

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ МІКРОБІОЛОГІЇ
ТА АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТРАНСФОРМАЦІЇ
ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ У ЧОРНОЗЕМІ
ВИЛУГУВАНОМУ ЗА ВИКОРИСТАННЯ
СТЕХІОМЕТРИЧНО ВІДПОВІДНИХ НОРМ
МІНЕРАЛЬНОГО АЗОТУ І ЛЕГКОДОСТУПНОГО
ВУГЛЕЦЮ**

(науково-методичні рекомендації)

Чернігів
2025

УДК 574:579.64:631.95:631.463
О-62

Оптимізація процесів трансформації органічної речовини у чорноземі вилугуваному за використання стехіометрично відповідних норм мінерального азоту і легкодоступного вуглецю (науково-методичні рекомендації) / В. В. Волкогон, А. М. Москаленко, С. Б. Дімова, К. І. Волкогон, Ю. М. Халеп, Л. А. Шевченко, Т. С. Сасіна, В. П. Горбань, І. В. Волкогон, М. М. Пархоменко. Чернігів : видавець Агеєв В. О., 2025. 32 с.

ISBN 978-617-95517-2-7

У рекомендаціях на прикладі вирощування сільськогосподарських культур на чорноземі вилугуваному в короткоротаційній сівозміні (картопля – ячмінь ярий – горох – пшениця озима) за різних систем удобрення (органічних, мінеральних різної інтенсивності, органо-мінеральних) обґрунтовано принципи оптимізації процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини за дотримання стехіометрично відповідного співвідношення мінерального азоту і доступного для ґрунтових мікроорганізмів вуглецю.

УДК 574:579.64:631.95:631.463

Рецензенти: доктор с.-г. наук, професор, академік НААН Тарарико Ю. О.,
доктор с.-г. наук Козар С. Ф.

Рекомендовано до друку вченою радою Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН (протокол № 13 від 17.11.2025 р.) і координаційно-методичною радою Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН — головної установи з виконання ПНД 8 «Сільськогосподарська мікробіологія» (протокол № 3 від 26.11.2025 р.).

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Приклади визначення спрямованості процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у чорноземі вилугуваному за різних рівнів азотного удобрення та забезпечення ґрунту свіжою органічною речовиною	6
1.1. Вплив систем удобрення на спрямованість процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті під картоплею	8
1.2. Інтенсивність процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті агроценозів ячменю ярого залежно від удобрення	11
1.3. Спрямованість біологічних процесів у ґрунті під горохом залежно від агрофону	13
1.4. Особливості перебігу процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті агроценозів пшениці озимої	14
2. Алгоритм розрахунків стехіометрично відповідних норм азотних добрив і доступного для мікроорганізмів вуглецю з метою покращення стану довкілля й оптимізації процесів гумусоутворення у ґрунті	19
3. Урожайність сільськогосподарських культур залежно від систем удобрення	24
Висновки	26
Список використаних джерел	28

ВСТУП

Як відомо, ступені засвоєння рослинами азоту з добрив не перевищують 35–55 % (Vitousek et al., 1997; Tilman, 1999; Ladha et al., 2005; Liang et al., 2019). Коли до ґрунту системно надходить доступний вуглець у вигляді свіжої органічної речовини, значна частина незасвоєного рослинами азоту може метаболічно зв'язуватися мікроорганізмами, формуючи мікробну біомасу. У подальшому частина біомаси мікроорганізмів трансформується в гумусні сполуки. Інша частина піддається мінералізації. Середній час обороту іммобілізованого в мікробній біомасі азоту складає близько 1,5 року (Jenkinson, Parton, 1989), тож повернення (мінералізація) його для засвоєння рослинами сприятиме підвищенню урожайності наступних у сівозміні сільськогосподарських культур. Системне дотримання принципів оптимізації вмісту в ґрунті легкодоступного вуглецю (наприклад, за використання післязбиральних решток, вирощування проміжних сидеральних культур та ін.) і застосування науково обґрунтованих норм мінеральних добрив зможе забезпечити збалансованість процесів трансформації азоту, мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунті й стабілізацію агроєкосистем. Натомість за дефіциту в ґрунті свіжої органічної речовини невикористана частина мінеральних азотних сполук частково вимивається, що призводить до евтрофікації (Stoate et al., 2009), забруднення поверхневих і ґрунтових вод (Spalding, Exner, 1993), а частково надходить до атмосфери у вигляді озоноруйнівного газу N_2O (Davidson et al., 2000). Крім того, за таких умов надлишок азоту в ґрунті може ініціювати розвиток специфічних угруповань ґрунтових мікроорганізмів, здатних використовувати як джерело вуглецю стійку органічну речовину (Fontaine et al., 2003). Наслідком цього, крім забруднення ґрунтових вод нітратами та зростання емісії N_2O , є розвиток біологічної дегуміфікації ґрунту. Отже, незасвоєну рослинами частку мінерального азоту необхідно утримувати від втрат шляхом метаболічного зв'язування мікроорганізмами, що потребує надходження до ґрунту стехіометрично

відповідної кількості свіжої органічної речовини з широким співвідношенням C/N як джерела доступного вуглецю.

При обґрунтуванні оптимального співвідношення C/N важливим є використання чутливих методів дослідження особливостей трансформації азоту й вуглецю. За використання наявних агрохімічних рішень, через відносно високий фоновий вміст гумусових сполук у ґрунті, достовірні зміни показників можна встановити лише за системної дії досліджуваного чинника протягом тривалого часу (інколи через дві-три ротації сівозміни) (Poultou et al., 2018). Водночас завдяки тісно пов'язаним циклам вуглецю та азоту, фактори, що впливають на процеси деструкції свіжої органічної речовини й синтезу гумусних сполук *de novo* в наземних екосистемах, безпосередньо діють не лише на процеси трансформації вуглецю в ґрунтах, а й на обмін газоподібних азотистих сполук між ґрунтом й атмосферою (Sahrawat & Keeney, 1986; Garcia-Montiel et al., 2002; Li et al., 2005). Орієнтуючись на цю інформацію, в Інституті сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН розробили методику газохроматографічного визначення спрямованості процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунтах агроценозів за дослідження емісійного співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$ і порівняння з показниками «еталонного» ґрунту (Волкогон з співав., 2019; Volkogon et al., 2019). Методика дозволяє оперативно відслідковувати зміни у спрямованості досліджуваних процесів і може бути суттєвим доповненням до наявних агрохімічних методів. Використовуючи заявлені методичні підходи, в умовах польового стаціонарного дослідження з різними системами удобрення сільськогосподарських культур досліджували перебіг емісії N_2O та CO_2 , розраховували питомі втрати азоту за емісійного співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$ та спрямованість процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунті за порівняння з показниками «еталонного» ґрунту.

У рекомендаціях наведено принципи обґрунтування стехіометрично відповідних норм мінерального азоту і легкодоступного вуглецю для оптимізації процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті.

