

СПРЯМОВАНІСТЬ ПРОЦЕСІВ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ↔СИНТЕЗУ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ У ЧОРНОЗЕМІ ВИЛУГУВАНОМУ ЗА РІЗНИХ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

В.В. Волкогон, С.Б. Дімова, К.І. Волкогон,
В.П. Сидоренко, Л.А. Шевченко, Т.С. Сасіна

Інститут сільськогосподарської мікробіології
та агропромислового виробництва НААН (м. Чернігів, Україна)
e-mail: volkogon@ukr.net; ORCID: 0000-0003-0675-1318
e-mail: dimova@ukr.net; ORCID: 0000-0003-2440-6657
e-mail: katerina_volkogon@ukr.net; ORCID: 0000-0002-7156-4124
e-mail: sydorenkochrom@gmail.com
e-mail: shevchenkolyubov@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2637-1999
e-mail: taniateri5@gmail.com; ORCID: 0000-0003-4021-9202

Мета роботи — визначити зміни у спрямованості процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунті за вирощування сільськогосподарських культур за мінеральних та органо-мінеральних систем удобрення. Використано методи польового дослідження (стаціонарний польовий дослід на чорноземі вилугуваному); польових камер; газохроматографії; розрахунків — для визначення питомих втрат закису азоту (γ $N-N_2O$ /кг CO_2 /га) і встановлення спрямованості процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини за порівняння з показниками «еталонного» ґрунту. Внаслідок тісно пов'язаних циклів вуглецю та азоту дія чинників на процеси деструкції свіжої органічної речовини і синтезу де ново в наземних екосистемах безпосередньо впливає не лише на процеси трансформації С у ґрунтах, але і на обмін між ґрунтом і атмосферою газоподібними сполуками, тому вирощування сільськогосподарських культур у короткочасній сівозміні (картопля → ячмінь ярий → горох → пшениця озима) у динаміці визначено інтенсивність емісії N_2O і CO_2 з ґрунту. Розраховано емісійне співвідношення газів (γ $N-N_2O/C-CO_2$ /га) та індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини ґрунту за порівняння отриманих показників зі значеннями перелогу, розміщеному поряд із дослідом. За системного використання мінеральних добрив відмічено домінування мінералізаційних процесів, інтенсивність яких зростає зі збільшенням норм добрив. Під час застосування туків по фоні прямої дії та післядії соломи (5 т/га) з біомасою післязривного люпинового сидерату ((~2,6 т/га сухої надземної маси + 2,8 т/га коренів) напрям досліджуваних процесів змінювався. За внесення невисоких норм мінеральних добрив по фоні органічних у ґрунті переважали синтетичні процеси, за середніх норм — процеси мінералізації та синтезу органічної речовини врівноважувалися. Внесення високих норм мінеральних добрив по фоні соломи й сидерату хоча й покращувало екологічну ситуацію порівняно з показниками, отриманими за застосування туків у чистому вигляді, проте не забезпечувало оптимальних показників (у ґрунті домінували мінералізаційні процеси). Отже, для забезпечення домінування синтетичних процесів у чорноземі вилугуваному незасвоєну рослинами частку мінеральних азотних добрив потрібно метаболічно трансформувати в органічні сполуки за внесення до ґрунту екзогенних джерел вуглецю. Визначення питомих втрат азоту (γ $N-N_2O$ /кг $C-CO_2$) і розрахунок коефіцієнтів мінералізації↔синтезу органічної ґрунтової речовини у практиці моніторингових досліджень стану ґрунтів агроценозів може бути перспективним для отримання оперативної інформації і прийняття необхідних управлінських рішень.

Ключові слова: емісія N_2O і CO_2 , ґрунтова органічна речовина, мінеральний азот, солома, сидерати.

ВСТУП

Проблема органічної речовини ґрунту є однією з ключових на шляху вирішення завдань стабілізації і відтворення ґрунтової родючості. Як регулятор потоків біогеохімічних циклів вуглецю, азоту та інших біогенних елементів, органічна речовина ґрунту (ОРГ) визнається одним із основних чинників сприятливого впливу на ріст рослин, підтримання рівня рН та структури в ґрунтах [1]. Навіть незначне збільшення вмісту ОРГ може мати непропорційно великий і сприятливий вплив на фізичні та біологічні властивості ґрунту [2].

Сьогодні також стає зрозумілим, що втрати ОРГ призводять не лише до негативних змін у живленні рослин і низці ґрунтових процесів, що зумовлює погіршення фізико-хімічних та біологічних характеристик ґрунтів, але й до значних біосферних негараздів, передусім пов'язаних із надходженням в атмосферу парникових газів. Ґрунти є потужним джерелом CO_2 , N_2O та CH_4 [3], вони містять приблизно втричі більше вуглецю, ніж атмосфера [4], тому інтенсивна мінералізація ОРГ може зумовити істотні зміни у планетарному масштабі. Саме внаслідок цього сьогодні проявляється величезна зацікавленість як науковців, так і суспільства та регуляторних органів низки країн до проблеми секвестрації вуглецю в ґрунті.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Як відомо, у ґрунтах природних екосистем кількість і склад органічної речовини визначаються довгостроковим балансом між рослинними надходженнями С, зв'язаного з атмосфери, і втратами його в результаті мікробного розкладання, а також унаслідок ерозії та вимивання [5]. Як правило, у природних фітоценозах ці процеси врівноважені. У сільськогосподарських екосистемах цього досягти не вдається, оскільки в них здійснюються різноманітні операції з управління ґрунтами. Це і вибір культурних рослин, які характеризуються різною кількістю і складом ексудатів та решток, і різні типи сівозмін (або

ж повна їх відсутність); це інтенсивність експорту рослин; випас худоби, скошування луків; додавання екзогенної органічної речовини, зрошення, удобрення, обробіток ґрунту і ін. Зазначені процедури можуть контролювати як просторово-часовий розподіл вхідних органічних речовин до ґрунту, так і чутливість їх до мінералізації, що загалом впливає на запаси ОРГ [6]. До того ж особливості її трансформації залежать від типу ґрунтів, ступеня їх насиченості органічною речовиною, материнської породи тощо [7]. Відповідно, щодо цього спостерігається ситуація високого ступеня невизначеності. У наукових колах також не існує узагальненої точки зору на дію різних чинників на процеси трансформації органічної речовини у ґрунтах.

Слід зазначити, що вимірювання відмінностей у вмісті ОРГ у ґрунті з достатньою точністю для визначення статистичної значущості впливу того чи іншого чинника на секвестрацію вуглецю є доволі складним завданням як через просторову відмінність, так і через відносно високий фон органічної речовини, на тлі якого відбуваються зміни [8], тому у більшості випадків можна зробити лише наближені до реальних сценаріїв висновки. Крім того, істотним недоліком більшості з існуючих методів виявлення змін у вмісті ОРГ є те, що вони відображають поступові або довгострокові зміни за впливу досліджуваних чинників, а не швидкі реакції ґрунтової системи [9].

