

Національна академія аграрних наук України
Інститут сільськогосподарської мікробіології
та агропромислового виробництва

**ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА
ЗАХОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ
ТРАНСФОРМАЦІЇ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ
В ЧОРНОЗЕМІ ВИЛУГУВАНОМУ**

(науково-методичні рекомендації)

Чернігів
2023

УДК 631.452:631.474:631.452:631.474
Е45

Еколого-економічна оцінка заходів оптимізації процесів трансформації органічної речовини в чорноземі вилугуваному (науково-методичні рекомендації) / Ю. М. Халеп, В. В. Волкогон, А. М. Москаленко, Д. В. Іванов, К. М. Сашченко. Чернігів : видавець Брагінець О. В., 2023. 28 с.

ISBN 978-617-7570-74-4

У рекомендаціях розглянуто біологічні та еколого-економічні аспекти оптимізації спрямованості процесів трансформації органічної речовини в агроценозах. Методичні підходи проілюстровано розрахунками на прикладі результатів тривалого польового стаціонарного досліджу на науково-дослідному полігоні ІСМАВ НААН.

Призначено для керівників та спеціалістів сільського господарства, землевласників, наукових працівників, викладачів і студентів.

УДК 631.452:631.474:631.452:631.474

Рецензенти:

– головний науковий співробітник відділу земельних відносин та природокористування ННЦ «Інститут аграрної економіки» НААН, доктор економічних наук, професор, член-кореспондент НААН **Федоров М. М.**;

– завідувач відділу агрохімії ННЦ «Інститут землеробства НААН», доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, член-кореспондент НААН **Дегодюк С. Е.**

Матеріали розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради (протокол № 11 від 09 листопада 2023 р.) та Координаційно-методичної ради Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН (протокол № 3 від 23 листопада 2023 р.).

ISBN 978-617-7570-74-4

© ІСМАВ НААН, 2023

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Біологічні аспекти оптимізації спрямованості процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в агроценозах	5
2. Еколого-економічна оцінка оптимізації процесів трансформації органічної речовини в чорноземі вилугуваному	10
2.1. Методика проведення еколого-економічної оцінки процесів трансформації органічної речовини в агроценозах	10
2.2. Приклади визначення еколого-економічної ефективності заходів оптимізації вуглецево-азотного співвідношення в ґрунті (за результатами польового стаціонарного дослідження ІСМАВ НААН на чорноземі вилугуваному)	13
3. Напрями управління спрямованістю процесами біологічної трансформації органічної речовини в ґрунті та їхня еколого-економічна оцінка	20
Заключення	24
Література	25

ВСТУП

В Україні продовжує залишатися нагальною та потребує невідкладного розв'язання проблема відтворення родючості ґрунтів, яка загострюється через дефіцит у них свіжої органічної речовини, спотворення структури й функцій угруповань мікроорганізмів за однобокого трактування принципів забезпечення культурних рослин поживними речовинами. Унаслідок цього запаси гумусу в орних ґрунтах невпинно знижуються. Це зумовлює необхідність забезпечення ґрунтів свіжою органічною речовиною (гній, солома, сидерати тощо) та умов оптимізації процесів її гуміфікації. Одним із шляхів розв'язання зазначеної проблеми є забезпечення ґрунту органічною речовиною та оптимізація вуглецево-азотного співвідношення (C/N) за різних систем і рівнів удобрення з метою, зокрема, запобігання як руйнуванню гумусових сполук, так і непродуктивних втрат Нітрогену.

Водночас експериментально визначені досить широкі діапазони оптимального (з точки зору перебігу біологічних процесів) співвідношення C/N (20-30/1) потребують обґрунтування вибору таких варіантів, які б забезпечували підвищення економічної ефективності виробництва за умови дотримання параметрів екологічної сталості агроценозів: позитивних балансів гумусу та сполук основних елементів живлення (NPK), що потребує відповідного науково-методичного забезпечення.

У рекомендаціях наведено особливості проведення еколого-економічної оцінки заходів оптимізації процесів трансформації органічної речовини в агроценозах та шляхи їх реалізації.

1. БІОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМІЗАЦІЇ СПРЯМОВАНOSTІ ПРОЦЕСІВ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ↔СИНТЕЗУ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ В АГРОЦЕНОЗАХ

Як відомо, ступені засвоєння рослинами Нітрогену з добрив не перевищують 35–55 % [1; 2]. Коли до ґрунту системно надходить доступний Карбон у вигляді свіжої органічної речовини, значна частина незасвоєного рослинами Нітрогену може тимчасово іммобілізуватися мікроорганізмами. Середній час обороту іммобілізованого в мікробній біомасі Нітрогену складає близько 1,5 року [3], тож повернення (мінералізація) його для засвоєння рослинами сприятиме підвищенню урожайності наступних у сівозміні сільськогосподарських культур. Системне дотримання принципів оптимізації вмісту в ґрунті легкодоступного Карбону (наприклад, за використання післязбиральних решток, вирощування проміжних сидеральних культур і ін.) та застосування науково обґрунтованих норм мінеральних добрив зможуть забезпечити збалансованість процесів трансформації Нітрогену, мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті й стабілізацію агроєкосистем. Натомість за дефіциту в ґрунті свіжої органічної речовини невикористана частка мінеральних азотних сполук частково вимивається, що призводить до евтрофікації [4], забруднення поверхневих і ґрунтових вод [5], а частково надходить до атмосфери у вигляді озоноруйнівного газу N_2O [6]. Крім того, за таких умов надлишок Нітрогену в ґрунті може ініціювати розвиток специфічних угруповань ґрунтових мікроорганізмів, здатних використовувати як джерело Карбону гумусові сполуки [7]. Наслідком цього, крім забруднення ґрунтових вод нітратами та зростання емісії N_2O , є розвиток біологічної дегуміфікації ґрунту. Отже, невикористану рослинами частину мінерального Нітрогену необхідно утримувати від вимивання та емісії шляхом

метаболічного зв'язування мікроорганізмами, розвиток яких потребує додаткового надходження свіжої органічної речовини з широким співвідношенням C/N. Важливою при цьому є оптимізація співвідношення кількості Карбону з нормами мінерального Нітрогену.