1. ПРИКЛАДИ ВИЗНАЧЕННЯ СПРЯМОВАНOSTI ПРОЦЕСІВ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ ↔ СИНТЕЗУ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ У ЧОРНОЗЕМІ ВИЛУГУВАНОМУ ЗА РІЗНИХ РІВНІВ АЗОТОВОГО УДОБРЕННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ҐРУНТУ СВІЖОЮ ОРГАНІЧНОЮ РЕЧОВИНОЮ

Дослідження проводили у 2021–2025 рр. в умовах тривалого польового стаціонарного дослідження за вирощування сільськогосподарських культур у короткоротаційній сівозміні на чорноземі вилугуваному, який містить гумусу — 3,03 %, азоту легкогідролізованого — 95,2 мг/кг, рухомих форм фосфору (P_2O_5) — 226 мг/кг (за Чиріковим), обмінного калію (K_2O) — 108 мг/кг (за Кирсановим); $pH_{\text{сол.}}$ — 5,30.

Сільськогосподарські культури вирощували в сівозміні (картопля – ячмінь ярий – горох – пшениця озима) за різних систем удобрення (табл. 1).

Площа дослідної ділянки — 86,4 м² (7,2 × 12,0), повторність — чотирикратна.

Свіжу органічну речовину вносили під картоплю. Подрібнену солому в кількості 5 т/га (вміст вуглецю — 2100 кг) заробляли у ґрунт відразу після збирання урожаю пшениці озимої (наприкінці липня – початку серпня залежно від кліматичних умов року) шляхом дискування, після чого у відповідних варіантах висівали на проміжний сидерат люпин вузьколистий. Сидеральну масу люпину (у середньому за роки досліджень ~2 т/га сухої надземної маси і сухої маси коренів ~2,2 т/га), що містить ~1600 кг вуглецю, заробляли у ґрунт шляхом дискування з наступною неглибокою оранкою (15 см) пізно восени (кінець листопада). Відповідно до систем удобрення при вирощуванні картоплі спостерігали пряму дію соломи й сидерату, ячменю — першого року післядію, гороху — другого року післядію, пшениці — третього року післядію цих добрив.

Мінеральні добрива застосовували щорічно відповідно до схеми дослідження.

Таблиця 1.1 — 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	а	б	с
Проміжний сидерат (люпин вузьколистий)	а	б	с
Солома + сидерат	а	б	с
$N_{40}P_{40}K_{40}$	$N_{30}P_{30}K_{30}$	$N_{30}P_{30}K_{30}$	$N_{30}P_{30}K_{30}$
$N_{40}P_{40}K_{40}$ + солома + сидерат	$N_{30}P_{30}K_{30}$ + а	$N_{30}P_{30}K_{30}$ + б	$N_{30}P_{30}K_{30}$ + с
$N_{80}P_{80}K_{80}$	$N_{60}P_{60}K_{60}$	$N_{60}P_{60}K_{60}$	$N_{60}P_{60}K_{60}$
$N_{80}P_{80}K_{80}$ + солома + сидерат	$N_{60}P_{60}K_{60}$ + а	$N_{60}P_{60}K_{60}$ + б	$N_{60}P_{60}K_{60}$ + с
$N_{120}P_{120}K_{120}$	$N_{90}P_{90}K_{90}$	$N_{90}P_{90}K_{90}$	$N_{90}P_{90}K_{90}$
$N_{120}P_{120}K_{120}$ + солома + сидерат	$N_{90}P_{90}K_{90}$ + а	$N_{90}P_{90}K_{90}$ + б	$N_{90}P_{90}K_{90}$ + с

а) першого року післядія органічних добрив; б) другого року післядія органічних добрив; с) третього року післядія органічних добрив.

У динаміці за використання газохроматографічних методів визначали інтенсивність емісії N_2O і CO_2 з ґрунту залежно від агрофонів. Для оцінки емісії закису азоту та вуглекислого газу в системі «ґрунт – рослина» застосовували метод закритих камер (Hutchinson et al., 2000; Kusa et al., 2008).

Розраховували втрати азоту (г $N-N_2O$) і вуглецю (кг $C-CO_2$), беручи до уваги молекулярну масу N_2O і CO_2 та швидкість емісії газів з одного гектара за добу.

Отримані показники порівнювали зі значенням «еталонного» ґрунту. Відносним еталоном слугувала ділянка перелугу площею 0,9 га, розміщена поряд із стаціонарним дослідом, підтримується починаючи з 2009 р.

Базуючись на емісійному співвідношенні $g\ N-N_2O / kg\ C-CO_2$, розраховували індекси мінералізації \leftrightarrow синтезу як відношення модуля різниці емісійного співвідношення $g\ N-N_2O / kg\ C-CO_2$ ґрунту «еталонної» ділянки і ґрунту агроценозу до показника емісійного співвідношення $g\ N-N_2O / kg\ C-CO_2$ «еталонної» ділянки (Волкогон з співав., 2019; Volkogon et al., 2019).

Згідно із заявленими методичними підходами за інтенсивних мінералізаційних процесів у ґрунті показники ІМС будуть мати від'ємні значення. Наближення значень індексу до «0» свідчатиме про стан врівноваженості досліджуваних процесів. За умови, коли синтетичні процеси у ґрунті домінують над мінералізаційними, отримані результати матимуть знак «+».

1.1. Вплив систем удобрення на спрямованість процесів мінералізації \leftrightarrow синтезу органічної речовини у ґрунті під картоплею. Проведені дослідження свідчать, що в агроценозах картоплі в контрольному варіанті (без застосування добрив) ІМС мають невеликі від'ємні значення (-0,08) (табл. 2). Позитивні значення ІМС (+0,05) отримали за додавання до ґрунту соломи, що пояснюється розвитком іммобілізаційних процесів. За вирощування як проміжної сидеральної культури люпину вузьколистого спостерігається деяке переважання мінералізаційних процесів над іммобілізаційними — ІМС має значення -0,12.

За поєднання соломи з біомасою проміжного сидерату отримано результати, які свідчать про наближення процесів мінералізації \leftrightarrow синтезу органічної речовини до стану врівноваження (ІМС дорівнює -0,4).

Найбільші показники питомих втрат $N-N_2O$ спостерігали за використання для удобрення картоплі мінеральних добрив. Зростали також й емісійні втрати $C-CO_2$. Зі збільшенням норм мінеральних добрив газоподібні втрати обох досліджуваних газів зростали, відповідно, збільшувалися й від'ємні показники ІМС (від -0,55 у варіанті з внесенням $N_{40}P_{40}K_{40}$ до -0,69 за внесення $N_{120}P_{120}K_{120}$), що свідчить про інтенсивний розвиток у ґрунті

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 $N-N_2O / C-CO_2$	ІМС	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O / C-CO_2$	ІМС	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O / C-CO_2$	ІМС
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	113,3	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
$НІР_{05}$	11,2	8,5	—	—	9,5	6,7	—	—	8,0	5,4	—	—

мінералізаційних процесів. Водночас за внесення мінеральних добрив по фоні «солома + сидерат» ситуація суттєво змінювалася. Так, зокрема, у варіанті «N₄₀P₄₀K₄₀ + солома + сидерат» домінували іммобілізаційні процеси, про що свідчить показник ІМС зі знаком «+».

