

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра агроінжинірингу

**До захисту
Допускається
Завідувач
кафедри**

Шуляк М.Л.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження факторів, що впливають на показники якості диференційованого внесення мінеральних добрив»

Виконав:

_____ (підпис)

Нестеренко Д.А.

_____ (Прізвище, ініціали)

Група:

СТЗ 2301-2м

(Науковий) керівник:

_____ (підпис)

Харченко Ф.М.

_____ (Прізвище, ініціали)

Суми – 2025

АНОТАЦІЯ

Нестеренко Д.А.

Дослідження факторів, що впливають на показники якості диференційованого внесення мінеральних добрив

ОПП Системи точного землеробства

Спеціальність 208 Агроінженерія

Сумський національний аграрний університет

М. Суми, 2025р.

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 44 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 Р 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 Р 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.

Оскільки властива просторова мінливість вмісту фосфору (Р) у ґрунті в межах поля є значною, технологію внесення фосфору зі змінною нормою (VR) слід застосовувати на невеликих площах (наприклад, 1 м²). Мета цього дослідження полягала в розробці та впровадженні системи удобрення VR на основі датчиків ґрунту для внесення фосфату (P₂O₅) під час посіву

кукурудзи. У передній частині сівалки-аплікатора встановлено робочий видимий (VIS) та ближній інфрачервоний (NIR) датчик ґрунту з діапазоном вимірювань 305–1711 нм для вимірювання Р ґрунту на ходу. раніше розроблена модель VIS–NIR була використана для прогнозування видобутого фосфору (P-ext), а спеціально розроблена програма LabVIEW була розроблена для запису спектрів ґрунту, прогнозування P-ext ґрунту, розрахунку фосфату під час вимірювання на ходу та надання подальше сигнал апарату для внесення добрив, щоб відрегулювати норму внесення.

Менші варіації листя рослин спостерігалися на ділянках з обробкою VR, що, можливо, вказує на кращий розподіл фосфору на ділянках VR. Кількість варіацій листя рослин становила 25% і 31% для ділянок VR і UR відповідно. Однак істотної різниці між графіками VR та UR не було. Урожайність кукурудзи була значно вищою (336 кг/га) і меншою мірою змінювалася на ділянках, які отримували обробку.

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

ABSTRACT

Nesterenko D.A.

Research of factors influencing the quality indicators of differentiated mineral fertilizer application

EP Precision Agriculture Systems

Specialty 208 Agricultural Engineering

Sumy National Agrarian University

Sumy, 2025

The final qualification work is presented on 44 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 purpose of the work is to evaluate the operational system of applying fertilizers with variable rates (VR) when applying phosphate (P₂O₅) during corn sowing using a VIS–NIR sensor for measuring the level of phosphorus P in the soil while driving across the field.

The work reviews literary sources on the topic of research, analyzes research on factors affecting the quality of fertilizer application, and conducts own research to determine the performance indicators of the sowing unit when sowing corn seeds and fertilizers using different approaches.

Since the inherent spatial variability of soil phosphorus (P) within a field is significant, variable rate (VR) phosphorus application technology should be applied to small areas (e.g., 1 m²). The objective of this study was to develop and implement a VR fertilization system based on soil sensors for phosphate (P₂O₅) application during corn planting. A working visible (VIS) and near infrared (NIR) soil sensor with a measurement range of 305–1711 nm was installed at the front of the seed drill applicator to measure soil P on the fly. A previously developed VIS–NIR model was used to predict extracted phosphorus (P-ext), and a custom-designed LabVIEW program was developed to record soil spectra, predict soil P-ext, calculate phosphate during on-the-fly measurements, and provide a signal to the fertilizer applicator to adjust the application rate.

Less variation in plant leaves was observed in the VR treatment plots, possibly indicating better phosphorus distribution in the VR plots. The amount of variation in plant leaves was 25% and 31% for the VR and UR plots, respectively. However, there was no significant difference between the VR and UR plots. Corn yield was significantly higher (336 kg/ha) and varied less in the treated plots.

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

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Стан питання і задачі досліджень.....	9
1.1 Агрономічні аспекти мінерального живлення рослин	9
1.2 Особливості застосування мінеральних добрив	13
1.3 Основні етапи диференційованого внесення добрив.....	15
1.4 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм.....	20
2 Методика експериментальних досліджень.....	23
2.1. Спектрофотометр і сенсор ґрунту на ходу.....	23
2.2 Створення рекомендації щодо фосфорних добрив.....	23
2.3 Опис сенсорного аплікатора для внесення добрив.....	25
2.4 Експериментальні поля та експериментальні випробування.....	26
2.5 Обробка даних під час роботи агрегату.....	27
2.6 Розробка карти для P-ext і фосфату ґрунту.....	31
2.7 Визначення урожайності кукурудзи.....	32
3 Результати досліджень та їх аналіз	33
3.1 Ділянка для відбору проб	33
3.2 Варіації фосфору та фосфатів у ґрунті.....	33
3.3 Витрата добрив.....	34
3.4 Показники росту рослин.....	36
Висновки.....	41
Список використаних джерел.....	42

ВСТУП

Застосування диференційованих способів внесення добрив дозволяє раціонально використовувати дорогі мінеральні добрива, що в порівнянні з традиційним фоновим методом економить значні кошти.

Інвестиції у деякі елементи точного землеробства повертаються вже протягом першого маркетингового року. Наприклад, технологія змінних норм висіву і автоматичного відключення секцій дозволяє здійснювати посів з автоматично-керованими змінними нормами висіву насіння в межах неоднорідних ділянок поля. Це дає можливість досягти оптимальної густоти стояння рослин на різних за властивостями частинах поля, а також ефективно використовувати ресурси та потенціал кожної ділянки поля, зокрема, різні запаси елементів живлення, продуктивної вологи, розподіл світла тощо.

Досвід застосування технології змінних норм висіву насіння в Україні свідчить, що приріст врожаю з поля сягає у середньому до 10% і вище в порівнянні з використанням однієї норми висіву. Застосування технології автоматичного відключення секцій під час посіву кукурудзи дає можливість уникнути перекрыттів і перевищення густоти рослин та дозволяє заощаджувати від 3 до 8% насіння.

Технологія диференційованого внесення добрив дозволяє оптимізувати використання ресурсів до 40%, а в деяких випадках і більше. Навіть перший, найпростіший крок до точного землеробства, який не потребує значних витрат — аналіз ґрунту і картографування його властивостей, дає можливість оптимізувати використання ресурсів і підвищити ефективність технології до 20% і вище.

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Агротехнічні вимоги до внесення мінеральних добрив

Мінеральні добрива відіграють фундаментальну роль у сучасній сільськогосподарській практиці, пропонуючи необхідні поживні речовини для покращення продуктивності сільськогосподарських культур і здоров'я ґрунту. Проте правильне внесення вимагає ретельного дотримання агротехнічних вимог, зокрема підбору добрив, строків, способів внесення та дозування відповідно до особливостей культури та ґрунту. У цьому рефераті викладено технічні та агрономічні міркування, необхідні для оптимального використання мінеральних добрив, зосереджуючись на підвищенні продуктивності сільського господарства, підтримці екологічної стійкості та досягненні цілей щодо родючості ґрунту.

Мінеральні добрива містять поживні речовини, необхідні для росту рослин, зокрема азот (N), фосфор (P) і калій (K), а також вторинні поживні речовини, такі як кальцій (Ca), магній (Mg) і сірка (S). Компенсуючи дефіцит поживних речовин у ґрунті, вони допомагають забезпечити сталість і якість урожаю. Оскільки сільськогосподарські системи стикаються з вимогами підвищення продуктивності через зростання населення, мінеральні добрива стали невід'ємною частиною сільськогосподарських систем у всьому світі. Однак неправильне внесення може призвести до дисбалансу поживних речовин, забруднення навколишнього середовища і навіть зниження врожайності, що підкреслює важливість суворих агротехнічних вимог.

Мінеральні добрива постачають необхідні поживні речовини у формах, легкодоступних для рослин. Азот сприяє вегетативному росту шляхом посилення синтезу хлорофілу, який стимулює фотосинтез. Фосфор життєво важливий для передачі енергії, розвитку коренів, формування квіток і насіння, тоді як калій регулює водний баланс, активацію ферментів і стійкість до хвороб. Збалансоване застосування цих елементів живлення

забезпечує оптимальний ріст рослин, підвищує врожайність і покращує якість врожаю.

Технології точного землеробства ще більше оптимізували використання добрив. Такі інструменти, як тестування ґрунту, дистанційне зондування та обладнання з GPS-навігацією, дозволяють фермерам вносити добрива саме там і коли вони потрібні. Цей цілеспрямований підхід максимізує поглинання поживних речовин, мінімізує втрати та підвищує економічну віддачу.

Мінеральні добрива роблять значний внесок у світову економіку. Вони дозволяють фермерам отримувати вищі врожаї на обмежених площах, зменшуючи потребу в розширенні сільського господарства та зберігаючи природні екосистеми. Підвищення продуктивності веде до підвищення доходів фермерів і знижує ціни на продовольство для споживачів, сприяючи економічній стабільності та боротьбі з бідністю.