Найчастіше під час встановлення змін у спрямованості процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті використовують класичні методи розрахунків балансу ОРГ [10], визначення ступеня лабільності органічної речовини [11], співвідношення гумінових кислот до фульвокислот [12]. Однак для надійних висновків щодо змін у вмісті ОРГ за використання зазначених методів потребуються дослідження протягом багатьох років. Точність розрахунків балансу ОРГ також є недосконалою, оскільки доволі складно визначити обсяг і якість надходження вуглецю з кореневими рештками. Крім того, практично повністю виключається

врахування такого джерела С як кореневі виділення та кореневий опад, а ця стаття вуглецевого балансу є доволі потужною [13] і має враховуватись у розрахунках.

У той самий час, встановлення спрямованості процесів трансформації органічної речовини у ґрунті (домінування деструктивних чи синтетичних процесів) для оперативної оцінки перспектив впливу окремих чинників на трансформацію органічної речовини та прийняття відповідних управлінських рішень, є вкрай необхідним. До того ж важливим може бути виявлення активності ключових біологічних процесів, що характеризують спрямованість реакцій мінералізації↔синтезу органічної речовини. Такими процесами є емісія N_2O та CO_2 . Як відомо, завдяки тісно пов'язаним циклам вуглецю та азоту, чинники впливу на процеси деструкції свіжої органічної речовини і синтезу *de novo* в наземних екосистемах безпосередньо впливають не лише на процеси трансформації С у ґрунтах, але й на обмін між ґрунтом і атмосферою газоподібними азотними сполуками [14; 15]. Орієнтуючись на це, ми запропонували визначити інтенсивність емісії N_2O та CO_2 залежно від дії досліджуваних чинників для оцінки перспектив впливу технологічних чинників на спрямованість процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини [16; 17]. Базуючись на газохроматографічному визначенні інтенсивності емісії N_2O і CO_2 , розрахунках емісійного співвідношення ($г\ N-N_2O/кг\ C-CO_2$) та порівнянні з показниками природного фітоценозу (переліг, цілина) як своєрідного «еталону», в якому біологічні процеси є врівноваженими, ми запропонували розраховувати індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини. Втім інтенсивність відхилення показників у той чи інший бік від значень «еталонного» ґрунту рекомендовано як діагностичний екологічний маркер на пряму процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунтах агроценозів [16; 17].

Метою наших досліджень, результатів яких відображено у статті, було визначення впливу окремих систем удобрення

сільськогосподарських культур на процеси мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунті за використання нового методу.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили в 2021 р. у польовому стаціонарному досліді Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН на чорноземі вилугуваному в умовах короткоротаційної сівозміни (картопля → ячмінь ярий → горох → пшениця озима). Дослід розпочато в 2009 р. За час існування досліду відбулося три ротації сівозміни. Вихідна (перед закладанням досліду) агрохімічна характеристика ґрунту: $pH_{\text{сол.}}$ — 5,3; вміст гумусу — 3,03%; азоту, що легко гідролізується — 95 мг/кг ґрунту; рухомих сполук фосфору (P_2O_5) — 150 мг/кг ґрунту (за Кирсановим); вміст обмінного калію (K_2O) (за Кирсановим) — 108 мг/кг ґрунту.

Погодні умови. Клімат у регіоні помірно континентальний. Атмосферних опадів випало 509 мм за рік із найвищими показниками у травні та липні. Середньодобові температури впродовж вегетаційного періоду були такі: квітень — +10°C; травень — +15°C; червень — +19°C; липень — +21°C; серпень — +22°C; вересень — +15°C.

Дизайн польового досліді. Сільськогосподарські культури (картопля сорту Беллароза, ячмінь ярий сорту Носівський, горох сорту Готівський і пшениця озима сорту Сонечко) вирощували за різних систем удобрення (табл. 1).

Дослід проводиться за повністю рендомізованою схемою з чотирма повтореннями та площею кожної дослідної ділянки 43,2 м². Дослід організовано у просторі й часі.

Свіжу органічну речовину щороку, починаючи з 2009 р., вносили під картоплю. У відповідних варіантах подрібнену солому (співвідношення $C/N = 76,9$) у кількості 5 т/га заробляли у ґрунт відразу після збирання врожаю пшениці озимої (наприкінці липня) шляхом дискування, після чого (у відповідних варіантах) висівали на

Таблиця 1. Системи удобрення сільськогосподарських культур у сівозміні

Удобрення культур			
картопля	ячмінь ярий	горох	пшениця озима
Без добрив	Без добрив	Без добрив	Без добрив
Солома, 5 т/га	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Проміжний сидерат (люпин вузьколистий)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Солома + сидерат	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀
N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀ + солома + сидерат	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + <i>a</i>	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + <i>b</i>	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + <i>c</i>
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀ + солома + сидерат	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + <i>a</i>	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + <i>b</i>	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + <i>c</i>
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + солома + сидерат	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + <i>a</i>	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + <i>b</i>	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + <i>c</i>

Примітки: *a* — першого року післядія екзогенної органічної речовини; *b* — другого року післядія екзогенної органічної речовини; *c* — третього року післядія екзогенної органічної речовини.

проміжний сидерат люпин вузьколистий. Сидеральну масу люпину із співвідношенням C/N~16,2 (~2,6 т/га сухої надземної маси + 2,8 т/га сухих коренів) заробляли у ґрунт шляхом дискування з наступною неглибокою оранкою (15 см) пізно восени (кінець листопада).

Мінеральні добрива у відповідних варіантах щороку застосовували у вигляді аміачної селітри (д. р. 34,5%), суперфосфату простого гранульованого (д. р. 19,5%) та калію хлористого (д. р. 60%), під картоплю — калію сірчаноокислого (д. р. 56%). Фосфорні та калійні добрива вносили під основний обробіток, азотні — в передпосівну культивування та підживлення.

Тому, за вирощування картоплі у ґрунті визначали пряму дію на досліджувані процеси як органічних, так і мінеральних добрив; ячменю — першого року післядію органічних добрив і прямий вплив мінеральних; гороху — другого року післядію органічних і пряму дію мінеральних; пшениці озимої — третього року післядію органічних і пряму дію мінеральних добрив.

Оскільки вищезазначені системи удобрення у досліді застосовували впродовж 12 років (з 2009 по 2021 рр.), вважали, що біологічні процеси у ґрунті набули характерних кожному виду удобрення ознак.

