

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри

Михайло ШУЛЯК

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження факторів, що впливають на показники якості внесення мінеральних добрив в системах точного землеробства»

Виконав:

(підпис)

Олексій КОЛІСНИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

СТЗ 2401-2м

Науковий керівник:

(підпис)

Анатолій ЛЕБЕДЄВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Михайло ШУЛЯК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Колісник Олексій Павлович

Дослідження факторів, що впливають на показники якості внесення мінеральних добрив в системах точного землеробства.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра за освітньою програмою «Системи точного землеробства» зі спеціальності 208 «Агроінженерія». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 52 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 4 таблиці, 9 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Об'єктом дослідження є технологічний процес внесення гранульованого фосфату посівною машиною обладнаною датчиком VIS–NIR для вимірювання рівня вмісту фосфору P у ґрунті.

Метою роботи є оцінка оперативної системи внесення добрив зі змінними нормами (VR) при внесенні фосфату (P₂O₅) під час посіву кукурудзи за допомогою датчика VIS–NIR для вимірювання рівня вмісту фосфору P у ґрунті під час руху по полю.

В роботі проведено огляд літературних джерел по темі досліджень, проведений аналіз досліджень факторів, що впливають на якість внесення добрив, виконані власні дослідження по визначенню показників роботи посівного агрегату при висіві насіння кукурудзи та добрив за різними підходами.

Було здійснено аналіз технології внесення фосфору (P) зі змінною дозою (VR), що використовує видимий (VIS) і ближній інфрачервоний (NIR) спектри в роботі ґрунтового сенсора. Комплекс обладнання для диференційованого внесення добрив забезпечував коригування кількості поданого фосфату приблизно кожні 3 м² у процесі руху агрегату по полю. Просторова

неоднорідність ґрунту на ділянці контролювалася за результатами близько 2500 вимірювань, отриманих із одного гектара за допомогою датчика, що здійснює відбір і аналіз даних у режимі реального часу.

Значення коефіцієнта варіації (CV) показника Р-ехт, визначеного безпосередньо на ходу, змінювались у діапазоні від 5% до 51%, тоді як просторові відмінності у вмісті фосфору на дослідних ділянках досягали 36–76%. Середньозважена норма фосфатів на варіантах зі змінною дозою становила 28,75 кг/га, що приблизно на 1,25 кг/га менше порівняно з ділянками, де застосовувалась рівномірна схема внесення (30 кг/га).

Ключові слова: мінеральні добрива, якість внесення, норма внесення, фосфорні добрива, технологія змінних норм.

ABSTRACT

Kolisnyk Oleksiy Pavlovych

Study of factors influencing the quality indicators of mineral fertilizer application in precision farming systems.

Qualification work for obtaining a master's degree in the educational program "Precision farming systems" in specialty 208 "Agroengineering". Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The final qualification work is presented on 52 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 4 tables, 9 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

The object of the study is the technological process of applying granular phosphate by a seeding machine equipped with a VIS-NIR sensor for measuring the level of phosphorus P in the soil.

The aim of the work is to evaluate the operational system of variable rate (VR) fertilizer application when applying phosphate (P₂O₅) during corn sowing using a VIS–NIR sensor to measure the level of phosphorus P in the soil while moving across the field.

The work includes a review of literature on the topic of research, an analysis of studies of factors affecting the quality of fertilizer application, and own research on determining the performance indicators of the sowing unit when sowing corn seeds and fertilizers using different approaches.

The technology of phosphorus (P) application with a variable dose (VR) was analyzed, which uses visible (VIS) and near infrared (NIR) spectra in the operation of the soil sensor. The complex of equipment for differentiated fertilizer application provided adjustment of the amount of applied phosphate approximately every 3 m² during the movement of the unit across the field. The spatial heterogeneity of the soil on the site was monitored based on the results of about 2500 measurements obtained from one hectare using a sensor that performs real-time data sampling and analysis.

The coefficient of variation (CV) values of the P-ext indicator, determined directly on the go, varied in the range from 5% to 51%, while spatial differences in phosphorus content on the experimental sites reached 36–76%. The weighted average rate of phosphates on the variants with a variable dose was 28.75 kg/ha, which is approximately 1.25 kg/ha less compared to the sites where a uniform application scheme was used (30 kg/ha).

Keywords: mineral fertilizers, application quality, application rate, phosphorus fertilizers, variable rate technology.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ. 1 Стан питання і задачі досліджень.....	11
1.1 Агронімічні аспекти мінерального живлення рослин	11
1.2 Роль точного землеробства в управлінні мінеральним живленням..	17
1.3 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм.....	20
Розділ 2. Методика експериментальних досліджень.....	27
2.1. Спектрофотометр і сенсор ґрунту на ходу.....	27
2.2 Створення рекомендації щодо фосфорних добрив.....	28
2.3 Опис сенсорного аплікатора для внесення добрив.....	30
2.4 Експериментальні поля та експериментальні випробування.....	31
2.5 Обробка даних під час роботи агрегату.....	32
2.6 Розробка карти для P-ext і фосфату ґрунту.....	36
2.7 Визначення урожайності кукурудзи.....	38
Розділ 3. Результати досліджень та їх аналіз	39
3.1 Ділянка для відбору проб	39
3.2 Варіації фосфору та фосфатів у ґрунті.....	39
3.3 Витрата добрив.....	41
3.4 Показники росту рослин.....	43
Висновки.....	48
Список використаних джерел.....	50

ВСТУП

1. Актуальність теми

Раціональне використання мінеральних добрив є одним із ключових чинників забезпечення стабільної урожайності та підвищення ефективності сучасного рослинництва. В умовах зростання вартості добрив, обмеженості ресурсів та необхідності мінімізації негативного впливу на довкілля, дедалі більшого значення набувають технології точного землеробства, зокрема системи диференційованого внесення добрив. Одним із критично важливих елементів цих технологій є забезпечення високої точності дозування мінеральних добрив та адаптація норми внесення відповідно до просторової неоднорідності ґрунту.

Особливої актуальності набувають дослідження, пов'язані з використанням сучасних сенсорів оперативної дії, які дозволяють отримувати дані про вміст поживних елементів у ґрунті під час руху техніки. Технологія застосування VIS–NIR спектрометрії відкриває можливості для точного контролю рівня доступного фосфору та визначення оптимальних норм внесення фосфатів у режимі реального часу. Враховуючи високу варіабельність показників родючості навіть у межах одного поля, дослідження ефективності таких систем набуває важливого наукового та практичного значення.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Наукові дослідження останніх років демонструють значний прогрес у розвитку систем змінних норм внесення добрив, які ґрунтуються на картографуванні ґрунтів, результатах агрохімічних аналізів, дистанційному зондуванні та застосуванні сенсорів на ходу. В роботах зарубіжних і вітчизняних учених висвітлено питання формування карт-завдань, технічних аспектів роботи розподільних систем, точності дозування та впливу різних факторів на якість внесення мінеральних добрив.

Попри значну кількість наукових публікацій, низка питань залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, актуальною є оцінка впливу просторових змін у вмісті фосфору на ефективність роботи систем VR, визначення коефіцієнтів варіації та стабільності зворотного зв'язку між сенсором і дозувальним механізмом, а також аналіз точності внесення фосфатів у різних умовах поля. Також потребують уточнення аспекти практичної реалізації систем VIS–NIR під час посіву, їх здатності забезпечувати оптимальне дозування на фоні високої неоднорідності ґрунтового середовища.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є оцінка оперативної системи внесення добрив зі змінними нормами (VR) під час посіву кукурудзи, яка використовує датчик VIS–NIR для визначення просторових змін у вмісті фосфору (P) у ґрунті в режимі реального часу.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є технологічний процес внесення гранульованого фосфату під час посіву за використання посівної машини, обладнаної VIS–NIR сенсором для оперативного вимірювання рівня фосфору в ґрунті.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є показники якості внесення мінеральних добрив за технологією змінних норм, а також фактори, що впливають на точність і стабільність роботи сенсорної системи під час руху агрегату по полю.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні наукові підходи до застосування мінеральних добрив і принципи технології диференційованого внесення.
2. Дослідити технічні особливості роботи сенсорів VIS–NIR та дозувальних систем VR під час внесення фосфатів.
3. Провести експериментальні дослідження з вимірювання просторової варіабельності фосфору у ґрунті та норми внесення добрив.

4. Оцінити ефективність технології змінних норм внесення фосфатів порівняно з традиційним рівномірним підходом.

7. Методи дослідження

У роботі використано методи спектрометричного аналізу VIS–NIR, польові експериментальні дослідження, статистичні та аналітичні методи опрацювання даних, методи просторового аналізу та картографування, а також методи порівняльної оцінки ефективності агротехнологічних рішень.

8. Структура та обсяг роботи

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 52 сторінки машинописного тексту, 4 таблиці, 9 рисунків та 25 джерел. У додатках наведено допоміжні матеріали, необхідні для повноти дослідження.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Агротехнічні вимоги до внесення мінеральних добрив

Мінеральні добрива слугують одним із ключових елементів сучасного землеробства, оскільки забезпечують рослини необхідними елементами живлення, сприяючи підвищенню врожайності й підтриманню належного стану ґрунтового середовища. Водночас їх використання потребує чіткого дотримання технологічних рекомендацій, які включають правильний вибір виду добрив, оптимальні строки внесення, способи розподілу та точні дози з урахуванням агрохімічних властивостей ґрунту і біологічних особливостей культур. У даній роботі викладено техніко-агрономічні аспекти ефективного застосування мінеральних добрив, акцентуючи увагу на підвищенні результативності виробництва, мінімізації негативного впливу на довкілля та підтриманні стабільної родючості орних земель.

Мінеральні добрива містять комплекс поживних елементів, без яких неможливий повноцінний розвиток рослин. До основних належать азот (N), фосфор (P) і калій (K), що відповідають за формування вегетативної маси, розвиток кореневої системи, закладання генеративних органів та регуляцію водного режиму. Крім того, вони містять і другорядні поживні речовини, такі як кальцій (Ca), магній (Mg) і сірка (S), котрі забезпечують низку важливих фізіолого-біохімічних процесів. Завдяки цьому добрива компенсують нестачу елементів у ґрунті, гарантують стабільність урожаю та високу якість продукції. В умовах постійного зростання потреб у харчових ресурсах, викликаних збільшенням населення планети, застосування мінеральних добрив стало необхідним компонентом інтенсивних агросистем. Водночас нехтування агротехнічно обґрунтованими нормами внесення здатне спричинити порушення балансу поживних речовин, деградацію екосистем, забруднення вод і ґрунтів, а також зниження кінцевої продуктивності посівів, що підкреслює необхідність відповідального їх використання.

Поживні елементи, що містяться в добривах, надходять до культур у формах, які легко засвоюються рослинами. Азот впливає на формування листової маси й активізує процес фотосинтезу через підсилення синтезу хлорофілу. Фосфор є визначальним чинником у забезпеченні енергетичного обміну, розвитку кореневої системи, утворенні квіток і насіння. Калій регулює водний баланс, підвищує імунітет рослин до хвороб та сприяє кращому засвоєнню інших елементів. Гармонійне поєднання цих поживних речовин у системі удобрення створює оптимальні умови для розвитку культур, збільшує урожай і поліпшує його якість.

Технології точного землеробства зробили процес внесення добрив ще більш раціональним та ефективним. Використання таких засобів, як аналіз ґрунтових властивостей, аерокосмічне та супутникове спостереження, а також техніка з GPS-навігацією, дає можливість аграріям подавати поживні речовини у чітко визначені місця та в слушний момент. Такий локалізований спосіб внесення сприяє кращому засвоєнню елементів живлення рослинами, зменшує їх непотрібні втрати та забезпечує вищу економічну віддачу від використаних ресурсів.