Виробництво та розподіл добрив також створює можливості для працевлаштування, підтримуючи такі галузі, як гірничодобувна промисловість, хімічне виробництво та транспорт. Уряди часто інвестують у субсидії на добрива, щоб стимулювати їх використання, особливо в регіонах, де продовольча безпека є гострою проблемою.

Хоча мінеральні добрива мають незаперечну користь, їх неправильне та надмірне використання може призвести до значних екологічних проблем. Надмірний стік азоту та фосфору у водойми викликає евтрофікацію, що призводить до цвітіння водоростей, гіпоксії та втрати водного біорізноманіття. Азотні добрива також є основним джерелом оксиду азоту, потужного парникового газу, який сприяє зміні клімату.

Тривале використання мінеральних добрив без належного догляду може негативно вплинути на стан ґрунту. Безперервне застосування без додавання органічної речовини може призвести до підкислення ґрунту, зменшення мікробного різноманіття та дисбалансу поживних речовин. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, який поєднує

мінеральні добрива з екологічно чистими методами, такими як сівозміна, покривні культури та використання органічних поправок.

Майбутнє мінеральних добрив полягає в інноваціях та стійкості. Добрива підвищеної ефективності (EEF), включаючи добрива з контрольованим вивільненням і стабілізовані добрива, спрямовані на зменшення втрат поживних речовин і покращення екологічних результатів. Ці продукти вивільняють поживні речовини відповідно до потреб культури, мінімізуючи вимивання та випаровування.

Біотехнології також обіцяють зменшити залежність від добрив. Генетично модифіковані культури з покращеною ефективністю використання поживних речовин можуть досягти високих урожаїв із меншим внесенням добрив. Тим часом, прогрес у мікробних інокулянтах, таких як бактерії, що фіксують азот, і грибки, що розчиняють фосфор, пропонують стійкі альтернативи традиційним добривам.

Політика та міжнародна співпраця мають вирішальне значення для сприяння сталому використанню добрив. Програми, які заохочують передові методи управління, інвестують у дослідження та розробки та навчають фермерів екологічним практикам, можуть пом'якшити вплив на навколишнє середовище, зберігаючи продуктивність.

Мінеральні добрива відіграли важливу роль у трансформації сільського господарства, забезпеченні продовольчої безпеки та стимулюванні економічного зростання. Однак їхній екологічний слід вимагає зміни парадигми в бік більш стійких практик. Використовуючи технологічний прогрес, сприяючи політичній підтримці та приймаючи інтегровані стратегії управління поживними речовинами, сільськогосподарський сектор може продовжувати отримувати користь від мінеральних добрив, зберігаючи навколишнє середовище для майбутніх поколінь.

Перед внесенням добрив необхідна ретельна оцінка ґрунту, щоб визначити наявні рівні поживних речовин, рН, вміст органічної речовини та

структуру. Випробування ґрунту виявляє дефіцит або надлишок поживних речовин, керуючи типом і кількістю необхідних добрив. Цю оцінку в ідеалі слід проводити до посіву, щоб забезпечити точне управління поживними речовинами відповідно до потреб ґрунту та культури. Моніторинг стану ґрунту з плином часу допомагає вдосконалити стратегії внесення добрив, сприяючи довгостроковій родючості ґрунту та продуктивності сільського господарства.

Вибір правильного типу добрива має вирішальне значення та залежить від вимог культури, характеристик ґрунту та місцевих екологічних факторів. Азотні добрива (наприклад, сечовина, аміачна селітра) підтримують вегетативний ріст, тоді як фосфорні (наприклад, суперфосфат) сприяють розвитку коренів і передачі енергії. Калійні добрива (наприклад, хлористий калій) покращують водорегуляцію та стійкість до хвороб. Змішані або комплексні добрива, які поєднують N, P і K, часто використовуються для зручності та для відповідності потребам конкретних культур у поживних речовинах. Крім того, можна вносити мікродобрива (наприклад, цинк, бор), якщо дослідження ґрунту вказують на недоліки.

Своєчасне внесення добрив максимізує поглинання поживних речовин і зменшує їх втрати. Як правило, внесення поживних речовин розподіляється на основні етапи росту: перед посадкою, посадкою та після посадки. Наприклад, азот може бути розподілений на декілька внесень протягом вегетаційного періоду, щоб узгодити потреби культури. Фосфор і калій часто застосовують як базові дози через їх меншу рухливість у ґрунті. Відповідність часу внесення добрив із циклами росту рослин зменшує вимивання та випаровування, підвищуючи ефективність поживних речовин і мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

Різні способи застосування впливають на доступність поживних речовин і потенціал втрати. Розкидання передбачає рівномірне розподілення добрив по поверхні ґрунту, що зазвичай використовується для основних поживних речовин і при роботі з великими полями. Техніка внесення, як-от

обробка ґрунту, допомагає помістити поживні речовини глибше в ґрунт, роблячи їх доступними для культур із розгалуженою кореневою системою та зменшуючи втрати на випаровування. Підживлення, метод, коли добрива вносяться біля коренів рослин, особливо ефективний для застосування азоту в просапних культурах. Позакореневе підживлення, інший метод, може постачати мікроелементи безпосередньо до рослин, пропонуючи швидкодійний засіб для усунення симптомів дефіциту, але підходить не для всіх типів поживних речовин.

Визначення правильного дозування має вирішальне значення для уникнення втрат поживних речовин, пошкодження врожаю та забруднення навколишнього середовища. Норми дозування залежать від виду культури, стану ґрунту та планової врожайності. Надмірне внесення може призвести до накопичення поживних речовин, що негативно впливає на структуру ґрунту та якість води. З іншого боку, недостатнє внесення призводить до недостатньої доступності поживних речовин, уповільнення росту культур. Таким чином, для оптимального використання добрива необхідні точні розрахунки дозування на основі аналізів ґрунту та потреб рослин у поживних речовинах.

Мінеральні добрива можуть суттєво впливати на навколишнє середовище, насамперед через стік та вимивання поживних речовин у водойми, що сприяє евтрофікації та забрудненню ґрунтових вод. Зведення до мінімуму втрат добрив і оптимізація ефективності внесення є життєво важливими для зменшення цих ризиків. Найкращі практики включають використання добрив із повільним вивільненням, використання буферних зон біля водойм, інтеграції технологій точного землеробства. Також слід дотримуватися протоколів безпеки під час обробки та зберігання, щоб запобігти випадковому витоку або впливу.

Технології точного землеробства, такі як обладнання з навігацією GPS, картографування ґрунту та сенсорні технології, змінили управління внесенням добрив. Ці інновації дозволяють вносити на конкретну ділянку,

регулюючи норми добрив залежно від мінливості ґрунту та культур на полі. Технологія змінної швидкості (VRT) і дистанційне зондування допомагають оптимізувати використання поживних речовин, що призводить до підвищення врожайності та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Використовуючи ці досягнення, фермери можуть краще узгодити свою практику внесення добрив з агротехнічними вимогами, сприяючи сталому сільському господарству.

Виконання агротехнічних вимог до застосування мінеральних добрив має важливе значення для збалансування продуктивності та здоров'я навколишнього середовища. Ефективне внесення добрив ґрунтується на науковій оцінці ґрунту, обґрунтованому виборі типів добрив, відповідних термінах, методичних техніках внесення та точному дозуванні. Дотримуючись цих вказівок, фермери можуть оптимізувати виробництво сільськогосподарських культур, одночасно зберігаючи ґрунтові ресурси та мінімізуючи ризики забруднення. Майбутні тенденції у внесенні добрив наголошують на інтеграції передових технологій для подальшого вдосконалення управління поживними речовинами, що забезпечує більш стійку та стійку сільськогосподарську практику.

1.2 Роль точного землеробства в управлінні мінеральним живленням

Точне землеробство (РА) здійснило революцію в сільськогосподарському секторі завдяки інтеграції передових технологій для оптимізації виробництва сільськогосподарських культур і використання ресурсів. Управління внесенням добрив, критично важливої складової сталого сільського господарства, зазнало значних покращень завдяки застосуванню методів точного землеробства. У цій статті розглядається роль точного землеробства в підвищенні ефективності добрив, зменшенні впливу на навколишнє середовище та підвищенні загальної прибутковості ферми.

Основним принципом ПА в управлінні добривами є застосування ресурсів на конкретній ділянці, що пристосовує використання добрив до унікальних потреб різних ділянок поля. Такі технології, як GPS, геоінформаційні системи (GIS), датчики ґрунту та супутникові зображення, надають детальні дані про родючість ґрунту, рівень вологості та здоров'я посівів. Ці інструменти дозволяють фермерам визначати просторову мінливість на своїх полях і відповідно коригувати норми внесення добрив. Технологія змінної норми (VRT), зокрема, дозволяє точно вносити добрива на основі реальних чи історичних даних, гарантуючи, що культури отримають потрібну кількість поживних речовин у потрібний час і в потрібному місці.

Однією з головних переваг точного землеробства в управлінні добривами є значне зменшення втрат ресурсів. Звичайні методи внесення добрив часто призводять до рівномірного розподілу, що може призвести до надмірного внесення добрив на одних ділянках і недостатнього внесення добрив на інших. Це не тільки витрачає ресурси, але й сприяє екологічним проблемам, таким як вимивання поживних речовин, стікання та викиди парникових газів. Навпаки, методи РА допомагають мінімізувати ці ризики шляхом оптимізації ефективності використання поживних речовин (NUE). Покращений NUE означає зниження витрат на вхідні ресурси та зменшення впливу на навколишнє середовище, що відповідає цілям сталого сільського господарства та дотриманню нормативних вимог.