Умови проведення аналізів. У динаміці за використання газохроматографічних методів у чотирикратній повторності визначали інтенсивність емісії N₂O і CO₂ з ґрунту залежно від агрофонів. Для оцінки емісії закису азоту та вуглекислого газу в системі ґрунт — рослина застосовували метод закритих камер [18]. Використовували циліндричні камери діаметром 0,3 м та заввишки 0,35 м. Камери встановлювали в ґрунті на глибині 5 см. Навколо камер робили водяну пробку для кращої ізоляції системи та запобігання втратам газів, що накопичувалися в камерах. Всередину камер поміщали чашки з водою, до яких перед експозицією додавали 20 г карбіду кальцію (реакція карбіду кальцію з водою призводить до утворення ацетилену, який інгібує фермент редуктазу оксиду азоту та зупиняє процес дисиміляції NO₃⁻ і NO₂⁻ на стадії відновлення оксиду азоту [19], що дає можливість виміряти N₂O, утворений у ході процесів нітрифікації і денітрифікації). Площа використаних для досліджень камер допомагає одночасно враховувати емісію газів із ґрунту без рослин та з ризосферного ґрунту. Перед установкою камер рослини зрізали на рівні поверхні ґрунту.

Дослідження проводили у чотириразовій повторності. Період експозиції з аце-

тиленом становив 3 год. Після експозиції проби газу відбирали з камер за допомогою шприців, поміщали у медичні вакуумовані флакони з гумовими мембранами та доставляли в лабораторію. Кількість N_2O у пробах визначали на газовому хроматографі «Цвет-500М» з детектором електронного захвату. Сорбційні колонки зі сталі завдовжки 3 м заповнювали сорбентом Poropak Q 60–80 mesh. Температура колонок $40^\circ C$, температура випарювача — $120^\circ C$, детектора — $330^\circ C$. Витрати газу-носія (аргон з метаном 95/5) — $35 \text{ см}^3/\text{хв}$.

Вміст CO_2 у газових пробах виявляли на газовому хроматографі «Цвет-500М» з детектором теплопровідності (струм мосту 130 mA). Сорбційні колонки зі сталі заповнювали сорбентом Poropak Q 60–80 mesh. Температура колонок $25^\circ C$ і детектора $40^\circ C$. Витрати газу — носія (гелію) — $20 \text{ см}^3/\text{хв}$.

Емісію N_2O оцінювали за формулою:

$$(E \times V_1) / (V_2 \times S \times t), \quad (1)$$

де E — кількість закису азоту в аналізованому зразку, нмоль N_2O ; V_1 — об'єм камери, см^3 ; V_2 — об'єм зразка, що вводиться в хроматограф, см^3 ; S — площа поперечного сечення камери, м^2 ; t — час експозиції.

Для визначення емісії CO_2 використовували ту саму формулу, але E оцінювали як кількість вуглекислого газу в аналізованому зразку, нмоль.

Втрати азоту та вуглецю, спричинені викидами досліджуваних газів, були оцінені на гектарі за добу, враховуючи молекулярну масу N_2O та CO_2 , час експозиції камер у полі й площу камер.

Отримані показники порівнювали зі значеннями «еталонного» ґрунту. Відносним еталоном слугувала ділянка перелогу (з 2009 р.), площею $0,75 \text{ га}$, розміщена поряд із стаціонарним дослідом. Відповідно до запропонованої методики розраховували індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини (I_{MC}) як відношення модуля різниці емісійного співвідношення $\text{г N-N}_2\text{O}/\text{кг C-CO}_2$ ґрунту «еталонної» ділянки і ґрунту агроценозу до показника емісійного співвідношення $\text{г N-N}_2\text{O}/\text{кг C-CO}_2$ «еталонної» ділянки:

$$I_{MC} = (E_{\text{ед.}} - E_{\text{агро}}) / E_{\text{ед.}} \quad (2)$$

де I_{MC} — індекс мінералізації↔синтезу; $E_{\text{ед.}}$ — емісійне співвідношення $\text{г N-N}_2\text{O}/\text{кг C-CO}_2$ «еталонної» ділянки; $E_{\text{агро}}$ — емісійне співвідношення $\text{г N-N}_2\text{O}/\text{кг C-CO}_2$ в агроценозі.

Згідно з методикою, за інтенсивних мінералізаційних процесів у ґрунті показники I_{MC} мають від'ємні значення. Наближення значень індексу до «0» (показник «еталонного» ґрунту) трактується як стан врівноваженості досліджуваних процесів. Коли отримані результати мають знак «+», це свідчить про домінування іммобілізаційних (синтетичних) процесів у ґрунті [16; 17].

Статистичні аналізи. Різницю в показниках емісії N_2O і CO_2 між варіантами оцінювали за використання ANOVA. Значення ймовірності $\leq 0,05$ використовували для встановлення статистично значимих відмінностей (Statistica 6.0, StatSoft Inc., США).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Спрямованість процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунті під картоплею залежно від удобрення. Як відомо, закис азоту утворюється в результаті мікробної трансформації сполук азоту в ґрунтах, і посилюється, коли доступний N перевищує потреби рослин [20]. Зважаючи на те, що цикли вуглецю і азоту тісно пов'язані між собою, співвідношення емісійних втрат $\text{N-N}_2\text{O}$ і C-CO_2 з ґрунту як реакція на вплив технологічних чинників за вирощування сільськогосподарських культур може значною мірою відображати особливості перебігу окремих біологічних процесів у ґрунті. Одержані нами результати підтверджують цю тезу і дозволяють оперативно визначити спрямованість процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті за різних систем удобрення культур.

Проведені у фазу сходів картоплі дослідження свідчать, що навіть у ґрунті контрольного варіанта, де з 2009 р. не застосовували добрив, розвиваються мінера-

лізаційні процеси ($I_{MC} = -0,08$), що, вірогідно, зумовлено технологічними операціями з обробітку ґрунту за вирощування сільськогосподарських культур (табл. 2).

Позитивні значення I_{MC} (+0,05) отримали за додавання до ґрунту соломи, що пояснюється розвитком іммобілізаційних процесів.

За вирощування як проміжної сидеральної культури люпину вузьколистого спостерігали переважання мінералізаційних процесів над синтетичними — I_{MC} мав значення $-0,12$.

За поєднання соломи з біомасою проміжного сидерату одержано результати, які свідчать про наближення процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини до стану врівноваження (I_{MC} дорівнює $-0,04$).