За внесення N₈₀P₈₀K₈₀ по фоні соломи із сидератом процеси мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунті практично врівноважувалися — ІМС дорівнював -0,03. І лише при застосуванні найбільшої в досліді норми туків (N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀) по органічному фоні ситуація хоча й покращувалася — ІМС зменшувався з позначки -0,69 до -0,21, проте не досягала оптимальних значень, що свідчить про надмірність цієї норми добрив за таких умов.

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

Проведення досліджень у наступні роки підтверджує зроблені висновки (рис. 1).

Висновком із результатів проведених аналізів є те, що норми мінеральних добрив під картоплю, які не перевищують N₈₀P₈₀K₈₀ при їх застосуванні по фоні 5 т/га соломи і 13 т/га сидеральної маси, сприяють оптимізації процесів мінералізації ↔ синтезу. І навіть поєднання найвищої в досліді норми туків зі свіжою органічною речовиною дозволяє значною мірою знизити інтенсивність мінералізаційних процесів.

Отже, за внесення туків по органічному фоні надлишок мінеральних сполук азоту метаболічно зв'язується (іммобілізується) мікроорганізмами і норми мінеральних добрив у досліді, які не перевищують N₈₀P₈₀K₈₀, стають екологічно прийнятними. При цьому внесення соломи не потребує додаткового забезпечення мінерального азоту для оптимізації співвідношення С/Н.

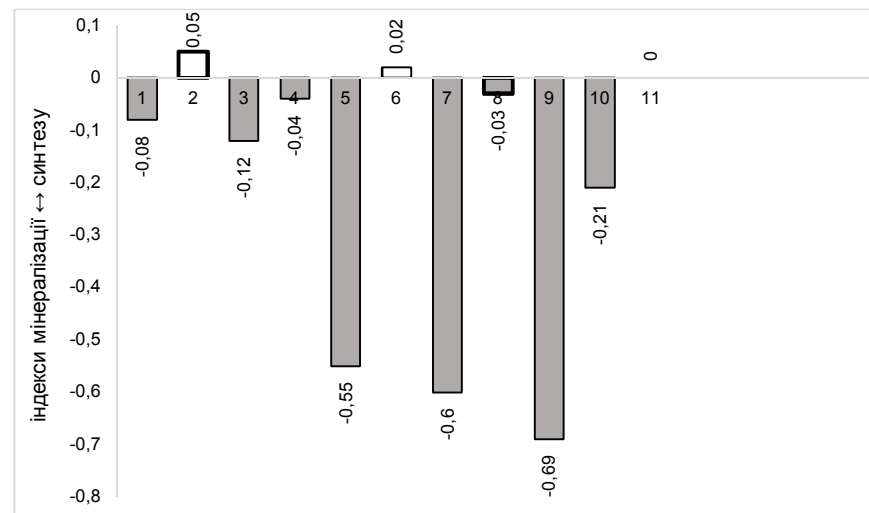


Рис. 1. Індеси мінералізації ↔ синтезу в агроценозах картоплі залежно від удобрення культури.

Примітка: 1 — без добрив, контроль; 2 — солома; 3 — сидерат; 4 — солома + сидерат; 5 — N₄₀P₄₀K₄₀; 6 — N₄₀P₄₀K₄₀ + солома + сидерат; 7 — N₈₀P₈₀K₈₀; 8 — N₈₀P₈₀K₈₀ + солома + сидерат; 9 — N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀; 10 — N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀ + солома + сидерат; 11 — переліг.

1.2. Інтенсивність процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті агроценозів ячменю ярого залежно від удобрення. При проведенні досліджень в агроценозах наступної в сівозміні культури — ячменю ярого, де спостерігалася першого року післядія органічних добрив і прямий вплив мінеральних на ґрунтові процеси та продукційний процес культури, у фазу сходів відзначено домінування синтетичних (іммобілізаційних) процесів у ґрунті варіанту із соломою (показник ІМС зі знаком «+»). Крім цього, позитивні значення ІМС спостерігали також і за внесення невисоких і середніх у досліді норм мінеральних добрив по фоні першого року післядії соломи із сидератом — відповідно, +0,14 і +0,03 (табл. 3).

Застосування найвищої при вирощуванні ячменю норми туків N₉₀P₉₀K₉₀ по фоні післядії органічних добрив хоча й покращує

щило спрямованість досліджуваних процесів (показник ІМС зменшувався з $-0,52$ до $-0,21$), проте не дозволило повністю розв'язати проблему.

У фазу виходу в трубку спостерігали схожу, з незначними відхиленнями показників, ситуацію (табл. 3).

Таблиця 3 — Індеси мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунті під ячменем ярим залежно від удобрення культури

Варіанти досліджу	Фази органогенезу		
	кущіння	вихід у трубку	молочно-воскова стиглість
Без добрив, контроль	-0,07	-0,22	-0,25
Солома ^а	+0,08	+0,08	+0,13
Сидерат ^а	-0,02	-0,03	-0,06
Солома ^а + сидерат ^а	-0,11	+0,02	-0,09
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	-0,18	-0,26	-0,30
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + солома ^а + сидерат ^а	+0,14	+0,12	+0,28
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	-0,26	-0,43	-0,48
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + солома ^а + сидерат ^а	+0,03	-0,05	-0,01
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	-0,52	-0,53	-0,81
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + солома ^а + сидерат ^а	-0,21	-0,29	-0,38
Переліг	0	0	0

У фазу молочно-воскової стиглості ячменю загалом відзначали схожі до вищеописаних особливості перебігу досліджуваних процесів. Так, зокрема, переважання синтетичних процесів (ІМС зі знаком «+») спостерігали у ґрунті варіантів з післядією соломи, за післядії соломи з сидератом, за внесення N₃₀P₃₀K₃₀ по фоні післядії органічних добрив, а також наближення до показників перелогу значень у ґрунті варіанту «N₆₀P₆₀K₆₀ + солома + сидерат» (ІМС = $-0,01$).

1.3. 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 (ІМС, відповідно: $+0,06$, $+0,04$ і $+0,05$). (табл. 4).