Ще однією важливою перевагою є підвищення врожайності та якості. Точне внесення добрив гарантує, що культури отримають оптимальне постачання поживними речовинами на всіх стадіях росту. Це збалансоване забезпечення поживними речовинами сприяє кращому здоров'ю рослин, що призводить до покращення стійкості до шкідників і хвороб і, зрештою, до підвищення врожайності. Крім того, можливість постійного моніторингу та аналізу даних дозволяє своєчасно втручатися, зменшуючи ймовірність

дефіциту поживних речовин або дисбалансу, який може перешкоджати продуктивності врожаю.

Економічний аналіз показує, що точне землеробство пропонує фермерам вигідну віддачу від інвестицій. Незважаючи на те, що вартість початкового налаштування для технологій РА може бути значною, довгострокова економія від зменшення використання добрив, підвищення врожайності та підвищення ефективності використання ресурсів часто переважає ці витрати. Крім того, державні субсидії та заохочення для впровадження стійких методів ведення сільського господарства ще більше знижують фінансові бар'єри для виходу на ринок малих і середніх фермерів.

Незважаючи на свої переваги, впровадження точного землеробства в управління внесенням добрив не позбавлене проблем. Висока вартість передових технологій і потреба в спеціальних знаннях можуть бути серйозними перешкодами, особливо в регіонах, що розвиваються. Крім того, варіабельність темпів впровадження технологій і доступності інфраструктури в різних країнах і розмірах ферм впливає на масштабованість і одноманітність практики РА. Вирішення цих проблем вимагає узгоджених зусиль зацікавлених сторін, включаючи політиків, дослідників і лідерів галузі, щоб забезпечити доступні рішення, навчання та системи підтримки.

Підсумовуючи, точне землеробство відіграє ключову роль у трансформації управління використанням добрив, сприяючи ефективності використання ресурсів, екологічній стійкості та економічній життєздатності. Оскільки глобальний попит на продовольство продовжує зростати, впровадження технологій РА буде мати вирішальне значення для задоволення цих потреб, мінімізуючи вплив сільського господарства на навколишнє середовище. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на розробці економічно ефективних і зручних для користувача технологій, щоб розширити доступ до точного землеробства та максимізувати його переваги в різноманітних контекстах сільського господарства.

1.3 Дослідження технологій внесення мінеральних добрив за технологіями змінних норм

Сільськогосподарський сектор перебуває під зростаючим тиском щодо підвищення продуктивності при мінімізації впливу на навколишнє середовище. Однією з ключових стратегій для досягнення цього балансу є впровадження технологій точного землеробства, включаючи внесення мінеральних добрив із застосуванням технології змінної норми (VRT). VRT дозволяє керувати сільськогосподарськими ресурсами на конкретній ділянці, регулюючи норми добрив на основі просторової мінливості рівнів поживних речовин у ґрунті, потреб культур і умов навколишнього середовища. Цей підхід забезпечує більш ефективне та стале використання добрив порівняно з однорідними методами внесення.

Принцип VRT полягає в його здатності збирати, аналізувати та використовувати просторові дані, зібрані з полів. Джерела даних включають відбір проб ґрунту, картографування врожайності, дистанційне зондування та сенсорні технології в реальному часі. Ці вхідні дані обробляються для створення карт рецептів, які керують обладнанням із змінною нормою внесення. Пристосовуючи внесення добрив до конкретних потреб різних зон поля, VRT оптимізує ефективність використання поживних речовин (NUE), підвищує врожайність сільськогосподарських культур і зменшує ризик вимивання поживних речовин і стоку, що може мати шкідливий вплив на якість води.

Запровадження VRT забезпечує кілька агрономічних та екологічних переваг. З точки зору агротехніки, це забезпечує точне управління поживними речовинами, яке відповідає потребам культури на різних стадіях росту. Це не тільки максимізує потенційну врожайність, але й запобігає надмірному внесенню добрив, яке може призвести до токсичності та зниження якості врожаю. Крім того, VRT підтримує збалансоване внесення добрив, вносячи правильний тип і кількість поживних речовин там, де вони

найбільше потрібні, вирішуючи такі проблеми, як неоднорідність ґрунту та дефіцит поживних речовин.

Екологічно VRT сприяє зменшенню викидів парникових газів і пом'якшує негативний вплив надмірного використання добрив. Закис азоту (N_2O), сильний парниковий газ, є побічним продуктом внесення азотних добрив. Завдяки більш точному застосуванню азоту VRT мінімізує умови, які сприяють викидам N_2O . Крім того, зменшуючи ризик стоку поживних речовин, VRT допомагає захистити водні екосистеми від евтрофікації, явища, спричиненого надлишком поживних речовин у водоймах.

Економічно VRT може призвести до економії коштів для фермерів за рахунок оптимізації використання вхідних ресурсів і підвищення прибутковості за рахунок підвищення врожайності та кращої якості врожаю. Хоча початкові інвестиції в обладнання та програмне забезпечення VRT можуть бути значними, довгострокові фінансові вигоди часто переважають витрати. Економічна доцільність VRT ще більше підвищується в поєднанні з державними стимулами та субсидіями, спрямованими на сприяння сталим методам ведення сільського господарства.

Проте впровадження VRT не позбавлене проблем. Технологія вимагає високого рівня досвіду в зборі, аналізі та інтерпретації даних. Фермерам необхідно інвестувати в навчання та навчання, щоб повністю використати потенціал VRT. Крім того, успіх VRT залежить від точності просторових даних і надійності використовуваного обладнання. Змінність погодних умов і польових операцій також може вплинути на продуктивність систем VRT.

Щоб вирішити ці проблеми, триваючі дослідження та розробки зосереджуються на підвищенні точності та доступності технологій VRT. Досягнення машинного навчання та штучного інтелекту покращують здатність аналізувати великі масиви даних і створювати точніші карти додатків. Крім того, інтеграція VRT з іншими інструментами точного землеробства, такими як автоматизоване обладнання та системи підтримки

прийняття рішень, розширює сферу застосування та ефективність управління поживними речовинами на території.

Внесення мінеральних добрив із застосуванням технології змінної норми є значним прогресом у сталому сільському господарстві. Поєднуючи агрономічні практики з охороною навколишнього середовища, VRT допомагає досягти подвійних цілей підвищення продуктивності сільського господарства та зменшення впливу на навколишнє середовище. Постійний розвиток і впровадження VRT мають вирішальне значення для майбутнього сільського господарства, особливо в контексті глобальних викликів, таких як зміна клімату, деградація ґрунту та зростаючий попит на продукти харчування.

Застосування гранульованих добрив є критично важливим компонентом у сучасному сільському господарстві, який суттєво впливає на врожайність сільськогосподарських культур та здоров'я ґрунту. Однак традиційні методи часто призводять до неефективності, наприклад надмірного або недостатнього застосування, що може негативно вплинути як на економічні, так і на екологічні результати. Інтеграція сенсорних технологій у внесення гранульованих добрив стала трансформаційним підходом, що забезпечує точність і ефективність.

Традиційне внесення добрив базується на картах рецептів або картках, які попередньо розроблені на основі історичних даних, зразків ґрунту та агрономічних моделей. Ці статичні приписи застосовуються рівномірно або змінно на полях, забезпечуючи загальну основу для розподілу поживних речовин. Незважаючи на те, що цей підхід підвищив ефективність використання добрив порівняно з загальним внесенням, він не відповідає мінливості поля в реальному часі та динамічним потребам урожаю.

Навпаки, сенсорні технології внесення добрив працюють у режимі реального часу, використовуючи дані, зібрані безпосередньо з поля під час внесення. Датчики вимірюють такі параметри, як рівень поживних речовин у ґрунті, здоров'я рослин та умови навколишнього середовища, щоб

динамічно регулювати норми добрив. Ці системи можуть включати оптичні, електрохімічні та NIR (ближній інфрачервоний) датчики, встановлені на обладнанні або дронах.

Однією з найважливіших переваг сенсорних технологій є їх здатність надавати дані в реальному часі, що дозволяє динамічно коригувати норми внесення добрив. На відміну від рецептурних карток, які спираються на статичні дані, зібрані тижнями або місяцями раніше, датчики реагують на поточні польові умови. Ця здатність гарантує, що культури отримають точну кількість поживних речовин, які їм потрібні на певних стадіях росту, що сприяє більш ефективному використанню добрив.

Сенсорні технології забезпечують вищу просторову роздільну здатність, ніж рецептурні картки. Хоча карти приписів зазвичай ділять поля на великі зони управління, датчики можуть виявляти дрібномасштабну мінливість у цих зонах. Цей гранульований підхід дозволяє точно вносити добрива, враховуючи мікромінливості родючості ґрунту та здоров'я врожаю.

