

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 впливу елементів систем точного землеробства на показники якості внесення твердих мінеральних добрив»

Виконав:

_____ (підпис)

Васільєв С.В.

_____ (Прізвище, ініціали)

Група:

СТЗ 2301-1м ВН

(Науковий) керівник:

_____ (підпис)

Лебедєв А.Т.

_____ (Прізвище, ініціали)

Суми – 2024

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 42 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 4 таблиці, 9 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Ключові слова: МІНЕРАЛЬНІ ДОБРИВА, ЯКІСТЬ ВНЕСЕННЯ, НОРМА ВНЕСЕННЯ, ФОСФОРНІ ДОБРИВА, ТЕХНОЛОГІЯ ЗМІННИХ НОРМ.

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.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Стан питання і задачі досліджень.....	7
1.1 Агрономічні аспекти мінерального живлення рослин	7
1.2 Особливості застосування мінеральних добрив	11
1.3 Основні етапи диференційованого внесення добрив.....	13
1.4 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм.....	18
2 Методика експериментальних досліджень.....	21
2.1. Спектрофотометр і сенсор ґрунту на ходу.....	21
2.2 Створення рекомендації щодо фосфорних добрив.....	21
2.3 Опис сенсорного аплікатора для внесення добрив.....	23
2.4 Експериментальні поля та експериментальні випробування.....	24
2.5 Обробка даних під час роботи агрегату.....	25
2.6 Розробка карти для P-ext і фосфату ґрунту.....	29
2.7 Визначення урожайності кукурудзи.....	30
3 Результати досліджень та їх аналіз	31
3.1 Ділянка для відбору проб	31
3.2 Варіації фосфору та фосфатів у ґрунті.....	31
3.3 Витрата добрив.....	32
3.4 Показники росту рослин.....	34
Висновки.....	39
Список використаних джерел.....	40

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 Агрономічні аспекти мінерального живлення рослин

Фізіологічна й агрохімічна школа мінерального живлення рослин поєднує в єдине ціле енергетичні потоки абіотичної та біотичної природи в ґрунтовому середовищі, які можуть бути природною властивістю, що не підлягають усвідомленому регулюванню (тепло, світло, механічний і гранулометричний склад ґрунту та ін.), та контрольовані людиною чинники у вигляді добрив, стимуляторів росту, ґрунтової біоти, зрошення, осушення тощо.

Культурні рослини завдячують своїми процесами росту як природним, так і регульованим потокам енергії. Створення комфорту для їх розвитку в обробітку ґрунту, мінеральному живленні, боротьбі з бур'янами і хворобами дає імпульс для встановлення таких систем землеробства, які відповідають рівню технічного прогресу і культури суспільства. В подальшому у дію вступають закони фізіології, біохімії росту і розвитку культур та пристосування до них найперспективніших технологій. На сьогодні таким вимогам відповідає відновлювана система удобрення, що передбачає оптимізацію мінерального живлення рослин з урахуванням біологічних властивостей сільськогосподарських культур та ґрунтово-кліматичних умов.

Функції мінерального живлення рослин виконує не тільки коренева, але й листкова поверхня рослини, яка здійснює процеси фотосинтезу. Через листкову поверхню можливе надходження до рослини хімічних елементів і сполук, що помітно впливають на ріст та розвиток рослин. Інтенсивність цього процесу залежить від абіотичних і біотичних чинників навколишнього середовища – температури повітря, вологості ґрунту, концентрації CO₂, віку рослини. На цьому принципі побудовано технологію позакореневого підживлення вегетуючих рослин хелатними розчинами, макро- і мікроелементами та стимуляторами росту. Ці препарати у малих дозах

забезпечують високий ефект у сівозміні на урожайність сільськогосподарських культур.

Відновлювана система землеробства передбачає обов'язкове залучення до позакореневого удобрення розчинів макро- і мікроелементів та стимуляторів росту, виготовлених на органічній основі. Застосування бактеріальних препаратів для оброблення насіння та позакорневих підживлень розчинами макро- й мікроелементів і стимуляторами росту забезпечує можливість підвищення продуктивності сівозміни [8]. У сучасних уявленнях щодо мінерального живлення рослин надається значна увага утворенню на коренях рослин мікоризи – симбіозу кореневої системи з деякими ґрунтовими грибами [11].