Хімічні добрива відіграють суттєву роль у розвитку світового господарства. Завдяки їм виробники отримують значно більші обсяги продукції на тій самій площі, знижуючи тиск на природні території та запобігаючи розширенню орних земель. Зростання врожайності забезпечує підсилення фінансової стабільності в аграрному секторі, зниження вартості продуктів харчування для населення та загалом зміцнює економічне благополуччя, допомагаючи боротися з голодом і злиденністю в усьому світі.

Крім того, вироблення та логістика добрив формує значний ринок праці, сприяючи розвитку видобувних підприємств, хімічної промисловості, транспортної інфраструктури та суміжних сфер діяльності. Державні програми, спрямовані на субсидування придбання добрив, часто реалізуються з метою підвищення їх доступності, особливо там, де існують складнощі із забезпеченням населення продовольством.

Однак попри численні переваги нераціональне використання мінеральних добрив може спричинити суттєві екологічні ризики. Надмірне вимивання азотних і фосфорних сполук у річки та озера викликає процеси евтрофікації, що проявляється масовим розростанням водоростей, дефіцитом кисню у воді та зменшенням різноманіття водних організмів. Азотовмісні добрива також є джерелом викидів закису азоту — одного з найбільш активних парникових газів, який посилює вплив глобального потепління.

Довготривале переважне застосування мінеральних форм поживних речовин без підтримання органічної складової ґрунту сприяє його виснаженню: підвищується кислотність, зменшується кількість корисних мікроорганізмів і погіршується баланс елементів живлення. Для запобігання таким наслідкам необхідний збалансований підхід, що включає впровадження екологічних практик, серед яких — правильні сівозміни, вирощування покривних культур, внесення органічних добрив та інших біологічних препаратів.

Подальший розвиток мінеральних добрив ґрунтується на інноваціях та екологічній стійкості. Сучасні високоефективні формуляції, зокрема добрива зі сповільненим або контрольованим вивільненням та стабілізовані композиції, орієнтовані на зменшення втрат поживних речовин і мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище. Такі продукти забезпечують надходження азоту, фосфору та інших елементів згідно з біологічними потребами культур, істотно знижуючи небажане вимивання чи газоподібні втрати.

Біотехнологічні інновації відкривають перспективи зниження залежності аграрного виробництва від мінеральних добрив. Модифіковані на генетичному рівні рослини з удосконаленим поглинанням поживних елементів здатні забезпечувати значні врожаї за умови меншого внесення добрив. Паралельно, розвиток мікробних препаратів — зокрема бактерій, що здатні фіксувати азот із атмосфери, а також грибів, які підвищують

доступність фосфору, — формує екологічні варіанти заміни класичним агрохімікатам.

Державне регулювання та міжнародна взаємодія є ключовими інструментами сприяння раціональному застосуванню добрив. Ініціативи, що стимулюють упровадження сучасних технологій господарювання, фінансують наукові розробки та підвищують компетентність аграріїв щодо природозберігаючих підходів, допомагають зменшити шкоду для довкілля й одночасно підтримати високу врожайність.

Мінеральні добрива мали суттєвий вплив на модернізацію агросфери, зміцнення глобальної продовольчої безпеки та підвищення економічної ефективності виробництва. Проте негативні наслідки їх надмірного використання вимагають переходу до стійкіших агротехнологій. Поєднання наукового прогресу, активної участі держави та комплексного управління живленням рослин забезпечить можливість зберегти позитивні властивості добрив, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу й турбуючись про благополуччя наступних поколінь.

Перш ніж вносити добрива, необхідно провести глибоку діагностику ґрунту, щоб визначити забезпеченість елементами живлення, кислотність, вміст органічних компонентів і структуру ґрунтового профілю. Аналіз ґрунту дозволяє виявити нестачу або надлишок окремих речовин, що дає змогу точно визначити необхідний склад і дозування добрив. Оптимально виконувати такі дослідження до початку сівби, забезпечуючи ефективне планування живлення рослин відповідно до реального стану ґрунту й потреб культури. Постійне спостереження за змінами показників ґрунту сприяє вдосконаленню системи удобрення, підтриманню довготривалої родючості та стабільної сільськогосподарської продуктивності.

Коректний підбір виду добрив є надзвичайно важливим і ґрунтується на біологічних вимогах конкретної культури, фізико-хімічних параметрах ґрунтів і локальних особливостях природного середовища. Азотні добрива (як-от аміачна селітра чи сечовина) інтенсивно стимулюють нарощування

зеленої маси, тоді як фосфорні (наприклад, суперфосфат) сприяють укоріненню й енергетичним процесам у рослині. Джерела калію (таких як калій хлористий) покращують регуляцію водного балансу рослин і підвищують їхню стійкість до хвороб. Комплексні добрива, що містять одразу N, P і K, широко використовують для оптимального живлення та зручності внесення. Якщо результати аналізу ґрунту сигналізують про нестачу важливих мікроелементів, застосовують також мікродобрива — наприклад, сполуки бору або цинку.

Своєчасне забезпечення рослин добривами дає змогу підвищити засвоєння поживних компонентів культурами та суттєво скоротити небажані втрати. Зазвичай подача поживних елементів організовується з урахуванням ключових фаз розвитку: перед висівом або садінням, безпосередньо під час висаджування, а також у подальші етапи росту. Наприклад, джерела азоту часто застосовують частинами впродовж усього періоду вегетації, щоб забезпечити відповідність між доступністю елементу та потребами рослин. На відміну від нього, фосфорні й калійні сполуки найчастіше вносять як основне живлення, оскільки вони дуже повільно переміщуються у ґрунтовому середовищі. Синхронізація строків внесення поживних речовин із фазами розвитку посівів мінімізує вимивання та втрати через газообмін, підвищуючи ефективність використання добрив і знижуючи екологічне навантаження.

Методи подачі добрив також визначають їх доступність кореневій системі та ймовірність небажаних втрат. Розподіл добрив по поверхні поля (суцільне розкидання) забезпечує рівномірне покриття великих площ і часто застосовується для основних елементів живлення. Водночас загортання у ґрунт під час механічного обробітку дає змогу розмістити поживні речовини глибше, що підвищує їх доступність для культур із розвинутою кореневою системою та обмежує втрати від випаровування. Локальне внесення біля рядків або коренів рослин, так зване підживлення, є особливо дієвим під час роботи з азотними добривами на просапних культурах. Позакореневе живлення листовими препаратами дозволяє доставляти мікроелементи прямо

до рослини та швидко усувати ознаки виснаження, однак цей прийом не підходить для всіх груп поживних речовин через обмеження у засвоєнні.

Коректний вибір дози має критичне значення, оскільки неправильні норми здатні призвести до пошкодження посівів, втрати цінних елементів та виникнення негативних екологічних наслідків. Розрахунок необхідної кількості залежить від виду вирощуваної культури, агрохімічного стану ґрунту, кліматичних умов і бажаної врожайності. Надлишок добрив може спричинити надмірне накопичення поживних речовин у ґрунті, що погіршує його властивості та може забруднювати водні ресурси. У той час як нестача добрив уповільнює ріст рослин і знижує урожайність через дефіцит необхідних елементів. Тому точний підбір дозування на основі результатів агрохімічного аналізу ґрунту та характеристик культури є обов'язковою умовою раціонального використання добрив.

Мінеральні добрива здатні створювати екологічні ризики: вимивання або поверхневий стік поживних речовин до річок і озер сприяє евтрофікації водних екосистем і забрудненню підземних вод. Зменшення втрат та підвищення ефективності використання поживних речовин є ключовими завданнями сучасного землеробства щодо захисту довкілля. До найважливіших заходів належать: застосування препаратів пролонгованої дії, створення захисних буферних смуг у прибережних зонах, впровадження технологій точного землеробства та автоматизованого контролю. Крім того, правильні умови транспортування й зберігання добрив, а також дотримання техніки безпеки допомагають уникнути небезпечних розливів та небажаного потрапляння хімічних речовин у навколишнє середовище.

Технологічні рішення у сфері точного землеробства, зокрема використання обладнання, оснащеного GPS-навігацією, електронного картографування характеристик ґрунтів і сучасних сенсорних систем, суттєво трансформували підходи до управління процесами внесення добрив. Завдяки таким інноваціям аграрії отримують можливість цілеспрямовано діяти на окремих ділянках поля, встановлюючи норми внесення поживних речовин

залежно від просторової мінливості ґрунтових показників і біологічних особливостей вирощуваних культур. Технологія змінної норми внесення (VRT), а також дистанційне зондування з повітря чи супутника сприяють раціональному використанню добрив, що в кінцевому результаті забезпечує підвищення потенційної врожайності та одночасно знижує негативний вплив на екосистеми. Застосування таких інтелектуальних рішень надає можливість господарствам максимально точно узгоджувати практики живлення рослин з агровимогами, створюючи основу для екологічно відповідального та стабільного розвитку агросектору.

Дотримання науково обґрунтованих агротехнічних правил щодо використання мінеральних добрив відіграє ключову роль у збереженні балансу між високою продуктивністю полів і підтриманням природного здоров'я довкілля. Розумне внесення поживних речовин передбачає глибоке дослідження ґрунтових умов, правильний підбір складу добрив відповідно до потреб культур, визначення оптимальних строків застосування, вибір найбільш ефективного способу внесення та точне регулювання доз. Подальший розвиток систем удобрення базується на впровадженні передових цифрових інструментів та інноваційних підходів, що ще краще оптимізують управління поживними елементами, забезпечуючи більш стале та витривале до змін клімату сільськогосподарське виробництво.

1.2 Роль точного землеробства в управлінні мінеральним живленням

Точне землеробство (РА) докорінно змінило сучасне агровиробництво, оскільки передові цифрові технології було поєднано з традиційними практиками для максимального підвищення урожайності сільськогосподарських культур і раціонального застосування матеріальних ресурсів. Особливо суттєві досягнення відбулися в управлінні добривами — однієї з ключових складових екологічно відповідального землеробства. Завдяки інноваційним методам РА фермери отримали можливість значно

підвищити ефективність використання добрив, одночасно зменшуючи шкоду для екосистем і збільшуючи економічний результат аграрного виробництва. У даній роботі детально розглядається внесок технологій точного господарювання в оптимізацію процесів удобрення, скорочення негативного впливу на довкілля та покращення фінансових показників ферми.

Основний концепт РА у сфері регулювання живлення рослин полягає в забезпеченні індивідуального підходу до кожної частини поля, тобто внесення поживних речовин відповідно до реальних потреб різних зон ґрунту. Використання навігації GPS, систем GIS, ґрунтових сенсорів і супутникових або аерофотознімків дає змогу отримувати високоточну інформацію про властивості ґрунту, наявну вологу, стан рослинного покриву та неоднорідність поля. Завдяки такому комплексу даних аграрії можуть обґрунтовано встановлювати норми внесення добрив для кожної ділянки. Особливу роль відіграє технологія змінної норми (VRT), яка забезпечує цілеспрямоване внесення поживних елементів на основі оперативної діагностики або накопичених даних, підвищуючи точність живлення культур у відповідний період їх розвитку.

Одним із найвагоміших результатів застосування точного землеробства для управління добривами є суттєве скорочення непродуктивних втрат ресурсів. Традиційні технології рівномірного внесення поживних речовин часто спричиняють надмірне удобрення в одних частинах поля та нестачу елементів — у інших. Це призводить до неефективного використання добрив, зайвих фінансових витрат і погіршення екологічної ситуації через вимивання нітратів, забруднення водою та посилення викидів парникових газів. Навпаки, впровадження продуманих рішень РА дозволяє значно підвищити коефіцієнт використання поживних речовин (NUE), що означає кращу окупність добрив та одночасне досягнення цілей природоохоронної політики й узгодження з вимогами міжнародних норм.

Додатковою важливою перевагою є покращення якості та обсягів врожаю. Завдяки точному підбору доз добрив рослини отримують необхідні

елементи живлення на різних фазах розвитку, що сприяє зміцненню їх імунітету, формуванню потужної кореневої системи, підвищенню стійкості до хвороб і шкідників. Це зрештою забезпечує стабільніше й більше виробництво продукції. Постійний контроль із використанням моніторингових технологій дає можливість своєчасно реагувати на появу дефіциту поживних речовин або на дисбаланс у живленні, не допускаючи погіршення темпів росту та продуктивності культур.

