

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ІНСТИТУТ ЗЕМЛЕРОБСТВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ»**

**СТРАТЕГІЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ СИСТЕМ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ
ЗА ВІДНОВЛЮВАНОВОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА ЛІСОСТЕПУ**

Вінниця

2025

*Рекомендовано до друку Вченою радою ННЦ «ІЗ НААН»
(протокол № 10 від 06 жовтня 2025 р.)*

Рецензенти:

Д. В. Літвінов – доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва ім. О.І. Душечкіна НУБіП України;

І. В. Мартинюк – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник відділу сівозмін і землеробства на меліорованих землях ННЦ «ІЗ НААН»

С 83 Стратегія сталого розвитку систем обробітку ґрунту за відновлюваного землеробства Лісостепу / М. А. Ткаченко, В. М. Булгаков, М. М. Пташнік, Ю. О. Ременюк, Л. М. Красюк, П. С. Заяць, О. В. Дикун. – Вінниця : ТВОРИ, 2025. – 60 с.

ISBN 978-617-8835-80-4

У роботі викладено науково обґрунтовану й практично орієнтовану стратегію сталого розвитку систем обробітку ґрунту за відновлюваного землеробства Лісостепу, з фокусом на керування ґрунтовими функціями у напрямі накопичення й збереження вологи, протидії ерозії та переущільненню ґрунту, стабілізації агрофізичної структури й вмісту органічної речовини, підвищення енергоефективності агротехнологій. Наведено практичні орієнтири очікуваних виробничих ефектів окремих технологічних рішень.

Стратегія сталого розвитку систем обробітку ґрунту за відновлюваного землеробства Лісостепу призначена призначені для керівників і фахівців галузі сільського господарства, науковців, викладачів вузів, аспірантів та студентів.

УДК 631.51:552.554:631.445.4

ISBN 978-617-8835-80-4

© ННЦ «ІЗ НААН», 2025

© ТОВ «ТВОРИ», 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. Науково-методологічні засади формування систем обробітку ґрунту за відновлюваного землеробства.....	7
2. Сучасний стан і ключові обмеження застосування різних систем обробітку ґрунту за відновлюваного землеробства	13
3. Функціональна диференціація систем обробітку ґрунту та інтегровані технологічні рішення.....	19
4. Системи обробітку ґрунту та управління рослинними рештками, покривними культурами й мульчею як інструмент регулювання ґрунтових функцій.....	24
5. Механічне навантаження ґрунтообробної техніки на ґрунт: ризики, межі, запобігання.....	31
6. Поживний режим ґрунту за різної інтенсивності обробітку: закономірності й технологічні рішення.....	36
7. Модель впровадження, моніторингу та адаптації систем обробітку ґрунту.....	41
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	47

ВСТУП

Сучасний етап розвитку систем землеробства в Україні характеризується одночасним посиленням кліматичних ризиків, деградаційних процесів ґрунтів і зростанням вимог до екологічної безпечності ведення агровиробництва. За оцінками Міжурядової групи експертів (держав-членів ООН і Всесвітньої метеорологічної організації) зі зміни клімату (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*), для Європи зберігається тенденція до зростання частоти/інтенсивності прояву небезпечних кліматичних явищ, пов'язаних із температурними аномаліями та посухами, що прямо впливає на рівень вологозабезпеченості агроecosистем і стабільність врожайності сільськогосподарських культур [5]. У межах України кліматично зумовлені посушливі явища вже мають виражену динаміку: за модельними оцінками у період 2021–2050 рр. очікується зростання аридності клімату впродовж вегетаційного періоду в основних агрокліматичних зонах країни, зокрема і в Лісостепу [6]. На прикладі центральної частини Лісостепу (Київщина) відмічається погіршення умов природного зволоження та зростання потенційної евапотранспірації, що підсилює дефіцит продуктивної вологи й вимагає адаптації технологій вирощування польових культур [7].

Одночасно з кліматичними викликами загострюється проблема деградації ґрунтів, серед проявів якої провідне місце посідає водна та вітрова ерозія на орних землях, а також виснаження органічної речовини та погіршення структурно-агрегатного стану ґрунтового покриву. В Україні ерозійні процеси набули загрозливих масштабів: фіксуються мільйони гектарів еродованих земель і суттєві втрати родючого шару разом із гумусом та елементами живлення [8]. Науково обґрунтоване вдосконалення систем обробітку ґрунту є одним із найбільш дієвих важелів одночасного зниження ерозійної небезпеки, підвищення водоутримувальної здатності орного шару, стабілізації запасів органічного вуглецю та підвищення енергоефективності технологій вирощування. У цьому контексті стратегія сталого розвитку систем

обробітку ґрунту для Лісостепу повинна розглядати обробіток не як ізольовану операцію, а як елемент інтегрованої системи управління ґрунтовими ресурсами, що узгоджується з практиками збереження й відновлення ґрунтової родючості [3].

Світова практика дедалі частіше спирається на принципи ґрунтозахисного та ресурсоощадного землеробства, зокрема на концепцію Conservation Agriculture (CA), що визначається трьома ключовими складовими: мінімальне механічне порушення ґрунту, постійне покриття поверхні ґрунту рослинною мульчею та диверсифікація структури сівозмін [1; 2]. Важливо, що в межах CA «мінімальне порушення» має конкретні кількісні обмеження (допускається смуговий обробіток за умови, що порушена площа не перевищує встановлених лімітів), а рівень рослинних решток/покриву на поверхні ґрунту після сівби також нормується [1]. Такий підхід методологічно наближує CA до практичних рішень для Лісостепу (де критичними є збереження вологи, протидія кіркоутворенню та прояву ерозії, зменшення енергозатрат), але водночас потребує адаптації до ґрунтово-кліматичної мозаїчності регіону. Разом із тим, наукова дискусія підкреслює, що ефекти CA не є універсальними: результативність принципів мінімального обробітку, мульчування та диверсифікації сівозмін залежить від клімату, типу ґрунту, культури, забезпечення поживними речовинами та рівня менеджменту. Узагальнення даних показують як потенціал, так і обмеження CA щодо продуктивності, а також істотну контекстну варіабельність ефектів на врожайність [9]. Поряд із цим наголошується на необхідності «контекст-чутливого» підходу: перехід до ґрунтозахисних технологій має супроводжуватися системним аналізом ризиків, умов прийнятності та підбором технологічних прийомів під конкретні виробничі умови [10]. Отже, для Лісостепу України доцільно формувати не «універсальну рекомендацію», а саме стратегію розвитку систем обробітку ґрунту як портфель адаптивних рішень (диференційований/комбінований, смуговий, мінімізований, нульовий обробіток тощо) за ефективного поєднання з вирощуванням покривних

культур, керуванням рослинними рештками, ущільненням/розущільненням, живленням і фітосанітарним станом.

У сучасній науковій і прикладній літературі дедалі ширше застосовується термін «відновлюване (регенеративне) землеробство», який акцентує не лише на зменшенні шкоди, а на відновленні ґрунтових функцій, підвищенні стійкості агроландшафтів та формуванні позитивного екологічного балансу. Огляд визначень і підходів показує значну різноманітність трактувань регенеративного землеробства та потребу у більш чітких рамках, що пов'язують практики з вимірюваними результатами (див. [11; 13]. Концептуально ґрунт виступає базовим «носієм» регенерації: покращення структури, зростання вмісту органічної речовини, підвищення інфільтрації та збереження вологи, активізація біоти розглядаються як ключові механізми підвищення продуктивності й стійкості агроєкосистеми [12; 15].

В умовах Лісостепу України стратегічне значення має поєднання ґрунтозахисної дії із технологічною та економічною доцільністю. Зокрема, смугові технології (*strip-till*) розглядаються як компроміс між оранкою і технологією *no-till*, за рахунок локалізації розпушення в зоні рядка, зберігається мульча у міжряддях, що забезпечує істотне зменшення енерговитрат, що особливо важливо за зростання вартості енергоресурсів і потреби скорочення викидів парникових газів [1; 14]. Водночас, формування довгострокової «стратегії» потребує врахування деградаційних ризиків (ерозія, ущільнення, дегуміфікація), кліматичних трендів (посушливість, дефіцит вологи) та науково обґрунтованих принципів сталого управління ґрунтовими ресурсами [3; 6–8].

1. Науково-методологічні засади формування систем обробітку ґрунту за відновлюваного землеробства

Системи обробітку ґрунту є одним із ключових регуляторів продуктивності та сталості сучасних розмаїтих систем землеробства, оскільки визначають водний режим, структуру, щільність і пористість орного шару, а також умови мінералізації органічної речовини й доступність елементів живлення. На сучасному етапі підсилюються два взаємопов'язані чинники, які роблять питання обробітку «першого порядку»: кліматичні зміни з частими посухами та температурними аномаліями [5–7] та посилення деградаційних процесів ґрунтів (ерозія, дегуміфікація, ущільнення, руйнування агрономічно цінних структурних агрегатів) [8]. За таких умов обробіток важливо трактувати не як «оранка чи без оранки», а як систему керування ґрунтовими функціями та процесами: інфільтрацією та запасами продуктивної вологи, протиерозійною стійкістю, відтворенням структури, збереженням органічного вуглецю та технологічною керованістю посівів культур впродовж ротації сівозміни [3; 16].

У методологічному сенсі система обробітку ґрунту – це не одиничний агрозахід, а узгоджений комплекс (основний + передпосівний обробіток, післяжнивні операції, локальне розпушення-розущільнення, управління рослинними рештками, трафік сільськогосподарської техніки) із чіткими виробничими цілями. Її «якість» у науковому плані коректно оцінювати за багатокритеріальною моделлю: агрономічна результативність (дружні сходи, активний розвиток кореневої системи, стабільність рівня врожайності культур); ґрунтозахисна дія (ерозія, кіркоутворення, ущільнення, агрегатна стійкість, інфільтрація); ресурсоощадність (енерговитрати, кількість проходів, час проведення технологічної операції); керованість фітосанітарного стану поля (бур'яни, шкідники та збудники хвороб); екологічні наслідки (вуглецевий баланс, втрати поживних речовин зі стоком, ризики деградації) [3; 15–17].

Така постановка питання відразу знімає спрощення: різні системи обробітку можуть бути рівноцінними за рівнем отриманого врожаю (у середньому за певний період), але суттєво відрізнятися за стійкістю в посушливі вегетаційні сезони або за накопичувальним ефектом на структуру та гумус.

У практиці землеробства співіснують різні базові основи, і обробіток у них має різну відображення. В інтенсивних моделях ключова ставка – на максимальну керованість агроценозу через механічну підготовку посівного ложа та швидкий старт на початкових етапах органогенезу культури, що забезпечує, як правило, стабільний технологічний результат, але за певних умов підсилює ерозійні ризики й непродуктивні втрати вологи. В органічних та біологізованих моделях частіше зростає роль механічного контролю бур'янів і мульчування, а отже – важливо знайти компроміс між частотою механічного руйнування і збереженням структури ґрунту. В інтегрованих моделях (із поєднанням агротехнічних і хімічних методів) обробіток підпорядковується зниженню загальних ризиків: підтриманню належного фітосанітарного стану поля, контролю ущільнення та ерозії без «зайвих» проходів ґрунтообробної техніки. За кліматично-адаптивних технологіях обробітку на перший план виходить керування водним режимом ґрунту – збереження мульчуючого рослинного покриву, зменшення випаровування, підвищення інфільтрації й утримання вологи, що особливо актуально за прогнозованого посилення аридності у вегетаційний період [5–7]. Тобто «філософія» обробітку змінюється залежно від того, яка система землеробства домінує, але наукова вимога одна: кожне втручання має бути обґрунтоване через ґрунтові функції та отриманий результат.

Окрему групу становлять ґрунтозахисні та ресурсощадні підходи, що найбільш відомі через концепцію Conservation Agriculture (CA). CA базується на трьох принципах: мінімальне механічне порушення ґрунту, постійне покриття поверхні ґрунту рослинною мульчею та диверсифікація культур сівозміни (у т. ч. покривні) [1–4]. Її сильна сторона – наявність операційних критеріїв і чітка прив'язка до протиерозійної стійкості та вологозбереження.

Водночас важливо не ототожнювати СА з «відмовою від обробітку» як самоціллю: наукові узагальнення засвідчують, що результативність застосування СА залежить від клімату, типу ґрунту, культури, рівня удобрення та менеджменту, а реакція врожайності є контекстною [9, 10]. Тобто СА – важлива методологічна опора, але не «єдина правильна відповідь» для всіх умов, і в системному аналізі обробітку її слід розглядати поруч з іншими підходами, що також працюють із ґрунтовими функціями (структура, волога, органічна речовина), але можуть мати інші технологічні акценти.