Взагалі абіотичні і біотичні чинники забезпечують біологічну активність ґрунтів – сумарне поняття, яке включає кількісний і видовий склад мікрофлори, 3. Агрономічні аспекти мінерального живлення рослин 15 ферментативну активність, дихання, а також амоніфікуючу, нітрифікуючу і азотфіксувальну здатність ґрунту.

Раціональне застосування добрив, з метою оптимізації мінерального живлення рослин, передбачає рівень родючості і окультурення ґрунтового покриву. Розрахунок оптимальних доз мінеральних добрив прийнято виконувати для ґрунтів за середнього забезпечення основними елементами живлення. В той самий час ґрунтовий покрив України відзначається дефіцитом азоту на всіх землях в обробітку. Площі ґрунтів з низьким вмістом рухомого фосфору за результатами VI туру агрохімічного обстеження (1991–1995 рр.) становили 8,3% обмінного калію – 7,6%, підвищеним – відповідно 27,9 і 33,1%. Середньому рівню забезпечення P2 O5 відповідає 44,5 і K2 O – 23,6% площі земель в обробітку.

У зв'язку зі строкатістю потенційної родючості ґрунтового покриву та необхідністю одержання гігієнічно чистої продукції для дитячого і дієтичного харчування розроблено критерії з надання статусу спеціальної сировинної зони та контролю за її використанням. Інститутом агроекології і

природокористування НААН визначено, що для ґрунтів середнього гранулометричного складу вміст азоту за нітрифікаційною здатністю повинен становити понад 15 мг NO₃ /кг ґрунту, рухомого фосфору (за Кірсановим або Чириковим) – понад 100 мг/кг, за Мачигінім – 30 мг/кг, рухомого калію, відповідно 120 і 80 мг/100 г ґрунту [13]. Тобто якісні показники повинні відповідати середнім значенням за забезпеченням ґрунту азотом, фосфором і калієм. Сприятливий агрохімічний фон для вирощування сільськогосподарських культур, крім поживного режиму, визначається і реакцією ґрунтового розчину. На ґрунтах із кислою або лужною реакцією урожайність у 1,6–2 рази нижча порівняно з вапнованим фоном [12].

Відсутність хімічної меліорації таких земель може знівелювати будь-які технології і досягнення урожайності рослин до низьких показників через несприятливе середовище ґрунтового розчину. На сильноокислих ґрунтах (рН_{сол.} < 4,5) «запрограмовано» зниження урожайності на 0,34, на середньоокислих – до 0,26 т/га зернових одиниць і таке саме підвищення урожайності – лише за проведення вапнування. Тому планування оптимізації мінерального живлення рослин є багатофакторною проблемою, де знання ґрунтових умов і фізіології формування врожайності ідуть поруч.

Вступивши у фазу росту рослина активно поглинає поживні елементи, які у сотні разів перевищують швидкість дифузії та осмосу. Так, вуглекислота від кореня до листя пересувається за 10–15 хв. Ще швидше надходять до кореневої системи елементи живлення, включаючи і внесені з добривами в ґрунт. Надходження 16 3. Агрономічні аспекти мінерального живлення рослин міченого фосфору (P32) від коренів до листка становить 2 хв. Основою мінерального живлення рослин є катіонний обмін, при якому внаслідок процесу дихання на поверхні кореневих волосків виникають нові порції H⁺ і HCO₃⁻, що спонукає K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, NH₄⁺ негайно вступати в обмінну реакцію, витісняючи з поверхні волосків H⁺. Аніони NO₃⁻, H₂PO₄⁻, SO₄⁻, обмінюються і витісняють у розчин HCO₃⁻. Поживні речовини

надходять у рослину не лише пасивно, але й активно, процес мінерального живлення рослин не лише фізичний, а й фізіологічний.

Рослині притаманна вбирна здатність до більшого споживання тих елементів, які їй потрібні, і меншого – тих, які не є необхідними. В житті рослини визначають періоди її розвитку – критичний, який часто спостерігається на початкових фазах росту, і період максимального споживання поживних речовин, що визначає важливість диференційованого застосування азотних добрив, як мобільної частини мінерального живлення рослин.