Економічні дослідження свідчать, що застосування технологій точного землеробства забезпечує агровиробникам значну вигоду від вкладених коштів. Хоча стартові витрати на підключення обладнання та цифрових систем можуть здаватися високими, у перспективі фінансові вигоди від скорочення надмірного внесення добрив, зростання обсягів вирощеної продукції та раціональнішого використання ресурсів здебільшого перебивають початкові затрати. Додатковим чинником є те, що державні програми підтримки та різні стимули для поширення екологічно відповідального землеробства сприяють зниженню економічних бар'єрів, дозволяючи невеликим і середнім господарствам легше долучатися до інноваційних агротехнологій.

Попри значний потенціал, інтеграція методів точного внесення добрив у повсякденну агропрактику може супроводжуватися певними труднощами. Суттєва ціна високотехнологічного обладнання разом із потребою в кваліфікованому персоналі створюють помітні перепони, особливо для регіонів із нижчим рівнем розвитку економіки. Окрім цього, різна швидкість адаптації інновацій, а також неоднакова доступність базової інфраструктури в країнах і господарствах різного масштабу впливають на широке впровадження та уніфікацію технологій РА. Для мінімізації цих викликів потрібні координовані зусилля зацікавлених учасників — державних інституцій, наукової спільноти та представників агробізнесу з метою забезпечення доступних технічних рішень, надання освітніх можливостей та розвитку ефективних сервісних систем.

Отже, концепція точного землеробства стає основою модернізації системи управління добривами, забезпечуючи більш ощадливе використання ресурсів, покращення екологічної ситуації та зміцнення економічної стабільності фермерських господарств. На тлі постійного зростання попиту на продовольство у світі впровадження інноваційних технологічних інструментів буде ключовим чинником задоволення цих викликів із мінімальним негативним впливом на природу. Подальша наукова діяльність має приділяти увагу створенню недорогих і простих у використанні систем, щоб зробити точне землеробство доступнішим для широкого кола господарств і повністю розкрити його переваги в умовах різноманітних аграрних ландшафтів.

1.3 Дослідження технологій внесення мінеральних добрив за технологіями змінних норм

Сучасне сільське господарство перебуває під дедалі сильнішим тиском щодо необхідності підвищення продуктивності разом зі скороченням негативного впливу на екосистеми. Одним із найефективніших шляхів досягнення такого поєднання є застосування інноваційних технологій точного землеробства, зокрема систем внесення мінеральних добрив зі змінною нормою (VRT). Ця технологічна концепція забезпечує більш обґрунтоване управління ресурсами на кожній окремій частині поля, встановлюючи різні дози добрив залежно від просторових відмінностей у забезпеченості поживними речовинами, агрофізичних характеристик ґрунту, стану рослин та зовнішніх факторів навколишнього середовища. Такий метод значно підвищує ефективність та екологічну сталість порівняно зі стандартним рівномірним внесенням.

Основою функціонування VRT є можливість збирання, інтерпретації та практичного використання просторових даних з агроландшафту. Інформація може надходити з аналізу ґрунтових зразків, картування врожайності, а також із датчиків дистанційного зондування та сенсорів у режимі реального часу. Після обробки цих даних створюються спеціалізовані карти-завдання, які

регулюють роботу розкидачів або сівалок із адаптивним дозуванням. Завдяки цьому забезпечується оптимізація коефіцієнта використання поживних речовин (NUE), зростання продуктивності культур і зменшення втрат елементів живлення через вимивання чи змивання, що зазвичай негативно відбивається на чистоті водних ресурсів.

Використання VRT відкриває широкі можливості як у виробничому, так і в екологічному аспектах. З агрономічної точки зору, забезпечується цілеспрямоване внесення поживних речовин відповідно до реальних потреб рослин у певний період їх розвитку. Це дає змогу повніше реалізувати генетичний потенціал культури, не допускаючи водночас надлишку добрив, який може спричинити погіршення якості врожаю чи навіть негативні фізіологічні реакції рослин. Коригування дозування дозволяє враховувати неоднорідність властивостей ґрунту, заповнюючи дефіцит елементів живлення саме у проблемних ділянках поля.

З погляду охорони довкілля VRT сприяє зменшенню утворення парникових газів та зниженню шкодочинного ефекту надмірного удобрення. Закис азоту (N_2O), що є потужним чинником глобального потепління, утворюється внаслідок надлишкового внесення азотних добрив. Раціональна точність у їх застосуванні дає можливість суттєво скоротити умови, які сприяють генерації таких викидів. Крім того, контроль за кількістю поживних речовин, що потрапляють у довкілля, допомагає уникнути евтрофікації водойм та погіршення стану водних екосистем.

Фінансовий аспект також має велике значення: застосування VRT здатне зменшити витрати фермерського господарства завдяки оптимізації використання добрив і підвищенню рентабельності виробництва за рахунок збільшених урожаїв та їх якісних показників. Попри необхідність інвестицій у програмне забезпечення й технічне обладнання, у перспективі економічний ефект зазвичай значно перевищує стартові витрати. Рентабельність таких рішень посилюється, якщо аграрії мають доступ до підтримки з боку держави

у вигляді грантів або субсидій для запровадження екологічно дружніх технологій у виробництві.

Хоча технологія змінної норми внесення ресурсів має значний потенціал, її використання супроводжується певними труднощами. Цей підхід вимагає високої кваліфікації фахівців у процесах збору інформації, її оброблення та подальшого пояснення результатів. Сільськогосподарським виробникам потрібно вкладати кошти в професійний розвиток і підвищення компетентності персоналу, щоб реально реалізувати можливості VRT. Також ефективність систем значною мірою визначається точністю просторової інформації та стабільністю обладнання, що експлуатується. На продуктивність технологій впливають і мінливі погодні фактори, а також специфіка польових робіт, що може призводити до коливань у роботі застосованих систем.

Для подолання зазначених бар'єрів наукові дослідження та інженерні розробки продовжують концентруватися на підвищенні якості, точності та більшій доступності інструментів VRT. Використання алгоритмів машинного навчання разом зі штучним інтелектом забезпечує покращення аналізу значних масивів інформації та створення точніших карт для керування агротехнологічними операціями. Окрім того, поєднання змінних норм із сучасними засобами точного землеробства — такими як роботизована техніка й рішення для підтримки управлінських дій — розширює можливості оптимізації живлення рослин та загального контролю за станом територій.

Використання мінеральних добрив за принципом змінної норми є важливим кроком на шляху до екологічно орієнтованого та ефективного сільського господарства. Поєднання агротехнологій із природоохоронними підходами сприяє одночасному досягненню двох стратегічних цілей: зростанню врожайності та зменшенню забруднення довкілля. Надалі безперервне вдосконалення і активне поширення VRT має ключове значення для розвитку аграрного сектору, особливо в умовах світових викликів: зміни клімату, виснаження земельних ресурсів і нині критичного збільшення попиту на продукти харчування.

Процеси внесення гранульованих добрив залишаються визначальним елементом сучасного рослинництва, який напряду впливає на отримувані врожаї та стан ґрунтового середовища. Проте звичні підходи нерідко створюють дисбаланс: використовуються надмірні або недостатні кількості добрив, що погіршує економічну вигідність і може негативно позначатися на екосистемах. Впровадження сенсорних систем контролю у процес розподілу гранул стає інноваційним рішенням, яке забезпечує високу точність, раціональність використання ресурсів та підвищену результативність агротехнологічних операцій.

Традиційне внесення мінерального живлення ґрунту спирається на заздалегідь складені картографічні рекомендації або спеціальні приписні матеріали. Такі дані формують, аналізуючи результати минулих спостережень, лабораторні дослідження землі та прогнози агрономічні моделі. Застосування цих фіксованих норм може бути рівномірним або з певною варіативністю на окремих ділянках поля, забезпечуючи базові підходи до розподілу корисних елементів. Попри те, що така методика підвищила раціональність використання добрив у порівнянні з традиційним суцільним внесенням, вона не здатна оперативно реагувати на зміну стану рослин чи ґрунту в процесі вегетації та не враховує швидку просторову мінливість.

На противагу цьому, сенсорні системи для внесення поживних речовин працюють у динамічному режимі, використовуючи інформацію, що отримується безпосередньо під час польових операцій. Вони фіксують параметри навколишнього середовища та біофізіологічні показники, зокрема фактичну забезпеченість ґрунту елементами живлення, рівень розвитку рослин чи стан поверхні поля. Такі технології можуть включати пристрої оптичного, електрохімічного та ближньоінфрачервоного контролю, розташовані на сільськогосподарському обладнанні або безпілотних апаратах, що забезпечує можливість адаптивного управління нормами внесення.

Однією з ключових переваг систем з датчиками є можливість миттєвого отримання й оброблення інформації з поля, що дозволяє автоматично

змінювати дозування добрив. На відміну від статичних карт, які створюють на основі застарілих даних, сенсорні пристрої оперативно реагують на актуальний стан культур. Це допомагає забезпечити кожен зону поля саме тією кількістю поживних речовин, яка є необхідною в конкретний період росту, сприяючи раціональному використанню ресурсів і підвищенню загальної ефективності технології.

Ще однією суттєвою сильною стороною сенсорних технологій є їх значно детальніша просторово-інформаційна точність порівняно з традиційними рецептами. Якщо звичайні картографічні підходи поділяють угіддя на крупні блоки з однаковими параметрами, то датчики здатні виявити дрібні відмінності в межах цих зон. Такий рівень деталізації забезпечує надточне дозування мінерального живлення відповідно до мікрособливостей ґрунтової родючості та стану рослинного покриву, що позитивно позначається на врожайності.

Технологічні рішення на базі польових сенсорів охоплюють широкий набір обладнання: оптичні, ультразвукові й електрохімічні системи, що передають інформацію для прийняття рішень без затримок. За їх допомогою фіксують такі показники, як поживний стан ґрунту, запас доступної вологи чи індекси здоров'я посівів, що дає змогу впроваджувати точне зональне управління. Наприклад, датчики спектральної рефлексії, встановлені на техніці, визначають інтенсивність росту культур і на основі цього коригують норму внесення на кожній частині поля, оптимізуючи живлення.

Ґрунтові сенсори також відіграють важливу роль, оскільки дають можливість контролювати запаси поживних елементів у верхньому шарі землі та реальний рівень зволоження. Завдяки поєднанню сенсорів із супутниковою навігацією створюють докладні карти характеристик ґрунту, які слугують основою для систем змінних норм розподілу добрив. Такі рішення забезпечують точне регулювання роботи техніки в реальному часі, спрямовуючи ресурси виключно в місця з дефіцитом поживних речовин. Це дозволяє скорочувати витрати на матеріали, а також істотно зменшити ризик

забруднення водних екосистем внаслідок вимивання надлишкових компонентів.

Стрімке зростання технологій Інтернету речей (IoT) суттєво підвищило потенціал сенсорних рішень у сільському господарстві. Сучасні датчики, що працюють у мережі IoT, здатні по бездротових каналах передавати вимірні параметри до централізованих платформ управління, де спеціалізоване програмне забезпечення виконує всебічну обробку отриманої інформації та формує рекомендації для користувачів. Така взаємопов'язаність забезпечує постійне спостереження за станом агросистем і оперативну підтримку прийняття рішень навіть на віддалених територіях. Додатково застосування алгоритмів машинного навчання відкриває можливість прогнозування потреб рослин у поживних елементах, враховуючи як архівні записи, так і поточні метеорологічні фактори.

Серед інноваційних напрямів розвитку особливо виділяються сенсори, інтегровані в безпілотні літальні апарати. Дрони, які оснащують мультиспектральними або гіперспектральними датчиками, дають змогу оперативно обстежувати значні площі угідь і отримувати високу деталізацію даних щодо фітосанітарного стану посівів і фізико-хімічних властивостей ґрунтів. Інформація з повітря доповнює дані наземного моніторингу, створюючи комплексне бачення просторової неоднорідності поля. Отримані БПЛА дані швидко аналізуються, що робить можливим своєчасне реагування та коригування норм внесення гранульованих добрив у процесі польових робіт.