відновлюване (регенеративне) землеробство як напрям ширше за СА: воно фокусується не тільки на зменшенні негативного впливу, а на відновленні ґрунтових функцій, зростанні стійкості агроєкосистем та формуванні позитивного екологічного балансу. Огляди визначень підкреслюють різноманітність трактувань регенеративності та потребу у зв'язку «практика → отриманий результат» (структура, інфільтрація, органічна речовина, біота тощо) [11–13]. Це принципово для обробітку: у регенеративних моделях не обов'язково працює один «еталонний» спосіб обробітку ґрунту, натомість формується комплексний набір узгоджених рішень – від смугового розпушення до мінімізованих і комбінованих технологій – які в сукупності забезпечують поліпшення ґрунтового стану та сталість рівня продуктивності агроценозів. Саме тому в сучасних підходах до обґрунтування обробітку зміщується акцент із «назви технології» на її функціональний ефект і відтворюваність результату в часі.

Наукова фундаментальність оцінювання систем обробітку базується на розвитку концепції «якість ґрунту/здоров'я ґрунту» («soil quality/soil health») і стандартизацію індикаторів ґрунтових функцій. Критичні літературні огляди свідчать, що індикатори мають бути чутливими до управління, пов'язаними з функціями й придатними для інтерпретації, інакше порівняння технологій обробітку зводиться до набору «неприв'язаних» показників [17]. У міжнародному полі це підсилюється базовими основами сталого управління ґрунтовими ресурсами, де добровільні керівні принципи FAO окреслюють

загрози та логіку збереження ґрунтових ресурсів [3], а протокол оцінювання сталого ґрунтового менеджменту пропонує систему індикаторів і практичні інструменти для визначення, чи веде технологія до деградації або до відновлення ґрунтових функцій [16]. Для систем обробітку це означає просту методологічну норму: порівняння має спиратися не на одну ознаку (наприклад, лише врожай), а на комплекс фізичних, хімічних і біологічних характеристик ґрунту, пов'язаних із ризиками деградації й водним режимом.

Доказова база щодо впливу різних систем обробітку значною мірою формується через довготривалі стаціонарні дослідження та мета-аналізи. Узагальнення по принципах СА демонструють, що «середній» ефект може бути помірним або неоднозначним, але варіабельність висока і визначається поєднанням практик, культур і клімату [9]. У літературі зазначають, що результати впровадження СА або *no-till*-технології є взаємозалежними й визначаються взаємодією складових технологій, зокрема структурою сівозміни, використанням покривних культур, управлінням рослинними рештками, системою живлення та фітосанітарним станом [10]. Показовим є розвиток проміжних технологій, зокрема *strip-till*, які поєднують локальне розпушення з рослинною мульчею у міжряддях і часто розглядаються як технологічний компроміс між інтенсивним (оранка) обробітком і прямою сівбою [14]. Сучасний глобальний мета-аналіз підтверджує, що *strip-till*-технологія у середньому здатна до підвищення врожайності культур порівняно з *no-till*-технологією, зберігаючи частину ґрунтозахисних переваг, але ефект залежить від культури та кліматичних умов [18]. Методологічно важливо враховувати, що значна частина практично застосовуваних систем обробітку має проміжний (гібридний) характер і не підпадає під бінарну класифікацію «оранка/без оранки», їх оцінювання доцільно здійснювати за комплексом критеріїв, зокрема вологозбереженням, керованістю посівного ложа та ризиком/контролем ущільнення.

Вуглецевий аспект систем обробітку є окремою складовою фундаментальності, але вимагає коректної інтерпретації. Зв'язок між

технологією обробітку й секвестрацією/втратою органічного вуглецю визначається не тільки інтенсивністю механічного втручання, а й ерозійними втратами, балансом біомаси (рештки, покривні культури), режимом удобрення та загальним рівнем продуктивності агросистеми. У науковій літературі обґрунтовано, що ґрунти функціонують як резервуар органічного вуглецю, а трансформація системи обробітку є одним із чинників, здатних впливати на його акумуляцію та мінералізацію; однак результати формуються в межах цілісної системи землеробства та проявляються у довгостроковому часовому горизонті [15]. Тому коректне наукове порівняння систем обробітку має включати щонайменше оцінку динаміки органічної речовини, агрегатної стійкості та ерозійної стійкості, а не обмежуватися витратами на проведення обробітку чи короткотерміновою реакцією врожайності культур.

В Україні, методологія оцінювання обробітку особливо важлива через неоднорідність ґрунтового покриву й поєднання кліматичних ризиків із техногенними (ущільнення, деградація структури) та організаційними (обмежені строки робіт, висока вартість пального тощо). Експериментальні дані засвідчують, що вплив систем обробітку на вміст та запаси гумусу та фізико-хімічні властивості ґрунту істотно залежить від фону удобрення та структури сівозміни; при цьому будь-яка задекларована технологія обробітку може забезпечувати різну ефективність залежно від рівня та якості виконання технологічних операцій [19]. Окремо важливий фітосанітарний блок: довготривале застосування різних систем основного обробітку в сівозміні змінює рівень забур'яненості посівів, запас насіння бур'янів, поширення шкідників і збудників хвороб, а отже – впливає на стійкість обраної технології обробітку ґрунту в часі; системні дослідження вказують на необхідність розглядати обробіток разом із удобренням та іншими елементами технології як єдиний комплекс [20]. Доцільність застосування тієї чи іншої системи обробітку визначається не тільки змінами ґрунтових показників, а й здатністю підтримувати контроль бур'янів і загальний фітосанітарний стан посівів у межах економічно обґрунтованих витрат та прийнятного рівня ризику.

Із методологічного погляду оцінювання систем обробітку доцільно будувати як поєднання польових оперативних індикаторів і лабораторно-аналітичних показників. До польових індикаторів, що швидко реагують на зміну обробітку, належать частка покриття ґрунту рослинними рештками (мульчею), ознаки прояву ерозії та поверхневого стоку, інфільтрація (польові тести), щільність та твердість ґрунту (діагностика ущільнення), розподіл ґрунтової вологи по горизонтах у критичні фази росту та розвитку культурних рослин, а також параметри якості сівби (глибина, контакт насіння з ґрунтом, рівномірність появи сходів). До аналітичних – вміст і запаси органічної речовини (по шарах), агрегатна стійкість, показники кислотності й насиченості основами, баланс елементів живлення, а також маркери біологічної активності там, де це доступно [16; 17; 19]. Така схема дозволяє не «перевантажувати» систему вимірюваннями, але водночас забезпечує наукову доказовість: будь-яка зміна обробітку має відображатися у зрозумілих показниках ґрунтових функцій та у стабільності продуктивності за мінливих погодних умов [5–7; 16].

Тому, науково-методологічні засади систем обробітку ґрунту у відновлюваному землеробстві формуються на перетині трьох взаємопов'язаних складових: агрономічної ефективності (за даними польових дослідів); ґрунтознавства (структурний стан, водний режим, органічна речовина, ризики деградації); системи управління агроценозом (сівозміна, покривні культури, управління рослинними рештками, фітосанітарний стан, трафік техніки). Така концептуальна модель оцінювання дає змогу коректно зіставляти полицеві, безполицеві, мінімізовані, смугові, нульові та комбіновані системи як інструменти керування ґрунтовими процесами, а не як технології, ототоженні з їх формальною класифікаційною належністю [3; 9; 10; 16–20].

2. Сучасний стан і ключові обмеження застосування різних систем обробітку ґрунту за відновлюваного землеробства

У практиці землеробства обробіток ґрунту залишається однією з базових ланок формування оптимально структурованого орного шару, однак його роль дедалі більше визначається не «нормативною глибиною» чи набором операцій, а здатністю підтримувати ґрунтові функції в умовах кліматичної нестабільності та підвищеного агрогенного навантаження. Для України актуальність цієї проблематики підсилюється трендом до посилення посушливих явищ у вегетаційний період і зростання ризиків температурних аномалій, що безпосередньо впливають на водний режим ґрунту та стабільність урожайності [5–7]. Паралельно з кліматичними викликами зберігаються деградаційні процеси: ерозійні втрати, дегуміфікація, погіршення структурно-агрегатного стану, локальні прояви переущільнення орного і підорного шарів, які в сукупності знижують ефективність використання вологи та добрив і підвищують виробничі як ризики так і витрати [8; 21].

Сучасний стан систем обробітку в Україні характеризується співіснуванням кількох технологічних «пакетів», які відрізняються інтенсивністю механічного впливу та рівнем інтеграції з іншими елементами технології (сівозміна, управління рослинними рештками, удобрення, захист рослин, технічне забезпечення). Традиційні полицеві та комбіновані системи й надалі широко застосовуються як інструмент швидкого вирівнювання поля, загортання рослинних решток і локального контролю бур'янів та шкідників, особливо за високого рівня забур'яненості або у разі потреби оперативної підготовки посівного ложа [28; 29]. Водночас практика та наукові узагальнення підкреслюють, що однотипна система обробітку «під усі культури» є технологічно й економічно невиправданою, оскільки реакція польових культур і ґрунтів на глибину, кратність і спосіб обробітку суттєво

залежить від погодних умов року, попередника, рівня ущільнення, забезпечення вологою та поживними речовинами [29].

У межах адаптивних (диференційованих, комбінованих) систем обробітку сутність підходу полягає не в «компромісі» між оранкою і мінімізацією, а в підборі інтенсивності механічного впливу відповідно до стану поля та конкретних технологічних операцій: чергування полицевих і безполицевих прийомів у сівозміні; поєднання глибокого, мілкого та поверхневого обробітку залежно від задач (ліквідація плужної підшви або ущільненого прошарку, управління поживними рештками, формування мульчуючого шару, провокація й знищення сходів бур'янів тощо) [28; 29]. Такий підхід фактично відповідає практичному запиту відновлюваного землеробства: механічні операції мають бути «підпорядковані» відновленню структури, регуляції водного режиму, збереженню органічної речовини та зниженню ерозійних ризиків, а не відтворюватися за усталеною схемою без урахування конкретних умов.

Ключовий фактор сучасних обмежень – водний режим орного шару. За умов, коли дефіцит продуктивної вологи стає системним чинником (особливо у роки з нерівномірним розподілом атмосферних опадів і спекотними періодами), технологічна цінність обробітку оцінюється через здатність забезпечити інфільтрацію, акумуляцію та збереження вологи, а також через вплив на випаровування з поверхні [6; 7; 17]. Це зміщує критерії порівняння систем обробітку від «глибше-мілкіше» до структурно-функціональних: пористість, агрегатний стан, стабільність структури та наявність рослинної мульчі. У цьому сенсі якість ґрунту розглядають як інтегральний показник, що охоплює фізичні (щільність, пористість, водопроникність), хімічні (вміст органічного вуглецю, забезпечення елементами живлення) та біологічні параметри, які разом визначають продуктивність і стійкість агроєкосистеми [17]. Для практики важливо, що протоколи оцінювання сталого землекористування та охорони ґрунтів орієнтують не на «один показник», а на

систему індикаторів і їхню динаміку в часі, що дає можливість коректно порівнювати системи обробітку на рівні поля або господарства [16; 17].

Окремою проблемою є баланс органічної речовини й органічного вуглецю в ґрунті. Інтенсивне механічне розпушення за сприятливих умов аерації прискорює мінералізацію органічної речовини, що за дефіциту повернення біомаси в ґрунт і недостатнього внесення органічних добрив може підтримувати тренд дегуміфікації. У наукових працях наголошується на ролі ґрунтів як депо вуглецю та на потенціалі накопичення та збереження органічного вуглецю через заходи, що забезпечують підтримання оптимальної структури й біологічної активності [15]. Для чорноземів важливе не лише абсолютне значення вмісту гумусу, а й зміни фізико-хімічних властивостей орного шару залежно від системи обробітку та удобрення, що підтверджується сучасними польовими дослідженнями [19]. З практичної точки зору це означає: оцінка «ефективності обробітку» має включати не тільки врожай у поточному році, а й зміну показників родючості (насамперед – структурний стан і органічну речовину) в середньо- та довгостроковій перспективі [15; 19].

Поряд із водним режимом і вмістом органічної речовини, постійним обмеженням виступає фітосанітарний стан посівів. Зменшення інтенсивності механічного впливу (переважно у системах мінімального та нульового обробітку) часто підвищує вимоги до контролю бур'янів, шкідників і збудників хвороб, зокрема через інший режим розміщення насіння бур'янів у профілі ґрунту та іншу динаміку рослинних решток на його поверхні. Це не є «недоліком технології» як таким, але є об'єктивною умовою механічна ланка (обробіток ґрунту) частково заміщується агрохімічною та агротехнічною складовою (сівозміна, покривні культури, точність внесення, строки проведення технологічних операцій) [20; 29]. Знаковим є те, що системи обробітку у взаємодії з удобренням здатні істотно змінювати фітосанітарний стан агроценозів, отже вибір обробітку не може бути ізольованим рішенням [20].