Важлива роль добрив у процесах раціонального споживання рослиною води. Як правило, вони знижують її витрати на одиницю врожаю на 10–20% порівняно з фонами без добрив. Щодо застосування добрив, зокрема, азотних, існують чинники, що визначають їх ефективність: 1) зовнішні чинники – рівень вологи, забезпеченість іншими макро- і мікроелементами; 2) внутрішні фізіологічні чинники – активність ферментів, відповідальних за первинне засвоєння мінерального азоту, нагромадження проміжних продуктів азотного обміну, транслокація сполук та гормональний обмін.

Специфічність азотного живлення в тому, що для рослини діапазон оптимального його засвоєння досить вузький і для неї можуть бути шкідливими як нестача так і надлишок цього елемента. Внесення фосфору у значних кількостях менше впливає на рослину, і тому фосфорні добрива рекомендують вносити «в запас» на декілька років. Однак процес зафосфачування ґрунту є небажаним, адже тоді виникає дефіцит у живленні рослин залізом і мікроелементами внаслідок зв'язування їх у нерозчинні сполуки. Визначено, що ефективність локального внесення фосфорних добрив пов'язана з контактуванням незначної частини кореневої системи з легкодоступною фосфорною кислотою, зосередженою у підвищеній концентрації локально. Ось чому коефіцієнт використання поживних речовин найвищий за рядкового або локального внесення добрив. Відомо,

що за посилення азотного живлення рослин наростання надземної частини відбувається більше, ніж кореневої системи. Так, у польових дослідах з кукурудзою встановлено, що у фазі цвітіння за внесення 67 кг/га N довжина коренів була на 69% більшою, ніж за дози азотних добрив 224 кг/га N. 3.

Поглинання рослинами азоту відбувається за участю нітратредуктази (НР) переважно у нітратній формі [18]. У кореневій системі відбувається відновлення нітратів до аміаку, який використовується на утворення амінокислот і амідів та у формі цих органічних сполук надходить в надземну частину рослин. За надлишкового азотного живлення НР не може впоратись з відновленням нітратів, і тоді у вегетативних органах, а також соковитих плодах нагромаджується значна кількість нітратів, які можуть бути шкідливими для людини і тварин. У цьому напрямі для фізіологів є перспективним напрям наукових досліджень із пошуку підвищення активності НР за регламентованого застосування добрив.

Активність ферменту нітратредуктази виявляється «вузьким місцем» в ланцюгу трансформації неорганічного азоту, обмежуючи ефективно застосування підвищених доз азотних добрив. Відсутність очікуваної ефективності від застосування високих доз мінеральних добрив за інтенсивного ведення сівозміни пов'язано з комплексом причин: 1) підвищення концентрації ґрунтового розчину, 2) порушення оптимального співвідношення хімічних елементів у ґрунтовому середовищі, що виникає за високих концентрацій; 3) недостатня водозабезпеченість; 4) нестача вуглекислого газу в процесі вуглецевого живлення рослин; 5) надлишкове розростання вегетативної маси надземної частини рослин, що знижує інтенсивність фотосинтезу та призводить до вилягання злакових культур; 6) розвиток хвороб і шкідників.

1.2 Особливості застосування мінеральних добрив

За будь-яких систем землеробства (крім органічної) застосування мінеральних добрив залишається основною частиною підвищення

потенційної і актуальної родючості ґрунту. Привнесення відшкодованої з урожаєм частини поживних речовин можна компенсувати лише внесенням мінеральних добрив, адже органічні місцеві ресурси є поповненням вже використаних попередніми культурами поживних речовин.

Мінеральні туки знайдуть своє місце в інтенсивному і відновлювальному землеробстві, за ведення точного землеробства і за впровадження no-till – технологій. Залежно від технологічного оснащення і спеціалізації господарства перспективними залишаються прості азотні, фосфорні й калійні добрива у гранульованій формі: аміачна селітра, карбамід, суперфосфат, калій хлористий. За фізичним станом мінеральні добрива бувають тверді й рідкі, порошкоподібні і гранульовані. За хімічним складом – прості й комплексні – складні (хімічні сполуки), до яких відносять амофос, діамфос, калійна чи натрієва селітра, комбіновані – нітроамофоска та ін. Змішані добрива виготовляють шляхом механічного перемішування гранульованих або порошкоподібних добрив.