Використання сенсорних інструментів при дозуванні мінеральних добрив у гранульованій формі має широкі переваги. Економічний ефект полягає у скороченні втрат і більш раціональному використанні матеріальних ресурсів, що сприяє підвищенню прибутковості аграрного виробництва. Екологічний аспект полягає в гармонізації технологій внесення з принципами сталого землеробства: система зменшує ризики забруднення водних об'єктів, скорочує викиди парникових газів, а також запобігає надмірному

використанню поживних речовин. У соціальному вимірі це сприяє зміцненню продовольчої безпеки завдяки збільшенню врожайності та раціональному управлінню ресурсами.

Водночас упровадження сенсорних рішень під час внесення добрив супроводжується низкою перешкод. Значні стартові фінансові витрати та технологічна складність інтеграції обладнання є стримувальним чинником для фермерських господарств малого масштабу. Крім того, ефективність функціонування таких систем напряду залежить від точності вимірювальних приладів і стабільної роботи програмних алгоритмів. Для мінімізації цих бар'єрів застосовуються різні інструменти підтримки, включно з державними дотаціями, навчальними проєктами та розробкою більш інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів керування.

Сенсорні засоби контролю та управління процесом внесення гранульованих добрив становлять справжню трансформацію технологій у сільському господарстві, поєднуючи практичну діяльність фермерів із концепціями точного землеробства. Оперативний доступ до зонально диференційованих даних сприяє зменшенню ресурсних витрат і підвищенню екологічної відповідальності виробництва.

З подальшим прогресом цифрових технологій очікується глибока модернізація агросектору, що забезпечить зростання продуктивності та сприятиме збереженню довкілля. Дальші наукові дослідження й технологічні інновації залишаються необхідними для усунення наявних обмежень і розширення можливостей застосування таких систем серед широкого кола виробників у всіх регіонах. В рамках нашої роботи було поставлено завдання оцінити функціонування сенсорної системи диференційованого внесення фосфатних добрив (VRT) під час сівби кукурудзи. Як вимірювальний елемент використовувався оптичний датчик діапазону VIS–NIR, який у процесі посіву визначав вміст доступного фосфору в ґрунті.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Спектрофотометр і сенсор ґрунту на ходу

Портативний спектрофотометр на основі волоконної оптики у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах (VIS–NIR) Zeiss Corona 45 visnir 1.7 (виробництво Німеччини), який працює в інтервалі 306–1711 нм, було змонтовано на технологічній панелі сівалки-аплікатора. Прилад інтегрували з датчиком ґрунту, що функціонує під час руху, забезпечуючи реєстрацію спектральних характеристик відбитого випромінювання поверхневих шарів землі. У межах 401–1135 нм вибрано спектральну роздільну здатність 3,2 нм, а в інтервалі 1135–1633 нм – 6 нм, що дозволяє отримувати деталізовані показники.

Цей вимірювальний пристрій характеризується високою швидкістю сканування (приблизно 0,5 секунди на один запис), точністю результатів і механічною міцністю, оскільки конструкція позбавлена рухомих компонентів. Завдяки цьому він чудово підходить для тривалого встановлення на пересувних агротехнічних машинах.

Розроблена система для визначення властивостей ґрунту на ходу включає глибокорозпушувальний елемент, який занурюється на задану глибину та формує вузьку траншею, дно якої вирівнюється за рахунок вертикального зусилля, спрямованого донизу на робочий орган. На задній частині цього агрегата фіксується оптичний модуль, що забезпечує отримання спектрів саме з вирівняної нижньої поверхні відкритої борозни.

Оптичний блок з'єднаний зі спектрофотометричним пристроєм VIS–NIR двома оптоволоконними проводами: один подає світловий потік для освітлення ґрунту, а інший збирає й передає відбитий сигнал на детектор. Обидві лінії фіксуються в спеціальному тримачі лінз під кутом 45°, що оптимізує умови реєстрації спектрального випромінювання.

2.2 Створення рекомендації щодо фосфорних добрив

Випробування на вміст фосфору в ґрунтах спрямовані на оцінку здатності ґрунтового середовища забезпечувати надходження Р у ґрунтовий розчин, звідки його можуть засвоювати рослини. Водночас вони не визначають повну кількість потенційно доступного фосфату. Отримані показники формують індекс фосфору, що демонструє відповідність між забезпеченістю ґрунту цією поживною речовиною та потребами у внесенні фосфорних добрив.

Зв'язок між значенням індексу Р, встановленим за аналітичними вимірюваннями ґрунту, і реальною потребою у фосфатних добривах встановлюють на основі тривалих польових експериментів. У таких дослідженнях порівнюють урожайність при використанні різних норм внесення фосфорних сполук і визначають, який рівень забезпеченості елемента є оптимальним для розвитку культури. Якщо наявний у ґрунті фосфор не може покрити запити рослин для досягнення максимальної продуктивності, тоді необхідно додавати мінеральні або органічні фосфорні добрива, які поповнять цю поживну речовину у ґрунтовому розчині.

У межах Бельгії система внесення фосфатів спирається на рекомендації, що їх формує Бельгійська служба ґрунтознавчих досліджень. Такі поради базуються на результатах визначення Р-ext методом екстракції лактатом амонію, а також на ряді допоміжних чинників: попереднє внесення гною, проведення вапнування, попередня культура, кислотність ґрунту, дата висіву та інші агрохімічні показники.

Варто підкреслити, що чинні нормативи щодо удобрення не були спеціально розроблені для систем змінних норм внесення (VR — Variable Rate), і нині відчутно бракує експериментальних даних, які б підтверджували їхню ефективність у такій технології. Тому для впровадження сенсорного управління дозами фосфатних добрив за принципами VR була створена окрема модель рекомендацій, яка допомагає визначати необхідну норму P₂O₅

(у кг/га). Вона ґрунтується на результатах поліноміальної регресії та має такий вигляд:

$$\text{Фосфат} = -0,001P_{ext}^2 + 0,1652P_{ext}^2 - 9,87P_{ext} + 224,22 \quad (R^2 = 0,96)$$

де P_{ext} – $P - ext$ ґрунту в мг 100 г – 1 .

Цю рекомендаційну модель сформовано, використовуючи сім різних доз внесення добрив: 200, 174, 160, 117, 57, 34 та 0 кг/га. Вони застосовуються залежно від діапазонів забезпеченості ґрунту доступним фосфором $P-ext$: < 5; 5 – 8; 8 – 11; 11 – 18; 18 – 30; 30 – 50 і > 50 мг на 100 г ґрунту відповідно. Зазначені градації були створені не випадково, а отримані шляхом дискретизації безперервної математичної залежності, яка описує норму внесення фосфатів. Таке спрощення запровадили для того, щоб уникнути необхідності оперативного визначення додаткових агрохімічних показників, що також суттєво впливають на точність призначення дози фосфорних добрив, але тоді технічно не могли бути оперативно враховані.

Переважаюча частина подібних моделей для розрахунку доз добрив включає не лише результати аналізу ґрунту, але й враховує заплановану продуктивність культури. Розроблена модель нормування внесення фосфату (Рівняння (1)) орієнтована на отримання врожайності кукурудзи на зерно 10 т/га. Максимальна межа внесення фосфорних добрив була стандартизована та округлена до величини 200 кг/га для ґрунтів з низьким вмістом доступного фосфору, а саме при $P-ext$ нижче 3 мг/100 г.

Система змінно-нормового (VR) удобрення використовувала крок у 5 кг/га, що теоретично давало приблизно сорок окремих рівнів дозування в діапазоні від нуля до двохсот кг/га. Саме тому розрахунок за формулою (Рівняння (1)) додатково коригували – кожна отримана доза заокруглювалась із похибкою до 2,5 кг/га, щоб привести результат до найближчого доступного варіанту.

Паралельно для схеми UR було проведено класичний аналіз ґрунту на вміст $P-ext$. Для цього з кожного гектара відбирали змішаний зразок, що

складався з приблизно двадцяти підразків, узятих на глибині 0,10–0,20 м. За результатами цього лабораторного визначення була призначена єдина рекомендована доза для поля — у даному випадку 30 кг/га фосфору для посіву кукурудзи.

2.3 Опис сенсорного аплікатора для внесення добрив

Для проведення польових дослідів використовували пневматичну просапну сівалку ED352 від AMAZONE, обладнану бункером для внесення гранульованих добрив. Регулювання дози здійснювалося через електричний привід LINAK & Co, інтегрований у систему подачі туку. Зміна норми внесення відбувалася шляхом корекції частоти обертання валу тукоподавальних механізмів через безступінчастий редуктор, що забезпечувало плавну і точну подачу добрив.

Було розроблено спеціальне програмне забезпечення на базі LabVIEW, яке дозволяло керувати приводом і встановлювати конкретну швидкість потоку гранул з кроком близько 4 кг/га фосфату. Перед початком експерименту виконували стаціонарне калібрування, щоб відтворити положення актуатора відповідно до заданої норми. Позиціонування приводу здійснювалося програмно з інтервалом 5 кг/га, що підвищувало точність регулювання.

Під час налаштування проводили імітацію руху сівалки: колесо аплікатора оберталося 36,8 разів, що відповідало обробці 1/40 га, виходячи з ширини захвату 3 м і геометричних параметрів колеса (за даними виробника AMAZONE). Гранульований потрійний суперфосфат відбирали та зважували для кожного положення приводу. Результати показали високу лінійну залежність між налаштуванням приводу та швидкістю подачі добрив ($R^2 = 0,9$), що підтверджує точність системи внесення.

Для реалізації технології змінної норми внесення (VR) використовували ґрунтовий сенсор, встановлений на відстані 0,91 м перед вихідними отворами добрив, що дозволяло оцінювати стан ґрунту до внесення речовини. Оптичний

блок кріпився на розпушувач, змонтований на трьохточковій навісці трактора. Робоча глибина становила 0,15 м, що давало змогу отримувати спектри ґрунту через інтервали приблизно 1,3 м під час руху по полю.

Для визначення координат ґрунтових спектрів використовували Trimble 132 AgDGPS, що дозволяло створювати детальні карти ґрунту для інформаційної підтримки прийняття рішень щодо диференційованого внесення добрив. Паралельно сівалку налаштували на висів 100 000 насінин на гектар, відповідно до технологічних вимог дослідження.

2.4 Експериментальні поля та експериментальні випробування

Поле підготували для висіву кукурудзи. Ґрунтова структура відповідала суглинку за класифікацією USDA (табл. 1). Територію розділили на дві великі ділянки: перша займала площу 12 000 м², друга — 3500 м². Частина А мала розміри 48 × 240 м, тоді як частина В — 48 × 70 м. Кожна з ділянок була додатково розбита на чотири смуги шириною по 12 м; у результаті утворилися дві VR-смуги та дві UR-смуги (рис. 3). На кожній із них можна було здійснити по чотири проходи сівалки.

Під час польового внесення добрив лише VR-смуги отримували норми фосфору, встановлені за допомогою оперативного вимірювання ґрунту. UR-смуги отримували фіксовану дозу 30 кг/га, визначену за результатами лабораторного аналізу P-ext, проведеного перед посівом. Водночас для UR проводився той самий комплекс збору даних, що й для VR: запис спектральних показників, попередня обробка, фільтрація, прогнозування вмісту P-ext, обчислення фосфору та фіксація координат зразка. Це дозволяло віртуально оцінити ефективність VR-внесення на ділянках із UR.

На основі додаткових стандартних аналізів ґрунту визначили рівномірне внесення інших елементів живлення: 180 кг/га азоту, 150 кг/га калію та 70 кг/га магнію. Для оцінки реакції рослин на VR-фосфор проводили підрахунок листя та вимірювали врожайність під час збору. З чотирьох проходів трактора на

кожній смузі лише два центральні (шириною 6 м) використовувалися для збору даних та проведення порівняння.