На основі цих обмежень формується спектр технологій, який у сучасній літературі часто описують через підхід Conservation agriculture (CA) – мінімальне порушення, покриття рослинними рештками, диверсифікація сівозмін [1; 2; 4]. Проте для умов України важливо розуміти, що CA не «єдиний правильний шлях», а методологічний орієнтир, який допомагає структурувати вимоги до принципів ґрунтозахисного й ресурсоощадного ведення землеробства. На рівні наукових узагальнень показано, що ефективність принципів CA щодо продуктивності є специфічними для конкретних умов вирощування, так як, наприклад, реакція врожайності на мінімізацію або нульовий обробіток варіює за погодними умовами, типом ґрунту, культурою та рівнем організації виробництва [9; 10]. Саме тому в європейському контексті, близькому за частиною агрокліматичних умов, результати досліджень свідчать про відмінності між типами ґрунтозахисного обробітку, зокрема мульчувальний, мінімальний та гребеневий обробітки можуть забезпечувати позитивний або нейтральний ефект зростання врожайності порівняно з оранкою, тоді як нульовий обробіток частіше потребує більш «жорсткого» дотримання інтегрованих технологічних рішень (сівозміна, покривні культури, інтегрований захист рослин, контроль ущільнення тощо) [22].

У межах спектра мінімізованих технологій практично значущими є системи, що поєднують локальне розпушення із збереженням покриття поверхні ґрунту рослинною мульчею. До таких належать смугові технології (*strip-till*) та близькі до них варіанти комбінованого локального обробітку. Смуговий підхід зменшує площу порушення ґрунту, концентрує розпушення в зоні рядка та залишає міжряддя під мульчею, що одночасно знижує енергетичні витрати й ризик ерозійного змиву ґрунту [14]. Встановлено, що технологія *strip-till* у середньому здатна підвищувати урожайність порівняно з *no-till* (за рахунок кращого теплового режиму рядка, локальної оптимізації щільності та розміщення добрив), при цьому ефект залежить від культури й погодних умов року [18]. У практичному вимірі це означає, що смугові

технології доцільно розглядати як один із «робочих» інструментів у арсеналі систем обробітки з чіткою прив'язкою до культури (передусім просапні), стану поверхні поля, кількості решток і можливостей технічного забезпечення [14; 18].

Окрема категорія сучасних обмежень стосується переущільнення ґрунту внаслідок руху техніки та збільшення осевих навантажень. У наукових оглядах підкреслюється, що ущільнення погіршує інфільтрацію, газообмін, проникнення коренів і, як наслідок, знижує використання вологи та елементів живлення; при цьому відновлення структури підорного шару природними процесами є повільним і значною мірою залежить від типу ґрунту та глибини ущільнення [27]. У цьому контексті обробіток як «ремонт» ущільнення має обмежену ефективність, а глибоке розпушення енергомістке й характеризується короточасним ефектом, якщо причина ущільнення (хаотичний рух сільськогосподарської техніки) не усунута [27]. Аналіз даних щодо глибини проведення глибокого обробітку ґрунту (*deep-tillage*) засвідчує, що відповідь урожайності залежить від кліматичних умов і глибини проведення, а оптимізація глибини є критичною з точки зору економіки й ризику повторного переущільнення [25]. Тому, у сучасних системах обробітку питання «розущільнення» тісно пов'язане з питанням керування технологічними проходами техніки, а саме: контрольована колійність розглядається як технологічний інструмент, що обмежує площу ущільнення та стабілізує агрофізичний стан ґрунту на решті поля, підвищуючи своєчасність виконання польових операцій [27].

Відновлюване землеробство (*regenerative agriculture*) у даному разі, доцільно трактувати не як «маркетингову етикетку», а як методологічний підхід, що передбачає кількісно оцінювані зміни ґрунтових функцій (структура, органічна речовина, інфільтрація, біота) та підвищення екологічної стійкості агроєкосистеми [11–13]. У практичному відношенні це підсилює роль сівозміни та покривних культур як рівноправних елементів поряд із обробітком. Численними дослідженнями з'ясовано, що

диверсифіковані сівозміни здатні позитивно впливати на показники агрофізичного ґрунту (через біопори, агрегацію, розподіл кореневої маси), а покривні культури змінюють низку фізико-хімічних властивостей ґрунту, що важливо для режиму вологості й структурної стабільності [23; 24]. Це принципово для вибору системи обробітку: там, де мінімізується механічний вплив, зростає цінність біологічних механізмів структурування ґрунту (корені, біота, мульча), і навпаки – за інтенсивного механічного впливу за відсутності достатнього надходження біомаси (рослинних решток і покривних культур), ризики прояву деградаційних процесів зростають [15; 23; 24].

Отже, сучасний стан систем обробітку ґрунту характеризується не «протистоянням» оранки та *no-till*, а необхідністю коректної технологічної диференціації: за культурою й попередником, за полем (рельєф, ерозійна небезпека), за станом агрофізичної структури ґрунту, забезпеченням рослинними рештками, рівнем технічного оснащення та кадрового потенціалу. У цьому контексті системи мінімального, смугового, комбінованого, періодичного глибокого рихлення та нульового обробітку слід розглядати як інструменти різної «силової дії», які працюють лише у зв'язці з управлінням органічною речовиною, сівозміною (покривними культурами), фітосанітарним станом та організацією руху машинно-тракторних агрегатів [3; 16; 17; 20; 22–27; 29]. Умови Лісостепу в цьому контексті проявляються насамперед через водний фактор (збереження, накопичення вологості), ерозійні ризики на схилах та вимоги до структурної стабільності орного шару, які мають бути враховані під час узгодження систем обробітку з рештою елементів технології вирощування сільськогосподарських культур [6–8; 21].

3. Функціональна диференціація систем обробітку ґрунту та інтегровані технологічні рішення

Обробіток ґрунту в сучасних виробничих системах доцільно розглядати як інструмент керування ґрунтовими функціями (водний режим, структура, аерація, протиерозійна стійкість, біологічна активність, доступність елементів живлення) і як елемент регулювання фітосанітарного стану та технологічного супроводу. Його роль не зводиться до «розпушення»: різні способи обробітку по-різному змінюють агрегатний стан, пористість, інфільтрацію, стратифікацію органічної речовини та поживних речовин, інтенсивність мінералізації, а також умови для проростання бур'янів і розвитку збудників хвороб. Саме тому за відновлюваного землеробства головним стає не «універсальний» прийом, а добір і поєднання систем обробітку під конкретні ґрунтові умови та культури, з перевіркою результату за показниками ґрунтової родючості [16; 17].

Практично корисною є функціональна класифікація систем обробітку за ступенем механічного порушення ґрунту та характером роботи з рослинними рештками. Умовно виділяють: (i) полицевий (оранка) як інтенсивне переміщення орного шару; (ii) безполицевий глибокий (чизель, плоскоріз, глибокорозпушувач) із мінімізацією обороту пласта; (iii) поверхнево-мілкий (дискування, культивация) з переважним обробітком верхнього шару 0–15 см шару ґрунту; (iv) мінімізований (зменшення глибини та кількості проходів, застосування комбінованих агрегатів); (v) нульовий (*no-till*) і близькі до нього рішення; (vi) смуговий (*strip-till*) як локалізоване розпушення в зоні рядка при збереженні мульчі в міжрядді [1; 2; 14; 18]. У виробництві ці «класи» часто комбінуються: наприклад, базовий мінімальний або нульовий обробіток може доповнюватися разовим розущільненням (глибоке рихлення), якщо діагностика підтверджує проблему ущільнення підорного горизонту [32; 33].

Полицевий обробіток історично є опорою інтенсивних систем землеробства, який забезпечує швидке загортання решток, механічне зниження забур'яненості та вирівнювання поля. Однак він підвищує ризики ерозії на оголеній поверхні (без рослинних решток), може посилювати втрати органічної речовини через активізацію процесів мінералізації та потребує значних енерговитрат.

У контексті зміни клімату, додатковим обмеженням стає прискорене випаровування ґрунтової вологи після інтенсивного розпушення та руйнування агрофізичної структури, особливо на ґрунтах із схильністю до кіркоутворення. Тому оранку доцільно трактувати як «спеціалізований» прийом (під окремі культури або виробничі умови), а не як універсальну норму, з обов'язковим протиерозійним супроводом (залишення пожнивних решток на поверхні, контурність, мульчування, покривні культури) [3; 16].

Безполицеві системи обробітку (чизельна, плоскорізна, комбінована/адаптивна) зменшують переміщення ґрунтових шарів і краще зберігають структурні агрегати у верхньому горизонті порівняно з оранкою, водночас забезпечують можливість своєчасного виконання технологічних операцій (закриття вологи, підготовка насінневого ложа, часткове перемішування решток). У виробничому плані це часто компроміс між мінімізацією механічного порушення поверхневого шару і збереженням рослинних решток на поверхні і потребою контролю бур'янів та шкідників у посівах культур сівозміни. Для умов із дефіцитом вологи важлива здатність таких систем формувати мульчуючий шар і зменшувати випаровування; однак ефект залежить від якості розподілу рослинних решток, рельєфу поля та налаштувань агрегатів (глибина, кут атаки, інтенсивність подрібнення) [1; 2].

Мінімізація обробітку (*mini-till*) і нульовий обробіток (*no-till*) найчастіше пов'язують із ґрунтозахисними підходами, але їх результативність не є «автоматичною». Узагальнення світових даних показують значну контекстну варіабельність: у частини систем можливе зниження врожайності через зниження температури ґрунту у весняний період порівняно до

традиційної оранки, зміни фітосанітарного стану, ущільнення верхнього горизонту або проблеми стартового живлення рослин; натомість у посушливі роки та на полях із ризиком ерозії збереження мульчі на поверхні поля та ґрунтової вологи забезпечують додаткові переваги даних систем [9; 10].

Саме тому коректніше говорити про комплекс заходів: мінімізація обробітку повинна супроводжуватися покривними культурами, керуванням рослинними рештками, раціональною системою удобрення та захисту рослин, а також контролем ущільнення ґрунту внаслідок руху сільськогосподарської техніки [11–13; 16; 20].

Окремий технологічний сегмент – смуговий обробіток (*strip-till*), який поєднує локальне розпушення та внесення добрив у рядок із мульчуванням міжряддя. Для культур широкорядного типу сівби це практичний шлях зменшити енерговитрати та водночас отримати «тепле й чисте» насіннєве ложе в обробленій смузі. В середньому технологія *strip-till* здатна підвищувати врожайність польових культур порівняно з *no-till*-технологією, хоча величина ефекту істотно варіює залежно від ґрунтово-кліматичних умов та комплексу супутніх агротехнічних прийомів [18].

У виробничому вимірі це підкреслює: важливі не лише назви систем, а точність виконання (геометрія смуги, стабільність глибини, якість закриття борозни, синхронізація з сівалкою) та узгодження з системою удобрення (адресне внесення, стартові дози, корекція вертикального розподілу поживних речовин за мінімізованих систем обробітку) [14; 18].

Критичним для більшості полів залишається ущільнення, пов'язане рухом машинно-тракторних агрегатів по полю та роботою техніки за перезволоження ґрунтів. Встановлено, що ущільнення, зумовлене проходками сільськогосподарської техніки істотно погіршує фізичні властивості ґрунту й знижує врожайність, а «самовідновлення» ґрунту не завжди достатнє в короткі терміни [31]. Тому, базовим рішенням має бути проведення профілактичних заходів (регулювання тиску в шинах, оптимізація навантаження на вісь, мінімізація проходів, контроль вологості ґрунту під час робіт), а

розущільнення – лише тоді, коли воно підтверджене проведеною діагностикою ґрунтового покриву поля (пенетрометрія, щільність складання, профіль коренів, інфільтрація) і економічно виправдане [16; 17; 31]. Важливо також уникати «звички» до глибокого обробітку, оптимум глибини проведення залежить від культури, погодних умов, типу ґрунту й причин ущільнення, а надмірне збільшення глибини не гарантує пропорційного приросту врожайності культур [35].

Сучасна практика дедалі частіше застосовує епізодичний (occasional) обробіток у системах *no-till* та мінімального обробітку як інструмент «ремонт» ущільнених шарів ґрунту – збереження базового режиму мінімального порушення при разовому втручанні для руйнування плужної підшови або локального ущільнення. Такий підхід може частково поєднувати переваги довготривалого мінімального обробітку з потребою розущільнення ґрунту, але ефект залежить від частоти, інтенсивності та супутніх агротехнічних заходів [32; 33]. Тобто «разове розущільнення» не замінює системної профілактики ущільнення, а працює лише як точкова корекція.