Найбільші показники питомих втрат $N-N_2O$ спостерігали за використання для удобрення картоплі мінеральних добрив. Зростали також і емісійні втрати $C-CO_2$. З підвищенням норм мінеральних добрив газоподібні втрати обох досліджуваних газів зростали, відповідно, збільшувалися і від'ємні показники I_{MC} (від $-0,55$ у варіанті з внесенням $N_{40}P_{40}K_{40}$ до $-0,69$ за використання $N_{120}P_{120}K_{120}$), що вказує на інтенсивний розвиток у ґрунті мінералізаційних процесів. У той самий час, за внесення мінеральних добрив по фону «солома + сидерат» ситуація істотно змінювалася. Так, зокрема, у варіанті « $N_{40}P_{40}K_{40}$ + солома + сидерат» домінували іммобілізаційні процеси, про що вказує показник I_{MC} зі знаком «+». За внесення $N_{80}P_{80}K_{80}$ по фону соломи з сидератом процеси мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті практично врівноважувалися — I_{MC} дорівнював $-0,03$. І лише за застосування найбільшої в досліді норми туків ($N_{120}P_{120}K_{120}$) по органічному фону ситуація хоча й покращувалася — I_{MC} зменшувався з позначки $-0,69$ до $-0,21$, проте не досягала оптимальних значень, що свідчить про надмірність цієї норми добрив за даних умов.

Зростання питомих втрат $N-N_2O$ у міру збільшення норм мінеральних добрив

можна було б пояснити мікробіологічною трансформацією незасвоєної рослинами частки мінерального азоту, але також зростала й емісія CO_2 (див. варіанти з системним застосуванням лише мінеральних добрив), що може свідчити про деструктивний вплив мінерального азоту на органічну речовину ґрунту (можливо, зокрема й стабільну ОРГ за дефіциту в ґрунті свіжої органічної речовини). Втім за внесення мінеральних добрив по органічному фону, який забезпечує легкодоступний для ґрунтових мікроорганізмів вуглець, надлишок мінеральних сполук азоту (незасвоєна рослинами частка добрива) метаболічно зв'язується (іммобілізується), відповідно, зменшується емісія N_2O .

У другий строк проведення досліджень в агроценозах картоплі (фаза цвітіння) отримано схожі результати. Подібні результати одержано також і наприкінці вегетаційного періоду картоплі (див. табл. 2).

Інтенсивність процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунті агроценозів ячменю ярого залежно від удобрення. Під час виконання досліджень в агроценозах наступної в сівозміні культури — ячменю ярого, де спостерігалася першого року післядія органічних добрив і прямий вплив мінеральних добрив на ґрунтові процеси та продукційний процес культури, у фазу сходів відмічено превалювання синтетичних процесів у ґрунті варіанта з соломою (показник I_{MC} зі знаком «+»). У варіанті першого року післядії люпинового сидерату показники I_{MC} вже не були настільки негативними, як це було відмічено в перший рік застосування зеленого добрива. Процеси мінералізації↔синтезу органічної речовини впродовж вегетаційного періоду наближалися до стану врівноваження (табл. 3).

Домінування синтетичних процесів у ґрунті під ячменем спостерігали за внесення невисоких та середніх у досліді норм мінеральних добрив по фону першого року післядії соломи з сидератом — I_{MC} , відповідно, $+0,14$ і $+0,03$ (див. табл. 3).

Поєднання найвищої за вирощування ячменю норми туків $N_{90}P_{90}K_{90}$ з післядією

Таблиця 2. Емісія N_2O і CO_2 , емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$ та індекси мінералізації $\leftrightarrow$ синтезу органічної речовини в агроценозах картоплі залежно від удобрення культури

Варіанти дослідів	Фаза сходів				Фаза цвітіння				Фаза відмирання бадилля			
	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}
Без добрив, контроль	104,4	66,5	1,57	-0,08	97,5	49,5	1,97	-0,23	69,0	42,9	1,61	-0,29
Солома	111,2	80,6	1,38	+0,05	92,0	63,5	1,45	+0,09	73,2	57,5	1,27	-0,01
Сидерат	155,0	95,0	1,63	-0,12	130,5	66,9	1,95	-0,22	125,3	80,1	1,56	-0,25
Солома + сидерат	148,2	98,8	1,50	-0,04	127,0	73,8	1,72	-0,08	130,0	90,7	1,43	-0,14
$N_{40}P_{40}K_{40}$	180,2	80,4	2,24	-0,55	192,8	75,0	2,57	-0,61	125,0	62,0	2,02	-0,62
$N_{40}P_{40}K_{40}$ + солома + сидерат	165,0	116,2	1,42	+0,02	170,0	11,3	1,50	+0,06	116,5	89,6	1,30	-0,04
$N_{80}P_{80}K_{80}$	210,4	90,7	2,32	-0,60	203,5	77,4	2,63	-0,64	155,1	72,8	2,13	-0,70
$N_{80}P_{80}K_{80}$ + солома + сидерат	180,0	120,0	1,50	-0,03	182,1	111,0	1,64	-0,03	143,6	106,4	1,35	-0,08
$N_{120}P_{120}K_{120}$	235,0	95,9	2,45	-0,69	221,5	80,5	2,75	-0,72	182,0	82,4	2,20	-0,76
$N_{120}P_{120}K_{120}$ + солома + сидерат	210,0	120,0	1,75	-0,21	201,0	89,7	2,24	-0,40	180,1	100,6	1,79	-0,43
Переліг	32,6	22,5	1,45	0	35,0	21,9	1,60	0	20,6	16,5	1,25	0
HP_{05}	11,2	8,5	—	—	9,5	6,7	—	—	8,0	5,4	—	—

Таблиця 3. Емісія N_2O і CO_2 , емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$ та індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті під ячменем залежно від удобрення культури

Варіанти досліду	Фаза сходів				Фаза виходу в трубку				Фаза молочно-воскової стиглості			
	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}
Без добрив, контроль	70,0	53,2	1,32	-0,07	67,0	37,2	1,80	-0,22	71,8	30,3	2,54	-0,25
Солома ^a	73,9	65,0	1,13	+0,08	61,3	45,0	1,36	+0,08	73,5	41,6	1,77	+0,13
Сидерат ^a	79,5	63,1	1,25	-0,02	85,2	55,7	1,52	-0,03	83,3	38,1	2,18	-0,06
Солома ^a + сидерат ^a	105,0	76,5	1,37	-0,11	105,3	73,5	1,43	+0,02	102,7	46,0	2,23	-0,09
$N_{30}P_{30}K_{30}$	115,6	80,0	1,45	-0,18	112,5	60,3	1,86	-0,26	98,8	37,2	2,65	-0,30
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома ^a + сидерат ^a	112,0	106,5	1,05	+0,14	110,0	85,6	1,29	+0,12	91,9	62,8	1,46	+0,28
$N_{60}P_{60}K_{60}$	147,9	95,4	1,55	-0,26	152,8	72,7	2,10	-0,43	126,9	42,0	3,02	-0,48
$N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома ^a + сидерат ^a	135,6	114,1	1,19	+0,03	140,0	90,2	1,55	-0,05	113,4	54,8	2,07	-0,01
$N_{90}P_{90}K_{90}$	202,0	107,7	1,88	-0,52	196,0	86,9	2,25	-0,53	168,1	45,2	3,71	-0,81
$N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома ^a + сидерат ^a	175,5	117,5	1,49	-0,21	180,5	95,4	1,89	-0,29	150,5	53,1	2,83	-0,38
Переліг	18,5	15,0	1,23	0	23,5	16,0	1,47	0	23,5	11,5	2,04	0
НІР ₀₅	9,5	7,2	—	—	10,7	6,4	—	—	8,8	5,2	—	—