Таблиця 4 — Індеси мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунті під горохом залежно від удобрення культури

Варіанти досліджу	Фази органогенезу		
	бутонізації	цвітіння	утворення бобів
Без добрив, контроль	-0,08	-0,06	-0,13
Солома ^б	+0,06	+0,11	+0,16
Сидерат ^б	+0,04	+0,08	+0,03
Солома ^б + сидерат ^б	+0,05	+0,15	+0,06
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	-0,49	-0,54	-0,52
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + солома ^б + сидерат ^б	+0,01	-0,05	0
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	-0,57	-0,66	-0,59
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + солома ^б + сидерат ^б	-0,11	-0,15	-0,18
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	-0,99	-0,83	-0,75
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + солома ^б + сидерат ^б	-0,71	-0,61	-0,50
Переліг	0	0	0

За використання лише мінеральних добрив спостерігали розвиток мінералізаційних процесів. Проте ситуація суттєво покращувалася за внесення мінеральних добрив по фоні другого року післядії соломи і сидеральної маси. Так, якщо ІМС за внесення до ґрунту N₃₀P₃₀K₃₀ становив $-0,49$, то за використання цієї норми добрив по фоні другого року післядії органічної речовини показник ІМС оптимізувався і становив $+0,01$.

За внесення середньої в досліді норми туків — N₆₀P₆₀K₆₀ негативний показник ІМС зростав до $-0,57$, проте за використання

цієї ж норми мінеральних добрив по фоні післядії соломи з сидератом він знижувався до $-0,11$. І лише за використання найбільшої в досліді норми добрив показник ІМС сягав $-0,99$ і дещо зменшувався при поєднанні туків з органічною речовиною — до $-0,71$.

Проведення досліджень у фазу цвітіння гороху демонструє схожі з вищеописаними залежності, хоча абсолютні показники й відрізняються. Дослідження, проведені в агроценозах гороху у фазу утворення бобів (табл. 4), загалом підтверджують відзначені вище спостереження. За другого року післядії соломи, люпинового сидерату і їх поєднання у ґрунті домінували 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 фоні другого року післядії екзогенної органічної речовини (ІМС = 0) і деяке переважання процесів мінералізації у варіанті « $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат» (ІМС = $-0,18$).

За внесення найвищої норми мінеральних добрив ($N_{90}P_{90}K_{90}$) відзначали інтенсивний розвиток мінералізаційних процесів — ІМС дорівнював $-0,75$. Застосування цієї ж норми мінеральних добрив по фоні другого року післядії соломи і сидерату забезпечувало зменшення показника ІМС до $-0,50$.

1.4. Особливості перебігу процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті агроценозів пшениці озимої. За третього року післядії органічних добрив затухав їхній вплив на досліджувані процеси. Так, у весняну фазу кущіння пшениці озимої у жодному з варіантів нами не відзначено показників ІМС зі знаком «+» (табл. 5). Проте різниця між варіантами значна. Так, за третього року післядії соломи, люпинового сидерату та їх поєднання показники ІМС наближалися до «0», що свідчить про екологічне благополуччя у цих варіантах. І навпаки, за використання мінеральних добрив від'ємні значення ІМС були

одними з найбільших у досліді, причому зі збільшенням норм туків вони зростали (з $-0,57$ за внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ до $-0,67$ за внесення $N_{60}P_{60}K_{60}$ і до $-0,84$ за $N_{90}P_{90}K_{90}$). Водночас застосування мінеральних добрив по фоні третього року післядії соломи і люпинового сидерату забезпечувало деяке зменшення інтенсивності мінералізаційних процесів у ґрунті. Схожі залежності, хоча і з різними абсолютними значеннями спостерігали також і в наступні фази органогенезу пшениці озимої (табл. 5).

Отримані дані підтверджуються результатами досліджень, проведених в інші роки.

Таблиця 5 — Індекси мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунті під пшеницею озимою залежно від удобрення культури

Варіанти досліді	Фази органогенезу		
	кущіння	вихід у трубку	молочно-воскова стиглість
Без добрив, контроль	$-0,22$	$-0,13$	$-0,13$
Солома ^c	$-0,08$	$-0,08$	$-0,02$
Сидерат ^c	$-0,03$	$-0,05$	$-0,02$
Солома ^c + сидерат ^c	$-0,07$	0	$-0,04$
$N_{30}P_{30}K_{30}$	$-0,57$	$-0,36$	$-0,27$
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома ^c + сидерат ^c	$-0,05$	$-0,08$	$-0,07$
$N_{60}P_{60}K_{60}$	$-0,67$	$-0,49$	$-0,60$
$N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома ^c + сидерат ^c	$-0,45$	$-0,17$	$-0,13$
$N_{90}P_{90}K_{90}$	$-0,74$	$-0,91$	$-0,67$
$N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома ^c + сидерат ^c	$-0,58$	$-0,49$	$-0,29$
Переліг	0	0	0

Підсумовуючи, варто зазначити таке. Якщо прослідкувати за змінами індексів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті протягом ротації сівозміни «картопля – ячмінь ярий – горох – пшениця озима», можна зробити висновок про позитивні

екологічні наслідки застосування соломи, люпинового сидерату та поєднання соломи із сидератом протягом трьох років.

За внесення до ґрунту мінеральних добрив розвиваються мінералізаційні процеси, причому їх інтенсивність зростає зі збільшенням норм туків. Застосування невисоких норм мінеральних добрив по фоні дії та другого-третього років післядії соломи і сидерату забезпечує домінування синтетичних процесів у ґрунті. За поєднання середніх у досліді норм туків з соломою і сидеральною біомасою ситуація наближається до норми, проте спостерігається деяке переважання процесів мінералізації органічної речовини у ґрунті.

Високі норми мінеральних добрив призводять до значної інтенсифікації мінералізаційних процесів. За їх поєднання з соломою і сидератом ситуація хоча й покращується, проте процеси мінералізації органічної речовини у ґрунті домінують.

Варто зазначити, що в удобренні сільськогосподарських культур азотним добривам надається особливе значення. Як вже згадувалося вище, мінеральний азот є одним із найпотужніших важелів впливу на формування урожайності сільськогосподарських культур. Водночас невисокі ступені засвоєння культурними рослинами діючої речовини із синтетичних азотних добрив (у межах 35–50 %) призводять до того, що невикористана рослинами частина мінерального азоту може негативно впливати на стан довкілля. Це і забруднення ґрунтових вод та водойм нітратами, і емісія закису азоту. Численні дослідження свідчать, що внесення підвищених норм азотних добрив призводить також і до інтенсивної деструкції стабільної ОРГ (Khan et al., 2007; Mulvaney et al., 2009; Russell et al., 2009; Robertson et al., 2013; Frossard et al., 2016). Однак негативний вплив тривалого використання синтетичних азотних добрив на стабільну ОРГ останнім часом ставиться під сумнів. Так, на думку Poffenbarger et al. (2017), мінеральний азот забезпечує збільшення запасів органічної речовини в ґрунті внаслідок впливу на зростання рослинної біомаси, особливо при застосуванні агрономічно оптимальних його норм. Низка дослідників також вважають, що синтетич-

не азотне добриво може зменшувати мінералізацію ОРГ (Craine et al., 2007; Li et al., 2017; Zang et al., 2017).

На нашу думку, спрямованість та інтенсивність процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунті за впливу мінерального азоту залежить від конкретної екосистеми (насамперед від рівня азотного удобрення; крім того, важливими чинниками можуть бути тип ґрунту, рівень його насичення органічним С, вид сільськогосподарської культури, історія поля та ін.).