Окрема група рішень стосується керування водним режимом і інфільтрацією. В умовах частих літніх злив і періодів посухи водопроникність (інфільтрація) та агрегатна стійкість ґрунту стають базовими показниками ґрунтової родючості. Встановлено, що інфільтрація тісно пов'язана зі структурою та пористістю ґрунту, а механічних обробіток може сприяти тимчасовому поліпшенню водопроникності, так і погіршувати її в середньостроковій перспективі через деструкцію агрегатів або повторне ущільнення проходами техніки [30]. Відповідно, технологічно важливо поєднувати обробіток із біологічними «структуроутворювачами» – кореневими системами основних і покривних культур, які стабілізують пори та агрегати, а також із мульчуючим шаром, що зменшує запливання і кіркоутворення [1–3; 11–13].

Диференціація обробітку в межах одного поля – ще один елемент сучасних систем обробітку. Навіть у межах одного масиву різняться

гранулометричний склад, мікрорельєф, глибина ущільнених прошарків і запас вологи, тому однакова глибина на всій площі часто є технологічно й енергетично невиправданою. Диференційований обробіток зі змінною глибиною (*variable depth tillage*) передбачає встановлення різної глибини механічного впливу в межах картованих зон поля, що дозволяє зменшити енерговитрати та виконувати глибоке розпушення лише там, де воно реально потрібне [34].

Практичним продовженням є використання управлінських зон як бази для «диференційованих технологічних налаштувань» (глибина та інтенсивність проведення обробітку, норми добрив, вибір покривних культур), що зменшує витрати і підвищує стабільність результатів у часі [37].

За відновлюваного землеробства система обробітку повинна бути узгоджена з ширшим контекстом систем землеробства – інтенсивними, адаптивними, органічними. Наприклад, за органічної системи збільшується механічний контроль бур'янів, що підвищує частоту обробітків; у такому випадку ґрунтозахисна дія досягається не «забороною обробітку», а правильним підбором знарядь і режимів, мульчуванням, покривними культурами, сидерацією, смуговим або локальним обробітком та дотриманням оптимальних строків виконання польових робіт [3; 11; 12]. Інтенсивні системи, навпаки, можуть дозволити собі глибшу механізацію й хімічний контроль, але мають компенсувати це управлінням органічною речовиною, протиерозійними заходами та мінімізацією енергетичних витрат [15; 39]. Такий міжсистемний аналіз важливий, бо показує: «найкраща» система обробітку не існує поза зв'язком із сівозміною, удобренням і системою захисту рослин [10; 20; 39].

4. Системи обробітку ґрунту та управління рослинними рештками, покривними культурами й мульчею як інструмент регулювання ґрунтових функцій

Ефективність будь-якої технології обробітку ґрунту в сучасних системах землеробства визначається не лише глибиною чи типом робочого органа, а насамперед тим, як регулюють надходження та розподіл органічної речовини: кількістю та розміщенням рослинних решток, інтенсивністю їх перемішування, наявністю покривних культур та тривалістю періоду без рослинного покриву поверхні ґрунту. Саме органічна маса формує структурно-агрегатний стан, водопроникність, стійкість до ерозії, інтенсивність мінералізації та відтворення гумусу – тобто ті функції ґрунту, які безпосередньо працюють на стабільність рівня врожайності польових культур та ефективність агротехнологій [3; 16; 17]. У рамках відновлюваного (регенеративного) землеробства ці процеси розглядають як базу: «відновлення» ґрунту, що практично означає підтримання постійного притоку органічних решток і зменшення прояву деструкційних процесів, що прискорюють дегуміфікацію та структурну деградацію ґрунту [11–13; 15].

У традиційній системі з інтенсивним полицевим обробітком органічна маса здебільшого заробляється в орний шар, що на короткому інтервалі прискорює процеси мінералізації, сприяє більш прогнозованому старту ростових процесів культури (тепліше насіннєве ложе, швидше підсихання верхнього шару навесні, ефективний контроль падалиці й бур'янів). Водночас інтенсивне розпушення й перемішування порушує агрегати, прискорює окиснення органічної речовини, знижує водостійкість та робить поверхню уразливішою до ерозійних процесів, особливо за дефіциту рослинного покриву в критичні періоди [3,; 8; 17]. Безполицеві системи (чизельний, плоскорізний, дисковий обробіток), мінімізовані та нульові технології інакше розв'язують питання управління органічною речовиною ґрунту, за яких

більша частина рослинних решток залишається на поверхні або в верхньому шарі ґрунту, формуючи мульчуючий екран, що зменшує випаровування, пом'якшує температурні коливання та знижує ризик руйнування структури краплями дощу. Однак це вимагає точнішої організації технологічного процесу, а саме: адаптації системи живлення з огляду на розподіл елементів живлення в ґрунтовому профілі, урахування зміни фітосанітарного стану, узгодження вимог до посівного обладнання/знарядь, а також регламентів виконання робіт за підвищеної вологості ґрунту та наявності колій.

Синтез експериментальних даних літературних джерел чітко засвідчує: поєднання мінімізованого обробітку з утриманням рослинних решток статистично поліпшує низку агрофізичних властивостей ґрунту. Зокрема, за технології *no-till*, поліпшується агрегатний склад і водостійкість ґрунтових агрегатів, збільшується доступність вологи та покращуються гідравлічні характеристики порівняно з традиційним обробітком, хоча часто супроводжуються невеликим зростанням щільності складення у верхньому шарі (яке не завжди є критичним для росту культур) [40]. Окремий огляд щодо фізичного середовища за *no-till* підкреслює, що «чистий ефект» технології дуже залежить від часу (*no-till* «працює з роками»), а супутні агротехнічні заходи – покривні культури, побічна продукція на добриво, контроль руху техніки – істотно підсилюють позитивний результат і зменшують ризики ущільнення [41]. Практичний висновок для систем обробітку зводиться до того, що не варто оцінювати технологію лише за фактом «без плуга», ключовим є комплекс заходів, що забезпечує мульчування, стабільну структуру, дренаж і кероване ущільнення ґрунту.

Насамперед покривні культури постають ключовим інструментом керування органічною речовиною ґрунту, але їхня ефективність не є однозначною і пов'язане зі змінами вологозабезпечення та динаміки вмісту сполук азоту в ґрунту. Встановлено, що покривні культури можуть знижувати сумарні запаси продуктивної вологи в усьому профілі на час сівби наступної культури, але водночас збільшувати вологозапаси у поверхневому шарі,

зменшувати непродуктивні втрати вологи та підвищувати ефективність водоспоживання, результат сильно модується погодними умовами, типом ґрунтом, кількості біомаси та строками припинення вегетації покривної культури [42]. Для умов із частими літніми посухами критичним є недопущення надмірного використання ґрунтової вологи покривними культурами, необхідні оптимальний добір видів і оптимізація строків припинення їхньої вегетації (терміни заробки або десикації), щоб зберегти запаси продуктивної вологи для основної культури. У посушливих умовах, згідно узагальнення літературних джерел, також відмічається потенційний ризик: у середньому покривні культури можуть зменшувати вологість ґрунту та вміст мінерального азоту на момент сівби наступної культури, тоді як вплив на врожайність варіює від позитивного до негативного залежно від кількості опадів, типу ґрунту, функціональної групи покриву та припинення вегетації покривної культури [43]. Тому, покривні культури слід розглядати не як універсальне рішення, а як керований технологічний інструмент із визначеними параметрами застосування: обсяг сформованої біомаси, співвідношення C:N рослинних решток, строки припинення вегетації, спосіб припинення та подальше поводження з рештками (залишення у вигляді мульчі або часткове загортання).

Щодо ролі покривних культур у пом'якшенні та адаптації до змін клімату встановлено, що вони можуть одночасно впливати на вуглецевий баланс (викиди та зв'язування вуглецю), ерозійні процеси та водний режим. Відповідно, їхню ефективність доцільно оцінювати інтегрально за комплексом показників, а не за одним критерієм, наприклад, лише за вмістом (або запасами) органічного вуглецю ґрунту (SOC) або лише за рівнем врожайності [44], що узгоджується з підходами ФАО до сталого управління ґрунтовими ресурсами, де технологічні рішення мають базуватися на багатокритеріальному оцінюванні (родючість, ерозійна стійкість, водний режим, біота, економічна доцільність) [3; 16].

Заходи щодо завершення вегетації покривних культур визначають, чи стане біомаса мульчею, яка «працює» на збереження вологи й пригнічення бур'янів, чи перетвориться на проблему (нерівномірний розподіл, «холодна» весна, осередки шкідників, ускладнена сівба). Останні роки істотно активізувалися дослідження механічного припинення вегетації покривних культур котком-кримпером (roller-crimper) у поєднанні з *no-till* та *strip-till*-технологіями, які засвідчили, що за оптимально підібраних видів і фаз розвитку проведення заходу, можна отримувати достатню мульчу та забезпечувати зростання рівня продуктивності культур, але стабільність ефекту залежить від кількості біомаси, погодних умов і задіяної системи контролю бур'янів [48; 50]. Однак прискорити розкладання рослинної мульчі й «підживити» мікробіоту в ґрунті не завжди вдається навіть за додаткових заходів, тому ефективність даної технології припинення вегетації покривних культур може бути нейтральною та потребує точного налаштування технологічного процесу [49]. У виробничих умовах, дана технологія постає як перспективний інструмент, але її слід розглядати не як заміну всіх інших технологічних рішень, а як додаткову опцію поряд із хімічною обробкою десикантами, мульчування рослинної маси покривних культур подрібнювачами, часткового загортанням або локальним обробітком у зоні рядка.

Керування органічною масою неминуче змінює агрохімічні властивості верхнього шару ґрунту. За *mini-till* і *no-till*-технологіями відмічається типовий шаруватий розподіл значень реакції ґрунтового розчину (pH), органічного вуглецю та елементів живлення у ґрунтовому профілі, насамперед за поверхневого способу внесення добрив. Довготривалі дослідження засвідчили, що інтенсивне NPK-живлення за *no-till*-технології спричиняє відчутну диференціацію кислотності у верхньому 0–5 см шарі ґрунту, тоді як за стандартні методи відбирання проб (на 0–20 або 0–30 см) не відображають фактичної динаміки показника, що обумовлює до прийняття хибних управлінських рішень [45]. Таким чином, за переходу до

мінімізованих технологій змінюється методика агрохімічного моніторингу ґрунтів, відбираються для аналізу ґрунтові проби у дрібніших шарах верхньої частини профілю, відокремлено оцінюється 0–5 та 5–10 см шари ґрунту, змінюється підхід щодо оптимізації кислотно-лужного балансу та рівня мінерального живлення (локальне внесення, стрічкове розміщення, поєднання зі *strip-till*-технологією). Аналогічно для фосфору важливим стає контроль стратифікації: накопичення Р у поверхневому шарі за поверхневих внесень у *no-till* пов'язують із потенційним зростанням ризику втрат із поверхневим стоком, що переходить у площину як агрономічної ефективності, так і якості вод [46]. Отже, інструменти управління органічною масою потрібно відразу «прошивати» рішеннями щодо розміщення добрив і вапнування, щоб уникнути прихованих обмежень продуктивності та екологічних ризиків.

Подібна закономірність встановлена для фосфору, де ключовим є урахування диференціації вмісту рухомих сполук елементу по профілю ґрунту. Зокрема, за поверхневого внесення у системах *no-till* відмічають тенденцію до накопичення рухомих сполук фосфору у верхньому 0–10 см шарі ґрунту, що може підвищувати ймовірність його втрат із поверхневим стоком та, відповідно, посилювати ризики для якості вод. Тому, питання має одночасно виробниче й екологічне значення, визначає результативність фосфорного живлення та рівень ризику дифузного забруднення водою [46]. Відтак управління надходженням органічної речовини в ґрунт (рослинні рештки, покривні культури, мульчування) доцільно інтегрувати з рішеннями щодо просторово-профільного розміщення мінеральних добрив і регулювання рівня кислотності (вапнування), щоб знизити ймовірність прихованих лімітуючих чинників продуктивності та мінімізувати екологічні ризики.