Мікробна ґрунтова біомаса зростає або зменшується у відповідь на зміни в управлінні ґрунтом набагато швидше, ніж органічна речовина ґрунту загалом, де такі зміни можуть тривати багато років, перш ніж їх можна буде виявити за використання класичного хімічного аналізу. Відповідно, ґрунтова мікробна біомаса може служити «раннім попередженням» про такі зміни. Це підтверджується висновками низки науковців, які показали сильну кореляцію між загальним вмістом органічного Карбону у ґрунті та розміром мікробної біомаси ґрунту в різних кліматичних умовах та екосистемах.

Сьогодні показники біомаси ґрунту вже широко рекомендовано використовувати як індикатор якості ґрунту, і є кілька програм моніторингу якості ґрунтів, куди це включено (Данія, Нідерланди, Нова Зеландія та ін.).

Безперечно, показники змін мікробної біомаси не варто трактувати як єдиний і універсальний індикатор якості ґрунту і продуктивності агроценозів. Водночас їх з успіхом можна застосовувати як показник циклу енергії/C у ґрунтах і, базуючись на цих даних, ухвалювати оперативні рішення щодо доцільності тих чи інших агроприймів.

Як доповнення до визначення вмісту мікробної біомаси в ґрунтах за їхньої діагностики запропоновано також дослідження функціональних особливостей мікроорганізмів. Зокрема, газохроматографічно визначене емісійне співвідношення $\mu\text{g N-N}_2\text{O/kg C-CO}_2$ за порівняння показників з даними «еталонного» ґрунту (переліг, цілинна ділянка тощо) дозволяє виявити спрямованість процесів мі-

нералізації↔синтезу органічної речовини. Аналіз отриманих даних дозволяє швидко реагувати на виявлені зміни і пропонувати заходи оптимізації стану ґрунту [8].

Запропоновано також мікробіологічні рішення щодо обґрунтування екологічно допустимих рівнів азотного удобрення сільськогосподарських культур за показниками активності процесу азотфіксації в кореневій зоні рослин [9].

Як відомо, гумус одночасно є акумулятором Карбону (і, відповідно, енергії) і носієм тимчасово зв'язаних сполук біогенних елементів [10; 11]. Зі свого боку синтез гумусових сполук можливий лише за наявності в ґрунті свіжої органічної речовини. Проте надходження її до ґрунтів сьогодні обмежене через різке зменшення обсягів застосування гною, ігнорування сівозмін, зведення до мінімуму площ вирощування трав, спалювання соломи тощо. Водночас активно проходять процеси дегуміфікації [12–14]. Підсилює деградацію гумусу також і підкислення ґрунтів [15; 16]. Ці процеси ще більше посилюються за внесення підвищених доз азотних добрив, що призводить до інтенсивної деструкції всіх високомолекулярних фракцій гумусових кислот [17–19]. Встановлено, що кожна одиниця Нітрогену добрив сприяє вивільненню від 0 до 1,2 одиниць ґрунтового Нітрогену за рахунок мінералізації гумусу [20]. Сьогодні можна також стверджувати, що за високих норм мінерального Нітрогену інтенсивно розвивається біологічна дегуміфікація ґрунтів, оскільки надлишок рухомого Нітрогену в ґрунті викликає у ґрунтових мікроорганізмів посилену потребу у Карбоні, а за відсутності свіжої органічної речовини окремі їхні представники використовують гумусові сполуки як джерело Карбону й енергії [7; 21; 22].

У зв'язку з цим набуває актуальності пошук шляхів забезпечення ґрунтів органічною речовиною та оптимізації процесів гумусоутворення.

Біологічні аспекти оптимізації спрямованості процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в агроценозах детально вивчали науковці ІСМАВ НААН, зокрема в тривалому польовому стаціонарному досліді на науково-дослідному полігоні Інституту з метою дослідження особливостей емісії закису Нітрогену з чорнозему вилугуваного за щораз вищих норм мінеральних добрив та надходження свіжої органічної речовини різного походження, а також визначення необхідної кількості Карбону для оптимізації біологічних процесів під час застосування туків. У досліді передбачено короткочасну сівозміну: картопля → ячмінь ярий → горох → пшениця озима. Грунт — чорнозем вилугуваний, який містить гумусу — 3,03 %, Нітрогену 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. Схемою досліді передбачено різні варіанти систем удобрення (табл. 1).