З обох боків залишили дві смуги завширшки по 3 метри, щоб уникнути взаємного впливу між внесеннями VR та UR. Кожне поле, яке включало чотири ряди культур, було розділено на сегменти довжиною по 20 метрів. З кожної групи з чотирьох сусідніх сегментів випадковим чином обирали один, оскільки сівалка обробляла одночасно чотири ряди. В результаті, для відбору рослинних зразків усього було відібрано 52 сегменти на полі. Для порівняння ефекту між VR та UR у відібраних ділянках підраховували кількість листків у рослин. Цей параметр фіксували через 15 днів після сівби. Вплив способу внесення (рівномірного або змінного) на розвиток культур досліджували за допомогою багатофакторного дисперсійного аналізу, враховуючи число рослин із трьома, чотирма та п'ятьма листками як залежні змінні. Для визначення значущості впливу режиму застосування використовували Лямбда Вілкса. Це тестова статистика, що застосовується в багатовимірному дисперсійному аналізі, яка дозволяє перевірити наявність відмінностей між середніми показниками визначених груп за сукупністю залежних змінних. Результати окремих однофакторних односторонніх дисперсійних аналізів застосовуються лише в разі, якщо загальний ефект, визначений за Лямбда Вілкса, виявляється статистично значущим.

2.5 Обробка даних під час роботи агрегату

Портативний ноутбук застосовувався для керування різними інструментами через два послідовні порти RS232: перший забезпечував контроль швидкості роботи, тоді як другий приймав сигнали від DGPS-приймача. Додатково, для взаємодії зі спектрофотометром використовувалася інтерфейсна карта PCMCIA (стандартна картка пам'яті для персональних комп'ютерів). На базі середовища програмування LabVIEW було створено спеціалізовану програму на замовлення.

Початкова задача цього програмного забезпечення полягала у записі спектрів відбиття ґрунту в діапазоні від 305 до 1711 нм. У програму було інтегровано схему фільтрації, яка дозволяла відсівати спектри, не пов'язані з ґрунтом, на основі передбачуваного значення R-ext. Попередня обробка спектральних даних виконувалася безпосередньо програмою (див. нижче). Після кожного отриманого спектра відбиття ґрунту, шум на краях спектру видалявся, а робочий спектральний діапазон звужувався до 401–1663 нм — саме його застосовували для побудови моделі калібрування R-ext. Надлишковий шум на краях обумовлений технічними обмеженнями спектрофотометрів при роботі з цими довжинами хвиль.

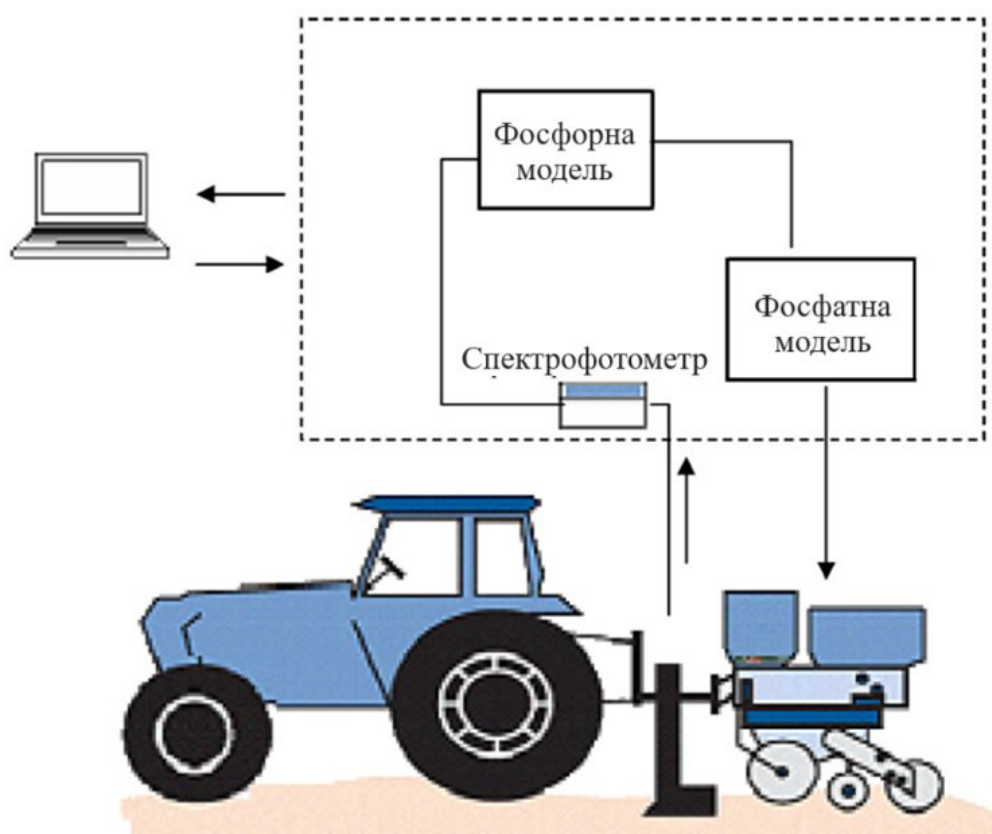


Рис. 1 - Схематична діаграма VR-аплікатора на основі датчика ґрунту

Програма здійснила аналогічні кроки попередньої обробки спектральних даних, які застосовувалися під час розробки моделі калібрування R-ext. До цих кроків належали максимальна нормалізація та первинне згладжування за методом Савіцького–Голяя. Крім того, модель R-ext ґрунту була інтегрована у середовище LabVIEW для прогнозування рівня

P-ext у ґрунті. Після отримання прогнозованого значення фосфору в ґрунті можна визначити рекомендовану дозу фосфату, використавши рівняння (1).



Рис. 2 – Система для внесення фосфору зі змінною нормою на основі датчика ґрунту, використана у дослідженні; (а) сівалка та аплікатор для внесення добрив (AMAZONE, ED332); (b) датчик і глибокорозпушувач; (c) антена DGPS; (d) електричний привід і (e) колесо для закриття борозни, зробленої глибокорозпушувачем

Для зменшення високої мінливості між послідовними вимірюваннями P-ext ґрунту під час проходження поля застосовувалося усереднення кожних десяти послідовних зразків. У цьому процесі дані про стан ґрунту оновлювалися шляхом отримання нового спектру та видалення найстарішого значення з вікна усереднення. Слід зазначити, що на початку кожного проходу поля перше прогнозоване значення P-ext використовувалося лише для першої комірки, а при подальшому русі по полю до середнього включалися друге, третє і так далі, аж до десятого, після чого формувалося усереднене значення для подальшої обробки.

У разі виникнення помилок при зборі спектрів або неправильного прогнозування Р-ext попереднє значення могло бути відновлене для обчислення нової рекомендованої норми добрива. Невірний прогноз зазвичай з'являвся через сканування матеріалів, що не є ґрунтом, або внаслідок несподіваної вібрації трактора під час руху по полю.

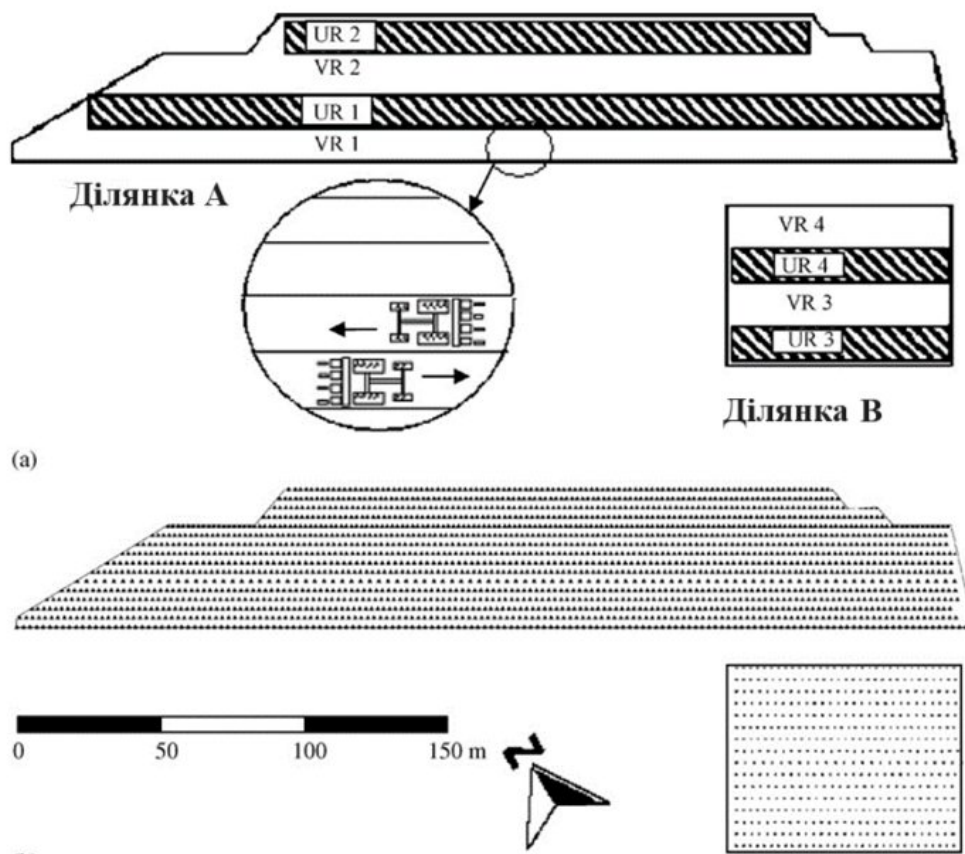


Рис. 3 - (а) Схематична діаграма експериментального дизайну двох частин поля; заштриховану ділянку відводили для рівномірного нанесення фосфату; кожна ділянка містить чотири ряди посіву та загалом 16 рядків кукурудзи; (б) положення кожного спектру ґрунту, отриманого аплікатором у двох частинах; VR і UR означають змінну норму та середню норму

Таблиця 1 – Структура ґрунту

Елемент	Глина (<2мкм)	Мул			Пісок (>50мкм)
		(2-10 мкм)	(10-20 мкм)	(20-50 мкм)	
Відсоток	14,34	4,18	11,79	32,35	37,34

Програма також надавала можливість фіксувати координати взятих зразків ґрунту для подальшого створення Р-карти, що дозволяло відобразити варіації Р-ext, які спостерігалися на полі під час проведення посіву, а також оцінити рівень внесеного фосфату. Кожній клітині для збору зразків (рис. 4) площею приблизно 4 м² присвоювався певний рівень фосфору залежно від показника Р-ext, визначеного для конкретної ділянки, а також враховувалося середнє значення Р-ext, розраховане на основі останніх дев'яти суміжних клітин. Оскільки контролер аплікатора не мав можливості встановлювати абсолютне нульове внесення добрив (0 кг/га), клітини, які не планувалося обробляти добривами, отримували умовно невелику норму — 0,5 кг/га. У тих ділянках, де вміст фосфору в ґрунті був нижчим за 3 мг/100 г, застосовувався фосфат у кількості 200 кг на гектар.

2.6 Розробка карти для Р-ext і фосфату ґрунту

Координати, отримані під час сканування ґрунтової поверхні за допомогою DGPS, були конвертовані у проєкцію Ламберта за допомогою версії 1.02 програмного комплексу Р7. Це забезпечило можливість опрацювання даних у метричній системі, що є необхідним для подальшого просторового аналізу. Для створення картографічних моделей Р-ext та вмісту фосфатів у ґрунті використовувалася програма Surfer 8.00, яка дозволяє здійснювати просторову візуалізацію та аналіз агрохімічних параметрів.