Сенсорні технології охоплюють широкий спектр пристроїв, включаючи оптичні, ультразвукові та електрохімічні датчики, які надають дані в режимі реального часу про різні агрономічні параметри. Ці датчики можуть вимірювати рівень поживних речовин у ґрунті, вміст вологи та здоров'я врожаю, що дозволяє керувати залежно від місця. Наприклад, оптичні датчики, встановлені на сільськогосподарській техніці, можуть оцінювати силу врожаю шляхом аналізу спектрального відбиття листя. Потім ці дані використовуються для коригування норми внесення добрив, гарантуючи, що кожна ділянка поля отримує оптимальну кількість.

Ґрунтові датчики є ще одним важливим компонентом, який дає змогу зрозуміти стан поживних речовин у ґрунті та рівень вологості. Завдяки інтеграції датчиків ґрунту з технологією GPS фермери можуть створювати детальні карти ґрунту, які керують системами внесення змінної норми. Ці системи регулюють продуктивність розкидача в режимі реального часу, вносячи добрива саме там, де вони потрібні. Ця точність зменшує витрати

на введення та мінімізує стік поживних речовин, який є значним фактором забруднення води.

Крім того, розвиток технологій Інтернету речей (IoT) розширив можливості сенсорних систем. Датчики з підтримкою Інтернету речей можуть передавати дані по бездротовому зв'язку до центральних систем керування, де розширені алгоритми аналізують інформацію та надають корисну інформацію. Це підключення полегшує безперервний моніторинг і прийняття рішень навіть із віддалених місць. Крім того, інтеграція алгоритмів машинного навчання дозволяє проводити прогнозу аналітику, допомагаючи фермерам передбачати потреби в поживних речовинах на основі історичних даних і погодних умов.

Однією з найбільш перспективних розробок у цій галузі є використання датчиків, встановлених на дронах. Безпілотники, оснащені мультиспектральними та гіперспектральними камерами, можуть швидко досліджувати великі площі, надаючи дані високої роздільної здатності про здоров'я врожаю та стан ґрунту. Ця перспектива з повітря доповнює наземні датчики, пропонуючи повне розуміння мінливості поля. Дані, зібрані дронами, можна швидко обробляти, що дозволяє вчасно втручатися та динамічно коригувати внесення добрив.

Переваги використання сенсорних технологій при внесенні гранульованих добрив багатогранні. Економічно вони допомагають зменшити втрати добрив, знижуючи витрати на введення та збільшуючи норми прибутку. З точки зору навколишнього середовища вони сприяють сталим методам ведення сільського господарства, мінімізуючи вимивання поживних речовин і скорочуючи викиди парникових газів, пов'язані з надмірним використанням добрив. У соціальному плані ці технології підтримують продовольчу безпеку, підвищуючи продуктивність сільськогосподарських культур і забезпечуючи ефективне використання ресурсів.

Незважаючи на ці переваги, впровадження сенсорних технологій у внесення гранульованих добрив стикається з кількома проблемами. Високі початкові витрати та складність інтеграції різних технологій можуть стримувати дрібних фермерів. Крім того, ефективність цих систем залежить від точності датчиків і надійності алгоритмів обробки даних. Зусилля докладаються для вирішення цих проблем за допомогою державних субсидій, програм навчання та розробки більш зручних для користувача технологій.

Сенсорні технології представляють собою зміну парадигми в застосуванні гранульованих добрив, узгоджуючи сільськогосподарську практику з принципами точного землеробства. Надаючи дані в режимі реального часу для конкретного місця, ці технології забезпечують більш ефективне та стає використання добрив.

Оскільки технологія продовжує розвиватися, вона має потенціал для революції в сільськогосподарському секторі, забезпечуючи вищу продуктивність і піклування про навколишнє середовище. Майбутні дослідження та інновації матимуть вирішальне значення для подолання поточних обмежень і розширення доступу до цих передових систем для широкого кола фермерів у всьому світі. Мета нашого дослідження полягала оцінці сенсорної системи внесення мінеральних добрив за VRT при внесенні фосфату при посіві кукурудзи. В системі застосовувався оптичний датчик VIS–NIR, який вимірював рівні P у ґрунті при посіві.

2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Спектрофотометр і сенсор ґрунту на ходу

Портативний волоконний спектрофотометр VIS–NIR (*Zeiss Corona 45 visnir 1.7*, Німеччина) з діапазоном вимірювань 306–1711 нм був встановлений на інструментальній панелі сівалки-аплікатора та підключений до датчика ґрунту на ходу. Для вимірювання спектрів відбиття ґрунту. Спектральна роздільна здатність, вибрана в діапазоні 401–1135 нм, становила 3,2 нм, а в діапазоні 1135–1633 нм – 6 нм. Цей інструмент є досить швидким (0,5 с для кожного сканування), точним і міцним, без рухомих частин, що робить його придатним для постійного встановлення на мобільних машинах. Система вимірювання на ходу була розроблена. Вона складається з глибокорозпушувача, який проникає в ґрунт на необхідну глибину, утворюючи траншею, дно якої згладжується за рахунок спрямованих вниз сил, що діють на проникаючий агрегат. Оптичний блок кріпиться на задній стороні глибокорозпушувача для отримання спектрів ґрунту з дна відкритої траншеї. Оптичний блок з'єднаний зі спектрофотометром VIS–NIR за допомогою пари проводів, одне для освітлення, а інше – для детектування світла. Вони були з'єднані разом під кутом 45° у тримачі лінзи.

2.2 Створення рекомендації щодо фосфорних добрив

Випробування фосфору в ґрунті вимірюють здатність ґрунту постачати P у ґрунтовий розчин для використання рослинами, але не вимірюють загальну кількість доступного P. Ці випробування забезпечують індекс P у ґрунтах, який пов'язаний із потребами фосфорних добрив у ґрунті. Взаємозв'язок між індексом P, визначеним за допомогою аналізу ґрунту, та потребою у фосфорних добривах можна визначити за результатами численних дослідницьких випробувань, у яких застосовувалися різні дози фосфатів і вимірювалася врожайність. Якщо

рівень доступного фосфору в ґрунті не є достатнім для оптимального росту культури, потрібно використовувати фосфорні добрива, щоб забезпечити достатню кількість цієї поживної речовини у фазі ґрунтового розчину. У Бельгії застосування базується на рекомендаціях, наданих службою ґрунтів Бельгії. Рекомендації встановлюються на основі тесту P-ext лактату амонію в ґрунті та інших факторів, таких як внесення гною, вапнування, попередній тип культури, рН, дата посіву та інші тести поживних речовин. Поточні рекомендації щодо добрив не розроблені для цілей схеми VR, і існує значний брак експериментальних даних, які підтверджують таке використання рекомендацій. Для внесення фосфатних добрив VR на основі сенсора, модель рекомендацій щодо внесення добрив, розроблена. Ця рекомендована модель фосфату (P₂O₅) у кг/га 1 є результатом поліноміальної регресії, наведеної таким чином:

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

де P_{ext} – P-ext ґрунту в мг 100 г⁻¹. Ця модель була отримана на основі семи рівнів рекомендацій (200, 174, 160, 117, 57, 34, 0 кг/га для значень P-ext <5, 5–8, 8–11, 11–18, 18–30, 30–50> 50 мг/100 г відповідно). Ці дискретні рівні були отримані з безперервної функції для рекомендацій щодо фосфатів для спрощення рекомендацій, оскільки не було жодних можливостей вимірювати на ходу інші фактори ґрунту, важливі для рекомендацій щодо фосфатів. Більшість рівнянь рекомендацій вимагають очікуваної врожайності на додаток до випробування ґрунту. Ця рекомендаційна модель для фосфату (Рівняння (1)) розроблена для врожайності зерна кукурудзи 10 тонн/га. Верхню межу застосування фосфату було округлено до 200 кг/га для будь-якого рівня P-ext у ґрунті менше 3 мг/100г. Рекомендація VR ґрунтувалася на інтервалах по 5 кг/га, що могло принести близько 40 рівнів для внесення P від 0 до 200 кг/га. Отже, кожне значення, визначене для фосфату за допомогою рівняння (1) було округлено до 2,5 кг/га допуску. Для рекомендації UR також було проведено традиційне тестування ґрунту на P-ext. Суміш із 20 зразків ґрунту (з глибини 0,1–0,2 м) на гектар була

підготовлена та проаналізована для рекомендацій щодо фосфату для посіву кукурудзи. Рекомендований результат 30 кг/га для застосування за UR.

2.3 Опис сенсорного аплікатора для внесення добрив

Для впровадження в поле використовували пневматичну просапну сівалку моделі ED352 (AMAZONE) з відділенням для внесення добрив. Норму гранулювання можна було змінювати за допомогою електричного приводу (LINAK & Co), який був виготовлений на пристрої для внесення добрив. Принцип зміни норми ґрунтувався на зміні частоти обертання вала тукоподавальних пристроїв через безступінчатий редуктор. Було розроблено програму з використанням програмування LabVIEW для запуску електричного приводу. Привід регулював швидкість потоку з кроками по 4 кг/га фосфату. Було проведено стаціонарне калібрування для моделювання положення приводу з відповідною нормою внесення добрив. Актуатор позиціонували за допомогою програми LabVIEW з кроком 5 кг/га. Наземне колесо аплікатора оберталося 36,8 разів, щоб імітувати рух вперед, який охоплював 1/40 га, виходячи з окружності колеса, ширини сівалки (3 м) і відповідно до інформації, наданої компанією-виробником (AMAZONE). Гранульоване добриво (потрійний суперфосфат) збирали та зважували для кожного положення приводу. Була виявлена сильна лінійна залежність між положенням приводу та швидкістю внесення потрійного суперфосфату ($R^2 = 0,9$ показує схематичну діаграму системи внесення добрив VR на основі датчика. Датчик ґрунту було прикріплено на 0,91 м попереду вихідних отворів для добрив. Глибокорозпушувач, оснащений оптичним блоком, був прикріплений до планки сівалки, яка була встановлена на триточковій навісці трактора. Глибина 0,15 м дозволила збирати один спектр ґрунту з інтервалами приблизно в 1,3 м під час проходження поля. Цифрова глобальна система позиціонування Trimble 132 AgDGPS використовувалася для визначення координат спектрів ґрунту. Це було зроблено з метою розробки ґрунтової карти виключно як інформаційний

інструмент. Сівалка була налаштована на 100 000 насінин на гектар. На рис. 2 показано агрегат для внесення фосфорних добрив обраний для цього дослідження.