Окремий блок за систем мінімального та нульового обробітків становлять ущільнення і організація проходів техніки по полю, оскільки за таких технологій відсутній регулярний глибокий полицевий обробіток (з

активним обертанням пласта ґрунту), який у традиційних системах частково «перезавантажує» орний шар. Тому колії та пов'язані зони підвищеної щільності можуть зберігатися триваліше і накопичуватися в просторі, формуючи стійкі осередки транспортно-індукованого ущільнення. Це має прямі наслідки для водного режиму та кореневмісного шару в результаті погіршення інфільтрації, порушення порового простору, ускладнення газообміну, особливо за виконання робіт на перезволожених ґрунтах. У таких умовах ефективність системи обробітку дедалі більше визначається не глибиною розпушення, а керуванням тиском в рушіях і частотою проходів, узгодженням колійності, мінімізацією повторних проїздів та дотриманням оптимальних строків проведення польових операцій [47]. Відповідно, на практиці контролювання колійності, зниження питомого тиску рушіїв і зонального розуцільнення проблемних ділянок розглядається як ключові елементи технологічного циклу вирощування з метою забезпечення формування оптимального агрофізичного стану ґрунту. Власне, компромісні рішення типу застосування технології *strip-till* часто розглядають як практичний спосіб поєднати мульчування міжрядь із локальним розпушенням у зоні рядка та стрічковим внесенням добрив, зберігаючи контроль над ущільненням і водним режимом [14; 18].

У підсумку, блок «органічна маса – рослинний покрив – мульча» задає для систем обробітку ґрунту кілька ключових, кількісно визначених технологічних критеріїв: мінімізувати тривалість періоду без рослинного покриву; забезпечити стабільне повернення біомаси в ґрунт і на його поверхню; регулювати водний баланс шляхом оптимізації строків і способів (десикація, прикочування, дискування, заорювання) припинення вегетації покривних культур; синхронізувати розміщення рослинних решток із вимогами сівби й живлення сільськогосподарських культур; урахувати профільну (вертикальну) диференціацію рівня рН та вмісту рухомих сполук фосфору шляхом адаптації агрохімічного моніторингу і способів внесення мінеральних добрив та меліорантів; зменшити ризики ущільнення шляхом

управління транспортними навантаженнями на ґрунт. Саме в такій системній конфігурації обробіток ґрунту слід розглядати як компонент керування ґрунтовими функціями, спрямований на стабілізацію агрофізичного стану, водного режиму та балансу органічної речовини в довгостроковому періоді [3; 16; 17; 40; 41].

5. Механічне навантаження ґрунтообробної техніки на ґрунт: ризик, межі, запобігання

У сучасних технологіях ключовим «техногенним» фактором деградації фізичного стану ґрунту є не стільки сам спосіб обробітку, скільки рух техніки по полю (трафік): кількість проходів, ширина та повторюваність колії, навантаження на колесо, вісь і стан ґрунту за вологістю під час виконання технологічної операції. Ущільнення формується тоді, коли прикладені напруження перевищують несучу здатність ґрунту; це проявляється ущільненням орного шару, локальними осередками переущільнення в технологічних коліях і, що найгірше, підорним (суборним) ущільненням, яке усувається повільно й обмежено, навіть за наявності високої біологічної активності та сезонних циклів зволоження-висихання [51–53; 58].

Орієнтовні кількісні оцінки з узагальнених джерел свідчать, що транспортно-індуковане ущільнення має практично значущі наслідки для агрофізичного стану ґрунту та продуктивності. Зокрема, ущільнення підвищує опір проникненню кореневих систем (penetrometer resistance) приблизно на 41–99 % залежно від гранулометричного складу ґрунту, а зниження врожайності за узагальненими даними зазвичай становить близько 6–34 % [55]. Ширина діапазону зумовлена відмінностями між культурами, погодними умовами року, рівнем ущільнення та агрофоном. Тому, ущільнення має практично значущі наслідки, оскільки безпосередньо пов'язане зі зниженням врожайності та стабільності рівня продуктивності агроценозів.

Перший прохід є критичним з погляду формування ущільнення, зумовленого проходами техніки. У більшості виробничих сценаріїв найбільший внесок в ущільнення припадає на прохід по непорушеній поверхні поля, який формує первинну колію та зону підвищеної щільності, тоді як подальші проходи переважно посилюють уже сформоване ущільнення. З огляду на це доцільно не розсіювати проходи по площі поля, а зменшувати їх

кількість та локалізувати рух техніки в керованому форматі з повторюваними коліями (постійні технологічні колії / *controlled traffic farming, CTF*) із одночасним контролем маси агрегатів, осьових навантажень і питомого тиску на ґрунт [51; 56–58].

З метою запобігання ущільнення підорного (суборного) визначені інженерні критерії, які можна використати в управлінні рухом (трафіком) сільськогосподарської техніки. Зокрема, для умов руху техніки по ґрунті за вологості, близької до польової вологоємності, запропоновано правило «50–50» за якого вертикальні напруження понад 50 кПа на глибині понад 50 см розглядають як небажані з огляду на ризик формування підорного ущільнення [54]. У тому ж дослідженні наведено практичне правило «8–8», згідно якого глибина залягання ізобари напруження 50 кПа збільшується приблизно на 8 см на кожну додаткову 1 т навантаження на колесо та ще приблизно на 8 см у разі подвоєння тиску в шині. З практичної точки зору це означає, що перехід від умовних 4 т/колесо до 6 т/колесо може змістити зону потенційно ризикових напружень орієнтовно на 16 см глибше, тоді як додаткове підвищення тиску в шині вдвічі може збільшити цю глибину ще приблизно на 8 см [54]. Це пояснює, чому підорне ущільнення часто формується не стільки внаслідок проведення обробітку ґрунту, скільки під дією важких самохідних чи причіпних агрегатів під час збирання врожаю, внесення добрив і транспортних операцій у межах поля.

На рівні нормативно-технічних критеріїв доцільно оперувати допустимим тиском ходових систем на ґрунт, оскільки він прямо пов'язаний із ризиком (передусім підорного) ущільнення. У публікаціях, що узагальнюють вимоги ДСТУ 4521:2006 «Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт», відмічено, що гранично допустимий максимальний тиск на ґрунт істотно залежить від вологості та стану складання верхнього шару і в типових польових умовах варіює орієнтовно в межах 40–210 кПа [59]. Оскільки фактичний контактний тиск визначається навантаженням на колесо/вісь і внутрішнім тиском у шинах,

практична реалізація даних норм неможлива без керування ходовою системою. За технічними даними для тракторних шин максимальний тиск на ґрунт за мінімально допустимого внутрішнього тиску може становити близько 78–177 кПа, а за внутрішнього тиску понад 120 кПа, відмічається ризик невідповідності технічним обмеженням щодо дії ходових систем на ґрунт. Таким чином, регулювання тиску в шинах у поєднанні з контролем фактичних навантажень (баластування, маса агрегату, осьові навантаження) є безпосереднім інструментом керування ризиком ущільнення, а не допоміжною сервісною процедурою.

Одним із найрезультативніших підходів до зменшення переущільнення є не стільки спроба знизити навантаження (скрізь і завжди), скільки просторове обмеження площі проходів техніки. Встановлено принципову різницю між випадковим і керованим рухом техніки, коли за певних конфігурацій ретельно спланованого руху (трафіку) техніки, частка площі, що потрапляє під колеса, може становити близько 25 % проти ≈ 75 % за умов випадкового розміщення проходів (*random tracking*) і, навіть у складніших схемах із подвоєнням ширини колії рівень трафіку за випадкового розміщення сягає 30–40 % [56]. Це означає не просто «менше ущільнення в середньому», а іншу просторову організацію ризику, коли ущільнення цілеспрямовано локалізується в постійних технологічних коліях, тоді як більша частина поля зберігає оптимальний агрофізичний стан (структуру, пористість) і, відповідно, кращі передумови для водопроникності та розвитку кореневих систем культурних рослин.

Керований трафік техніки (CTF – Controlled Traffic Farming) є інструментом, що накладається на будь-яку систему обробітку, оскільки його ключова функція – просторове обмеження транспортно-індукованого ущільнення, яке не залежить від того, яким способом обробітку формують посівне ложе.

За інтенсивного (полицевого) обробітку частина поверхневого ущільнення може тимчасово компенсуватися розпушенням орного шару,

однак проходить важких агрегатів здатні формувати ущільнення нижче глибини основного обробітку, яке вже не усувається традиційними заходами обробітку ґрунту [51–52; 58]. За мінімізованих систем і прямої сівби помилки в організації проходів техніки мають більш відчутні наслідки, за хаотичного розміщення колій по полю переущільнені смуги й локальні осередки можуть накопичуватися та набувати системного характеру; натомість СТФ локалізує ризик у постійних коліях і робить його керованим [56; 57].

Глибоке розущільнення (щільювання, глибоке рихлення) може бути результативним, однак як стратегічний прийом воно виправдане лише за одночасного усунення причин повторного ущільнення – надмірних навантажень і тиску, виконання робіт за несприятливої вологості, хаотичних проходів техніки. В іншому разі ефект часто є короткотривалим, і ущільнення відновлюється протягом 1–2 сезонів [57; 58].

Діагностика ущільнення має базуватися на простих та відтворюваних індикаторах, які дозволяють коректно вимірювати стан ґрунту та аналізувати його зміни. Зокрема, до них варто віднести такі: пенетрометрія (опір проникненню) як швидкий метод первинної оцінки; щільність складення й пористість ґрунту (за потреби проводять на реперних або контрольних ділянках поля); візуальна оцінка структурності та розвитку кореневої системи у ґрунтовому профілі; просторовий аналіз проходів техніки (карта колій, карти врожайності, індекси дистанційного зондування (супутникові та безпілотні)). Важливо не зводити діагностику до одного показника, навіть у польових дослідженнях встановлено, що після події ущільнення через два роки окремі фізичні властивості можуть не повернутися до доущільненого рівня, причому функціональні характеристики (проникність, переміщення води й газів) та загальна пористість ґрунту відновлюються з різною швидкістю й не синхронно [53]. Це свідчить про те, що стратегічна мета полягає не лише в разовому «розущільненні», а у підтриманні відновлення ґрунтових функцій і запобіганні повторному формуванню умов, що спричиняють ущільнення.

Комплекс технологічних та організаційних заходів проти ущільнення ґрунту зазвичай включає кілька базових, але критично необхідних елементів: мінімізацію кількості проходів і переїздів, чітку організацію руху агрегатів по полю, контроль вологості ґрунту (уникнення робіт за стану, близького до межі пластичності), регулювання тиску в шинах відповідно до операції та фактичного навантаження, добір ходових систем із більшою площею контакту там, де використання важкої техніки неминуче, перехід до постійних технологічних колій (СТФ), а також локальні коригувальні заходи (розущільнення) лише на ділянках, де діагностика підтвердила проблему і де усунено передумови її повторного формування [51; 54; 56–58].

У такому разі дисципліна організації проходів техніки стає базовою складовою технології нарівні зі строками виконання робіт, нормами внесення, налаштуваннями агрегатів і контролем якості виконання операцій.

6. Поживний режим ґрунту за різної інтенсивності обробітку: закономірності й технологічні рішення

Система обробітку ґрунту по суті переналаштовує функціонування елементів живлення: змінює їх профільний розподіл, інтенсивність і локалізацію мінералізації, масштаби втрат із водними потоками та газообміном, а також доступність поживних речовин у критичні фази розвитку культури. Відповідно, одна й та сама норма добрив може забезпечувати різний результат залежно від того, чи домінує інтенсивне перемішування орного шару (оранка), чи розпушення без перевертання скиби (чизельний, плоскорізний, комбінований обробіток), чи застосовується смуговий обробіток (*strip-till*), або ж ґрунт зазнає мінімального механічного впливу (*no-till*).

У науково обґрунтованих підходах до відновлюваного землеробства ключовим стає не лише питання «скільки внести», а просторово-часова організація живлення: де саме в профілі й у якій формі локалізувати елементи, яким способом і в які строки здійснювати внесення, а також як узгодити ці рішення з обробітком, наявністю рослинних решток і покривних культур, щоб забезпечити доступність елементів за одночасної мінімізації втрат і деградаційних ризиків [3; 16; 17].

Найвиразніша закономірність зі зменшенням інтенсивності обробітку – це посилення профільної (вертикальної) неоднорідності вмісту органічної речовини, доступних форм фосфору й калію, кальцію, магнію та показників кислотності в межах оброблюваного 0–30 см шару ґрунту. За тривалого застосування технології *no-till* або мінімізованого обробітку органічний вуглець і поживні елементи частіше акумулюються у поверхневому шарі, тоді як у горизонтах 10–30 см можливе відносне зниження забезпеченості доступними формами, особливо за багаторічного поверхневого внесення добрив [67].