Багаторічними дослідженнями встановлено, що за внесення органічних добрив (гною, соломи, біомаси люпинового сидерату та їх поєднання) зменшуються питомі ($г\ N-N_2O/кг\ C-CO_2$) втрати Нітрогену з ґрунту. Найбільші питомі втрати $N-N_2O$ у досліді спостерігаються у варіантах з використанням мінеральних добрив. Водночас застосування туків у невисокій (100 кг/га діючої речовини (д. р.) у ланці сівозміни) та середній (200 кг/га д. р.) нормах по фону 5 т/га соломи й 13 т/га люпинового сидерату сприяє зменшенню показників (навіть нижче контрольного), що свідчить про іммобілізацію невикористаної рослинами частини мінеральних азотних сполук. При цьому для оптимізації співвідношення C/N не потрібне додаткове застосування мінерального Нітрогену. Поєднання найвищої в досліді норми мінеральних добрив (300 кг/га у ланці сівозміни) з соломою і сидератом не дозволяє знизити питомі втрати $N-N_2O$ до рівня контролю, що свідчить про надлишковість мінерального Нітрогену в ґрунті в цьому разі. Запропоновано формулу

Таблиця 1. Системи удобрення сільськогосподарських культур у сіввозміні

№ варіанту	Система удобрення	Удобрення культур				
		картопля	ячмінь ярий	горох	пшениця озима	
1	Без добрив (контроль)	Без добрив	без добрив	без добрив	без добрив	
2	Солома	Солома, 5 т/га	a	b	c	
3	Сидерат	Проміжний сидерат (люпин вузьколистий)	a	b	c	
4	Гній	40 т/га гною	a	b	c	
5	Солома + сидерат	Солома + сидерат	a	b	c	
6	Гній + сидерат	40 т/га гною + сидерат	a	b	c	
7	Мінеральна невисока	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	
8	Мінеральна невисока + солома + сидерат	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀ + солома + сидерат	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + a	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + b	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + c	
9	Мінеральна середня	N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	
10	Мінеральна середня + солома + сидерат	N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀ + солома + сидерат	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + a	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + b	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + c	
11	Мінеральна висока	N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	
12	Мінеральна висока + солома + сидерат	N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + солома + сидерат	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + a	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + b	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + c	
13	Гній + мінеральна	40 т/га гною + N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + a	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + b	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + c	
14	Гній + мінеральна + сидерат	40 т/га гною + сидерат + N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + a	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + b	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + c	

Примітки: a — першого року післядія органічних добрив; b — другого року післядія органічних добрив; c — третього року післядія органічних добрив.

розрахунків необхідної кількості Карбону для оптимізації співвідношення C/N за застосування різних норм азотних добрив у технологіях вирощування сільськогосподарських культур, що забезпечує збалансованість мінералізаційних і синтетичних процесів у ґрунті. Отже, в процесі вирощування сільськогосподарських культур на чорноземі вилугуваному застосування розрахункових норм свіжої органічної речовини (гній, солома, люпиновий сидерат та їх поєднання, у т. ч. з мінеральними добривами) сприяє оптимізації перебігу мікробіологічних процесів в агроценозах. За цих умов невикористаний рослинами Нітроген мінеральних сполук метаболічно зв'язується (імобілізується) мікроорганізмами, зменшується емісія N₂O і норми мінеральних добрив, що не перевищують 200 кг/га д. р. у сівозміні, стають екологічно прийнятними.

2. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТРАНСФОРМАЦІЇ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ В ЧОРНОЗЕМІ ВИЛУГУВАНОМУ

2.1. Методика проведення еколого-економічної оцінки процесів трансформації органічної речовини в агроценозах.

За методологічну основу проведення оцінки нами прийнято досягнення максимального рівня еколого-економічної ефективності у вигляді максималізації економічних результатів за дотримання таких параметрів екологічної сталості агроценозу:

– позитивні баланси гумусу по сівозміні (з інтенсивністю на рівні не менше від рекомендованих оптимальних 105–110 %) та NPK;

– забезпечення співвідношення C/N у межах рекомендованих оптимальних 20-30/1.

Нормативно-методичну базу оцінки згідно з наведеними положеннями представлено як загальну логічно-смыслову модель укрупнених (результуючих) блоків на рис. 1.

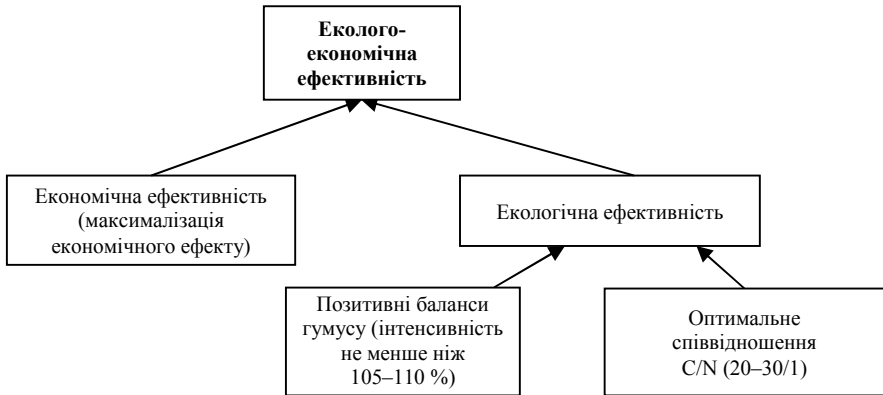


Рисунок 1. Загальна блок-схема оцінки еколого-економічної ефективності сільськогосподарського виробництва щодо умов дослідження.

Методика розрахунків **екологічної ефективності** включала низку наведених нижче аспектів.

Визначення співвідношення C/N проводили за врахування джерел їх надходження до ґрунту. Оскільки в літературі відсутній детальний перелік згаданих джерел, наводимо його за авторським баченням. Так, зокрема, до джерел надходження Карбону віднесено:

- вивільнення в процесі мінералізації гумусу за вирощування відповідних сільськогосподарських культур;
- з посадковим матеріалом;
- з побічною продукцією (залежно від системи удобрення);
- з корінням та післязбиральними рештками;
- з органічними добривами.