Побудова регулярної сітки здійснювалася шляхом використання алгоритму інтерполяції зворотного зважування відстані (IDW). Зазначений метод розраховує прогнозовані значення для кожного пікселя або вузла сітки в межах заданої ділянки. Кожен вимір, що походить із первинного набору даних, під час обчислення отримує ваговий коефіцієнт залежно від просторового віддалення від центру конкретної комірки. Оскільки метод IDW базується на принципі оберненої залежності значення від дистанції, точки, розташовані далі, мають значно менший вплив на кінцевий результат, а найближчі вимірювання істотніше формують прогнозоване значення.

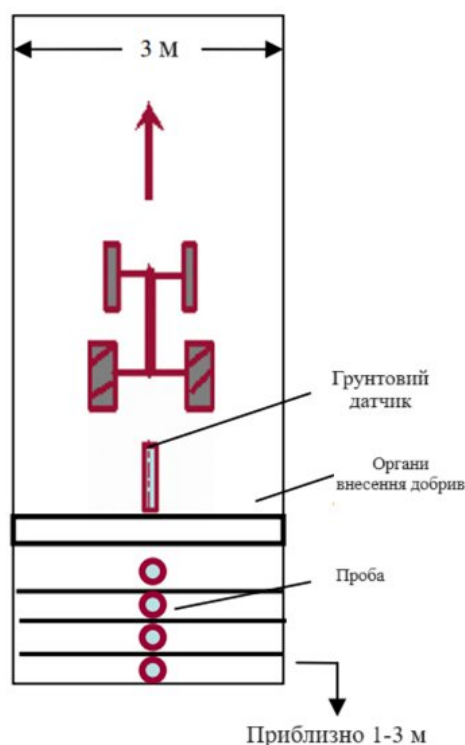


Рис. 4 – Схематична діаграма розміру комірки для вибірки
 Фактичні карти застосування фосфату, які регулювались аплікатором
 VR, були розроблені на основі середнього значення десяти послідовних
 прогнозованих значень P-ext

Роздільна здатність інтерполяційної сітки для більшості карт характеризувалась радіусом пошуку 25 метрів і ступенем 2. Проте для карт, створених на основі реальних даних внесення фосфорних добрив, цей радіус було обмежено лише 2,8 метра. Таке зменшення (менше за ширину сівалки 3 м) дозволило скоротити похибки на межах між зонами внесення за змінною нормою (VR) та однорідного застосування (UR), запобігаючи зайвому згладжуванню показників.

Картографічні моделі P-ext ґрунту поділяли на два варіанти. Перший варіант ґрунтувався на значеннях P-ext, виміряних окремо для кожного елемента сітки. Другий передбачав використання усередненого показника, отриманого з десяти послідовних вимірів P-ext, що виконувалося у середовищі LabVIEW для забезпечення більш стабільного результату та зменшення випадкових флуктуацій у даних.

2.7 Визначення урожайності кукурудзи

В оптимальних умовах ширина дослідних смуг повинна перевищувати робочу ширину жатки комбайна, що застосовується для збирання врожаю, приблизно в один або два рази. Під час експерименту використовували кукурудзозбиральний комбайн CR 960 N.H., обладнаний жаткою шириною 6 м, що й визначало конфігурацію оброблюваних площ. Висів кукурудзи на кожній обліковій ділянці здійснювався трактором із сівалкою, робоча ширина якої становила 3 м, що забезпечувало відповідний розподіл рядків під майбутнє збирання.

Для обліку врожаю застосовували комбайн, укомплектований датчиком безперервного контролю потоків зерна, який надає можливість оперативно фіксувати просторову мінливість показників урожайності. Реєстрація змін урожайності проводилася під час руху техніки в полі. Встановлений сенсор потоку зерна забезпечував отримання значень урожайності з частотою один вимір на секунду, що дозволяло отримати детальну картину варіацій по всій довжині проміжків.

При подальшому аналізі враховувалися дані лише із центральної 6-метрової смуги кожної обробної ділянки, що відповідає робочій ширині жатки комбайна; крайні зони завширшки по 3 м з обох сторін не включалися до розрахунків для уникнення впливу периферійних похибок.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Ділянка для відбору проб

Аналіз співвідношення числа зафіксованих під час висіву спектрів ґрунту до повної площі посівної ділянки засвідчив, що один спектральний запис припадав орієнтовно на кожні 4 м² території. Це відповідає ширині робочого захвату техніки у 3 м та довжині шляху, яку умовно визначили близько 1,3 м. У підсумку виходило приблизно 2500 вимірів на один гектар посівної площі. Показник частки проб, відібраних для технології змінної норми внесення (VRPS), по відношенню до одиниці площі (1 м²), що визначався критеріями вибірки для VR-картографування, складав у межах нашого експерименту близько 25%.

Оцінка точності та інформативності спектрів, отриманих під час руху сівалки, продемонструвала, що близько 10–15% з них мали незадовільні характеристики. Основними чинниками цього виступали два технічні аспекти. Насамперед, калібрування і точне регулювання сенсора ґрунту необхідно проводити синхронно з налаштуваннями самої посівної машини, адже поверхня реєструвального елемента повинна залишатися строго горизонтальною під час переміщення в борозні.

Додатковим фактором, що позначався на отриманих даних, була якість обробітку ґрунту під посів. На окремих фрагментах дослідної ділянки підготовка поверхні була виконана не на належному рівні: фіксувалася значна грудкуватість та нерівність рельєфу. В цих зонах виникали спотворення та шумові артефакти у спектральних сигналах, що призводило до зниження надійності отриманої інформації.

3.2 Варіації фосфору та фосфатів у ґрунті

Показники концентрації P-ext по всій території поля характеризувалися коефіцієнтом варіації (CV), величина якого коливалася від 5% до 51%. Найнижчий та найвищий зафіксований рівень доступного фосфору становив

відповідно 9/100 і 70/100 мг/г на всіх дослідних ділянках. Такі результати свідчать про істотну нерівномірність у забезпеченості ґрунту фосфором на полі площею 1,55 га, що загалом демонструє значну просторову неоднорідність. Отримані в ході вимірювань величини охопили практично всі категорії, які застосовуються під час інтерпретації даних аналізу ґрунтів.

У таблиці 2 наведено підсумовані однолінійні статистичні показники щодо вмісту фосфатів для всіх зон, як із технологією змінної норми (VR), так і стандартною нормою (UR). Варто наголосити, що саме VR-ділянки отримували різні кількості добрив, розраховані відповідно до значень P-ext, які визначалися безпосередньо під час руху техніки, тоді як на решту площ було застосовано фіксовану норму внесення — 30 кг/га. Візуалізація мінливості фосфатів у 170 послідовно розташованих точках відбору проб на 225-метровому відрізку поля А наведена на рисунку 5: протягом цього маршруту рівень внесення добрив змінювався 17 разів, перебуваючи в межах 5–30 кг/га.

Для ілюстрації просторової неоднорідності розподілу P-ext були створені дві картограми: перша ґрунтувалася на прогнозованих одиничних значеннях доступного фосфору, тоді як друга — на середніх результатах десяти безперервних сканувань (рис. 6 і 7). Наявність високої подібності між цими картами свідчить, що усереднення десяти послідовних прогнозів є корисним методом при визначенні адаптивної норми підживлення. Діапазони просторового варіювання, розраховані кожною методикою, також практично збігалися. Незважаючи на відносно малу площу зон обстеження (12000 та 3500 м²), на всій їхній території простежувалися значні зміни вмісту фосфору: на полі А — у межах 9–70 мг/100 г, а на полі В — від 16 до 70 мг/100 г.

На рисунках 8 і 9 відображено створені карти-завдання для застосування фосфорних добрив відповідно на ділянках А та В. Зображення 8(а) і 9(а) показують запланований (розрахований) розподіл фосфатів, тоді як рисунки 8(б) і 9(б) демонструють фактичне внесення агротехнікою. Розбіжності в нормах на VR-зонах зумовлені тим, що система автоматично коригувала дозу,

орієнтуючись на оперативні дані прогнозу P-ext при пересуванні по полі. Для UR-площ застосовувалася наперед запланована кількість 30 кг/га. Невеликі зміни дозування на межах UR-ділянок пояснюються інтерполяційними процесами, що використовувалися під час створення відповідних карт.

3.3 Витрата добрив

Одним із ключових показників, що дозволяє здійснювати коректне порівняння технологій внесення добрив за принципами VR та UR, є реально досягнуті обсяги подачі поживних речовин у ґрунт. Значна кількість наукових експериментів підтверджує: використання змінної норми має здатність скорочувати обсяги внесення там, де застосування однакової дози неодмінно спричиняє зайві витрати мінеральних добрив і, відповідно, знижує економічну доцільність.

На ділянках, що були виділені для завдання усередненої норми внесення, фактичний показник складав 30 кг/га. Позначення P-ext у дослідженні відноситься до екстрагованого амоній-лактатного фосфору, який є важливим індикатором доступності елемента для рослин.

Отримане реальне значення норми внесення, розраховане на базі всіх прогнозованих даних щодо концентрації P-ext, дорівнювало 45,2 мг/100 г ґрунту. Цей результат дещо нижчий у порівнянні зі стандартними лабораторними визначеннями, де було зафіксовано 51,0 мг/100 г. Для поля з підвищеним вмістом фосфору встановлено залежність: чим більша кількість точок вимірювання включається до аналізу для усереднення, тим меншою стає середня рекомендована норма внесення фосфатних добрив. Оскільки для всього поля було зібрано 2500 аналітичних точок, прогнозом передбачалося суттєве зменшення значення показника P у розрахунках.

За умов, коли результати класичних методів вологого аналізу демонструють рівень 51,0 мг/100 г або вище, внесення фосфатів за схемою UR не розглядається як доцільне рішення. За концентрацій P-ext, що перевищують

межу у 50 мг/100 г, рекомендовано утримуватися від додаткового фосфорного живлення, аби уникнути надлишку елемента в ґрунтовому середовищі.

Таблиця 2 – Статистика вмісту фосфору в ґрунті та рекомендованого фосфату (P_2O_5) на основі зібраних на ходу спектрів ґрунту на ділянках зі змінною нормою (VR) і середньою нормою (UR).

Ділянка	P-ext, мг/100г			CV, %	Фосфат, кг/га			CV,%
	Min	Max	Сер.		Min	Max	Сер.	
VR1	23.99	69.60	44.07	21	0	70	26.69	44
VR2	17.38	64.71	42.49	23	5	95	29.72	50
VR3	16.44	51.23	38.10	23	15	100	36.53	51
VR4	29.09	65.59	48.06	21	5	50	22.07	49
UR1	9.03	69.60	45.40	27	0	150	27.10	76
UR2	35.13	68.89	51.69	15	0	40	17.76	42
UR3	28.54	65.59	39.64	2.2.	5	55	32.95	36
UR4	30.07	69.60	48.42	25	0	55	22.60	64

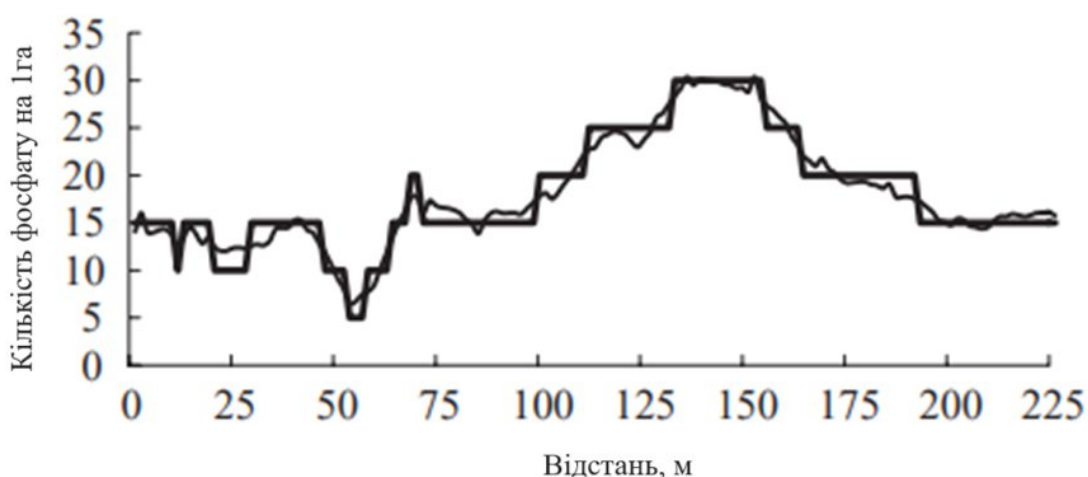


Рис. 5 – Порівняння теоретично визначеного фосфату (тонка крива) і фактичного (жирна крива) внесення фосфату, класифікованого на 5 кг/га інтервалів за один польовий цикл, взятий як приклад

Середнє загальне внесення добрив на варіативних (VR) ділянках становило приблизно 28,75 кг/га. Цей показник виявився на 1,25 кг/га меншим порівняно з уніфікованою нормою (UR), визначеною на основі традиційних результатів аналізу ґрунту. Водночас середнє значення фактично рекомендованої кількості фосфатних добрив, розрахованих за усіма даними показника P-ext, отриманими з ділянок UR, становило лише 25,1 кг/га. Це на

4,9 кг/га нижче за нормативне внесення (приблизно 30 кг/га), що демонструє наявність надмірного застосування добрив при використанні середньої дози. Діапазон використання фосфатів на VR-ділянках був досить широкий і коливався від повної відсутності внесення до 100 кг/га (Таблиця 2), тоді як моделювання внесення на UR-варіантах показало можливі норми від 0 до 150 кг/га.