органічного фону хоча й покращило спрямованість досліджуваних процесів (показник I_{MC} зменшувався з $-0,52$ до $-0,21$), проте не допомогло повністю вирішити проблему.

У фазі виходу в трубку спостерігали схожу, з незначними відхиленнями показників, ситуацію (див. *табл. 3*). У фазі молочно-воскової стиглості ячменю загалом відмічали схожі до вищеописаних особливості перебігу досліджуваних процесів. Так, зокрема, переважання синтетичних процесів (I_{MC} зі знаком «+») спостерігали у ґрунті варіантів з післядією соломи, за післядії соломи з сидератом, за внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ по фону післядії органічних добрив, а також наближення значень до показників перелогу у ґрунті варіанта « $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат» ($I_{MC} = -0,01$).

Спрямованість біологічних процесів у ґрунті під горохом залежно від агрофону. Проведення досліджень в агроценозах гороху демонструє домінування синтетичних процесів у ґрунті за другого року післядії соломи, другого року післядії сидерату та їх поєднання (I_{MC} відповідно: $+0,06$, $+0,04$ і $+0,05$) (*табл. 4*).

Під час застосування лише мінеральних добрив спостерігали розвиток мінералізаційних процесів. Ситуація істотно покращувалася за внесення мінеральних добрив по фону другого року післядії соломи і сидеральної маси. Так, якщо I_{MC} за внесення до ґрунту $N_{30}P_{30}K_{30}$ становив $-0,49$, то за використання цієї норми добрив по фону другого року післядії органічної речовини процеси мінералізації ↔ синтезу в ґрунті оптимізувалися (показник I_{MC} становив $+0,01$).

За внесення середньої в досліді норми туків — $N_{60}P_{60}K_{60}$ I_{MC} зростав до $-0,57$, проте за застосування цієї самої норми мінеральних добрив по фону післядії соломи з сидератом він знижувався до $-0,11$. За використання найбільшої в досліді норми добрив показник I_{MC} сягав $-0,99$ і дещо зменшувався за внесення туків по фону післядії органічної речовини — до $-0,71$. Зважаючи, що за цієї норми туків може

знижитись і продуктивність симбіотичної азотфіксації, її екологічна недоцільність не викликає сумніву. На нашу думку, таку кількість добрив, зокрема, мінерального азоту, потенційно можна трансформувати в доцільну лише за поповнення ґрунту додатковою свіжою органічною речовиною з широким співвідношенням C/N, що може забезпечити трансформацію реактивного азоту в ґрунті в органічні сполуки.

Проведення досліджень у фазі цвітіння гороху демонструє схожі з вищеописаними залежності, хоча абсолютні показники й відрізнялися (див. *табл. 4*).

Дослідження, виконані в агроценозах гороху у фазі утворення бобів, загалом підтвердили відмічені вище спостереження. За другого року післядії соломи, люпинового сидерату і їх поєднання у ґрунті переважали синтетичні процеси — результати свідчать, що за цих умов ситуація була навіть кращою за стан процесів у ґрунті перелогу.

Спостерігали врівноваження процесів мінералізації ↔ синтезу в ґрунті за внесення найменшої норми мінеральних добрив по фону другого року післядії екзогенної органічної речовини ($I_{MC} = 0$) і деяке превалювання процесів мінералізації у варіанті « $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат» ($I_{MC} = -0,18$). За використання найвищої норми мінеральних добрив ($N_{90}P_{90}K_{90}$) відмічали інтенсивний розвиток мінералізаційних процесів — I_{MC} дорівнював $-0,75$.

Застосування цієї самої норми туків по фону другого року післядії соломи і сидерату зменшувало показник I_{MC} до $-0,50$.

Особливості перебігу процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті агроценозів пшениці озимої. Під час визначення емісії досліджуваних газів із ґрунту під пшеницею загалом відмічено відносно невисокі показники (щодо значень, отриманих за вирощування попередніх у сівозміні культур), зокрема і за використання мінеральних добрив. На нашу думку, це можна пояснити інтенсивнішим розвитком рослин пшениці і формуванням більшої продуктивності культури порівняно з ячменем і горохом за однакових

Таблиця 4. Емісія N_2O і CO_2 , емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$ та індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті під горохом залежно від удобрення культури

Варіанти досліду	Фаза бутонізації				Фаза цвітіння				Фаза утворення бобів			
	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}
Без добрив, контроль	60,5	31,5	1,92	-0,08	46,3	25,7	1,80	-0,06	35,7	20,0	1,79	-0,13
Солома ^b	61,3	36,6	1,67	+0,06	44,7	29,5	1,52	+0,11	34,0	25,8	1,32	+0,16
Сидерат ^b	60,0	35,1	1,71	+0,04	46,9	30,0	1,56	+0,08	36,3	23,7	1,53	+0,03
Солома ^b + сидерат ^b	72,4	42,5	1,70	+0,05	52,4	36,1	1,45	+0,15	48,4	32,5	1,49	+0,06
$N_{30}P_{30}K_{30}$	96,3	36,1	2,66	-0,49	88,7	33,8	2,62	-0,54	70,8	29,5	2,40	-0,52
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома ^b + сидерат ^b	86,9	48,9	1,77	+0,01	79,2	44,2	1,79	-0,05	61,9	39,0	1,59	0
$N_{60}P_{60}K_{60}$	118,1	42,4	2,79	-0,57	104,7	37,0	2,82	-0,66	86,4	34,4	2,51	-0,59
$N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома ^b + сидерат ^b	97,6	49,2	1,98	-0,11	89,3	45,8	1,95	-0,15	71,0	38,1	1,86	-0,18
$N_{90}P_{90}K_{90}$	184,2	52,1	3,54	-0,99	146,9	46,9	3,11	-0,83	108,1	39,0	2,77	-0,75
$N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома ^b + сидерат ^b	169,7	55,6	3,05	-0,71	132,7	48,6	2,73	-0,61	100,8	42,5	2,37	-0,50
Переліг	35,5	20,0	1,78	0	31,1	18,3	1,70	0	27,5	17,4	1,58	0
НІР ₀₅	15,2	7,5	—	—	13,9	8,5	—	—	9,0	7,3	—	—

умов вирощування. За більших рівнів урожайності використовується більша кількість поживних речовин, зокрема й азоту з добрив, відповідно у ґрунті залишається менша кількість реактивного азоту, що неодмінно має позначитися на інтенсивності емісії N_2O і CO_2 .