До джерел надходження Нітрогену віднесено:

- вивільнення в процесі мінералізації гумусу за вирощування відповідних сільськогосподарських культур;
- з посадковим матеріалом;
- з побічною продукцією (залежно від системи удобрення);
- з корінням та післязбиральними рештками;
- з органічними добривами;
- з мінеральними добривами з урахуванням загальноприйнятого показника непродуктивних втрат на рівні 50 % мінерального Нітрогену.

В процесі **екологічної оцінки** баланси гумусу та NPK визначали як різницю між їх надходженням (утворенням) в ґрунт із різних джерел органічної речовини й мінеральних добрив та статтями витрат згідно із загальноприйнятими методиками [23; 24]. Додатково враховано надходження Нітрогену від мінералізації гумусу під певними сільськогосподарськими культурами [25].

Критеріями екологічної оцінки, як уже зазначалося, є забезпечення позитивного балансу гумусу з інтенсивністю балансу в межах рекомендованих 105–110 % [26] та позитивних балансів NPK. Щодо балансів NPK допускається також незначний дефіцит (унаслідок вирощування сільськогосподарських культур) у межах, які є прийнятними для збереження екологічної рівноваги агроценозу [27].

У процесі проведення **економічної оцінки** основні результати економічні показники (собівартість продукції, прибуток, рівень рентабельності виробництва, окупність додаткових витрат додатковим прибутком) визначалися за загальновідомими формулами на основі розроблених технологічних карт та калькулювання собівартості продукції.

2.2. Приклади визначення еколого-економічної ефективності заходів оптимізації вуглецево-азотного співвідношення в ґрунті (за результатами польового стаціонарного дослідження ІСМАВ НААН на чорноземі вилугуваному).

Екологічна ефективність

Основні показники екологічної ефективності вирощування с.-г. культур наведено в табл. 2. Як можна бачити, в контрольному варіанті (без застосування добрив) співвідношення C/N становить 23,9/1, тобто перебуває в межах біологічного оптимуму (20–30/1). Водночас баланси гумусу та основних елементів живлення (NPK) мають від’ємні значення зі значним дефіцитом та низькою їх інтенсивністю. Отже, цей варіант характеризується незадовільним рівнем екологічної ефективності.

Застосування мінеральної невисокої системи удобрення дещо звужує значення співвідношення C/N (22,2/1), як порівняти з контрольним варіантом, за рахунок внесення мінерального Нітрогену (табл. 2). Водночас дефіцит балансу по гумусу зменшується за рахунок додаткового надходження органічної речовини з рештками вирощуваних сільськогосподарських культур унаслідок підвищення продуктивності сівозміни (табл. 3). Баланс Фосфору набуває позитивного значення, а баланси Нітрогену та Калію — в дефіциті, який є більшим, як порівняти з контролем.

За використання середньої в досліді норми туків спостерігається подальше звуження C/N — 21,4/1 (табл. 2). Подальше підвищення продуктивності сівозміни (табл. 3) та, як наслідок, збільшення маси решток, сприяють зменшенню дефіциту гумусу та зростанню профіциту Фосфору. При цьому Нітроген і Калій залишаються в дефіциті, але він є меншим, як порівняти з контрольним варіантом.

Таблиця 2. Основні показники екологічної ефективності агроценозів за досліджуваних систем удобрення

№ варіанту	Система удобрення	C/N*	Баланси та їхня інтенсивність (абсолютні показники на 1 га сівозмінної площі)							
			гумус		N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
			баланс, +/- т/га	інтенсивність, %	баланс, +/- кг/га	інтенсивність, %	баланс, +/- кг/га	інтенсивність, %	баланс, +/- кг/га	інтенсивність, %
1	Без добрив (контроль)	23,9	-0,48	67,2	-29,5	60,5	-21,5	9,2	-47,3	22,3
2	Солома	26,8	-0,23	82,7	-28,4	64,8	-21,3	16,4	-39,6	39,7
3	Сидерат	22,3	-0,35	76,2	-10,0	88,2	-19,4	27,7	-46,4	33,3
4	Гній	24,3	0,13	106,3	2,3	102,4	-2,5	91,6	-6,0	92,5
5	Солома + сидерат	24,6	-0,08	93,0	-5,2	94,0	-18,0	34,4	-35,9	49,7
6	Гній + сидерат	23,2	0,20	110,9	25,3	125,2	0,7	102,3	-2,6	96,9
7	Мінеральна невисока	22,2	-0,32	79,0	-30,2	72,3	3,9	112,8	-32,7	58,5
8	Мінеральна невисока + солома + сидерат	22,8	-0,03	97,5	-0,1	99,9	9,4	128,8	-15,7	81,2
9	Мінеральна середня	21,4	-0,14	90,9	-26,2	81,1	31,3	187,0	-16,7	82,5
10	Мінеральна середня + солома + сидерат	22,2	0,22	113,8	2,0	101,4	36,1	193,9	-1,4	98,7
11	Мінеральна висока	20,1	-0,04	97,9	-17,3	89,4	60,1	252,0	5,4	105,1
12	Мінеральна висока + солома + сидерат	21,1	0,32	121,0	12,0	107,1	65,3	256,8	21,1	118,8
13	Гній + мінеральна	22,7	0,36	122,6	5,4	103,9	36,1	193,5	18,7	118,3
14	Гній + мінеральна + сидерат	21,8	0,46	129,4	29,4	120,3	39,7	198,7	22,9	121,3

*) співвідношення Карбону до Нітрогену в органічній речовині, що надходить до ґрунту протягом року за різних систем удобрення (включно з післязбиральними та корневими рештками).