Сучасний ринок агрохімікатів в Україні пропонує широкий асортимент змішаних добрив, який не завжди відповідає потребам збалансованого мінерального живлення рослин, а в умовах виробництва часто не дотримуються середніх оптимальних доз мінеральних добрив під сільськогосподарські культури.

Способи і строки внесення мінеральних добрив мають відмінність у тому, що під зяблевий обробіток ґрунту пропонується майже повністю виключити внесення азотних мінеральних добрив, крім 20% дози азоту під пшеницю озиму після гірших попередників за низького забезпечення ґрунту цим елементом. Це пов'язано з непродуктивними втратами азоту внаслідок денітрифікації і вимивання сполук азоту за межі кореневмісного шару ґрунту. Всю дозу азоту слід внести під ярі культури навесні у передпосівну культивуацію.

Згідно із існуючими рекомендаціями і біологічними особливостями культур пропонується внесення в рядки переважно суперфосфату або

амофосу в межах 10–15 кг/га P2 O5 , а під окремі культури (кукурудза 20 4. Основні види добрив у сучасному землеробстві на зерно і силос, буряки цукрові й ріпак) – по 10–15 кг/га повного мінерального удобрення у співвідношенні 1:1:1. Для зони Полісся в першому мінімумі є азот, а в другому – калій, що визначає і склад співвідношень. На кислих ґрунтах слід уникати внесення фізіологічно і хімічно кислого добрива сульфату амонію.

Для різних ґрунтово-кліматичних зон важливо дотримуватись встановлених оптимальних співвідношень NPK, що дає можливість зосереджувати мінеральні добрив без зменшення їх продуктивності. Розроблені раніше наукою оптимальні дози добрив під сільськогосподарські культури визначали потребу у них згідно з виносом поживних речовин середнім врожаєм за умови періодичного внесення підстилкового гною, якого було вдосталь. На сьогодні за відсутності промислового тваринництва вся побічна продукція залишається на полі (солома, стебла, гичка тощо).

1.3 Основні етапи диференційованого внесення добрив

Основна мета впровадження точного землеробства – економія ресурсів: насіння, добрив, хімікатів, палива і т.д. Досягається це за рахунок використання спеціалізованих методик внесення.

Також заощаджуються кошти завдяки зниженню витрат на придбання і ремонт техніки за рахунок її більш раціонального використання.

Нові технології процесу обробки ґрунту, такі як картування врожайності, паралельне водіння і ін. знижують час і трудомісткість процесу.

Диференційоване внесення добрив – один з найважливіших елементів точного землеробства. Воно передбачає, що добрива вносяться вибірково, там, де необхідність в тих чи інших добривах особливо актуальна. Причому застосовується два основних способи: внесення в режимі реального часу і

внесення з попередньо підготовленої картою поля. Найчастіше застосовується другий варіант.

На 1-му етапі створюється попередня електронна карта поля по забезпеченості ґрунту хімічними елементами живлення. Це можна зробити декількома способами, які відрізняються один від одного комбінацією вікорістовуваного обладнання.

Наприклад, можна використовуват дані врожайності, записані прямо під час збирання врожаю в пам'ять бортового комп'ютеру комбайну. Аналіз врожайності дає можливість визначити «проблемні» ділянки, тобто ділянки з мінімальним рівнем врожайності, и саме там відібрати проби ґрунту для аналізу. Якщо можливості зібрати такі дані немає, то відібрати проби доведеться з усього поля.

На 2-му етапі – відбір ґрунту. Технологія відбору при точному землеробстві полягає, перш за все, у визначенні координат виділених ділянок на електронній карті. Місцезнаходження таких ділянок встановлюється за допомогою високоточного GPS-приймача.

Відбір проб для агрохімічного аналізу необхідно проводити з огляду на вертикальну структуру, неоднорідність ґрунтового покриву, рельєф і клімат місцевості.