3.4 Показники росту рослин

Для повноцінного розвитку посівів важливо забезпечити ґрунт достатньою кількістю сполук фосфору. Нестача цього елемента призводить до уповільнення формування кореневої системи, що, у свою чергу, негативно впливає на подальший ріст та загальний стан рослин.

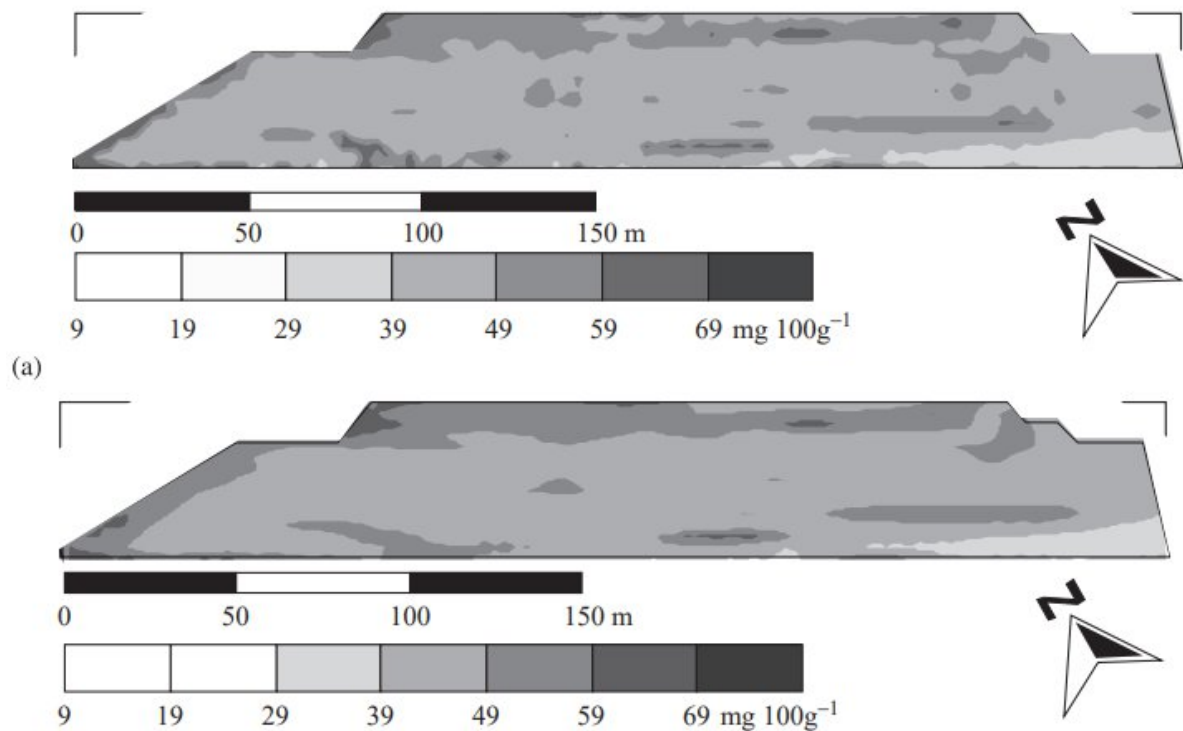


Рис. 6 – Карти P-ext ґрунту частини А поля з використанням окремих P-ext (a) та середнього 10 послідовних значень P-ext (b)

У наукових працях наголошується, що існує прямий, майже пропорційний взаємозв'язок між рівнем розвитку коренів і фазою появи листків у рослинних організмів.

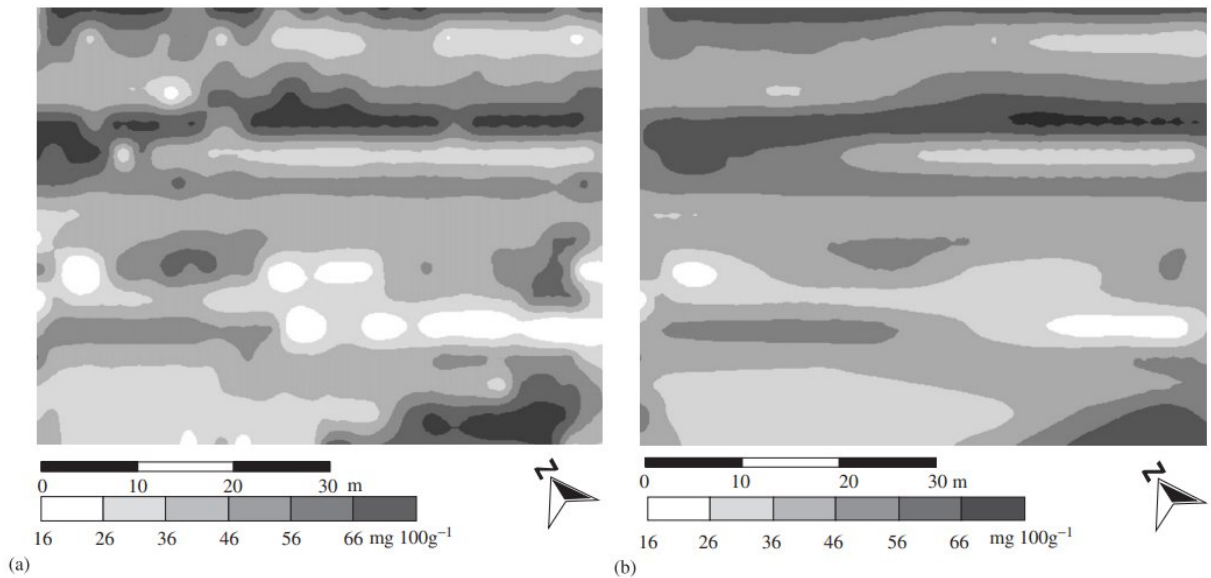


Рис. 7 – Карти Р-ехт ґрунту частини В поля з використанням окремих Р-ехт (а) та середнього 10 послідовних значень Р-ехт (б)

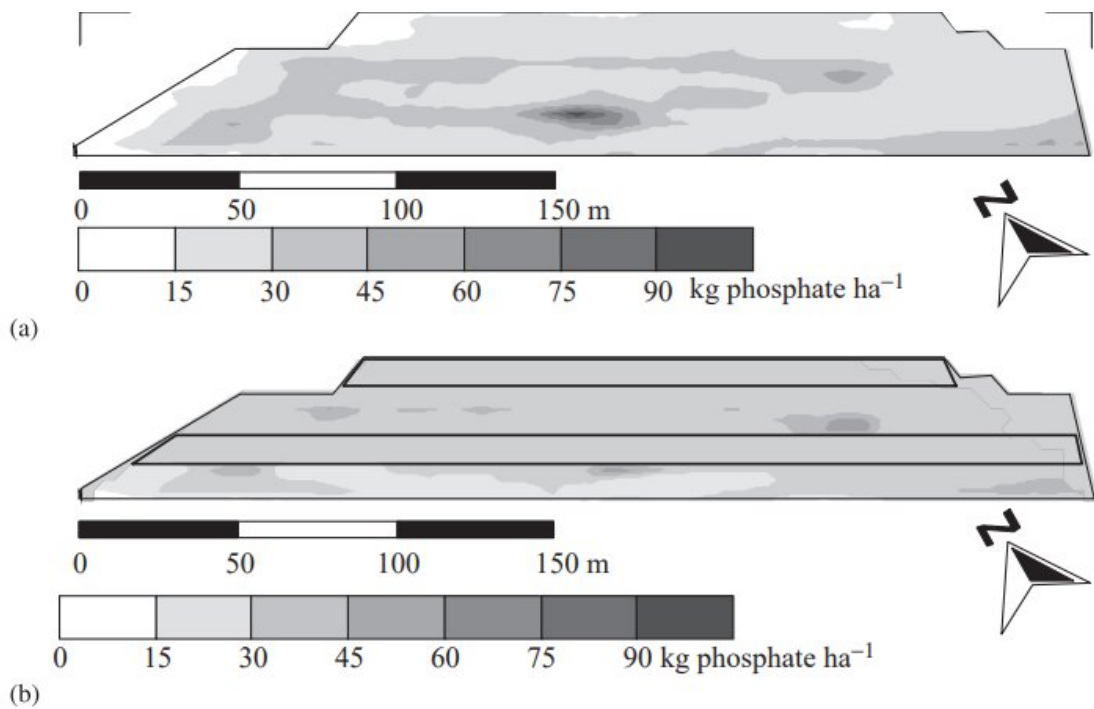


Рис. 8 – Рекомендована (а) і застосована (б) фосфатна карта частини А поля, яка була створена з використанням середнього десяти послідовних прогнозованих Р-ехт у напрямку руху трактора; ділянки, призначені для рівномірної норми внесення (30 кг/га), позначені багатокутниками в (б)

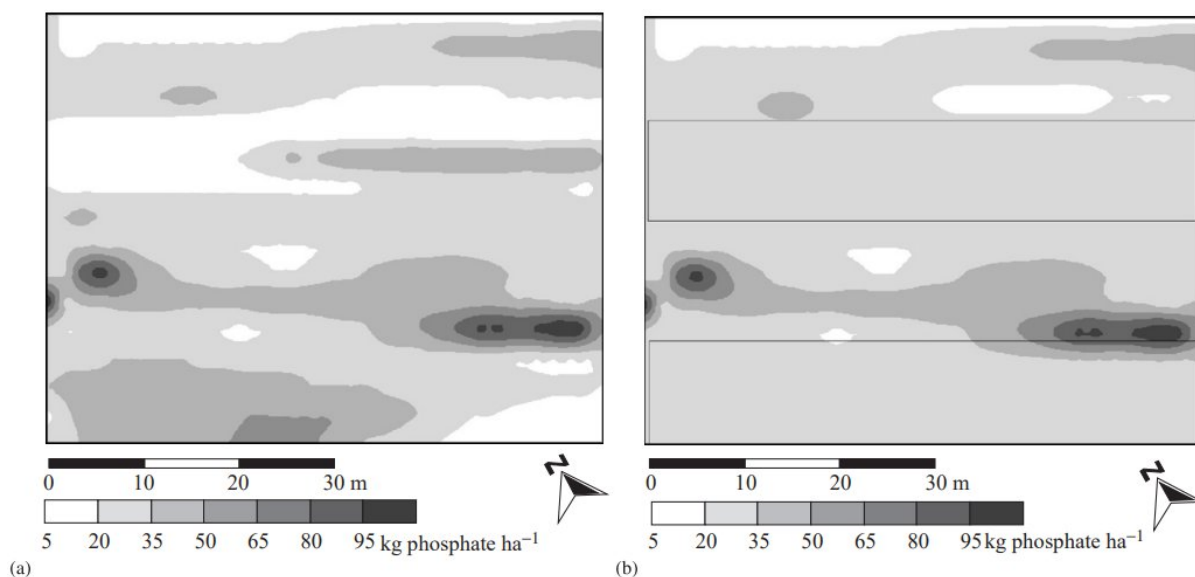


Рис. 9 – Рекомендована (а) і застосована (б) фосфатна карта частини В родовища, яка була створена з використанням середнього значення 10 послідовних прогнозованих Р-ext у напрямку руху поля; ділянки, призначені для рівномірної норми внесення (30 кг/га), позначені багатокутниками в (б)