2.4 Експериментальні поля та експериментальні випробування

Поле було підготовлено для посіву кукурудзи. Структура ґрунту була суглинком відповідно до класифікації ґрунтів USDA (табл. 1). Все поле було розділене на дві великі частини площею 12 000 і 3500 м². Перша частина (частина А) мала 48 м на 240 м, а друга частина (частина В) була 48 м на 70 м. Кожна частина була поділена на чотири ділянки шириною 12 м кожна; в результаті чого отримано 2 графіки VR і 2 UR (рис. 3). На кожній ділянці можна було виконати чотири цикли посіву. Під час польового застосування лише ділянки, призначені для обробки VR, отримували норми, рекомендовані вимірюванням ґрунту на ходу. Ділянки UR отримали норму 30 кг/га за допомогою референсних лабораторних вимірювань P-ext, проведених перед польовим випробуванням. Однак той самий збір даних, який використовується для обробки VR, також проводився під час застосування UR. Це включало запис спектрів, фільтрацію, попередню обробку, прогноз P-ext, розрахунок фосфату та запис координат зразка. Це дозволило віртуально оцінити VR застосування фосфату для UR ділянок. На основі інших стандартних аналізів поживних речовин у ґрунті було встановлено рівномірне внесення 180, 150 та 70 кг/га для азоту, калію та магнію відповідно. Щоб оцінити реакцію рослини на застосування фосфату VR, кількість листя рослини підраховували, а також вимірювали врожай під час збору врожаю. З чотирьох тракторних прогонів, які використовувалися на кожній ділянці, лише два середніх (шириною 6 м) використовувалися для збору даних з метою порівняння.

Дві 3-метрові смуги з кожного боку були залишені, щоб усунути взаємодію між внесеннями VR та UR. Кожне поле, включно з чотирма рядами культур, було поділено на сегменти довжиною 20 м. Один сегмент

був випадковим чином обраний з кожних чотирьох суміжних сегментів, оскільки сівалка була 4-рядною. Нарешті, загалом 52 сегменти були відібрані на полі для відбору зразків рослин. Для порівняння між VR та UR кількість листя рослини підраховували у вибраних сегментах. Цей показник вимірювали через 15 днів після посіву. Вплив режиму застосування (рівномірного або змінного) на ріст рослин досліджували за допомогою багатofакторного дисперсійного аналізу, розглядаючи кількість рослин, що мають 3, 4 та 5 листків, як змінні відповіді. Лямбда Вілкса була використана для оцінки значущості режиму застосування. Лямбда Вілкса — це тестова статистика, яка використовується в багатовимірному дисперсійному аналізі, щоб перевірити, чи існують відмінності між середніми значеннями ідентифікованих груп суб'єктів за комбінацією залежних змінних.

Індивідуальні однофакторні результати одностороннього дисперсійного аналізу використовуються лише в тому випадку, якщо виявляється значний загальний вплив на основі лямбда Вілкса.

2.5 Обробка даних під час роботи агрегату

Портативний комп'ютер використовувався для керування інструментами через два послідовних порти RS232, перший для контролю швидкості застосування, а другий для отримання сигналів від приймача DGPS. Крім того, для зв'язку зі спектрофотометром використовувалася інтерфейсна карта PCMCIA (Міжнародна асоціація карт пам'яті персонального комп'ютера). З використанням мови програмування LabVIEW розроблено програму на замовлення.

Початкова функція програми полягала в записі спектрів відбиття ґрунту від 305 до 1711 нм. Схема фільтрації була включена в програму для фільтрації неґрунтових спектрів на основі значення прогнозованого R-ext. Попередня спектральна обробка була виконана програмою (див. нижче). Після передачі кожного спектру відбиття ґрунту шум на обох краях був урізаний, а спектральний діапазон зменшено до 401–1663 нм, діапазону,

який використовувався для встановлення моделі калібрування P-ext. Цей шум пояснюється технічною проблемою, пов'язаною з цими довжинами хвиль на більшості доступних спектрофотометрів.

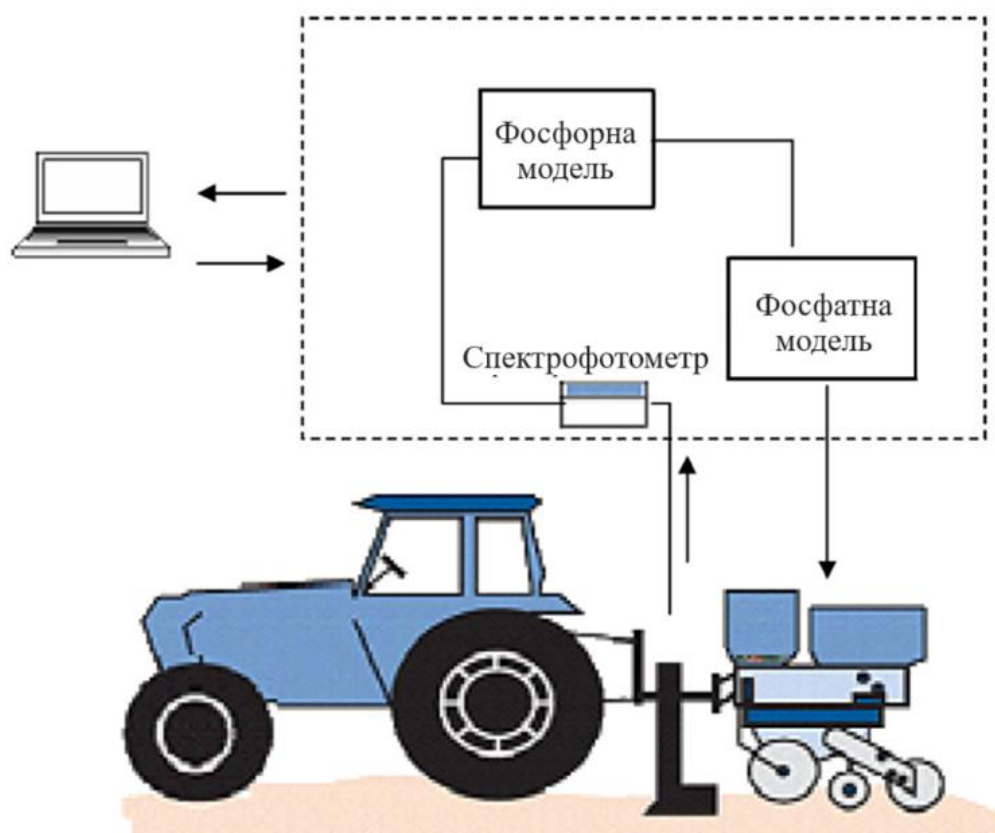


Рис. 1 - Схематична діаграма VR-аплікатора на основі датчика ґрунту
Програма виконала ті ж самі етапи попередньої обробки спектрів, що й ті, які використовувалися під час створення моделі калібрування P-ext. Цими етапами попередньої обробки були, відповідно, максимальна нормалізація та перше виведення Савіцького–Голя. Модель P-ext ґрунту також була включена в програму LabVIEW для прогнозування P-ext ґрунту. Спрогнозувавши P ґрунту, рекомендовану кількість фосфату можна розрахувати за допомогою 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; (с) антена DGPS; (d) електричний привід і (е) колесо для закриття борозни, зробленої глибокорозпушувачем

Кожне середнє десяти послідовних зразків було використано для пом'якшення високої мінливості між послідовними зразками Р-ext ґрунту під час проходження поля.

З цією метою інформацію про ґрунт було оновлено шляхом сканування нового спектру ґрунту та видалення найстарішого з вікна усереднення. Варто зазначити, що на початку кожного циклу поля значення одного прогнозованого Р-ext враховувалося для першої комірки, а при подальшому проходженні по полю середнє значення два, три тощо, і нарешті десять було прийнято для компіляції даних.

У випадках, коли сталася помилка в зборі спектрів або неправильне передбачення прогнозованого Р, попереднє значення можна було відновити для розрахунку нової рекомендованої норми Р. Неправильний прогноз може

бути спричинений скануванням матеріалів, які не є ґрунтом, а також неочікуваною вібрацією трактора під час руху.