За мінеральної високої системи удобрення з подальшим звуженням C/N до 20,1/1 (табл. 2) досягається практично бездефіцитний баланс гумусу та позитивний баланс Калію, а профіцит Фосфору і надалі значно зростає. Водночас зменшується дефіцит Нітрогену, як порівняти з попередніми розглянутими варіантами.

За внесення соломи як органічного добрива значно розширюється співвідношення C/N проти контрольного варіанту — до 26,8/1 (табл. 2). Дефіцит балансу по гумусу значно зменшується як за рахунок соломи, так і додаткового надходження мортмаси з рештками вирощуваних сільськогосподарських культур унаслідок підвищення продуктивності сівозміни. Водночас дефіцити балансів Нітрогену та Фосфору дещо зменшуються, а дефіцит Калію зростає.

Застосування проміжного посіву люпину на сидерат (сидеральна система удобрення) помітно звужує значення співвідношення C/N проти контрольного варіанту — до 22,3/1 (табл. 2) за рахунок вузького співвідношення C/N безпосередньо в біомасі люпину (16,2/1). Водночас баланси гумусу та NPK помітно покращуються, як порівняти з контрольним варіантом, але все ще залишаються від'ємними.

За поєднаного застосування соломи й сидерату (варіант «солома + сидерат») співвідношення C/N набуває середнього між їх роздільним внесенням і дещо ширшого, як порівняти з контрольним варіантом значення — 24,6/1 (табл. 2). За позитивного комплексного та взаємодоповнювального їх впливу на родючість ґрунту щодо гумусу та Нітрогену баланси останніх наближаються до бездефіцитних рівнів. Водночас баланси Фосфору й Калію залишаються від'ємними, хоча і помітно кращими, як порівняти контрольним варіантом.

Застосування гною у кількості 10 т на 1 га сівозмінної площі дещо розширює співвідношення C/N проти контрольного варіан-

ту — до 24,3/1 (табл. 2). А проте воно є дуже близьким до варіанту солома + сидерат. Водночас за показниками екологічної ефективності ця система удобрення підтверджує «імідж» гною як універсального добрива: баланси гумусу й Нітрогену є позитивними, по Фосфору та Калію спостерігаються незначні дефіцити. До того ж зазначені дефіцити можуть бути компенсованими за рахунок порівняно легко відновлюваних природних запасів цих елементів живлення, а невисокі рівні дефіцитів, як порівняти із цими запасами, можна сприймати як допустимі для збереження екологічної рівноваги агроценозу [27].

За додавання до гною сидерату (варіант гній + сидерат) співвідношення C/N становило 23,2/1 (табл. 2). Водночас баланс гумусу є позитивним, по Нітрогену спостерігається значний профіцит, по Фосфору — бездефіцитний рівень, а по Калію — наближення до бездефіцитного рівня.

Доповнення мінеральних систем удобрення органічною речовиною соломи й сидерату сприяло підвищенню показників екологічної ефективності досліджуваних агроценозів, водночас значення співвідношення C/N не зазнавали суттєвих змін. Так, за додавання соломи й сидерату до мінеральної невисокої системи удобрення значення співвідношення C/N становило 22,8/1 (табл. 2). До того ж вже досягаються практично бездефіцитні баланси гумусу й Нітрогену; по Фосфору спостерігається помітний профіцит, по Калію — зменшення дефіциту як проти контролю, так і мінеральної невисокої системи удобрення без застосування соломи й сидерату.

За додавання соломи й сидерату до мінеральної середньої системи удобрення (табл. 2) значення співвідношення C/N дещо розширюється (22,4/1), спостерігаються значні позитивні баланси гумусу, Нітрогену й Фосфору та практично бездефіцитний баланс Калію.

Доповнення соломою та сидеральною біомасою мінеральної високої системи удобрення (табл. 2) для оптимізації вуглецево-азотного співвідношення й відтворення родючості ґрунту сприяло розширенню значення співвідношення C/N до 21,1/1 з досягненням позитивних балансів за усіма досліджуваними показниками екологічної ефективності.

За додавання гною та гною з біомасою сидерату до мінеральної (на середньому рівні) системи удобрення (табл. 2, варіанти № 13 і № 14) значення співвідношення C/N перебували в межах біологічного оптимуму (22,7/1 та 21,8/1 відповідно) зі значними позитивними балансами гумусу та NPK.

Економічна ефективність

Основні показники економічної ефективності вирощування сільськогосподарських культур по досліджуваних варіантах наведено в табл. 3.

На підставі аналізу показників таблиці можна зробити висновок, що за всіх варіантів досліду досягається прибуткове ведення виробництва з розміром прибутку від 2355 грн/га (мінімальне значення) до 16 066 грн/га (максимальне значення) та рівнем рентабельності від 11,4 % (мінімальне значення) до 51,7 % (максимальне значення). Водночас найвищі рівні продуктивності сівозміни та економічної ефективності за основними показниками досягаються за комплексного поєднання в системах удобрення синтетичних агрохімікатів з органічними добривами та заходами оптимізації вуглецево-азотного співвідношення в ґрунті: мінеральна висока + солома + сидерат, гній + мінеральна (на середньому рівні), гній + мінеральна (на середньому рівні) + сидерат. До того ж, саме за цих систем удобрення спостерігаються й найвищі рівні екологічної ефективності з дотриманням співвідношення C/N у межах біологічного оптимуму (табл. 2).