За третього року післядії соломи й сидерату затухає їх вплив на досліджувані процеси. У весняну фазу кущення пшениці озимої у жодному з варіантів нами не відмічено показників I_{MC} зі знаком «+» (табл. 5). Однак різниця між варіантами простежується. Так, за третього року післядії соломи, люпинового сидерату та їх поєднання показники I_{MC} наближалися до «0», що свідчить про екологічне благополуччя у ґрунті цих варіантів. І навпаки, за використання мінеральних добрив від'ємні значення I_{MC} були одними з найбільших у досліді, до того ж зі збільшенням норм туків вони зростали (від $-0,57$ за внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ до $-0,67$ за внесення $N_{60}P_{60}K_{60}$ і до $-0,84$ за застосування $N_{90}P_{90}K_{90}$). Водночас, за внесення мінеральних добрив по фоні третього року післядії соломи і люпинового сидерату інтенсивність мінералізаційних процесів у ґрунті дещо зменшувалася. Схожі залежності, хоча і з різними абсолютними значеннями спостерігали також і у наступній фазі органогенезу пшениці озимої (див. табл. 5).

Слід відмітити, що серед чинників впливу на процеси трансформації органічної речовини у ґрунтах агроценозів чи не найбільш дискусійним є такий агроприйом, як застосування мінеральних добрив, і особливо азотних.

Мінеральний азот є одним із найпотужніших важелів впливу на формування урожайності сільськогосподарських культур. У той самий час, невисокі ступені засвоєння культурними рослинами діючої речовини з синтетичних азотних добрив — у межах 35–50% [21], призводять до того, що невикористана рослинами частина мінерального азоту може негативно впливати на стан довкілля. Це і забруднення ґрунтових вод та водоймищ нітратами, це також і емісія закису азоту. Окремі дослідження

свідчать, що внесення підвищених норм азотних добрив призводить також і до інтенсивної деструкції стабільної ОРГ [22; 23]. Однак, негативний вплив тривалого використання синтетичних азотних добрив на стабільну ОРГ, останнім часом, ставиться під сумнів. Так, на думку Poffenbarger et al. [24], мінеральний азот забезпечує збільшення запасів органічної речовини в ґрунті внаслідок впливу на зростання рослинної біомаси, особливо за застосування агрономічно оптимальних його норм. Низка дослідників також вважають, що синтетичне азотне добриво може зменшувати мінералізацію ОРГ [25; 26].

На нашу думку, спрямованість та інтенсивність процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті за впливу мінерального азоту залежить від конкретної екосистеми (передусім від рівня азотного удобрення; крім того, важливими чинниками можуть бути тип ґрунту, рівень його насичення органічним С, вид сільськогосподарської культури, історія поля і ін.). У зв'язку з цим доцільно згадати дослідження, що фіксують про необхідність оптимізації стехіометричного співвідношення реактивного азоту і доступного для мікроорганізмів вуглецю в ґрунті для досягнення бажаної секвестрації С [27; 28]. Це опосередковано підтверджується результатами нашого досліді. Попередній висновок щодо цього такий: застосування кожної норми мінерального азоту слід супроводжувати стехіометрично відповідною кількістю доступного для мікроорганізмів вуглецю. У нашому дослідженні на чорноземі вилугуваному для оптимізації ситуації за внесення середніх норм мінерального азоту (до 60–80 кг залежно від культури) достатньо вносити 5 т/га соломи по фоні проміжного люпинового сидерату.

Щоб оптимізувати біологічні процеси в ґрунті за підвищених норм азотних добрив цієї кількості свіжої органічної речовини недостатньо. Тому для врівноваження процесів мінералізації↔синтезу в ґрунті в цьому випадку можна або збільшити кількість пшеничної соломи, або додатково застосувати соломі ячменю ярого, який

Таблиця 5. Емісія N₂O і CO₂, емісійне співвідношення N–N₂O/C–CO₂ та індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті під пшеницею озимою залежно від удобрення культури

Варіанти дослідів	Фаза кущення				Фаза виходу в трубку				Фаза молочно-воскової стиглості			
	емісія N–N ₂ O, г/га за добу	емісія C–CO ₂ , кг/га за добу	емісійне співвідношення г N–N ₂ O / кг C–CO ₂	I _{MC}	емісія N–N ₂ O, г/га за добу	емісія C–CO ₂ , кг/га за добу	емісійне співвідношення г N–N ₂ O / кг C–CO ₂	I _{MC}	емісія N–N ₂ O, г/га за добу	емісія C–CO ₂ , кг/га за добу	емісійне співвідношення г N–N ₂ O / кг C–CO ₂	I _{MC}
Без добрив, контроль	41,5	22,4	1,86	–0,22	32,5	19,6	1,65	–0,13	28,1	16,6	1,69	–0,13
Солома ^c	43,2	26,3	1,64	–0,08	33,1	20,9	1,58	–0,08	27,4	17,9	1,53	–0,02
Сидерат ^c	42,0	26,9	1,56	–0,03	32,1	20,8	1,54	–0,05	28,6	18,6	1,53	–0,02
Солома ^c + сидерат ^c	46,3	28,6	1,62	–0,07	35,3	24,1	1,46	0	28,2	18,1	1,56	–0,04
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	66,5	28,0	2,38	–0,57	48,4	24,4	1,98	–0,36	40,8	21,5	1,90	–0,27
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + солома ^c + сидерат ^c	64,5	40,5	1,59	–0,05	43,5	27,5	1,58	–0,08	36,5	22,8	1,60	–0,07
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	89,7	35,4	2,53	–0,67	60,5	27,8	2,17	–0,49	55,7	23,2	2,40	–0,60
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + солома ^c + сидерат ^c	85,5	38,7	2,20	–0,45	55,3	32,3	1,71	–0,17	43,5	25,6	1,69	–0,13
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	105,5	39,7	2,65	–0,74	85,8	30,6	2,80	–0,91	69,4	27,6	2,51	–0,67
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + солома ^c + сидерат ^c	98,7	41,1	2,40	–0,58	73,4	33,8	2,17	–0,49	55,2	28,5	1,93	–0,29
Переліг	18,8	12,4	1,52	0	17,5	12,0	1,46	0	20,3	13,5	1,50	0
НІР ₀₅	8,7	5,5	—	—	9,8	4,2	—	—	7,0	4,5	—	—

вищується в сівозміні. Безперечно, кількість доступного вуглецю для кожного конкретного випадку потрібно або визначати емпірично, проводячи дослід, або шляхом моделювання. Крім того, запропоновані методичні підходи можуть бути корисними, оскільки їх застосування допомагає оперативно оцінювати ситуацію.