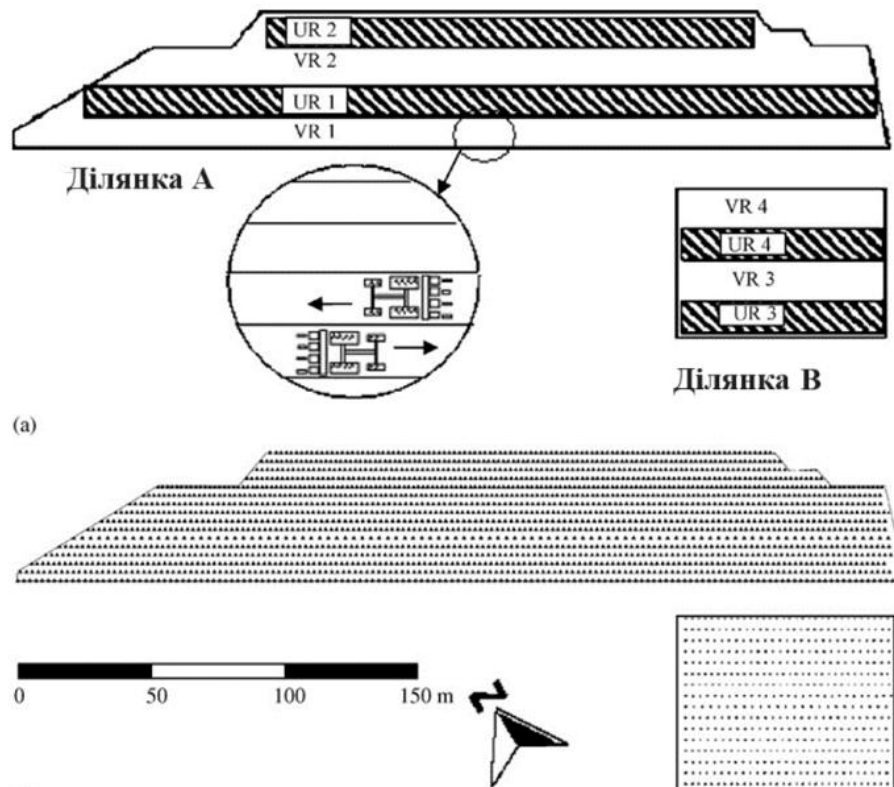


Рис. 3 - (а) Схематична діаграма експериментального дизайну двох частин поля; заштриховану ділянку відводили для рівномірного нанесення фосфату; кожна ділянка містить чотири ряди посіву та загалом 16 рядків кукурудзи; (б) положення кожного спектру ґрунту, отриманого аплікатором у двох частинах; VR і 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)	
Percentage	14,34	4,18	11,79	32,35	37,34

Програма також дозволяла записувати координати зразка ґрунту для розробки Р-карти, щоб вказати варіацію Р-ext, наявну в полі під час посіву, а також рівень застосованого фосфату. Кожній клітинці для відбору зразків (рис. 4) площею приблизно 4 м² було призначено рівень фосфату відповідно до рівня Р-ext, отриманого для будь-якої заданої області, а також середнього

значення рівня P-ext, передбаченого для останніх дев'яти клітин. Оскільки контролер аплікатора не міг регулювати нульове внесення добрив (0 кг/га), клітини, які не мали отримувати добрива, отримували замість цього 0,5 кг/га. Області, де рівень фосфору в ґрунті був меншим за 3 мг/100г, отримували 200 кг фосфату на 1 га.

2.6 Розробка карти для P-ext і фосфату ґрунту

Координати сканування ґрунту, записані DGPS, були перетворені в систему координат Ламберта за допомогою програмного забезпечення P7 версії 1.02 для отримання метричних значень. Програмне забезпечення Surfer 8.00 використовувалося для розробки карт P-ext і фосфатів ґрунту.

Сітку інтерполювали за допомогою методу зворотного зважування відстані (IDW). Інтерполятор IDW обчислює значення для комірок сітки по всій області відображення. Кожна точка даних із вихідної матриці, яка враховується при обчисленні значення комірки, зважується за її відстанню від центру комірки. Оскільки інтерполяція є зворотним обчисленням відстані, чим далі точка від комірки, тим менше її значення впливатиме на результуюче значення комірки.

Розмір інтерполяційної сітки всіх карт мав радіус 25 м і ступінь 2. Однак для тих карт, розроблених на основі даних фактичного застосування (фосфат), радіус було зменшено до 2,8 м (менше ширини сівалки 3 м, щоб мінімізувати ефект інтерполяції на межі між графіками VR і UR. Карти P-ext ґрунту були розділені на дві групи, одна була розроблена на основі індивідуальних P-ext, записаних для кожної клітинки, а інша використовувала середнє значення десяти послідовних значень P-ext (за допомогою програми LabVIEW).

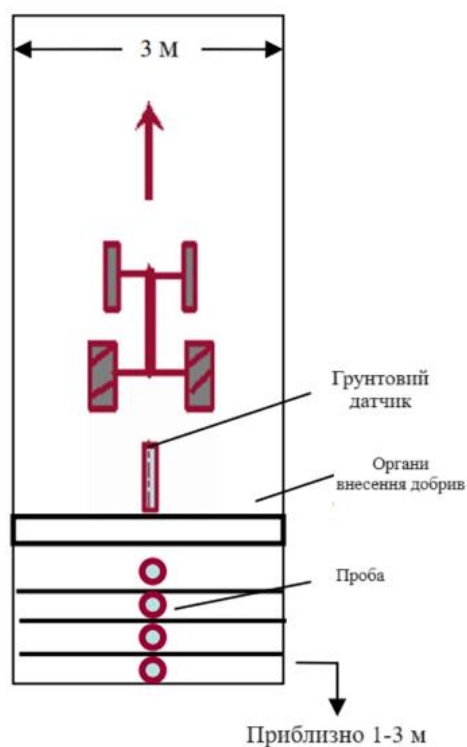


Рис. 4 – Схематична діаграма розміру комірки для вибірки

Фактичні карти застосування фосфату, які регулювались аплікатором VR, були розроблені на основі середнього значення десяти послідовних прогнозованих значень P-ext.

2.7 Визначення урожайності кукурудзи

В ідеалі ширина обробних ділянок повинна бути в один або два рази більшою за ширину жатки на комбайні, який використовується для збирання. Жатка кукурудзяного комбайна, яка використовувалася для збирання, мала ширину 6 м (CR 960 NewHolland). Тому для посіву кукурудзи на кожній ділянці було використано трактор (з шириною сівалки 3 м). Урожайність вимірювали за допомогою комбайна, оснащеного датчиком безперервного потоку зерна, який дозволяє контролювати мінливість врожайності. Просторову мінливість врожайності кукурудзи реєстрували на ходу. Датчик потоку зерна комбайна міг фіксувати врожайність щосекунди. Інформація про врожайність тільки для 6-метрової смуги в середині ділянок була записана, а решта (3 м з кожного боку) була проігнорована.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Ділянка для відбору проб

Співвідношення кількості записаних під час посіву ґрунтових спектрів до загальної площі поля продемонструвало, що один спектр приблизно знімався на кожних 4 м² (ширина захвату агромашини 3 м помножена на шлях приблизно в 1,3 м). Загалом отримали 2500 проб на кожен гектар. Відсоток відібраних проб для *VR (VRPS)* відносно одиниці площі (1 м²), що був визначений критерієм вибірки *VR*, в нашому дослідженні складав 25%.

Як показав аналіз якості зафіксованих на ходу спектрів ґрунту, приблизно 10 - 15% з них були зафіксовані погано, що пояснюється двома головними причинами. По-перше, тонкі налаштування ґрунтового сенсора потрібно було проводити разом із налаштуваннями посівної машини. Поверхня ґрунтового сенсора має займати горизонтальне положення при русі по борозні. По-друге, на ці регулювання здійснює вплив вібрація трактора при русі по поверхні ґрунту. Також, якість передпосівної підготовки ґрунту має вплив на сигнали від датчика. На декількох ділянках дослідного поля підготовка ґрунту була неналежною, зокрема спостерігалась наявність великих грудок та значна нерівномірність поверхні. На таких ділянках поля спостерігалися певні шумові спектри ґрунту.

3.2 Варіації фосфору та фосфатів у ґрунті

Змінні рівні *P-ext* по всій площі поля, виражались коефіцієнтом варіації (*CV*), який становив від 5 до 51%. Мінімальний та максимальний вміст *P-ext* становив 9/100 та 70/100 мг/г на всіх ділянках. Це показує на високе варіювання вмісту *P* по всьому полю загальною площею 1,55 га. Зафіксовані значення вмісту *P* охопили майже всі класи інтерпретації досліджень ґрунту.

У табл. 2 підсумовано однофакторну статистику вмісту фосфатів, зареєстровану на всіх ділянках як з VR так і з UR. Потрібно відмітити, що тільки ділянки, призначені під внесення за технологією VR, отримали змінні норми на основі даних зафіксованих на ходу, а на інші вносили середню норму 30 кг/га. Рис. 5 відображає варіативність фосфату в 170 послідовних клітинках для взяття проб, що збиралися вздовж відстані 225 м на полі А, взятому як приклад: на цій відстані норма внесення фосфату змінювалась 17 разів та перебувала в межах 5 - 30 кг/га.