Таблиця 3. Основні показники економічної ефективності вирощування сільськогосподарських культур за різних систем удобрення та заходів оптимізації вуглецево-азотного співвідношення в ґрунті (абсолютні показники на 1 га сівозмінної площі)

№ варіанту	Система удобрення	Витрати, грн/га	Прибуток, грн/га	Рівень рентабельності, %	Зернові одиниці (по основній продукції)		Окупність додаткових витрат додатковим прибутком, грн/грн
					вихід з 1 га, т	собівартість 1 т, грн	
1	Без добрив (контроль)	20 604	2355	11,4	2,88	7166	×
2	Солома	20 803	4069	19,6	3,10	6706	8,58
3	Сидерат	21 929	5342	24,4	3,44	6369	2,25
4	Гній	23 732	9760	41,1	3,79	6264	2,37
5	Солома + сидерат	22 090	5719	25,9	3,38	6533	2,26
6	Гній + сидерат	25 801	11 183	43,3	4,09	6316	1,70
7	Мінеральна невисока	23 742	5928	25,0	3,71	6403	1,14
8	Мінеральна невисока + солома + сидерат	25 089	6368	25,4	3,93	6387	0,89
9	Мінеральна середня	26 907	12 392	46,1	4,52	5957	1,59
10	Мінеральна середня + солома + сидерат	28 277	13 386	47,3	4,81	5877	1,44
11	Мінеральна висока	29 851	14 392	48,2	5,01	5953	1,30
12	Мінеральна висока + солома + сидерат	31 263	16 061	51,4	5,30	5896	1,29
13	Гній + мінеральна	28 243	14 594	51,7	4,87	5804	1,60
14	Гній + мінеральна + сидерат	30 282	15 391	50,8	5,11	5925	1,35

Узагальнюючи, варто звернути увагу, що по окремих елементах живлення у деяких варіантах з мінеральними системами удобрення, особливо за поєднання мінеральних та органічних добрив,

спостерігаються значні позитивні баланси з високою їх інтенсивністю (табл. 2). Зазначене дає потенційну можливість регулювати норми внесення туків з міркувань як економії витрат (підвищення рівня економічної ефективності), так і запобігання можливих втрат елементів живлення. Такий підхід можна реалізувати шляхом застосування різних видів мінеральних добрив (простих, комплексних тощо).

3. НАПРЯМИ УПРАВЛІННЯ СПРЯМОВАНІСТЮ ПРОЦЕСАМИ БІОЛОГІЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ В ҐРУНТІ ТА ЇХНЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

Теоретично завдання управління спрямованістю процесами біологічної трансформації органічної речовини в ґрунті можна розв'язувати двома шляхами.

Перший шлях: насичувати сівозміну максимально можливою за конкретних умов кількістю органічної речовини з метою підвищення родючості ґрунту з одночасним вирівнюванням співвідношення C/N додаванням необхідної кількості мінерального Нітрогену. Щодо конкретних умов цього дослідження, потенційно можливими додатковими джерелами свіжої органічної речовини можуть бути залишення на полі як добриво не лише соломи пшениці озимої, як це передбачено схемою дослідження, але й соломи ячменю та гороху, а також посів проміжного сидерату після ячменю. Але варто мати на увазі, що перевищення інтенсивності балансу гумусу понад рекомендовані оптимальні рівні 105–110 % може бути як економічно не вигідним у разі відсутності належної віддачі, так і екологічно небажаним у разі порушення принципів низькокарбонатного зем-

лекористування. Водночас зазначені потенційні додаткові джерела надходження органічної речовини можуть сприяти забезпеченню оптимального співвідношення C/N та підвищенню рівня еколого-економічної ефективності агроценозу навіть у варіанті максимального мінерального агрофону, щодо якого, за фактичних умов досліду, спостерігалось звужене до нижньої межі біологічного оптимуму співвідношення C/N (табл. 2, 3). Крім того, варто мати на увазі, що додаткові дози внесення мінерального Нітрогену для досягнення математично оптимального співвідношення C/N можуть перевищувати обґрунтовані фізіологічно доцільні межі [28], що потребує додаткових досліджень, зокрема щодо можливості збільшення фізіологічно доцільних доз туків за збалансованого внесення органічної речовини.

Другий шлях: насичувати сівозміну фізіологічно допустимою кількістю мінерального Нітрогену й вирівнювати до оптимального рівня співвідношення C/N додатковими можливими джерелами органічної речовини. З цією метою нами раніше було розроблено модель, за використання якої можна розрахувати бажану кількість Карбону для оптимізації співвідношення C/N за застосування різних норм мінерального Нітрогену [29; 30]. Модель формалізовано у вигляді такої формули:

$$C = k_1 \cdot (CN \cdot k_2 - k_3),$$

де C — кількість Карбону, яку необхідно внести з органічними добривами із розрахунку на 1 кг застосованого мінерального Нітрогену для досягнення планового співвідношення C/N, кг;

CN — показник запланованого співвідношення C/N;

k_1 — поправочний коефіцієнт, що враховує вміст Нітрогену та Карбону в органічних добривах та їх додаткове надходження внаслідок впливу органічних добрив на продукційний процес вирощування сільськогосподарських культур;

k_2 — надходження Нітрогену в агроценоз унаслідок внесення 1 кг мінерального Нітрогену (враховує ступінь засвоєння рослинами діючої речовини з добрив на рівні 50 %, а також Нітроген кореневих і післязбиральних решток), кг;

k_3 — надходження Карбону в агроценоз унаслідок внесення 1 кг мінерального Нітрогену (враховує Карбон кореневих і післязбиральних решток), кг.

Обидва запропоновані шляхи передбачають різноманітні сценарії кількісного забезпечення сівозміни органічною речовиною та мінеральним Нітрогеном, що може мати різні економічні та екологічні наслідки.