Це підтверджується результатами проведених досліджень. Як показано вище, отримані в досліді результати впливу азотних добрив на індекси мінералізації ↔ синтезу органічної речовини демонструють переважання мінералізаційних процесів над синтетичними у разі системного застосування добрив без поповнення ґрунту джерелами вуглецю. Маючи показники ІМС для чотирьох рівнів азотного удобрення в досліді (N_0 , N_{min} , N_{mid} , N_{max}), ми змоделювали їх залежність від норм добрив у діапазоні 0–120 кг/га (рис. 2). Отримуємо загальний тренд — майже пряма низхідна залежність індексів від норм добрив.

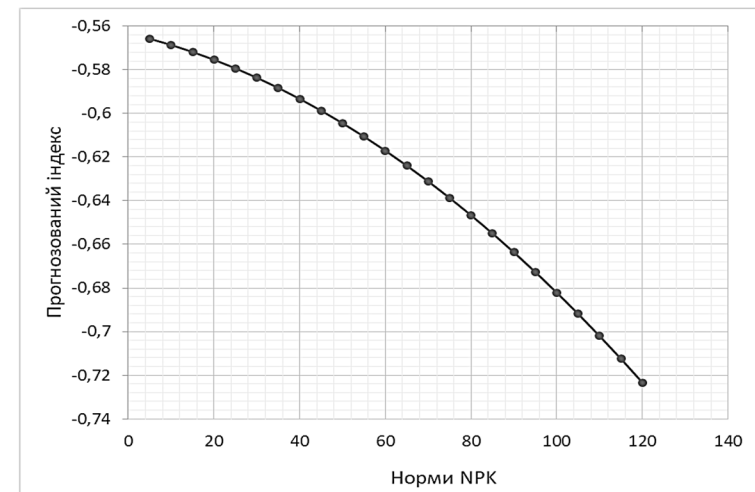


Рис. 2. Залежність прогнозованих індексів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунті від норм мінерального азоту (без надходження до ґрунту джерел вуглецю).

За моделювання залежності ІМС від норм азотних добрив, застосованих по фоні 5 т/га соломи і біомаси проміжного люпинового сидерату, маємо параболічну залежність: у діапазоні 50–80 кг/га мінерального азоту спостерігаємо індекси зі знаком «+» (переважання синтетичних процесів), а збільшення норм добрив призводить до негативних значень («-») цього показника, які зростають зі збільшенням норм добрив (рис. 3).

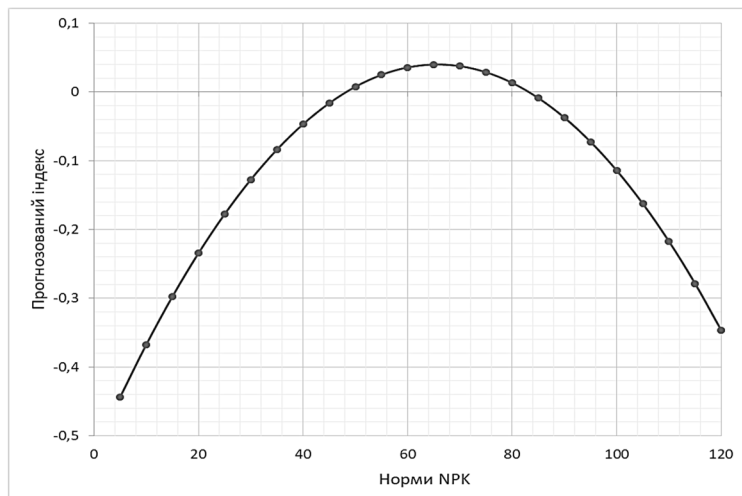


Рис. 3. Залежність прогнозованих індексів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунті від норм мінерального азоту (за внесення 5 т/га соломи і біомаси проміжного люпинового сидерату — 3700 кг/га С).

Отже, для підтримання позитивних значень ІМС зі збільшенням норм мінерального азоту варто збільшувати надходження до ґрунту вуглецю у вигляді свіжої органічної речовини з широким співвідношенням С/Ν.

У зв'язку з цим доцільно згадати теоретичні висновки, які свідчать про необхідність оптимізації стехіометричного співвідношення реактивного азоту і доступного для мікроорганізмів

вуглецю в ґрунті для досягнення бажаної секвестрації С (Mooshammer et al., 2014; Kirkby et al., 2014).

У нашому дослідженні на чорноземі вилугуваному для оптимізації ситуації при застосуванні невисоких і середніх норм мінерального азоту достатньо вносити 5 т/га соломи по фоні проміжного люпинового сидерату. Дія органічних добрив чітко прослідковується протягом трьох років після їх внесення. 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 солому ячменю ярого, який вирощується в сівозміні.

2. АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКІВ СТЕХІОМЕТРИЧНО ВІДПОВІДНИХ НОРМ АЗОТНИХ ДОБРИВ І ДОСТУПНОГО ДЛЯ МІКРООРГАНІЗМІВ ВУГЛЕЦЮ З МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ Й ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ГУМУСОУТВОРЕННЯ У ҐРУНТІ

Для підтвердження розрахунків необхідної для ґрунтових мікроорганізмів кількості вуглецю до стехіометрично відповідних норм азотних добрив за основу взято показники, отримані в стаціонарному польовому досліді та відомі з літературних джерел інформацію щодо коефіцієнтів засвоєння сільськогосподарськими культурами діючої речовини з азотних добрив (в середньому ~50 %).

Якщо в досліджуваній сівозміні за використання невисоких норм добрив застосовано 130 кг/га мінерального азоту (40 кг/га для картоплі + 30 кг/га для ячменю +30 кг/га для гороху + 30 кг/га для пшениці), то незасвоєна рослинами частка складе 65 кг/га. Крім цього, у ґрунті є 15 мг/кг нітратного азоту і 8 мг/кг аміачного азоту, загалом — 69 кг/га. У сумі — 134 кг/га. Щоб не втратити цю кількість азоту, її потрібно трансформувати в органічні

сполуки мікробної ґрунтової біомаси. Для цього слід додатково внести до ґрунту стехіометрично відповідну кількість легкодоступного вуглецю у вигляді свіжої органічної речовини. Теоретично (за врахування оптимального співвідношення С/Н — 20/1 [36]) для метаболічного зв'язування потрібно 2680 кг/га С (134 × 20).

Якщо солома пшениці озимої містить 42 % С, то в 5 т/га міститься 2100 кг чистого вуглецю. *(Вміст N у 5 т соломи (26 кг) можна проігнорувати, оскільки він перебуває в органічній формі, а нас цікавить лише реактивний азот)*. Відповідно, співвідношення $C_{\text{соломи}}/N_{\text{мін}} = 15,67$. До оптимального для гумусоутворення показника (20/1) необхідне додаткове надходження вуглецю. Таким джерелом у досліді є біомаса проміжного люпинового сидерату. Суха надземна біомаса люпинового сидерату становить в середньому 2 т/га, суха маса коренів — ~2,2 т/га. Вміст С у біомасі люпину — 38,4 %, що в перерахунку дорівнює 1600 кг. *(Вміст азоту в біомасі люпину — 2 %. Його також можна не брати до уваги, оскільки він перебуває в органічній формі. У процесі мінералізації люпинової біомаси цей азот переважно буде трансформований мікроорганізмами в мікробну біомасу)*.