Для відображення просторової змінності Р-ехт були розроблені дві карти вмісту: одна на основі індивідуальних прогнозованих значень Р-ехт, а друга – на основі середнього значення десяти неперервних сканувань (рис. 6 та 7). Схожість цих двох карт доводить, що середні значення 10 прогнозованих послідовних величин Р-ехт можна застосувати при адаптації норми внесення добрива. Інтервали просторової варіації, отримані такими двома методиками були також дуже схожі. Попри невеликий розмір досліджуваних площ (12000 і 3500 м²), істотні варіювання вмісту Р було виявлено на всій площі. Вони коливалися в межах 9-70 та 16- 70 мг/100 г для ділянок поля А і В відповідно. На рис. 8 та 9 показані карти-приписи, побудовані для внесення фосфорних добрив для ділянок А і В відповідно. На рис. 8(а) і 9(а)] наведені карти завдання на внесення фосфатів, а карти фактичного внесення показано на рис. 8(б) і 9(б). На карті фактичного внесення для VR-ділянки отримано різні норми, так як система працювала через прогнозування Р-ехт ґрунту під час руху агромашини по полю, а на UR-ділянки вносили заздалегідь визначену норму 30 кг/га. Різні норми на границях ділянок UR були спричинені інтерполяцією даних при генерації карти.

3.3 Витрата добрив

Одним з найважливіших параметрів для порівняння внесення VR і UR є фактично отримані норми внесення добрива. Чимало дослідів вказує, що

застосування змінних норм має потенціал для зменшення фактичної норми на ділянках, де підживлення з однаковою нормою спричинить перевитрату добрив.

На площах, відібраних для внесення середньої норми, вносилося 30 кг/га; під *P – ext* мається на увазі екстрагований амоній-лактат фосфору.

Отримана фактична норма внесення на основі всіх прогнозованих значень вмісту *P-ext* становила 45,2 мг/100г, що дещо менше, ніж результати визначені стандартними методиками, які становили 51,0 мг/100г. Для поля з вищим рівнем фосфору було продемонстровано, що при збільшенні кількості вимірювань для усереднення, середня розрахована норма внесення добрив буде зменшуватись. Оскільки 2500 значень було отримано з усього поля, прогнозувалося, що середнє значення вмісту *P* для ґрунту буде меншим. В такому випадку, при результатах вологого аналізу визначено вміст 51,0 мг/100г не рекомендовано вносити фосфат з UR Краще уникати внесення фосфату для значень *P-ext* вище 50мг/100г.

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	Sep.		Min	Max	Sep.	
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

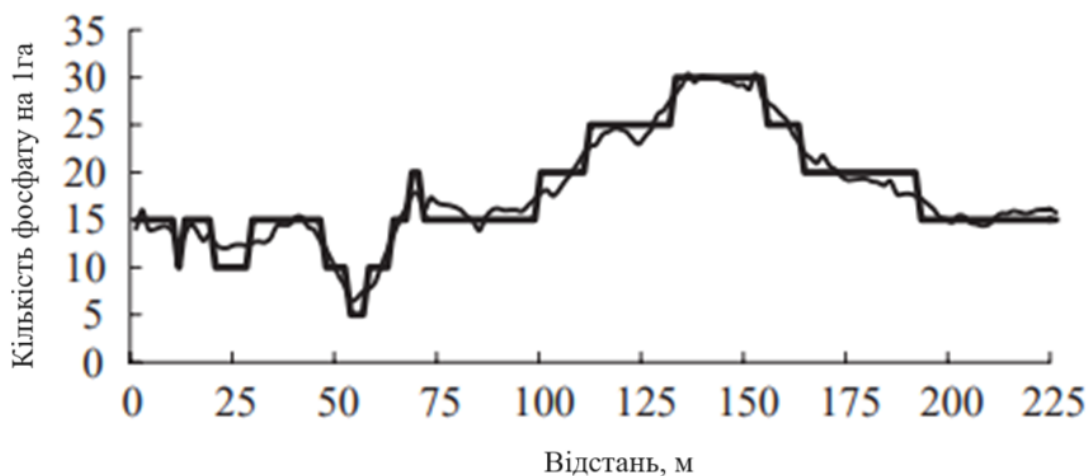


Рис. 5 – Порівняння теоретично визначеного фосфату (тонка крива) і фактичного (жирна крива) внесення фосфату, класифікованого на 5 кг/га інтервалів за один польовий цикл, взятий як приклад

Загальна середня кількість добрив, застосованих на ділянках VR, становила 28,75 кг/га, що на 1,25 кг/га нижче, ніж застосування UR, рекомендоване стандартним випробуванням ґрунту. Однак середня фактично рекомендована кількість фосфату з використанням усіх даних P-ext, зібраних на ділянках UR, становила 25,1 кг/га, що на 4,9 кг нижче рекомендованого внесення (30 кг/га), що свідчить про надмірне внесення добрив за середньою нормою. Внесений фосфат коливався від 0 до 100 кг/га на ділянках VR (Таблиця 2), тоді як віртуальне внесення фосфату на ділянках UR становило від 0 до 150 кг/га.

3.4 Показники росту рослин

Щоб забезпечити оптимальний ріст рослин, у ґрунт необхідно внести достатню кількість фосфору. Дефіцит P може уповільнити розвиток коренів і, як наслідок, ріст рослин. Деякі дослідники показали, що між розвитком кореня та стадією листка рослини існує лінійний зв'язок.

Після посіву кукурудзи та застосування фосфату на ділянках VR та UR листя рослин підраховували, коли рослини були переважно на стадії 4 листків, через 2 тижні після посіву. Був проведений статистичний аналіз, щоб перевірити будь-яку різницю між двома обробками (UR і VR) для 3, 4 і

5 листків. Лямбда Вілкса показала, що режим застосування (VR або UR) не мав істотного впливу на кількість рослин, які мають 3, 4 або 5 листків. Як наслідок, індивідуальні відмінності (для 3, 4 і 5 листків) не аналізувалися.

Однак рослини з 4 листками показали меншу варіацію на ділянках, призначених для обробки VR, порівняно з тими, які були призначені для обробки UR. CV для ділянок VR і UR становив 24,7% і 31,04% відповідно, що може вказувати на деяку реакцію рослини на внесення фосфору з використанням удобрення VR, що, можливо, свідчить про кращий розподіл фосфору.

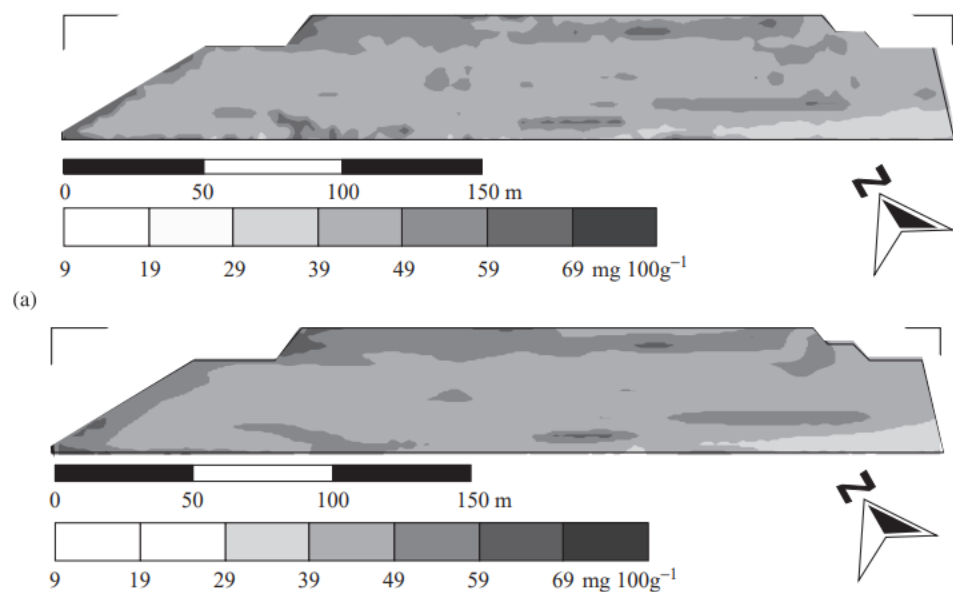


Рис. 6 – Карти Р-ехт ґрунту частини А поля з використанням окремих Р-ехт (а) та середнього 10 послідовних значень Р-ехт (б)

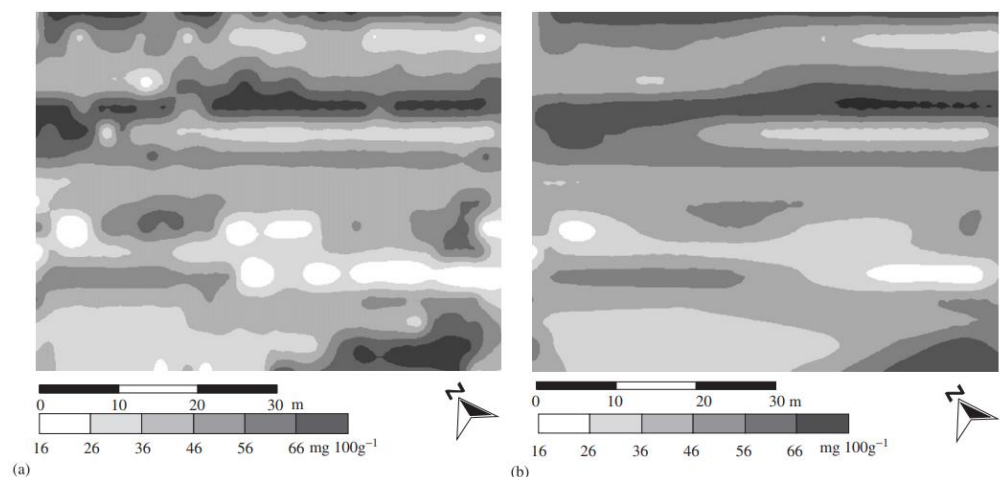


Рис. 7 – Карти Р-ехт ґрунту частини В поля з використанням окремих Р-ехт (а) та середнього 10 послідовних значень Р-ехт (б)