Для культурних рослин це проявляється не тільки на рівні агрохімічних показників, а й у фізіології живлення рослин: у посушливі роки активна зона поглинання зміщується глибше разом із розміщенням кореневої системи, і тоді підвищені концентрації фосфору та калію у поверхневому шарі не компенсують дефіцит доступних форм у шарі, який забезпечує основне водопостачання. Відповідно, у мінімізованих і смугових системах зростає значення локалізованого внесення (стрічкове або смугове, глибоке локалізоване внесення добрив, стартові дози в рядок) та профільної агрохімічної діагностики з відбором проб за шарами ґрунту.

З практичного погляду для агрохімічного супроводу мінімізованих і *no-till* систем доцільно застосовувати профільний (пошаровий) відбір ґрунту, щонайменше 0–10 і 10–20 см, а за потреби – з дрібнішою деталізацією (наприклад 0–2,5; 2,5–5; 5–7,5 см за тривалого застосування *no-till*). Це обумовлено тим, що саме у верхньому 0–10 см шарі формується найбільш виражена вертикальна неоднорідність показників рН і забезпеченості рухомими сполуками фосфору, і саме там традиційний відбір ґрунтових проб з 0–20 см шару найчастіше призводить до методичних похибок оцінювання та прийняття хибних управлінських рішень [64].

У системах із обмеженим перемішуванням орного шару (мінімізований обробіток, *no-till*, *strip-till*) для зменшення міжрічної варіабельності врожайності сільськогосподарських культур і стабілізації доступності елементів живлення доцільно ширше застосовувати локалізоване внесення (*banding/strip placement*) та приповерхнєве розміщення добрив у зоні активного коренеутворення. Ефект цього підходу підтверджено узагальненням результатів польових досліджень: у середньому розміщення добрив у ґрунті забезпечувало близько +3,7 % прирости врожайності порівняно з поверхневим розкидним внесенням, водночас приріст урожайності залежить від форми добрива та технології внесення, а для окремих комбінацій (зокрема локалізації карбаміду та/або амонійних форм азоту разом із розчинним фосфатом у смузі (стрічці) на глибині) приріст був істотно вищим.

З огляду на низьку рухомість фосфору в ґрунті, просторове розміщення добрива часто є визначальним чинником ефективності, ніж подальше нарощування норми внесення. Узагальнення результатів польових досліджень щодо способу внесення фосфорних добрив свідчить, що стрічкове (рядкове) внесення значною мірою забезпечує перевагу над розкидним, однак ефект є неоднорідним і залежить від умов вирощування: для зернових культур і ріпаку ефект локалізації проявляється частіше, тоді як для сої в окремих ґрунтово-кліматичних умовах перевага може зберігатися за розкидним внесенням [61].

Зокрема, дослідження Huang H. Щодо глибини локалізованого внесення NP-добрив добре ілюструють, як раціональне технологічне рішення забезпечує підвищення рівня врожайності зерна кукурудзи. За порівняння, розміщення добрив на 5, 15 і 25 см урожай зерна кукурудзи за внесення на 15 см був вищий на 5,7 %, а за внесення на 25 см – на 13,8 % порівняно з варіантом 5 см [66]. Одночасно зростали економічна віддача та показники ефективності використання азоту, тоді як газоподібні втрати азоту (N_r) і вуглецевий слід зменшувалися орієнтовно на 11–21 % N_r та на 4–14 % карбону за глибшого розміщення добрив [66].

Практичний зміст даних результатів полягає в тому, що локалізація елементів живлення в зоні активного коренеутворення може підвищувати стабільність живлення, особливо в умовах дефіциту опадів, коли поглинання вологи й елементів живлення зміщується до глибших шарів ґрунту.

У системах із збереженням рослинних решток на поверхні поля, варто виділяти два взаємопов'язані шляхи забезпечення азотом: оперативному (надходження мінеральних форм і рання доступність для культури) та біологічному (мінералізація органічної речовини, активність біоти, поступове вивільнення N). За наявності поверхневих решток із високим співвідношенням C:N можливе тимчасова іммобілізація сполук азоту у верхньому шарі, тому стартові локальні дози (у рядок або стрічкою) часто забезпечують вищу ефективність, ніж суцільне розкидне внесення. Водночас поверхнєве внесення карбаміду або КАС без загортання підсилює ризики втрат азоту, зокрема у

вигляді амоніаку (NH_3) та непродуктивного винесення нітратів із водними потоками. Тому в таких системах ключовими стають форма, строки та просторове розміщення азотних добрив – параметри внесення, які за ефективністю є співмірними з вибором норми внесення.

Окремий блок становить регулювання кислотності ґрунтового розчину, яка тісно пов'язана з довготривалим застосуванням азотних добрив. Зокрема, за технології *no-till* багаторічне застосування азотних добрив сприяє зниженню значень рН у верхньому шарі та посиленню профільної неоднорідності рівня кислотності. Важливо, що зміни значень рН і пов'язаних показників (зокрема вмісту обмінного Al, забезпеченості Ca та інших основ) часто проявляються не рівномірно в 0–20 см, а найбільш виразно в 0–5 см шарі ґрунту, що підкреслює методичну необхідність дрібнішого пошарового відбору проб для об'єктивної діагностики рівня кислотності й планування меліоративних заходів [64].

Фосфор і волога: компроміс між продуктивністю та екологічною безпекою. За мінімізованих систем обробітку найбільш чутливою зоною стає поверхневий шар ґрунту, де внаслідок слабого перемішування накопичуються фосфор і органічні сполуки. Це добре для стартового живлення, але створює екологічний ризик: за інтенсивних опадів або сніготанення зростає ймовірність перенесення розчинних форм фосфору з поверхневим стоком. Підтверджено, що за технології *no-till* знижується концентрація та винесення нерозчинних сполук фосфору орієнтовно на 45 % і 55 % відповідно, але водночас нерідко асоціюється з вищими втратами рухомих (розчинних у воді) сполук фосфору [62]. Це типовий приклад, коли «ґрунтозахист» і «якість води» потребують спільного налаштування, а не одного рішення «на все поле».

Практичним інструментом зниження цього ризику може бути періодичне перемішування поверхневого шару за тривалого застосування технології *no-till* на тих полях, де поверхнева акумуляція сполук фосфору досягла критичних рівнів. У польовому експерименті на глинистих ґрунтах

встановлено, що за тривалого застосування технології *no-till* втрати розчинного фосфору були приблизно утричі вищими, ніж за щорічного полицевого (оранка) обробітку, тоді як одноразова оранка на глибину 20–22 см зменшувала втрати розчинного Р на 60 %, а також помітно знижувала втрати через підґрунтовий стік протягом кількох років після виконання даного заходу [63]. За відновлюваного землеробства це слід трактувати не як «повернення до оранки», а як захід керування екологічними ризиками.

За мінімізованого та нульового обробітку поверхнєве внесення вапнякових матеріалів часто повільно впливає на кислотність 10–25 см шару ґрунту. У результаті в 0–10 см шарі формується прийнятний рівень, тоді як нижче відмічається підвищення кислотності ґрунтового розчину, що обмежує розвиток кореневої системи, знижує доступність окремих елементів живлення (зокрема P_2O_5 і Мо) та за певних умов підвищує ризик алюмінієвої токсичності.

Узагальнення сучасних досліджень свідчить, що найбільш стабільне зменшення диференціації значень рН в ґрунтовому профілі досягається або внесенням вапна з частковим загортанням (через розпушування або чизелювання в межах прийнятного рівня порушення ґрунту), або поєднанням поверхнєвого вапнування з гіпсуванням, що поліпшує фізико-хімічні властивості нижчих шарів ґрунту [65]. Отже, вапнування доцільно планувати не як періодичний «разовий» захід, а як елемент системи обробітку та удобрення, прив'язаний до пошарової агрохімічної діагностики, вимог культур у сівозміні та допустимого рівня механічного втручання.

Тому, за мінімізованих і, особливо, технології *no-till* система удобрення та меліоративні заходи стають передусім питанням просторової організації та проведення об'єктивної агрохімічної діагностики через виразну профільну неоднорідність показників ґрунтової родючості, тому вирішальними є шаровий відбір ґрунту й локалізоване внесення як добрив, так і меліорантів, особливо в умовах дефіциту атмосферної вологи.

7. Модель впровадження, моніторингу та адаптації систем обробітку ґрунту

Системи обробітку ґрунту в умовах ведення відновлюваного землеробства доцільно трактувати як портфель адаптивних виробничих рішень, а не як «єдиний правильний спосіб». У практичній площині це означає добір для різних полів (і окремих ділянок у межах поля) різних комбінацій способу обробітку ґрунту – від диференційованого (комбінованого) та мульчувального до смугового (*strip-till*), поверхневого лущення, періодичного глибокого розпушення (за результатами діагностики) і технології *no-till*. Визначальним критерієм є стабільність рівня урожайності за одночасного обмеження деградаційних ризиків і економічної доцільності, а не нормативна «ідеологія» окремої технології. У цьому сенсі принципи відновлюваного (ґрунтозахисного) землеробства (мінімальне порушення, постійний покрив рослинними рештками/мульчею, диверсифікація сівозмін) є методологічним орієнтиром, однак у виробничих умовах рішення неминуче формуються як компроміс між водним режимом, контролем бур'янів і фітосанітарним станом, ризиками ущільнення, своєчасністю виконання операцій та логістикою руху техніки [1; 4; 10].

Базовий алгоритм впровадження систем обробітку ґрунту в господарствах різних форм власності, має будуватися за принципом «діагностика → зонування → поетапне впровадження». Початковим кроком є не заміна ґрунтообробних знарядь, а польова типізація: виділення ґрунтових відмін і гранулометричного складу, оцінка рельєфу полів та ерозійної небезпеки, характеристика водного режиму (перезволоження, пересихання), аналіз історії обробітку й ознак ущільнення (зокрема плужної підшви та локальних проблемних ділянок), а також картування проходів техніки як основного чинника формування переущільнених смуг. Практично це оформлюють у вигляді карти технологічних (управлінських) зон і стислого

«паспорта поля», де чітко зазначено переважаючі ризики та обмеження (ерозія, ущільнення, перезволоження, дефіцит продуктивної вологи) і прив'язано їх до конкретних ділянок. Такий підхід відповідає принципам сталого управління ґрунтовими ресурсами, за яких технологічні рішення обґрунтовуються загрозами й функціями ґрунту та підтверджуються об'єктивними, кількісно оцінюваними показниками, а не узагальненими намірами [3; 16; 17].

Другий крок – сформувати мінімальний, але регулярний набір контрольних показників, щоб уникнути надмірної деталізації й водночас мати відтворювану основу для управлінських рішень. Сучасні підходи підкреслюють, що ефективніше працює обмежений набір показників із чітким протоколом вимірювання та інтерпретації (поєднання польових і лабораторних тестів), ніж епізодичні «повні обстеження» без повторюваності в часі [16; 70; 75]. Для виробничих умов практично достатньо 6–10 індикаторів у трьох блоках:

- Фізичний блок: інфільтрація (час поглинання), водостійкість та агрегатна стійкість, візуальна оцінка структури ґрунту, пенетрометрія та польові ознаки ущільнення, частка площі під коліями (ущільненими смугами) як ключовий індикатор результативності організації проходів техніки;
- Хімічний блок: рівень рН, доступні елементи живлення (з окремим акцентом на профільний розподіл Р і К за шарами), за потреби – електропровідність та ознаки солонцюватості;
- Біологічний блок: показники макрофауни (насамперед дощові черв'яки) та біоти ґрунту, за наявності можливостей проведення простих тестів щодо інтенсивності ґрунтового дихання та/або ферментативної активності, або інші доступні проксі-показники біологічної активності ґрунту.

Як правило, у виробничих умовах аналізують до 6–8 показників, де частина – швидкі польові тести, а частина – лабораторні аналізи, придатні для порівняння в часі [74; 75].

Третій крок – формування технологічних пакетів для виділених технологічних (управлінських) зон. Йдеться не про вибір «*no-till* чи *strip-till*», а про конструювання узгодженого набору взаємопов’язаних рішень: спосіб і глибина проведення обробітку (або його відсутність); управління рослинними рештками (подрібнення, рівномірність розподілу, висота зрізу, налаштування розкидачів); покривні (проміжні культури), їхній видовий склад, строки сівби та припинення вегетації; сівба основних культур (тип сошників, притиск, очищення рядка, контроль глибини); організація проходів техніки та навантаження на ґрунт (колійність, тиск у рушіях, строки виїзду); система живлення (локалізоване внесення, урахування профільної диференціації елементів живлення та рівня рН); фітосанітарний стан посівів (контроль бур’янів, шкідників і збудників хвороб як критичних ризиків переходу). Саме така інтеграція пояснює, чому одна й та сама технологія у різних господарствах може давати протилежні результати та різнятися поєднанням технологічних операцій, точністю їх проведення та вихідні лімітуючими чинниками показників родючості ґрунту [10; 70].