Слід відмітити, що використані у досліді органічні добрива демонструють доволі пролонгований вплив на біологічні процеси у ґрунті. Так, внесення в ґрунт 5 т/га соломи сприяло розвитку іммобілізаційних процесів упродовж трьох років — I_{MC} за вирощування картоплі, ячменю і гороху були позитивними, і лише за третього року післядії соломи, під час вирощування пшениці озимої спостерігали затухання синтетичних процесів у цьому варіанті.

За планування досліджень ми очікували, що сидеральна біомаса буде досить швидко мінералізованою і не характеризуватиметься тривалою післядією. Втім отримані результати свідчать про досить пролонговану післядію проміжного сидерату на синтетичні процеси. Можливо цьому сприяють кореневі рештки люпину вузьколистого. Так, відомо, що внесок коренів до загального вмісту стабільної ОРГ набагато вищий, ніж надземних решток рослин [29].

Урожайність сільськогосподарських культур залежно від систем удобрення. Облік урожайності сільськогосподарських культур у досліді демонструє залежність показників від чинників удобрення.

Плануючи в досліді внесення до ґрунту соломи, ми очікували на зменшення врожайності культур, зважаючи на відоме ще з початку ХХ ст. явище тимчасового дефіциту мінеральних сполук азоту для рослин за застосування соломи внаслідок конкуренції з ґрунтовими мікроорганізмами і необхідність додавання компенсаторної дози мінерального азоту. Тим не менше, у досліді ми відмітили тенденцію до зростання врожайності культур за їх вирощування по фоні дії та післядії соломи без додаткового надходження мінерального азоту до ґрунту. Оскільки дослід розпочато в 2009 р.,

ми пояснюємо такий ефект досягненням стабілізації окремих біологічних процесів у ґрунті за цей час і відсутністю за цих умов конкуренції за азот між рослинами і мікроорганізмами.

За використання проміжного сидерату спостерігали достовірне збільшення врожайності картоплі (на 25,1%) і тенденцію до зростання показників за вирощування наступних у сівозміні культур (табл. 6).

Достовірний приріст урожайності картоплі (на 16,8%), ячменю (на 16,6) і гороху (на 23,9%) забезпечило поєднання соломи з сидератом. Для пшениці післядії соломи і сидерату сприяла лише незначному зростанню врожайності.

Застосування мінеральних добрив у технологіях вирощування сільськогосподарських культур забезпечувало істотне підвищення їх урожайності, до того ж приріст посилювався зі збільшенням норм туків. За поєднання мінеральних добрив з соломою і сидератом відмічали чітку тенденцію до зростання урожайності, а в окремих варіантах і достовірні прирости врожаю порівняно з показниками варіантів, де використовували туки у чистому вигляді (див. табл. 6). Отже, таке поєднання є позитивним не лише в екологічному відношенні.

Тому, одержані результати свідчать, що запропоновані методичні рішення допомагають оперативно визначати інтенсивність емісії N_2O і CO_2 з ґрунту і за розрахунками питомих втрат азоту у вигляді закису цього елементу ($N-N_2O$ на одиницю втраченого з ґрунту $C-CO_2$) та індексів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті спостерігати зміни, зумовлені системами удобрення сільськогосподарських культур. Метод може бути корисним для експрес-визначення впливу різних технологічних чинників на спрямованість процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті і прийняття оперативних управлінських рішень.

Висока чутливість газохроматографічного визначення активності емісії N_2O і CO_2 , можливість використання достатньої кількості експозиційних камер для ніве-

Таблиця 6. Урожайність сільськогосподарських культур залежно від систем удобрення

Системи удобрення	Картопля		Ячмінь ярий		Горох		Пшениця озима	
	урожай- ність, т/га	приріст до конт- ролю, %	урожай- ність, т/га	приріст до конт- ролю, %	урожай- ність, т/га	приріст до конт- ролю, %	урожай- ність, т/га	приріст до конт- ролю, %
Без добрив, контроль	17,96	—	2,23	—	2,18	—	3,22	—
Солома	19,22	7,0	2,42	8,5	2,30	5,5	3,31	2,8
Сидерат	22,47	25,1	2,54	13,9	2,37	8,7	3,43	6,5
Солома + сидерат	20,97	16,8	2,60	16,6	2,70	23,9	3,41	5,9
Мінеральна невисока	23,25	29,5	3,12	39,9	3,08	41,3	4,42	37,3
Мінеральна невисока + солома + сидерат	24,48	36,3	3,41	52,9	3,38	55,0	4,65	44,4
Мінеральна середня	36,35	102,4	3,88	74,0	3,60	65,1	5,27	63,7
Мінеральна середня + солома + сидерат	38,46	114,1	4,16	86,5	3,95	81,2	5,43	68,6
Мінеральна інтенсивна	41,12	128,9	4,34	94,6	4,13	89,5	5,49	70,5
Мінеральна інтенсивна + солома + сидерат	42,42	136,2	4,45	99,6	4,55	108,7	5,66	75,8
НІР ₀₅	1,85	—	0,33	—	0,25	—	0,37	—

лювання ефекту просторових ґрунтових відмінностей, дають можливість із високою точністю спостерігати зміни у напрямі біологічних процесів у ґрунті.

ВИСНОВКИ

Пряма дія та післядія екзогенної органічної речовини у вигляді соломи та біомаси проміжного люпинового сидерату позитивно впливає на перебіг процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у чорноземі вилугуваному. Вплив соломи і сидерату на досліджувані процеси затухає в часі, проте простежується протягом

трирічного періоду. Системне застосування лише мінеральних добрив призводить до розвитку мінералізаційних процесів у чорноземі вилугуваному. Зі збільшенням їх доз деструктивні процеси в ґрунті зростають.

За внесення мінеральних добрив по фоні дії та післядії соломи і люпинового сидерату невикористана рослинами частка мінеральних сполук азоту метаболічно зв'язується (імобілізується) мікроорганізмами, відповідно зменшується негативний вплив туків на довкілля загалом і на ґрунт зокрема.