В економічному плані, залежно від ресурсного забезпечення конкретного господарства та стабільності цінової ситуації, доцільним може бути застосування й додаткових критеріїв вибору системи удобрення та рівня агрофону. Зокрема, за умов цього дослідження, серед загальнодоступних (тобто без застосування гною) варіантів, за яких забезпечується досягнення прийнятних екологічних параметрів, наприклад, за мінеральної середньої + солома + сидерат системи удобрення спостерігається нижчий рівень економічної ефективності (передусім розмір прибутку із розрахунку на 1 га), ніж за мінеральної високої + солома + сидерат системи. Водночас для застосування першої з них потрібен і менший розмір додаткових вкладень на 1 га, як порівняти з другою (табл. 3).

Аналізуючи вищевикладене, зокрема значення співвідношення C/N по варіантах дослідження (табл. 2), можна зробити припущення про прийнятність їх деякого розширення (подекуди — звуження) в межах біологічного оптимуму з метою підвищення продуктивності та еколого-економічної ефективності досліджуваних агроценозів за рахунок застосування заходів оптимізації вуглецево-азотного співвідношення в ґрунті. З урахуванням схеми дослідження до таких резервів, передусім органічної речовини, можна віднести, як уже зазначалося: залишення на полі як добриво не лише соломи пшениці

озимої, як це передбачено схемою досліду, але й соломи ячменю та гороху, а також посів проміжного сидерату після ячменю. В табл. 4 наведено розрахунки прогнозних результатів застосування одного з таких заходів — доповнення соломою ячменю мінеральної невисокої + солома + сидерат системи удобрення. Водночас прогнозований рівень продуктивності цього агроценозу за додавання соломи ячменю (на основі рівнів урожайності вирощуваних сільськогосподарських культур з переведенням у зернові одиниці) розраховано за показниками приростів рівнів урожайності згідно з відповідним варіантом цього досліду із застосуванням соломи озимої пшениці з коригуванням на вищий вміст Нітрогену в соломі ячменю.

Таблиця 4. Прогнозні результати застосування заходів оптимізації вуглецево-азотного співвідношення в ґрунті (абсолютні показники на 1 га сівозмінної площі)

Варіанти	Урожайність, т/га	Співвідношення C/N	Основні показники екологічної ефективності (баланси, +/-)				Основні показники економічної ефективності		
			гумус, т/га	N, кг/га	P ₂ O ₅ , кг/га	K ₂ O, кг/га	собівартість продукції, грн/т	прибуток, грн/га	рентабельність, %
Мінеральна невисока + солома + сидерат	3,93	22,8	-0,03	-0,1	9,4	-15,7	6387	6368	25,4
Те ж саме + солома ячменю	4,19	24,8	0,28	1,5	10,0	-4,9	6045	8358	33,0
Відхилення, +/-	+0,26	×	+0,31	+1,6	+0,6	+10,8	-342	+1990	+7,6

Із даних табл. 4 видно, що за доповнення соломою ячменю системи удобрення мінеральна невисока + солома + сидерат поліп-

шуються усі досліджувані показники. Так, значення співвідношення C/N розширилося до 24,8/1 і перебувало в межах біологічного оптимуму; продуктивність сівозміни зросла; баланси гумусу, Нітрогену та Фосфору набули позитивних значень; дефіцит Калію зменшився до прийняттого рівня з інтенсивністю балансу 93,2 %. За таких умов собівартість продукції знизилася, прибуток із розрахунку на 1 га сівозмінної площі збільшився, підвищився й рівень рентабельності.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

1. Усі досліджувані системи удобрення (згідно зі схемою досліджу) характеризуються прийнятними значеннями співвідношення C/N — в межах біологічного оптимуму (20–30/1) та позитивними рівнями економічної ефективності.

2. Мінеральні системи удобрення характеризуються переважно негативними показниками екологічної ефективності, що потребує додаткових заходів забезпечення екологічної сталості.

3. Застосування одних лише заходів підвищення родючості ґрунту як систем удобрення, у вигляді внесення органічної речовини соломи, сидерату та їх поєднання не забезпечує належного рівня екологічної ефективності за більшістю показників.

4. Найвищі рівні еколого-економічної ефективності агроценозів досягаються в органо-мінеральних системах удобрення за комплексного поєднання середніх та високих (для цього досліджу) норм туків з органічними добривами.

5. Подальше застосування заходів оптимізації вуглецево-азотного співвідношення в ґрунті, на доповнення до систем удобрення згідно зі схемою досліджу за відповідного обґрунтування сприятиме підвищенню екологічної сталості, продуктивності та економічної ефективності агроценозу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Vitousek P. M., Aber J. D., Howarth R. W., Likens G. E., Matson P. A., Schindler D. W., Schlesinger W. H., Tilman D. G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecol. Applications*. 1997. 7(3). P. 737–750.
2. Tilman D. Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. *P Nat Acad Sci USA*. 1999. 96. P. 5995–6000.
3. 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.
4. Stoate C., Baldi 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
5. 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
6. 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. 667–680. doi: 10.1641/0006-3568(2000)050[0667:TACMOS] 2.0.CO;2
7. Берестецкий О. А., Возняковская Ю. М., Доросинский Л. М. и др. Биологические основы плодородия почвы. М. : Колос, 1984. 287 с.
8. Volkohon V., Pyrig O., Volkohon K., Dimova S. Methodological aspects of determining the trend of organic matter mineralization↔synthesis processes in croplands. *Agricultural Science and Practice*. 6(1), P. 3–8. doi: 10.15407/agrisp6.01.003
9. Гриник І. В., Зарішняк А. С., Волкогон В. В. та ін. Визначення фізіологічно (екологічно) доцільних доз мінерального азоту в технологіях вирощування сільськогосподарських культур (науково-практичні рекомендації). Київ, 2010. 33 с.

