранкою, де характер наростання дефіцитності підпорядкований параболічності. Інтервал емісії CO_2 в атмосферу залежно від мінералізації за оранки був більш широким порівняно з безполіцевим обробітком, що свідчить про посилення мінералізаційних процесів у ґрунті за однотипності азотно-вуглецевого колообігу, що визначає обробіток ґрунту як підпорядковану регуляторну підсистему типу сівозміни й виду органічних добрив у загальному колообігу.

Demydenko O.

Cherkasy State Agricultural Experimental Station of the National Research Centre «Institute of Agriculture of NAAS»; 13 Dokuchaieva Str., vil. Kholodnianske, Smelyany district, Cherkasy oblast, 29731, Ukraine; e-mail: agrogumys@ukr.net; ORCID: 0000-0002-5334-1154

Carbon control of nitrogen mineralization and immobilization cycle in Forest-Steppe agroecosystems

Goal. To determine the normative parameters of a comprehensive model of nitrogen and carbon circulation using different types of crop rotation, the use of alternative types of organic fertilizers, and the implementation of various methods of soil cultivation. To identify the main regularities of the direction of the nitrogen-carbon cycle, the nature and mechanisms of the restoration of natural soil formation using soil-based adaptive measures in the agroecosystems of the modern climatic system of the Forest-Steppe of Ukraine. **Methods.** Field (soil sampling to determine organic substances), laboratory (to determine the content of organic substances in the soil), mathematical,

statistical, and comparative calculation (to justify the reliability of the developed models of the nitrogen-carbon cycle under various agrotechnical influences). **Results.** The type of organic fertilizer influences the emission of CO_2 into the atmosphere depending on the mineralization of plant residues: at the use of manure, the typical interval of emissions is 25–85 tons, while for by-products their volumes increase up to 80–160 tons, which is accompanied by increased removal of nitrogen compared to its entry into agroecosystems, in the first case, and, conversely, a linearly increasing flow of total nitrogen compared to its removal in the process of mineralization of by-products, in the second case. The effect of the type of agroecosystem (crop rotation) on the nitrogen-carbon cycle is reduced to the fact that, due to the saturation of crop rotation with crops with a high yield of by-products (crop rotation with peas), a linear increase in the flow of nitrogen in the typical interval of productivity growth during mineralization of by-products and the release of nitrogen from it. Increased CO_2 emissions in the latter case are accompanied by an increase in the carbon balance in the soil and the productivity

of agrocenosis. The impact of the chornozem cultivation method on the nitrogen-carbon cycle is reduced to the fact that, under no-till cultivation, regardless of the type of organic fertilizer and the type of agrocenosis, in the interval of productivity growth, the carbon balance in the soil is positively increased compared to plowing, where the nature of deficit growth is subordinated to parabolicity. The interval of emission of CO₂ into the atmosphere in the process of mineralization for ploughing was wider in comparison with no-till cultivation, which indicated an increase in mineralization processes in the soil with the uniformity of nitrogen-carbon cycle, which defined soil cultivation as a subordinate regulatory subsystem of the type of crop rotation and the type of organic fertilizers in general circulation. **Conclusion.** Use of crushed by-products of crop production as organic fertilizer with sufficient nitrogen

compensation by mineral fertilizers, which are wrapped in the surface layer of chornozem during systematic no-till cultivation, models the natural nature of the nitrogen-carbon cycle in agrocenoses of short crop rotations of various types. Reproduction of the natural model of soil formation in agrocenoses, at the level with microbiological activity, is provided by the activation of photosynthetic activity of crops due to the reproduction of the stock mechanisms of carbon due to the increase in the content of CO₂ in the atmosphere and the thermal resource in agroecosystems in general. This should be the basic model of extended reproduction of the fertility of typical chornozems in the Forest-Steppe of Ukraine.

Key words: *nitrogen balance, manure, soil cultivation, carbon monoxide, plowing, by-products, crop rotation, chornozem.*

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202505-02>

Бібліографія

1. Velichko V.A., Demidenko O.V. Regulation of nitrogen-carbon interactions in agroecosystems in the forest-steppe zone of Ukraine. *Agricultural Science and Practice*. 2015. 2(1). P. 35–49.

2. Демиденко О.В., Шаповал І.С., Бойко П.І., Величко В.А. Вуглецево-азотний обіг в агроценозах сівозмін. *Вісник аграрної науки*. 2018. 9. С. 64–73.

3. *Шосте* національне повідомлення України з питань зміни клімату. К., 2012. 342 с.

4. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. E.C. Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren et al. (eds). IPCC. 2019. 7 p. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>.

5. Thornton P.E., Doney S.C., Lindsay K. et al. Carbon-nitrogen interactions regulate climate-carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere-ocean general circulation model. *Biogeosciences*. 2009. 6(10). P. 2099–2120. doi: 10.5194/bg-6-2099-2009

6. Friedlingstein P., Cox P., Betts R. et al. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C⁴MIP model intercomparison. *Journal of Climate*. 2006. 19(14). P. 3337–3353.