За надходження до ґрунту 3700 кг/га С (2100 + 1600) співвідношення С свіжої органічної речовини до наявного в ґрунті реактивного азоту складе 27,6, що є з надлишком достатнім для попередження втрат азотних сполук із ґрунту і переорієнтування спрямованості процесів у бік синтезу органічної ґрунтової речовини (що повністю підтверджується нашими дослідженнями коефіцієнтів мінералізації ↔ синтезу при застосуванні в сівозміні невисоких норм мінерального азоту).

За надходження 260 кг/га мінерального азоту (80 кг/га під картоплю + 60 кг/га для ячменю + 60 кг/га для гороху + 60 кг/га для пшениці озимої) незасвоєна рослинами частка складе, відповідно, 130 кг/га. Додатково у ґрунті є 15 мг/кг нітратного азоту і 8 мг/кг аміачного азоту, загалом — 69 кг/га. У сумі — 199 кг/га. Щоб не втратити цей азот, його треба перевести в органічну

форму, в біомасу мікроорганізмів. Для цього додатково внести до ґрунту свіжу органічну речовину (легкодоступний вуглець); теоретично — 3980 кг С (199 × 20 = 3980).

У 5 т/га соломи міститься 2100 кг чистого вуглецю. Вміст С у біомасі люпину — 1600 кг. За надходження до ґрунту 3700 кг С (2100 + 1600) співвідношення С свіжої органічної речовини до N мінерального складе 18,59 (3700/199). Таке співвідношення наближається, але не досягає оптимального для процесів гумусоутворення значення. Ці теоретичні розрахунки підтверджуються дослідженнями індексів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті за внесення середніх у досліді норм азотних добрив (див. табл. 2.1–2.4).

Для забезпечення стехіометричної збалансованості реактивного азоту в ґрунті й відповідної кількості вуглецю потрібне додаткове внесення 280 кг/га вуглецю. Така кількість С міститься в 667 кг соломи. Відповідно, кількість пшеничної соломи треба збільшити на 667 кг (або ~1 т). Також цю кількість вуглецю можна внести у вигляді соломи ячменю ярого після збирання урожаю цієї культури.

Якщо в сівозміні застосовано 390 кг/га мінерального азоту (120 кг/га під картоплю + 90 кг/га під ячмінь ярий + 90 кг/га під горох + 90 кг/га під пшеницю озиму), то незасвоєна рослинами частка складе 195 кг/га. Додатково в ґрунті міститься близько 69 кг/га аміачного й нітратного азоту. Загалом кількість реактивного азоту складе 264 кг/га. За надходження до ґрунту 3700 кг С (5 т/га соломи + сидеральна біомаса) співвідношення вуглецю до наявного реактивного азоту складе 14,02, що недостатньо для оптимальної трансформації мінерального азоту в органічній формі, оскільки в ґрунті будуть домінувати мінералізаційні процеси. Для забезпечення прийняттого з погляду екологічності перебігу процесів трансформації потрібно не менше ніж 5280 кг вуглецю (для досягнення співвідношення С/Н на рівні 20/1). Таким джерелом С у сівозміні може бути додаткова кількість соломи пшениці озимої, а також солома ячменю ярого. У соломі

ячменю міститься близько 42 % вуглецю. Тож для покриття 1580 кг дефіциту С (5280 – 3700 = 1580) треба додатково до 5 т/га заробити в ґрунт близько 3,8 т/га соломи (3,761 т/га) ячменю (або, за наявності, соломи пшениці озимої).

Окрім соломи й сидеральної біомаси, як джерела вуглецю можна використовувати інші вуглецевмісні речовини, взявши до уваги вміст у них С із довідкових матеріалів, або шляхом аналітичного визначення вмісту С.

З огляду на вищенаведену інформацію, алгоритм розрахунків необхідної кількості свіжої органічної речовини для метаболічного зв'язування незасвоєного рослинами мінерального азоту в ґрунті можна звести до такого:

1. Підсумовуємо кількість внесеного в ґрунт мінерального азоту в сівозміні (або в ланці сівозміни) протягом чотирьох років (оскільки через чотири роки післядія органічних добрив вже статистично недостовірна). Для розрахунків треба взяти 50 % від загальної кількості (ступінь засвоєння рослинами азоту з добрив), кг/га.

2. Визначаємо вміст ґрунтового азоту (нітратний азот + амонійний азот, мг/кг), здійснюємо перерахунок у кг/га.

3. Підсумовуємо загальну кількість реактивного азоту в ґрунті (50% від азоту мінеральних добрив + ґрунтовий азот), кг/га.

4. Отриманий показник реактивного азоту множимо на 20 (відносна кількість вуглецю для досягнення оптимального співвідношення С/Н на рівні 20/1). Отримуємо необхідну кількість вуглецю в кг/га.

5. З довідкових джерел (або шляхом аналітичного визначення) знаходимо вміст вуглецю у свіжій органічній речовині та розраховуємо відповідну кількість вуглецевмісного матеріалу.

Отже, формула розрахунку кількості вуглецю, стехіометрично відповідної нормі незасвоєного рослинами реактивного азоту, матиме такий вигляд:

$$C = [(N_d \times 0,5) + N_r] \times 20,$$

де С — необхідна кількість вуглецю, кг/га;

N_d — кількість мінерального азоту, внесеного в ланці сівозміни протягом трьох років, кг/га;

0,5 — коефіцієнт засвоєння рослинами азоту з добрив;

N_r — кількість мінерального ґрунтового азоту (сума нітратного і амонійного азоту), кг/га;

20 — показник для досягнення оптимального співвідношення С/Н на рівні 20/1).

Розрахунки необхідної кількості свіжої органічної речовини для метаболічного зв'язування незасвоєного рослинами мінерального азоту в ґрунті можна зобразити у графічному вимірі (рис. 4), де на осі ординат позначено кількість вуглецю, а на осі абсцис — кількість реактивного азоту.