Четвертий крок – визначити порогові значення та алгоритми коригувальних дій, щоб управління системою базувалося на чітко визначених кількісних критеріях, а не на суб’єктивній оцінці. Приклади простих виробничих правил можуть бути такими:

- Покрив поверхні (протиерозійна стійкість, збереження вологи). Якщо мета ерозійна безпека та збереження вологи, рівень покриття поверхні рослинними рештками після сівби має фіксуватися як кількісний контрольований показник, а не оцінюватися «на око». Як мінімальний орієнтир використовують ≥ 30 % покриття поверхні ґрунту, а для полів із вищими ризиками (схили, легкі ґрунти, дефіцит вологи) – 50–70 % залежно від культури умов вирощування;
- Ущільнення (точкова корекція замість суцільних операцій). Якщо індикатори ущільнення підтверджують проблему, заходи мають бути локалізованими та причинно-орієнтованими, Розущільнення

проводиться лише на проблемних ділянках, дотримується обмеження та маршрутизація проходів техніки, строків виїзду, навантажень і тиску в шинах, замість суцільного глибокого рихлення всього поля;

Диференціація розподілу елементів живлення (адаптація живлення, а не відмова від обраної системи). Якщо за мінімізованих систем обробітку формується виражена диференціація поживних елементів і рівня рН в ґрунтовому профілі, корекція полягає не в «поверненні до оранки», а в переналаштуванні системи живлення, переходу до стрічкового (локалізованого) внесення, профільне (шарове) агрохімічне обстеження ґрунту, застосування меліорантів та узгодження системи удобрення із плановою врожайністю й біологією культури.

П'ятий крок – прив'язка агрономічних рішень до ключових показників ефективності, що забезпечує управлінський, а не декларативний характер впровадженої технології. В європейських підходах з метою оцінювання сталості виробництва на рівні господарства дедалі частіше переходять від «переліку технологічних заходів» до оцінки фактичних результатів за показниками, які можна отримати у виробничих умовах за проведення стандартних аналізів (урожайність, витрати пального, енергоємність, викиди парникових газів, стан родючості ґрунту тощо) [73]. У ґрунтовому блоці реалізують індексні підходи на прикладі Open Soil Index, які базуються на кількісно визначених властивостях ґрунту та забезпечують інтерпретацію, придатну для управлінських рішень, дозволяють ідентифікувати, які саме показники знижують інтегральну оцінку і які адаптивні заходи мають першочерговий пріоритет [71]. Важливо, щоб показники були простими, постійними та прив'язаними до конкретних управлінських рішень, наприклад: покриття поверхні поля рослинними рештками, інтенсивність інфільтрації, пенетрометрія у критичні періоди, частка площі під коліями, витрати пального на 1 га, а також стабільність урожайності за 3–5 років. Це своєю чергою, дозволить прямо пов'язувати стан родючості ґрунту з прийнятими

технологічними рішеннями та оцінювати економічну ефективність на основі об'єктивних показників.

Шостий крок – економічна валідація прийнятих рішень, оскільки навіть методологічно коректні підходи у виробництві мають бути підтверджені розрахунками витрат і отриманого результату. Показовими є моделі, у яких оптимізація управління земельними ресурсами та адаптація технологічних заходів розглядається за одночасного виконання обмежень щодо ґрунтової родючості та екологічних ризиків і максимізації фінансового результату. Зокрема, на прикладі FARManalytics продемонстровано, що за певних умов оптимізація технологій може одночасно відповідати вимогам до ґрунту й довкілля та підвищувати дохід, у наведеному дослідженні зазначено потенціал до €940/га/рік, водночас підкреслено, що обмеження підорного ущільнення залишається складним завданням навіть за «оптимізованих» сценаріїв [72]. Для практики це означає, що спектр систем обробітку має включати не лише ґрунто- та природоохоронну складову, а й операційно та економічно здійсненні рішення з урахуванням наявної техніки, строків виконання робіт, ринкових умов і фітосанітарних ризиків.

Сьомий крок – масштабування без втрати керованості. Реалістична траєкторія впровадження передбачає поетапність: спочатку контрольні поля/ділянки, далі – розширення на технологічні зони зі подібними ризиками. Ключовим є не «демонстраційний полігон», а внутрішньогосподарське порівняння в максимально вирівняних умовах: одна культура, близькі строки, однакові схеми живлення і захисту, але різні системи обробітку, управління рослинними рештками та організації проходів техніки. Саме так проводиться поетапне розширення застосування систем обробітку із збереженням керованості технологічних процесів: де *strip-till* стабільно дає перевагу за вологозабезпеченням, де поверхнєве лущення у поєднанні з покривними культурами ефективніше контролює бур'яни, а *no-till* потребує іншої конфігурації сівалки та переналаштування роботи з рослинними рештками. У цьому контексті інтегроване оцінювання показників родючості ґрунту

доцільне як інструмент верифікації змін, оскільки ефективність застосування системи обробітку відображаються не в одному показнику, а в сукупності фізичних, біологічних і хімічних параметрів, що потребують багатокритеріального аналізу [70].

Підсумовуючи, узагальнююча модель може бути подана як управлінський цикл технологічних рішень: типізація полів → формування пакета рішень під переважаючі ризики → система ключових показників результативності → коригувальні дії → поетапне розширення застосування. Сильна сторона підходу полягає в практичній керованості: він забезпечує контрольований перехід між системами обробітку на основі показників родючості ґрунту, урожайності та виробничих витрат і залишає чітке місце для технологічних компромісів, насамперед щодо ущільнення, фітосанітарних ризиків та економічної ефективності технологічних операцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Conservation Agriculture principles. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/conservation-agriculture-principles/en/>.
2. Conservation Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>.
3. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management. Rome: FAO, 2017. URL: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9a5b9373-3558-43b3-b732-f69326a7314d/content?utm_source=chatgpt.com.
4. Conservation Agriculture. FAO. URL: https://www.fao.org/fileadmin/templates/tc/tce/pdf/Conservation_Agriculture.pdf.
5. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Chapter 13: Europe*. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-13/>
6. Polevoy A., Barsukova O., Husieva K., Zhygailo O., Volvach O., Kyrnasivska N., Tolmachova A., Zhygailo T., Danilova N., Kostiukievych T. The Climate Change Impact on the Development of Droughts in Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25(6). P. 194–205. Doi:10.12911/22998993/187276. URL: <https://www.jeeng.net/pdf-187276-110366?filename=110366.pdf>
7. Saydak R.V., Tarariko Y.O., Pysarenko P.V., Soroka Y.V., Zhuravlov O.V., Leliavska L.V. Assessment of natural moisture conditions on the example of the southwestern part of Kyiv region. *Land Reclamation and Water Management*. 2024. №2. Doi:10.31073/mivg202402-395. URL: <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/395/297>.
8. Волощук М. Деградація ґрунтів – глобальна екологічна проблема. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2017. Вип. 51. С. 63–70. URL:

<https://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/article/viewFile/8738/8705>.

9. Pittelkow C.M., Liang X., Linquist B.A. et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*. 2015. Vol. 517. P. 365–368. Doi:10.1038/nature13809. URL: <https://www.nature.com/articles/nature13809>.

10. Giller K.E., Andersson J.A., Corbeels M. et al. Beyond conservation agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 2015. Vol. 6. Article 870. Doi:10.3389/fpls.2015.00870. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2015.00870/full>.

11. Newton P., Civita N., Frankel-Goldwater L., Bartel K., Johns C. What Is Regenerative Agriculture? A Review of Scholar and Practitioner Definitions Based on Processes and Outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2020. Vol. 4. Article 577723. Doi:10.3389/fsufs.2020.577723. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2020.577723/full>.

12. Schreefel L., Schulte R.P.O., de Boer I.J.M., Pas Schrijver A., van Zanten H.H.E. Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*. 2020. Vol. 26. 100404. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>.

13. Congreves K. Regenerative agriculture—a definition and philosophy. *Npj Sustainable Agriculture*. 2025. Doi: URL: <https://www.nature.com/articles/s44264-025-00097-7>.

14. Jaskulska I., Jaskulski D. Strip-Till One-Pass Technology in Central and Eastern Europe: A MZURI Pro-Til Hybrid Machine Case Study. *Agronomy*. 2020. Vol. 10(7). 925. Doi:10.3390/agronomy10070925. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/7/925>.

15. Lal R. Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2015. Vol. 15, P. 79–86. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.09.002>.

16. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Protocol for the Assessment of Sustainable Soil Management. Rome: FAO, 2020. URL: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/SSM/SSM_Protocol_EN_006.pdf.
17. Bünemann E. K., Bongiorno G., Bai Z. et al. Soil quality – A critical review. *Soil Biology & Biochemistry*. 2018. Vol. 120. P. 105–125. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030. URL: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
18. Dou S., Wang Z., Tong J., Shang Z., Deng A., Song Z., Zhang W. Strip tillage promotes crop yield in comparison with no tillage based on a meta-analysis // *Soil and Tillage Research*. 2024. Vol. 240. 106085. DOI: 10.1016/j.still.2024.106085. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106085>.
19. Ткаченко М., Задубинна Є., Кондратюк І., Цюк О., Тарасенко О. Зміни вмісту гумусу та фізико-хімічних властивостей чорнозему типового залежно від систем обробітку та мінерального удобрення. *Вісник аграрної науки*. 2024. Т. 102, № 1. DOI: 10.31073/agrovisnyk202401-03. URL: https://agrovisnyk.com/index.php/agrovisnyk/article/view/2024_01_03.
20. Примак І. Д., Войтовик М. В., Горновська С. В., Покотило І. А., Федорук Ю. В., Присяжнюк Н. М., Нагорнюк О. М., Панченко О. Б., Ображій С. В. Ефективність різних систем обробітку ґрунту, удобрення в короткоротаційній сівоzmіні та вплив на фітосанітарний стан агроценозів. *Агроекологічний журнал*. 2023. № 2. С. 150–163. DOI: 10.33730/2077-4893.2.2023.283707. URL: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/9442>.
21. Балюк С. А., Кучер А. В., Максименко Н. В. Ґрунтові ресурси України: стан, проблеми і стратегія сталого управління. *Український географічний журнал*. 2021. № 2(114). С. 3–11. DOI: 10.15407/ugz2021.02.003. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ_2021_2_03-11.pdf.
22. Achankeng E., Cornelis W. Conservation tillage effects on European crop yields: A meta-analysis. *Field Crops Research*. 2023. Vol. 298. 108967. DOI: 10.1016/j.fcr.2023.108967. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429023001531>.

23. Iheshiulo E. M.-A., Larney F. J., Bork E. W. et al. Do diversified crop rotations influence soil physical health? A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*. 2023. Vol. 233. 105781. DOI: 10.1016/j.still.2023.105781. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198723002650>.
24. Yan F., Arthur E. Cover crops alter soil physicochemical properties: A global meta-analysis. *Geoderma*. 2025. Vol. 460. 117436. DOI: 10.1016/j.geoderma.2025.117436. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706125004221>.
25. Huang S. S., Islam M. U., Jiang F. H. The effect of deep-tillage depths on crop yield: A global meta-analysis. *Plant Soil and Environment*. 2023. Vol. 69(3). P. 105–117. DOI: 10.17221/373/2022-PSE. URL: <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/pse/2023/03/02.pdf>.
26. da Luz F. B., Panachuki E., Alvarez J. W. R. Et al. Controlled traffic farming maintains soil physical functionality in sugarcane fields . *Geoderma*. 2023. Vol. 432. 116427. DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116427. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706123001814>
27. Antille D. L., Peets S., Galambošová J. et al. Review: Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agronomy Research*. 2019. Vol. 17(3). P. 653–682. DOI: 10.15159/AR.19.133. URL: <https://hau.repository.guildhe.ac.uk/17412/1/Sven%20Peets%20Soil%20compaction%20publishers.pdf>.
28. Томашівський З. М., Коник Г. С. Наукові основи системи землеробства в західному регіоні України: монографія / за наук. Ред. Томашівського З. М. Львів: СПОЛОМ, 2020. 286 с.
29. Примак І. Д., Єщенко В. О., Манько Ю. П., Трегуб М. І., Примак О. І. Ресурсозберігаючі технології механічного обробітку ґрунту в сучасному землеробстві України: навч. Посіб. / за ред. І. Д. Примака. Київ: КВІЦ, 2007. 272 с.
30. Basset C., Abou Najm M., Ghezzehei T., Hao X., Daccache A. How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review. *Soil and*

Tillage Research. 2023. Vol. 226. 105577. DOI: 10.1016/j.still.2022.105577. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105577>.