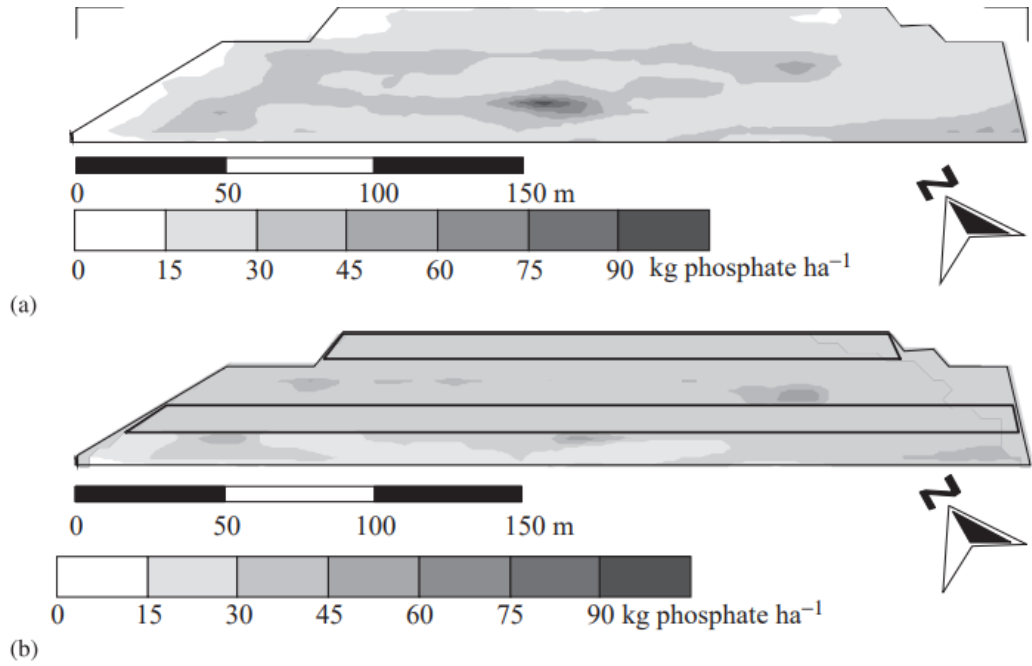


Рис. 8 – Рекомендована (а) і застосована (б) фосфатна карта частини А поля, яка була створена з використанням середнього десяти послідовних прогнозованих Р-ехт у напрямку руху трактора; ділянки, призначені для рівномірної норми внесення (30 кг/га), позначені багатокутниками в (б)

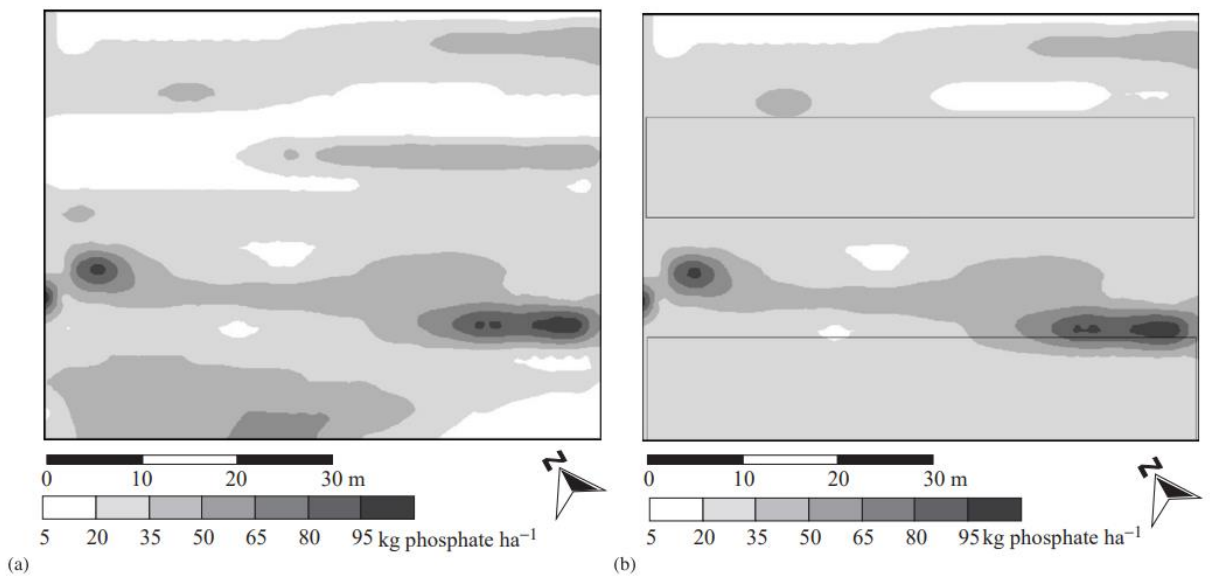


Рис. 9 – Рекомендована (а) і застосована (б) фосфатна карта частини В родовища, яка була створена з використанням середнього значення 10 послідовних прогнозованих Р-ехт у напрямку руху поля; ділянки, призначені для рівномірної норми внесення (30 кг/га), позначені багатокутниками в (б)

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

Деякі дослідження показали, що агротехнічні культури реагуватимуть на внесення фосфорних добрив, якщо рівні фосфору в ґрунті знаходяться в дуже низьких, низьких і середніх межах. В експериментальному полі цього дослідження рівень P-ext був високим (45,21 мг/100г на основі даних, зібраних за допомогою датчика ґрунту, і 51 мг/100г на основі вологого аналізу) і, відповідно, реакція рослин на P внесення очікується низькою.

На врожайність може впливати багато факторів, і проведення будь-яких експериментів для порівняння VR та UR без урахування інших

параметрів може призвести до неправильних висновків. Середні показники врожайності ділянок VR та UR становили 8187 та 7851 ц/га відповідно.

Після проведення дисперсійного аналізу Велча помітно значну різницю між графіками VR і UR на 5% рівні ймовірності. Це могло бути пов'язано з високою варіацією Р ґрунту, доступною на дослідних ділянках. У таблиці 3 наведено результати врожайності кукурудзи на дослідних ділянках. Схоже, що при використанні підходу VR спостерігається деяке послаблення просторової мінливості. Це проілюстровано CV врожайності, яка нижча для ділянок під обробкою VR. У таблиці 4 показано вплив обробки ВР на ділянках на кількість листя рослин і врожайність культури. Варіація послаблюється за допомогою застосування VR. Проте ділянки UR1 і UR4 показали CV 25% (Таблиця 3), що пояснюється отриманням UR внесення 30 кг/га, що відповідає майже всім дефіцитам Р на цих експериментальних ділянках. Потреби у фосфорних добривах для цих ділянок становили 27,1 і 22,6 кг/га відповідно, які були оцінені на основі даних, зібраних під час вимірювання на ходу.

ВИСНОВКИ

Досліджено систему внесення фосфору (P) зі змінною нормою (VR) у видимому (VIS) та ближньому інфрачервоному (NIR) ґрунтовому датчику. Оперативна система внесення добрив могла оновлювати норму внесення P на кожні 3 м² під час руху по полю. Просторова мінливість поля була успішно відстежена на основі 2500 зразків ґрунту, взятих з гектара за допомогою датчика ґрунту, що працює на ходу. Ці дані можна легко використовувати для зміни внесення фосфату під час руху по полю.

Урожайність сільськогосподарських культур і кількість листя рослин показали меншу варіацію на ділянках, призначених для обробки зі змінною нормою (VR), порівняно з ділянками з рівномірною обробкою (UR). Не було виявлено істотної різниці між кількістю листків рослин як на ділянках VR, так і на UR. Це могло бути пов'язано з початково високим рівнем P у полі. Проте врожайність ділянок, які отримали режим VR, була значно вищою, ніж режим UR. Хоча VR застосування фосфату не вплинуло суттєво на листя рослин, корекція просторової варіації P для рівномірного росту рослин може бути кінцевою метою застосування VR. Це може вплинути на ефективність поля з часом. Отримання відносно рівномірного врожаю вимагає кількох років, після чого можна досягти найбільшої користі від VR застосування P.

Коефіцієнт варіації (CV) P-ext, виміряний на ходу, становив від 5% до 51%, тоді як варіація фосфату коливалася від 36% до 76% на експериментальних ділянках.

Середня кількість фосфату, застосованого на ділянках VR, становила 28,75, що на 1,25 кг/га менше ніж UR (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 досліду 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.; Pecyna, A.; 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