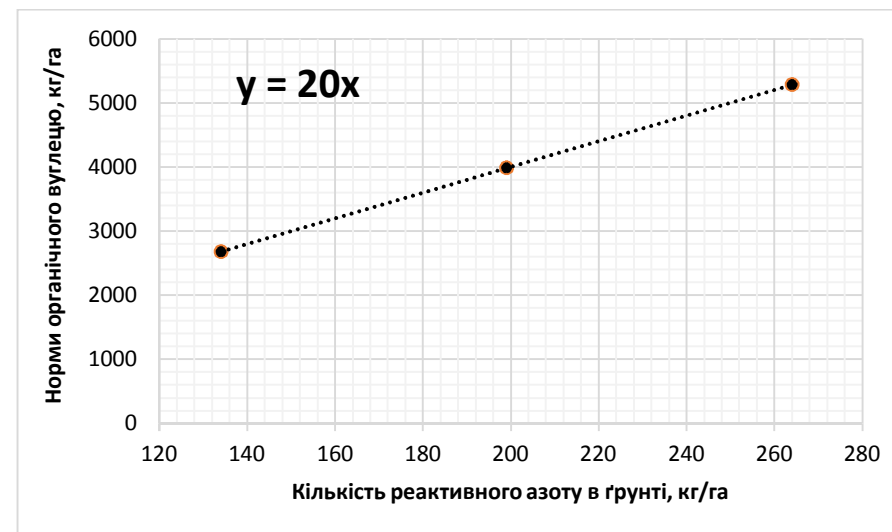


Рис. 4. Графічне відображення стехіометрично відповідної кількості вуглецю для метаболічного зв'язування реактивного азоту в чорноземі вилугуваному.

3. УРОЖАЙНІСТЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ЗАЛЕЖНО ВІД СИСТЕМ УДОБРЕННЯ

Наскільки адекватними для сільськогосподарського виробництва є запропоновані методичні підходи, можна бачити, обліковуючи врожайність сільськогосподарських культур у сівозміні. Урожайність культур у досліді демонструє залежність показників від чинників удобрення. Варто зазначити, що плануючи в досліді внесення до ґрунту соломи, ми очікували на зменшення урожайності культур, зважаючи водночас на відоме ще з початку ХХ ст. явище тимчасового дефіциту мінеральних сполук азоту для рослин при застосуванні соломи внаслідок конкуренції з ґрунтовими мікроорганізмами і необхідність додавання компенсаторної дози мінерального азоту (Hutchinson, Richards, 2021), що також підтверджують і сучасні дослідження (Rathke, Behrens, 2006). А втім, у досліді ми відзначили тенденцію до зростання урожайності культур за їх вирощування по фоні дії та післядії соломи без додаткового надходження мінерального азоту до ґрунту.

Оскільки дослід розпочато у 2009 р., ми пояснюємо такий ефект досягненням стабілізації біологічних процесів у ґрунті за цей час і відсутністю за цих умов конкуренції за азот між рослинами й мікроорганізмами.

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

Достовірний приріст урожайності картоплі (на 16,8 %), ячменю (на 16,6 %) і гороху (на 23,9 %) отримано за поєднання соломи із сидератом. Для пшениці післядія соломи і сидерату сприяла лише незначному зростанню урожайності.

Застосування мінеральних добрив у технологіях вирощування сільськогосподарських культур забезпечувало достовірне зростання їх урожайності, причому приріст збільшувався зі

Таблиця 6 — Урожайність сільськогосподарських культур залежно від систем удобрення (середнє за роки досліджень)

Системи удобрення	Картопля		Ячмінь ярий		Горох		Пшениця озима	
	урожайність, т/га	приріст до конт-ролю, %	урожайність, т/га	приріст до конт-ролю, %	урожайність, т/га	приріст до конт-ролю, %	урожайність, 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	

збільшенням норм добрив. За поєднання мінеральних добрив із соломою і сидератом загалом відзначали підсилення позитивної дії. Достовірний ефект від такого поєднання зафіксовано при застосуванні під картоплю $N_{80}P_{80}K_{80}$ по фоні соломи із сидератом. Так, за внесення $N_{80}P_{80}K_{80}$ отримано 36,35 т/га бульб картоплі, а за поєднання цієї норми добрив із соломою і сидератом — 38,46 т/га. При вирощуванні ячменю ярого застосування туків по фоні першого року післядії соломи й сидерату сприяло тенденції до зростання урожайності культури порівняно з показниками окремого використання мінеральних добрив. Достовірний приріст урожайності гороху отримано за поєднання всіх досліджених норм мінеральних добрив по фоні другого року післядії соломи із сидератом.

При вирощуванні пшениці озимої застосування мінеральних добрив по фоні третього року післядії соломи із сидератом не забезпечувало достовірного приросту врожайності порівняно з використанням туків у чистому вигляді (табл. 6).

ВИСНОВКИ

1. Прогнозування спрямованості процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті є важливим для розробки стратегій сталого землекористування.

2. Зважаючи на неповне засвоєння культурними рослинами азоту з добрив, застосування мінеральних азотних добрив у технологіях вирощування сільськогосподарських культур має супроводжуватися використанням стехіометрично відповідної кількості вуглецю у вигляді свіжої органічної речовини, що забезпечуватиме трансформацію залишкових мінеральних азотних сполук в органічні.

3. Зменшення втрат азоту в поєднанні зі збільшенням запасів цього елемента в ґрунті сприятиме зменшенню норм азотних

добрив, які необхідно вносити для підтримки врожайності сільськогосподарських культур.

4. Зважаючи на неповне використання рослинами діючої речовини з азотних добрив, пропонується в багатьох публікаціях додавання мінерального азоту до соломи для оптимізації її розкладання вважаємо недоцільним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Патент України № 119297. МПК G01N 33/24. Спосіб визначення спрямованості процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини в ґрунтах агроценозів. Волкогон В. В., Дімова С. Б., Волкогон К. І., Пиріг О. В., Британ Т. Ю. Опубл. 27.05.2019.
2. Craine J. M., Morrow C., Fierer N. Microbial nitrogen limitation increases decomposition. *Ecology*. 2007. № 88. P. 2105–2113. doi: 10.1890/06-1847.1
3. Davidson E. A., Keller M., Erickson H. E., Verchot L. V., Veldkamp D. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. *Bioscience*. 2000. № 50(8). P. 667–680. doi: 10.1641/0006-3568(2000)050[0667:TACMOS]2.0.CO;2
4. Fontaine S., Mariotti A., Abbadie L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. № 35(6). P. 837–843. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8)
5. Frossard E., Buchmann N., Bünemann E. K. et al. Soil properties and not inputs control carbon, nitrogen, phosphorus ratios in cropped soils in the longterm. *Soil*. 2016. № 2. P. 83–99. doi: 10.5194/soil-2-83-2016
6. Garcia-Montiel D., Melillo J., Steudler P. A. et al. Relationship between N₂O and CO₂ emissions from the Amazon Basin. *Geophysical Research Letters*. 2002. 29(6). 141–143. doi: 10.1029/2001GL013830
7. Hutchinson H. B., Richards E. H. Artificial farmyard manure. *J. Ministry Agric. (London)*. 1921. № 28. P. 398–411.
8. Hutchinson G. L., Livingston G. P., Healy R. W., Striegl R. G. Chamber measurement of surface-atmosphere trace gas exchange: numerical evaluation of dependence on soil, interfacial layer, and source/sink properties. *J. Geophysical Research*. 2000. № 105. P. 8865–8875. doi: 10.1029/1999JD901204
9. Jenkinson D. S., Parry L. C. The nitrogen cycle in the Broadbalk Wheat Experiment: a model for the turnover of nitrogen through

the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 1989. № 21. P. 535–541.