Таблиця 3 – Статистика врожайності кукурудзи на восьми ділянках дослідного поля

Ділянка	Врожайність, т/га			CV, %
	Середнє	Max	Min	
VR				
1	8.41	12.19	1.11	22
2	8.44	11.48	1.47	19
3	7.21	9.93	1.09	35
4	7.27	9.50	1.42	27
UR				
1	8.48	12.72	0.84	25
2	7.78	11.36	0.96	35
3	6.54	10.16	0.96	40
4	6.81	8.89	2.40	25

Таблиця 4 – Коефіцієнт варіації як індекс, який показує ефективність методу VR для узгодження варіації врожайності та кількості рослин на певній території

Показник	CV, %	
	VR	UR
Врожай	25.75	31.25
Кількість листків	24.70	31.04

Після висіву кукурудзи та внесення фосфатних добрив на експериментальних секціях із змінною (VR) та рівномірною (UR) нормою удобрення здійснювали облік кількості листків на рослинах. Оцінювання проводили приблизно через два тижні після посіву, коли культура здебільшого перебувала на фазі чотирьох листків. Для визначення можливої різниці між двома методами удобрення стосовно рослин із 3, 4 та 5 листками застосували статистичний аналіз. Результати тесту лямбда Вілкса засвідчили, що спосіб внесення добрива (UR чи VR) не спричинив статистично значущих відмінностей у кількості рослин із різною кількістю листків. Відповідно, подальший окремий аналіз відмінностей за кожною з категорій листків (3, 4 і 5) виконувати не вважалося доцільним.

Попри це, на ділянках, де застосовували змінні норми, спостерігалось менше коливання показників для рослин на стадії чотирьох листків у порівнянні з ділянками UR. Значення коефіцієнта варіації для VR становило 24,7%, тоді як для UR – 31,04%. Така тенденція може свідчити про певну реакцію рослин на фосфорне удобрення, виконане за допомогою VR-технології, що потенційно демонструє ефективніший розподіл фосфору в ґрунті.

Ряд наукових досліджень підтверджує, що польові культури зазвичай реагують на внесення фосфатних добрив за умов низького або середнього забезпечення елементом у ґрунті. Натомість у цьому експерименті рівень доступного фосфору був досить високим: згідно з даними датчика – 45,21 мг/100 г, а за результатами лабораторного аналізу – 51 мг/100 г. Таким чином,

очікувана реакція рослин на додатковий фосфор мала бути мінімальною, що й підтвердилося під час дослідження.

Врожайність культури формується під впливом широкого спектра агрономічних факторів, тому порівняння UR і VR без комплексного врахування умов вирощування може призвести до неправильних висновків. Середній урожай на ділянках VR дорівнював 8187 ц/га, тоді як на UR — 7851 ц/га, що свідчить про помітну різницю на користь змінного внесення.

Проведений дисперсійний аналіз Велча показав статистично значущу різницю між варіантами VR і UR на рівні 5% ймовірності. Це може бути зумовлено значною просторовою мінливістю вмісту фосфору у ґрунті на досліджуваній території. Дані врожайності для кожної ділянки представлені в таблиці 3, де простежується певне зниження просторової варіабельності врожаю під впливом VR-технології: коефіцієнт варіації у VR нижчий, ніж в UR. У таблиці 4 продемонстровано результати впливу змінного удобрення на листовий апарат рослин і загальний урожай. Отже, VR сприяє вирівнюванню показників продуктивності між окремими частинами поля.

Водночас дві ділянки з UR (UR1 і UR4) показали коефіцієнт варіації на рівні 25% (див. табл. 3). Це пояснюється тим, що вони отримали рівномірне внесення фосфору в дозі 30 кг/га, що практично повністю покривало їхній реальний дефіцит фосфору. Потреба в елементі для цих ділянок становила 27,1 та 22,6 кг/га відповідно, що було розраховано на підставі оперативних вимірювань під час польового картування.

ВИСНОВКИ

Було здійснено аналіз технології внесення фосфору (P) зі змінною дозою (VR), що використовує видимий (VIS) і ближній інфрачервоний (NIR) спектри в роботі ґрунтового сенсора. Комплекс обладнання для диференційованого внесення добрив забезпечував коригування кількості поданого фосфату приблизно кожні 3 м² у процесі руху агрегату по полю. Просторова неоднорідність ґрунту на ділянці контролювалася за результатами близько 2500 вимірювань, отриманих із одного гектара за допомогою датчика, що здійснює відбір і аналіз даних у режимі реального часу. Зібрані показники легко інтегруються для оперативного регулювання норми внесення фосфатних добрив під час польових операцій.

Показники урожайності культур і розвиток листового апарату свідчили про істотно нижчу мінливість у межах ділянок, де застосовували диференційовану подачу добрив (VR), порівняно з територіями з однаковою нормою внесення (UR). Аналіз числа листків на рослині не продемонстрував статистично вагомої різниці між варіантами VR і UR. Такий результат ймовірно пояснюється тим, що на початковому етапі рівень забезпеченості фосфором був досить високим на всій площі дослідного поля. Водночас врожайність на територіях, де використовували VR встановлення дози, перевищувала показники ділянок із традиційною подачею (UR). Незважаючи на відсутність значного впливу на листовий покрив, урахування локальних змін концентрації P з метою отримання максимально однорідного росту рослин є ключовим завданням використання VR-технологій. Це здатне поступово підвищувати продуктивність і стабільність поля. Для досягнення вираженого ефекту вирівнювання врожайності зазвичай потрібен тривалий період, після якого впровадження VR дає найвищий економічний і агрономічний результат.

Значення коефіцієнта варіації (CV) показника P-ext, визначеного безпосередньо на ходу, змінювались у діапазоні від 5% до 51%, тоді як

просторові відмінності у вмісті фосфору на дослідних ділянках досягали 36–76%. Середньозважена норма фосфатів на варіантах зі змінною дозою становила 28,75 кг/га, що приблизно на 1,25 кг/га менше порівняно з ділянками, де застосовувалась рівномірна схема внесення (30 кг/га).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [USDA-NASS]. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2022. Available online: https://www.nass.usda.gov/Surveys/Guide_to_NASS_Surveys/Chemical_Use/ (accessed on 13 November 2022).
2. Virk, S.; Meena, R. Pulse Width Modulation Technology for Agricultural Sprayers. University of Georgia Cooperative Extension, Athens, GA. Circular 1277; 2022; pp. 1–8. Available online: <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=C1277> (accessed on 14 February 2023).
3. Hou, Z.; Yang, H. Effects of soil fertilization periods and methods on the growth and fruiting of fruit trees. *Pract. Rural Technol.* 2019, 11, 48.
4. Liu, J.; Li, H.; Hao, B.; Qu, Z.; Han, L. Effects of different fertilization treatments on apple fruit quality and fruit tree growth. *Shaanxi Agric. Sci.* 2021, 67, 48–51
5. Du, J. Effect of Organic Fertilizer Substitution for Chemical Fertilizer and the Level of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Regulation on Apple Production. Master's Thesis, Shandong Agricultural University, Shanghai, China, 2022.
6. Сіяти соняшник зі змінною нормою чи ні? Результати дослідів на 50 полях [Електронний ресурс] // *Агроном.* – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.agronom.com.ua/siyaty-sonyashnyk-zi-zminnoyu-normoyu-chy-ni-rezultaty-doslidu-na-50-polyah/>.
7. Przywara, A.; Santoro, F.; Kraszkiewicz, A.; Песуна, А.; Pascuzzi, S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture* 2020, 10, 467.
8. Фактори, які впливають на прибуткове вирощування гібридів кукурудзи [Електронний ресурс] // *Seed Ukraine.* – 2020. – Режим доступу до

ресурсу: <https://seed-ua.com/ua/factory-yaki-vplyvayut-na-prybutkove-vyroshhuvannya-gibrydiv-kukurudzy/>.

9. Amankulova K., Farmonov N., Mucsi L. Time-series analysis of Sentinel-2 satellite images for sunflower yield estimation, Smart Agricultural Technology, Vol. 3, 2023 DOI:10.1016/j.atech.2022.100098.

10. Налаштування сівалок при проблемах з посівом і глибиною заробки насіння [Електронний ресурс] // Поради від команди DEKALB. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.dekalb.ua/agronomichna-biblioteka/porady-vid-monsanto/nalashtuvannja-sivalok>.

11. Легкодух І. Автоматизовані системи контролю якості сівби для просапних сівалок [Електронний ресурс] / І. Легкодух, Н. Легкодух // Агросеа. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://agrosea.com.ua/UKRNIPVT_POGORILOGO/.

12. Процеси, машини та обладнання АПВ [Текст] : навч. посіб. / М. О. Свірень, В. П. Смірнов, І. М. Осипов та ін. - Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2018. - 296 с.

13. Як оцінити якість посіву? Plant Counting: Pogostick та дрони [Електронний ресурс] // aggeek. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://aggeek.net/ru-blog/yak-otsiniti-yakist-posivu-plant-counting-pogostick-ta-droni>.

14. Правильний посів: основні фактори, що впливають на врожайність під час сівби польових культур. [Електронний ресурс] // AgroDay. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://agroday.com.ua/2019/05/14/pravylnyj-posiv-osnovni-factory-shho-vplyvayut-na-vrozhajnist-pid-chas-sivby-polovyh-kultur/>.

15. Морозов І. Фактори ефективності сівалок [Електронний ресурс] / І. Морозов, М. Макаренко // Агробізнес Сьогодні. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1138-factory-efektyvnosti-sivalok.html>.

16. Wang, X. Analysis of the results of a trial of organic fertilizer

replacing some chemical fertilizers in potatoes. *Mod. Agric.* 2021, 01, 56–57.

17. Wang, S.; Li, L.; Wu., D.; Liu, F.; Zhang, P. Experimental study on the effect of replacing chemical fertilizers with equal-nutrient commercial organic fertilizers. *Mod. Agric. Sci. Technol.* 2020, 12, 199–200.

18. Shannon D., Clay E., Kitchen N. (2018). *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Incorporated, 230p.

19. Jupp L. (2018). *Precision Farming From Above*. Writing Matters Publishing, 113 p.

20. Alameen, A.A.; Al-Gaadi, K.A.; Tola, E.K. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application. *Comput. Electron. Agric.* 2019, 160, 31–39.

21. Colaço, A., Bramley, R., 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *F. Crop. Res.* 218, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>.

22. Збірник методик з використання машин в землеробстві /За ред. Мельника В. І. – Харків: “Промпроект” – 2020, 257 с.

23. Heiß, A., Paraforos, D.S., Sharipov, G.M., Griepentrog, H.W., 2020. Modelling and Simulation of a Fuzzy System for Site-Specific Nitrogen Fertilization. In: *Proceedings of the 21st IFAC World Congress (virtual)*, July 12-17, Berlin, Germany (in press).

24. Paraforos, D.S., Sharipov, G.M., Griepentrog, H.W., 2019. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review. *Comput. Electron. Agric.* 163, 104863. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104863>.

25. Mendes, W.R., Araújo, F.M.U., Dutta, R., Heeren, D.M., 2019. Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Syst. Appl.* 124, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.043>.

Додатки