7. Canadell J.G., Pataki D.E., Gifford R. et al. Saturation of the terrestrial carbon sink. *Terrestrial*

ecosystems in a changing world, 2007. P. 59–78. doi: 10.1007/978-3-540-32730-1_6

8. Sabine C., Heimann M., Artaxo P. et al. Current status and past trends of the global carbon cycle. *SCOPE 62: The Global Carbon Cycle: Integrating Humans Climate and the Natural World*. London: Island Press, 2004. P. 17–44.

9. Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D. et al. Modelling vegetation and the carbon cycle as interactive elements of the climate system. *N.Y.: Meteorology at the millennium*, 2001. P. 259–279.

10. Denman K., Brasseur G., Chidthaisong A. et al. Couplings between changes in the climate system and bio-geochemistry. Cambridge: *Climate Change*, 2007. P. 499–588.

11. Kapshtyk M.V., Demydenko O.V. The ways to ecologically balanced development of agro ecosystems in the Forest-steppe zone of Ukraine. *International Journal of Agricultural Research and Review*. 2014. 2(8). P. 92–98.

12. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2014. Geneva, Switzerland, 151 p.

13. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas

Inventories. IPCC, 2019. Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>

14. Rosswall T. The nitrogen cycle. B. Bolin, R.B. Cook (eds.). *SCOPE 21: The major biogeochemical cycles and their interactions*. N.Y.: Wiley, 1983. P. 46–50.

15. Sabine C.L. Current status and past trends of the global carbon cycle. C.L. Sabine, M. Heimann, P. Artaxo et al. Field C.B., Raupach M.R. (Eds.) *SCOPE 62: The global carbon cycle*. London: Island Press, 2004. P. 17–44.

16. Sokolov A.P., Kicklighter D.W., Melillo J.M. et al. Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle. *Journal of Climate*. 2008. 21(15). P. 3776–3796. doi: org/10.1175/2008JCLI2038.1

17. Thornton P.E. P.E., Lamarque J.F., Rosenbloom N.A. et al. Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO₂ fertilization and climate variability. *Global Biogeochemical Cycles*. 2007. 21(4). P. 1–15. doi: 10.1029/2006GB002868

18. Booth M.S., Stark J.M., Hart S.C. Soil-mixing effects on inorganic nitrogen production and consumption in forest and shrubland soils. *Plant and Soil*. 2006. 289(1). P. 5–15. doi: 10.1007/s11104-006-9083-6

19. Booth M.S., Stark J.M., Rastetter E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: A synthetic analysis of literature data. *Ecological Monographs*. 2005. 75(2). P. 139–157. doi: 10.1890/04-0988

20. Myrold D.D., Bottomley P.J. Nitrogen mineralization and immobilization. Nitrogen in agricultural systems. 2008. P. 157–172. doi: 10.2134/agronmonogr49.c5

21. Barraclough D. The direct or MIT route for nitrogen immobilization: A 15N mirror image study with leucine and glycine. *Soil Biology Biochemistry*. 1997. 29(1). P. 101–108. doi: 10.1016/S0038-0717(96)00241-6

22. Booth M.S., Stark J.M., Rastetter E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: A synthetic analysis of literature data. *Ecological Monographs*. 2005. 75(2). P. 139–157. doi: 10.1890/04-0988

23. Luxhoi J., Bruun S., Stenberg B., Brelund T.A., Jensen L.S. Prediction of gross and net nitrogen mineralization-immobilization-turnover from respiration. *Soil Science Society of America Journal*. 2006. 70(4). P. 1121–1128. doi: 10.2136/sssaj2005.0133

24. Hamner K., Kirchmann H. Net nitrogen immobilization in soil induced by small additions of energy sources. *Acta Agriculturae Scandinavica*. 2005. 55(3). P. 177–185. doi: 10.1080/09064710510008496

25. Hadas A., Kautsky L., Goek M., Kara E.E. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biology and Biochemistry*. 2004. 36(2). P. 255–266. doi: 10.1016/j.soilbio.2003.09.012

26. Балюк С.А., Греков М.В., Лісовий А.В. та ін. Розрахунок балансу гумусу і поживних речовин у землеробстві України на різних рівнях управління. Харків: КП «Міська друкарня», 2011. 30 с.

27. Анішин Л.А., Грицаєнко З.М., Пономаренко С.П. та ін. Утилізація вуглекислого газу за умов вирощування зернових культур з використанням біостимуляторів росту. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Серія: Біологія, біотехнологія, екологія. 2014. 204. С. 56–65.

28. Довідник поживності кормів. За ред. М.М. Карпуся. 2-ге вид., переробл. і доп. Київ: Урожай, 1988. 400 с.

29. *Нормативи ґрунтозахисних контурно-меліоративних систем землеробства*. За ред. О.Г. Тараріка, М.Г. Лобаса. Київ: Урожай, 1998. 158 с.

30. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Lim B. et al. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. IPCC/OECD/IEA, Paris, France, 1996. 3(4). 140 p.

31. Penman J., Kruger D., Galbally I. et al. Intergovernmental Panel on Climate Change (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. 2000. 4. 94 p.

32. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa et al. (eds). IPCC. 2006. Published: IGES, Japan. 4. 678 p.

33. Харченко О.В., Прасол В.І., Сенченко Н.К. та ін. Деякі аспекти оцінювання балансу гумусу. Вісник Сумського національного аграрного ун-ту. Серія: Агрономія і біологія. 2011. 4(21). С. 33–35.