10. Khan S. A., Mulvaney R. L., Ellsworth T. R., Boast C. W. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J. Environ. Qual.* 2007. № 36. P. 1821–1832. doi: 10.2134/jeq2007.0099
11. Kirkby C., Richardson A. E., Wade L., Passioura J. B., Batten G., Blanchard C. & Kirkegaard J. Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils. *Soil Biol. Biochem.* 2014. № 68. P. 402–409. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.09.032
12. Kusa K., Sawamoto T., Hu R., Hatano R. Comparison of the closed-chamber and gas concentration gradient methods for measurement of CO₂ and N₂O fluxes in two upland field soils. *Soil Science and Plant Nutrition*. 2008. № 54. P. 777–785. doi: 10.1111/j.1747-0765.2008.00292.x
13. Ladha J. K., Pathak H. J., Krupnik T., Six J., van Kessel, C. Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. *Advances in Agronomy*. 2005. № 87. P. 85–156. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)
14. Li C., Frolking S., Butterbach-Bahl K. Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing. *Climatic Change*. 2005. 72. 321–338. doi: 10.1007/s10584-005-6791-5
15. Li X. G., Jia B., Lv J., Ma Q., Kuzyakov Y., Li F. M. Nitrogen fertilization decreases the decomposition of soil organic matter and plant residues in planted soils. *Soil Biol. Biochem.* 2017. № 112. P. 47–55. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.04.018
16. Liang D., Zhang Q., Zhang W., Liu L., Liang H., Quirino R. L. et al. Tunable thermo-physical performance of castor oil-based polyurethanes with tailored release of coated fertilizers. *J. Cleaner Prod.* 2019. № 210. P. 1207–1215. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.047
17. Mooshammer M., Wanek W., Zechmeister-Boltenstern S. & Richter A. Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications

of microbial adaptations to their resources. *Frontiers in Microbiology*. 2014. № 5. Article 22. doi: 10.3389/fmicb.2014.00022

18. Mulvaney R. L., Khan S. A., Ellsworth T. R. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: a global dilemma for sustainable cereal production. *J. Environ. Qual.* 2009. № 38. P. 2295–2314. doi: 10.2134/jeq2008.0527

19. Poffenbarger H. J., Barker D. W., Helmers M. J. et al. Maximum soil organic carbon storage in Midwest US cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized. *PLoS ONE*. 2017. № 12, article e0172293. doi: 10.1371/journal.pone.0172293

20. Poulton P., Johnston J., Macdonald A., White R., Powlson D. Major limitations to achieving “4 per 1000” increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Glob Change Biol*. 2018. № 24. P. 2563–2584. doi: 10.1111/gcb.14066

21. Rathke G.-W., Behrens T., Diepenbrock W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Agriculture, Ecosystems and Environments*. 2006. № 117. P. 80–108. doi: 10.1016/j.agee.2006.04.006

22. Robertson G. P., Bruulsema T. W., Gehl R. J. et al. Nitrogen-climate interactions in US agriculture. *Biogeochemistry*. 2013. № 114. P. 41–70. doi: 10.1007/s10533-012-9802-4

23. Russell A. E., Cambardella C. A., Laird D. A., Jaynes D. B., Meek D. W. Nitrogen fertilizer effects on soil carbon balances in Midwestern US agricultural systems. *Ecol. Appl.* 2009. № 19. P. 1102–1113. doi: 10.1890/07-1919.1

24. Sahrawat K. L. & Keeney D. R. (1986). Nitrous oxide emission from soils. *Adv. Soil. Sci.* 4, 103–147. doi: 10.1007/978-1-4613-8612-4_2

25. Smith M. S., Firestone M. K., Tiedje J. M. The Acetylene Inhibition Method for Short-term Measurement of Soil Denitrification and its Evaluation Using Nitrogen-13. *Soil Sci. American J.* 1978. № 42(4). P. 611–615. doi: 10.2136/sssaj1978.03615995004200040015x/

26. Spalding R. F. & Exner M. E. Occurrence of nitrate in groundwater — a review. *J Environ Qual.* 1993. № 22. P. 392–402. doi: 10.2134/jeq1993.00472425002200030002x

27. Stoate C., B'aldi A., Beja P. et al. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe — a review. *J Environ Manage*. 2009. № 91. P. 22–46. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.07.005

28. Swift M. J., Heal O. W., Anderson J. M. Decomposition in terrestrial ecosystems. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1979. 372 p.

29. Tiedje J. M., Simkins S. & Groffman P. M. Perspectives on measurement of denitrification in the field including recommended protocols for acetylene-based methods. *Plant Soil*. 1989. № 115. P. 261–284. <https://doi.org/10.1007/BF02202594>

30. Tilman D. Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. *P. Natl. Acad. Sci. USA*. 1999. 96. 5995–6000.

31. Vitousek P. M., Aber J. D., Howarth R. W. et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. 1997. *Ecological Applications*. 7(3). 737–750.

32. Volkogon V. V., Pyrig O. V., Volkohon K. I., Dimova S. B. Methodological aspects of determining the processes of organic matter mineralization ↔ synthesis in croplands. *Agric. sci. pract.* 2019. № 6(1). P. 3–9. doi: 10.15407/agrisp6.01.003

33. Zang H., Wang J., Kuzyakov Y. N fertilization decreases soil organic matter decomposition in the rhizosphere. *Appl. Soil Ecol.* 2016. № 108. P. 47–53. doi: 10.1016/j.apsoil.2016.07.021

Наукове видання

Оптимізація процесів трансформації
органічної речовини у чорноземі вилугуваному
за використання стехіометрично відповідних норм
мінерального азоту і легкодоступного вуглецю

(науково-методичні рекомендації)

<i>В. В. Волкогон</i>	<i>Л. А. Шевченко</i>
<i>А. М. Москаленко</i>	<i>Т. С. Сасіна</i>
<i>С. Б. Дімова</i>	<i>В. П. Горбань</i>
<i>К. І. Волкогон</i>	<i>І. В. Волкогон</i>
<i>Ю. М. Халеп</i>	<i>М. М. Пархоменко</i>

Комп'ютерна верстка та макетування *В. О. Агеєв*
Коректура *О. В. Ільчук*

Підписано до друку 19.12.2025 р. Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура Arial.
Умовн. друк. арк. 1,86. Обл.-вид. арк. 1,26.
Зам. № 25283-01. Наклад 50 прим.

Видавець та виготовлювач: ФОП Агеєв В. О.
Свід. про внесення до держ. реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК, № 8282 від 02.05.2025.
Запис в єдиному держ. реєстрі № 201035000000182294 від 01.08.2022.
Україна, 14005, м. Чернігів, вул. В'ячеслава Чорновола, 4, к. 15.
<http://siver-druk.com.ua> e-mail: siverdruk11@gmail.com