10. Дегтярьов В. В. Гумус чорноземів Лісостепу і Степу України. Харків : Майдан., 2011. 360 с.
11. Булигін С. Ю., Величко В. А., Демиденко О. В. Агрогенез чорнозему. К. : Аграрна наука. 356 с.
12. Шидула М. К., Балаев А. Д., Демиденко О. В. Грунтоутворювальна і грунтозахисна роль соломи та інших пожнивних решток в агроценозах. Вісник агр. науки. 2003. № 10. С. 5–10.
13. Тараріко Ю. О. Сучасні технології відтворення родючості ґрунтів та підвищення продуктивності агроєкосистем. К. : Аграрна наука. 126 с.
14. Заришняк А. С., Цвей Я. П., Іваніна В. В. Оптимізація удобрення та родючості ґрунту в сівозмінах. К. : Аграрна наука. 2015. 208 с.
15. Мазур Г. А. Відтворення і регулювання родючості легких ґрунтів. К. : Аграрна наука. 2008. 308 с.
16. Мазур Г. А., Григора Т. І., Ткаченко М. А., Кондратюк І. М. Гумусний стан сірого лісового ґрунту залежно від хімічної мінералізації та системи удобрення. Зб. наук. праць ННЦ «Інститут землеробства УААН». 2009. Вип. 1–2. С. 3–8.
17. Кудеяров В. Н., Биелек П., Соколов О. А. Баланс азота и трансформация азотных удобрений в почвах. Пушино. 1986. 160 с.
18. Гомонова Н. Ф., Овчинникова М. Ф. Влияние длительного применения минерального удобрения и известкования на химические свойства, групповой и фракционный состав гумуса. Агрохимия. 1986. № 1. С. 85–90.
19. Мазур Г. А., Григора Т. І. Групово-фракційний склад і запаси гумусу в сірому лісовому ґрунті у зв'язку з інтенсивністю його використання. Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В. В. Докучаєва. 2011. № 1. С. 178–181.
20. Кудеяров В. Н., Благодатский С. А., Ларионова А. А. Изменение внутрипочвенных потоков азота при внесении азотных удобрений. Агрохимия. 1990. № 11. С. 47–53.
21. Туев Н. А. Гумус в почвенном плодородии и микробиологические процессы его минерализации. Тр. ВНИИСХМ. 1984. Т 54. С. 40–54.

22. Волкогон В. В., Британ Т. Ю., Пиріг О. В. Розвиток мікроорганізмів та спрямованість біологічних процесів у чорноземі вилуженому за моделювання дефіциту свіжої органічної речовини та впливу мінерального азоту. Сільськогосподарська мікробіологія. 2018. № 28. С. 3–16. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.28.3-16>

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

24. Тараріко Ю. О. Формування сталих агроecosистем: теорія і практика. К. : Аграрна наука, 2005. 508 с.

25. Бацула О. О., Головачов Є. А., Дерев'яно Р. Г. та ін. Забезпечення бездефіцитного балансу гумусу в ґрунті (за ред. О. О. Бацули). К. : Урожай, 1987. 128 с.

26. Тараріко Ю. О., Несмашна О. Ю., Бердніков О. М. та ін. Біоенергетична оцінка сільськогосподарського виробництва (науково-методичне забезпечення) (за ред. Ю. О. Тараріка). К. : Аграрна наука, 2005. 200 с.

27. Прянишников Д. Н. Избранные сочинения. М. : Изд-во с.-х. литературы, 1963. Т. 1: Агрoхимия. 692 с.

28. Волкогон В. В., Москаленко А. М., Дімова С. Б., Волкогон К. І., Халеп Ю. М., Штанько Н. П., Луценко Н. В., Земська І. А., Сидоренко В. П. Обґрунтування екологічної доцільності систем удобрення сільськогосподарських культур за біологічними показниками (науково-методичні рекомендації). Чернігів, 2020. 44 с.

29. Волкогон В. В., Пиріг О. В., Дімова С. Б., Волкогон К. І., Халеп Ю. М., Британ Т. Ю. Оптимізація біологічних процесів трансформації органічної речовини у чорноземі вилуженому (науково-методичні рекомендації). Чернігів, 2018. 38 с.

30. Волкогон В. В., Москаленко А. М., Дімова С. Б., Пиріг О. В., Халеп Ю. М., Волкогон К. І. Оптимізація біологічних процесів трансформації органічної речовини у чорноземі вилуженому. Вісник аграрної науки. 2019. № 11. С. 5–12.

Наукове видання

Еколого-економічна оцінка заходів оптимізації
процесів трансформації органічної речовини
в чорноземі вилугуваному
(науково-методичні рекомендації)

Ю. М. Халеп
В. В. Волкогон
А. М. Москаленко
Д. В. Іванов
К. М. Сащенко

Комп'ютерна верстка та макетування *В. О. Агєєв*
Коректор *О. В. Ільчук*

Підписано до друку 01.12.2023 р. Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура Times.
Умовн. друк. арк. 1,63. Обл.-вид. арк. 1,02.
Зам. № 23375-3. Наклад 50 прим.

Видавець та виготовлювач: ФОП Брагинєць О. В.
Свід. про внесення до держ. реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК, № 4879 від 07.04.2015.
Виписка з єдиного держ. реєстру серія ААВ, № 257729 від 01.12.2011.
Україна, 14029, м. Чернігів, вул. О. Кошового, 6, к. 15.
<http://siver-druk.com.ua> e-mail: siverdruk11@gmail.com