ЛІТЕРАТУРА

- Hoffland, E., Kuyper, T. W., Comans, R. N. J., & Creamer, R. E. (2020). Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant Soil.*, 455, 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>.
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.96>.
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmі, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils. A review. *Geochemistry*, 76(3), 327–352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>.
- Lal, R., Griffin, M., Apt, J., Lave, L., & Morgan, M. G. (2004). Managing soil carbon. *Science*, 304(5669), 393. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1093079>.

5. Torn, M. S., Swanston, C. W., Castanha, C., & Trumbore, S. E. (2009). Storage and turnover of organic matter in soil. In N. Senesi, B. Xing, P.M. Huang (Eds.), *Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems* (Vol. VI, pp. 219–272). DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470494950.ch6>.
6. Jastrow, J. D., Amonette, J. E., & Bailey, V. L. (2007). Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Clim Chang.*, 80, 5–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9178-3>.
7. Dignac, M. F., Derrien, D., Barré, P., Darot, S., Cecillon, L., Chenu, C., ... Basile-Doelch, I. (2017). Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 37(14). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>.
8. Poulton, P., Johnston, J., Macdonald, A., White, R., & Powlson, D. (2018). Major limitations to achieving «4 per 1000» increases in soilorganic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Glob Change Biol.*, 24, 2563–2584. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14066>.
9. Ludwig, B., Geisseler, D., Michel, K., Joergensen, R. G., Schulz, E., Merbach, I., ... Liu, X. (2011). Effects of fertilization and soil management on crop yields and carbon stabilization in soils. A review. *Agron Sustain Dev.*, 31, 361–372. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro/2010030>.
10. Балюк, С. А., Греков, В. О., Лісовий, М. В., & Комариста, А. В. (2011). *Розрахунок балансу гумусу і поживних речовин у землеробстві України на різних рівнях управління*. Харків: КП «Міська друкарня».
11. Balaiev, A., Pikovska, O., Karabach, K., & Shemetun, K. (2023). Labile organic matter and fertility of chernozems. *Plant Soil Sci.*, 14(2), 9–20. DOI: <https://doi.org/10.31548/plant2.2023.09>.
12. Zalba, P., Amiotti, N. M., Galantini, J. A., & Pistola, S. (2016). Soil Humic and Fulvic Acids from Different Land-Use Systems Evaluated By E4/E6 Ratios. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(13–14), 1675–1679. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1206558>.
13. Zhalnina, K., Louie, K. B., Hao, Z., Mansoori, N., da Rocha, U. N., Shi, S., ... Brodie, E. L. (2018). Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patterns in rhizosphere microbial community assembly. *Nature microbiology*, 3, 470–480. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41564-018-0129-3>.
14. Li, C., Frolking, S., & Butterbach-Bahl, K. (2005). Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing. *Climatic Change*, 72, 321–338. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-005-6791-5>.
15. Garcia-Montiel, D., Melillo, J., Steudler, P. A., Neill, C., Feigl, B. J., & Cerri, C. C. (2002). Relationship between N₂O and CO₂ emissions from the Amazon Basin. *Geophysical Research Letters*, 29(6), 141–143. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GL013830>.
16. Волкогон, В. В., Дімова, С. Б., Волкогон, К. І., Пиріг, О. В., & Британ, Т. Ю. (2019). Спосіб визначення спрямованості процесів мінералізації-синтезу органічної речовини в ґрунтах агроценозів: патент 119297 Україна. МПК G01N 33/24; Бюл. №10. Київ: Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН.
17. Volkohon, V., Pyrig, O., Volkohon, K., & Dimova, S. (2019). Methodological aspects of determining the trend of organic matter mineralization+synthesis processes in croplands. *Agricultural Science and Practice*, 6(1), 38. DOI: <https://doi.org/10.15407/agrisp6.01.003>.
18. Kusa, K., Sawamoto, T., Hu, R., & Hatano, R. (2008). Comparison of the closed-chamber and gas concentration gradient methods for measurement of CO₂ and N₂O fluxes in two upland field soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 777–785. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2008.00292.x>.
19. Smith, M. S., Firestone, M. K., & Tiedje, J. M. (1978). The Acetylene Inhibition Method for Short-term Measurement of Soil Denitrification and its Evaluation Using Nitrogen-13. *Soil Science Society of America J.*, 42(4), 611–615. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200040015x>.
20. Oenema, O., Wrage, N., Velthof, G. L., van Groenigen, J. W., Dolfing, J., & Kuikman, P. J. (2005). Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 72, 51–65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-004-7354-2>.
21. Cameron, K. C., Di, H. J., & Moir, J. L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Ann Appl Biol.*, 162, 145–173. DOI: <https://doi.org/10.1111/aab.12014>.
22. Khan, S. A., Mulvaney, R. L., Ellsworth, T. R., & Boast, C. W. (2007). The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J. Environ. Qual.*, 36, 1821–1832. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0099>.
23. Frossard, E., Buchmann, N., Bünemann, E. K., Kiba, D. I., Lompo, F., Oberson, A., ... & Traore, O. Y. A. (2016). Soil properties and not inputs control carbon, nitrogen, phosphorus ratios in cropped soils in the longterm. *Soil*, 2, 83–99. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-2-83-2016>.
24. Poffenbarger, H. J., Barker, D. W., Helmers, M. J., Miguez, F. E., Olk, D. C., Sawyer, J. E., ... & Castellano, M. J. (2017). Maximum soil organic carbon storage in Midwest US cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized. *PLoS ONE*, 12, article e0172293. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172293>.
25. Zang, H., Wang, J., & Kuzyakov, Y. (2016). N fertilization decreases soil organic matter decomposition in the rhizosphere. *Appl. Soil Ecol.*, 108, 47–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.021>.
26. Li, X. G., Jia, B., Lv, J., Ma, Q., Kuzyakov, Y., & Li, F. M. (2017). Nitrogen fertilization decreases

- the decomposition of soil organic matter and plant residues in planted soils. *Soil Biol. Biochem.*, 112, 47–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.04.018>.
27. Mooshammer, M., Wanek, W., Zechmeister-Boltenstern, S., & Richter, A. (2014). Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources. *Frontiers in Microbiology*, 5(22). DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00022>.
28. Kirkby, C., Richardson, A. E., Wade, L., Passioura, J. B., Batten, G., Blanchard, C., & Kirkegaard, J. (2014). Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils. *Soil Biol. Biochem.*, 68, 402–409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.032>.
29. Menichetti, L., Ekblad, A., & Kätterer, T. (2015). Contribution of roots and amendments to soil carbon accumulation within the soil profile in a long-term field experiment in Sweden. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200, 79–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.11.003>.

Стаття надійшла до редакції журналу 09.10.2025