31. Obour P. B., Ugarte C. M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 211. 105019. DOI: 10.1016/j.still.2021.105019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019>.

32. Blanco-Canqui H., Wortmann C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. *Soil and Tillage Research*. 2020. Vol. 198. 104534. DOI: 10.1016/j.still.2019.104534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104534>.

33. Peixoto D. S., Silva L. D. C. M., Melo L. B. B. et al. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 745. 140887. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140887>.

34. Šarauskis E., Sokas S., Rukaitė J. Variable Depth Tillage: Importance, Applicability, and Impact—An Overview. *AgriEngineering*. 2024. Vol. 6(2). P. 1870–1885. DOI: 10.3390/agriengineering6020109. URL: <https://www.mdpi.com/2624-7402/6/2/109>.

35. Huang S. S., Islam M. U., Jiang F. H. The effect of deep-tillage depths on crop yield: A global meta-analysis. *Plant, Soil and Environment*. 2023. Vol. 69(3). P. 105–117. DOI: 10.17221/373/2022-PSE. URL: <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/pse/2023/03/02.pdf>.

36. Tsyliuryk O. I., Tkach Y. I., Kolesnykova K. V. Et al. Modern trends and development directions of soil tillage systems in the world and Ukraine. *Agrology*. 2025. Vol. 8(1). P. 48–54. DOI: 10.32819/202507. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/12078/1/173-Article%20Text-483-1-10-20250328.pdf>.

37. Косолап М. П. Та ін. Системи зберігаючого землеробства: *No-till і Strip-till* : навч. Посібник. Київ : НУБіП України, 2023. 379 с. URL:

https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u427/sistemi_zemlerobstva_no-till_strip-till_1.pdf.

38. Танчик С. П., Цюк О. А., Центилю Л. В. Наукові основи систем землеробства : монографія. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2015. 314 с.

39. Примак І. Д., Цюк О. А., Мартинюк І. В. Та ін. Еволюція систем землеробства в Україні : монографія. Вінниця : ТОВ «ТВОРИ», 2022. 524 с.

40. Li Y., Li Z., Cui S., Jagadamma S., Zhang Q. Residue retention and minimum tillage improve physical environment of the soil in croplands: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 194. 104292. DOI: 10.1016/j.still.2019.06.009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.009>.

41. Blanco-Canqui H., Ruis S. J. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*. 2018. Vol. 326. P. 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>.

42. Wang J., Zhang S., Sainju U. M., Ghimire R., Zhao F. A meta-analysis on cover crop impact on soil water storage, succeeding crop yield, and water-use efficiency. *Agricultural Water Management*. 2021. Vol. 256. 107085. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107085>.

43. Garba I. I. et al. Cover crop legacy impacts on soil water and nitrogen dynamics, and on subsequent crop yields in drylands: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*. 2022. Vol. 42. Article 18. DOI: 10.1007/s13593-022-00760-0. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-022-00760-0>.

44. Kaye J. P., Quemada M. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2017. Vol. 37. Article 4. DOI: 10.1007/s13593-016-0410-x. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-016-0410-x>.

45. Souza J. L. B., Antonangelo J. A., Zhang H., Reed V., Finch B., Arnall B. Impact of long-term fertilization in no-till on the stratification of soil acidity and related parameters. *Soil and Tillage Research*. 2023. Vol. 228. 105624. DOI: 10.1016/j.still.2022.105624. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105624>.

46. Smith D. R., Huang C., Haney R. L. Phosphorus fertilization, soil stratification, and potential water quality impacts. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2017. Vol. 72(5). P. 417–424. DOI: 10.2489/jswc.72.5.417. URL: <https://doi.org/10.2489/jswc.72.5.417>.
47. Obour P. B., Ugarte C. M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 211. 105019. DOI: 10.1016/j.still.2021.105019. DOI: [10.1016/j.still.2021.105019](https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019).
48. Ryan M. R. et al. Rolled-crimped cover crops for organic no-till planted winter wheat (*Triticum aestivum*) in the Northeast region of the United States. *Agrosystems, Geosciences & Environment*. 2024. DOI: 10.1002/agg2.70015. <https://doi.org/10.1002/agg2.70015>.
49. Sondag D. A. et al. Priming the decomposition of cover crop residues in no-till organic cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2025. DOI: [10.1016/j.agee.2025.109651](https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109651).
50. Willmott R. et al. Potential of Cover Crop Use and Termination with a Roller-Crimper in a Strip-Till Silage Maize (*Zea mays* L.) Production System in the Central Valley of California. *Agronomy*. 2025. Vol. 15(1). 132. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/1/132>.
51. Hamza M. A., Anderson W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*. 2005. Vol. 82. P. 121–145. DOI: 10.1016/j.still.2004.08.009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.
52. Keller T., Sandin M., Colombi T., Horn R., Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 194. 104293. DOI: 10.1016/j.still.2019.104293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>.
53. Keller T., Colombi T., Ruiz S. et al. Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. *Soil*

Science Society of America Journal. 2021. Vol. 85(4). P. 1002–1020. DOI: 10.1002/saj2.20240. URL: <https://doi.org/10.1002/saj2.20240>.

54. Schjønning P., Lamandé M., Keller T., Pedersen J., Stettler M. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use and Management*. 2012. Vol. 28(3). P. 378–393. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2012.00411.x. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00411.x>.

55. Obour P. B., Ugarte C. M. Traffic-induced compaction increases soil penetration resistance and decreases crop yield: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 211. 105019. DOI: 10.1016/j.still.2021.105019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019>.

56. Tullberg J. N., Yule D. F., McGarry D. Controlled traffic farming—From research to adoption in Australia. *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 97(2). P. 272–281. DOI: 10.1016/j.still.2007.09.007. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.09.007>.

57. Chamen W. C. T., Moxey A. P., Towers W., Balana B., Hallett P. D. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*. 2015. Vol. 146 (Part A). P. 10–25. DOI: 10.1016/j.still.2014.09.011. doi : <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.011>.

58. Nawaz M. F., Bourrié G., Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2013. Vol. 33. P. 291–309. DOI: 10.1007/s13593-011-0071-8. Doi : <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>.

59. Ребров Б. С. Підвищення ефективності колісної ходової системи трактора типу 4К4 шляхом регулювання тиску повітря в шинах : дис. ... канд. Техн. Наук : 05.05.11. Харків, 2021. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/93417>.

60. Nkebiwe P. M., Weinmann M., Bar-Tal A., Müller T. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. *Field Crops Research*. 2016. Vol. 196. P. 389–401. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.07.018. doi : <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.018>.

61. Freiling I., Dittmar T., Rolli E., Pätzelt M. Phosphorus placement is a key to improve yield of field crops: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 216. 105257. DOI: 10.1016/j.still.2021.105257. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105257>.
62. Daryanto, S., Wang, L. and Jacinthe, P.A. (2017), Meta-Analysis of Phosphorus Loss from No-Till Soils. *J. Environ. Qual.* 46. P.1028–1037. Doi : <https://doi.org/10.2134/jeq2017.03.0121>.
63. Uusitalo R., Lemola R., Sustár V., Kurkilahti M., Käseva J., Turtola E. Strategic tillage of no-till decreased surface and subsurface losses of dissolved phosphorus. *Journal of Environmental Quality*. 2024. Vol. 53. P. 657–668. Doi : <https://doi.org/10.1002/jeq2.20612>.
64. Souza J. L. B. et al. Impact of long-term fertilization in no-till on the stratification of soil acidity and related parameters. *Soil and Tillage Research*. 2023. Vol. 229. 105684. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105624>.
65. Pellissier M. A., Swanepoel P. A., Hardie A. G., Drayton M. C., Kopittke P. M. Strategies to alleviate pH stratification and subsurface acidity under no-tillage. *Agronomy Journal*. 2024. Vol. 116(2). P. 777–789. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.21531>.
66. Huang H. et al. Influence of the Depth of Nitrogen-Phosphorus Fertilizer Placement in Soil on Maize Yielding and Carbon Footprint in the Loess Plateau of China. *Agronomy*. 2024. Vol. 14(4). 805. DOI: 10.3390/agronomy14040805. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/4/805>.
67. Mühlbachová G., Růžek P., Kusá H., Vavera R., Káš M. Nutrient Distribution in the Soil Profile Under Different Tillage Practices During a Long-Term Field Trial. *Agronomy*. 2024. Vol. 14(12). 3017. DOI: 10.3390/agronomy14123017. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14123017>.
68. van der Bom F. et al. Phosphorus management is key to developing sustainable root-ideotypes for improved phosphorus-acquisition. *Plant and Soil*. 2023. DOI: 10.1007/s11104-023-06020-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06020-8>.

69. Roberts T. L., Johnston A. E. Phosphorus use efficiency and management in agriculture. *Resources, Conservation and Recycling*. 2015. Vol. 105(Pt B). P. 275–281. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.09.013. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.013>.
70. Thirze D.G. Hermans, Andrew J. Dougill, Stephen Whitfield, Caroline L. Peacock, Samuel Eze, Christian Thierfelder, Combining local knowledge and soil science for integrated soil health assessments in conservation agriculture systems. *Journal of Environmental Management*. Vol. 286. 2021.P.112192. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112192>.
71. Ros G. H., Verweij S. E., Janssen S. J. C., De Haan J., Fujita Y. An Open Soil Health Assessment Framework Facilitating Sustainable Soil Management. *Environmental Science & Technology*. 2022. Vol. 56(23). P. 17375–17384. DOI: 10.1021/acs.est.2c04516. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36399796/>.
72. Matthew J. Gardner, Jason R. Condon, Brian S. Dear, Mark K. Conyers, Matthew T. Newell, Richard C. Hayes, Guangdi D. Li, Nitrogen 56 ineralization rates from chicory-based pastures. *European Journal of Agronomy*. Vol. 155.2024.P.127116. doi : <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127116>.
73. Barış B. T., Marselis S. M., Ros G. H., van Doorn A., Erisman J. W. Towards sustainable agriculture: A blueprint for European KPI-based farm-level assessment. *Ecological Indicators*. 2025. Vol. 175. 113560. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113560>.
74. Schiebelbein B. E., Souza V. S., Cherubin M. R. Soil health and management assessment kit (SOHMA KIT®): Development and validation for on-farm applications. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2025. Vol. 27. 100802. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100802>.
75. Campbell G., Robinson D. A., Smith P. та ии. Indicator selection framework with protocol for AI4SoilHealth (Deliverable D3.1, Version 1.1, 16 April 2024). AI4SoilHealth. URL: <https://ai4soilhealth.eu/wp->

[content/uploads/2025/09/D3.1.-Indicator-selection-framework-with-protocol-for-AI4SoilHealth.pdf](#).

76. Soil Health and Organic Matter: Resource Concerns and Soil Health Indicators. USDA Natural Resources Conservation Service. URL: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-06/Res%20Cons%26Soil%20Health%20Indicators%202.3.pdf>.

77. Lardy J. M., Mbagwu J. S. C. та ін. Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance in long-term no-till and conventional tillage systems. *Agricultural & Environmental Letters*. 2022. DOI: [10.1002/ael2.20096](https://doi.org/10.1002/ael2.20096).

78. Valentine T. A., Hallett P. D., Binnie K., Young M. W., Squire G. R., Hawes C., Bengough A. G. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. *Annals of Botany*. 2012. Vol. 110(2). P. 259–270. DOI: [10.1093/aob/mcs118](https://doi.org/10.1093/aob/mcs118). URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3394656/>.

ДЛЯ НОТАТОК

ДЛЯ НОТАТОК

Наукове видання

ТКАЧЕНКО Микола Адамович
БУЛГАКОВ Володимир Михайлович
ПТАШНИК Михайло Михайлович
РЕМЕНЮК Юрій Олександрович
КРАСЮК Людмила Михайлівна
ЗАЯЦЬ Павло Степанович
ДИКУН Олексій Васильович

**СТРАТЕГІЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ СИСТЕМ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ
ЗА ВІДНОВЛЮВАНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА ЛІСОСТЕПУ**

Підписано до друку 06.10.2025.
Формат 60х84/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Друк. арк. 3,75.
Умов. друк. арк. 3,5. Обл.-вид. арк. 2,6.
Наклад 100 прим. Зам. № 1293/1.

Видавець та виготовлювач ТОВ «ТВОРИ».
Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 6188 від 18.05.2018 р.
21034, м. Вінниця, вул. Немирівське шосе, 62а.
Тел.: 0 (800) 33-00-90, (096) 97-30-934, (093) 89-13-852.
e-mail: info@tvoru.com.ua
<http://www.tvoru.com.ua>