Тут також є, різні методики:

- випадковий відбір проб – підходить для однорідних полів з невеликими змінами. Даний метод не підходить для точного землеробства, оскільки показує лише середні показники поля;

- виділення елементарних ділянок на підставі результатів моніторингу врожайності;

- еталонний відбір проб – добре підходить для неоднорідних полів з великою кількістю змін на поле (пагорби, зміни рельєфу і т.д.). Еталонний відбір проб зменшує площу обраного поля шляхом ділення його на ділянки розміром 5-10 га. Таким чином, після проведення аналізу повинні будуть дані рекомендації по внесенню добрив для кожної такої ділянки. В ідеалі

координати кожного еталонного ділянки повинні бути відзначені за допомогою GPS, або іншим способом, щоб в майбутньому можна було повернутися на нього для відбору проб і внесення добрив. Відбір зразків в одному і тому ж самому місці покаже картину щорічних змін на полі.

Відбір змішаних зразків найкраще проводити навесні, коли на поле ще не внесені добрива і не проведені посіви. Другий термін відбору зразків – після збирання врожаю, коли основний запас доступних поживних елементів вже витрачено рослинами, а відсутність посівів не заважає виконанню робіт.

Найчастіше для відбору змішаних ґрунтових зразків застосовують метод «конверта»: на кожній з ділянок по діагоналі або по «конверту» (4 точки по кутах і одна в центрі) в його 5-ти точках відбирають проби.

Як правило, точкові проби відбирають з орного горизонту ґрунту, де глибина становить 0-30 см, а відбір проб в заданій точці здійснюється ручним буром або автоматичним пробовідбірником.

3-й етап – лабораторний аналіз ґрунту. Аналіз може включати тестування ґрунту на нітратний азот, доступний фосфор, доступний калій, сірку, кислотність ґрунту (рН), засоленість і вміст органічної речовини (потенціал ґрунту). Також проводяться аналізи на мікро- і макроелементи, такі як бор, молібден, мідь, залізо, марганець, цинк, кобальт, магній і кальцій, механічний склад (гранулометрія).

За результатами дослідження ґрунту в лабораторії отримують більш вичерпну та достовірну інформацію про хімічний склад ґрунту, а також його фізико-механічних показниках. Ця інформація уточнить уявлення про родючість ґрунту. Крім того, стає можливим створення за допомогою спеціального програмного забезпечення електронної карти поля для точного землеробства.

Як показує практика, існує пряма залежність між врожайністю і вмістом в ґрунті гумусу, рухомого фосфору, лужно-гідролізуемого азоту. Чим вищий вміст гумусу, фосфору й азоту в ґрунті, тим вище рівень

врожайності. Ділянки полів із вмістом гумусу менше 2%, зазвичай, схильні до водної ерозії, коли помітний вихід материнської породи на поверхню. Менш значуща залежність за змістом рухомого калію.

4-й етап – розрахунок дози добрив на запланований врожай. З огляду на рекомендації агрохіміків з ефективного використання добрив проводиться розрахунок норми діючої речовини на гектар.

Розраховані значення норм внесення добрив формують в програмі SMS-Advanced карту-завдання на внесення добрив, що складається з елементарних ділянок, колір яких відповідає заданій нормі внесення добрив у фізичній вазі. Кожен з елементарних ділянок має однаковий розмір (виходячи з ширини захоплення розкидачів) і свою географічну прив'язку.

5-й етап – диференційоване внесення добрив. Карта-завдання завантажується в бортовий комп'ютер трактора. Під час руху трактора по полю при внесенні добрив бортовий комп'ютер, використовуючи дані позиціонування з високоточного GPS-приймача, зчитує інформацію з карти-завдання і керує положенням дозуючих заслінок, збільшуючи або зменшуючи подачу добрив.

Персональний підхід до кожного поля та вивчення ґрунтів стане основою на початку шляху до технології точного землеробства. Для того, щоб зрозуміти, що відбувається в ґрунті, тобто в яких умовах доведеться починати роботу (а саме тип ґрунту, вміст мікро та макро елементів, органічна складова) та яких елементів потребує поле, його слід дослідити, проаналізувати та сформулювати стратегію роботи у вигляді карт-завдання для розкидача, обприскувача або аплікатора для внесення добрив. Від дослідження ґрунту до створення карти-завдань потрібно пройти декілька цікавих кроків: сканування ґрунту для виявлення неоднорідностей поля, створення стратегії, щодо відбору проб на аналіз ґрунту в зонах цих неоднорідностей, а після отримання результатів з лабораторії — сформулювати карту-завдання для внесення добрив.

Проаналізувати результат стратегії можна через супутниковий або безпілотний моніторинг культур протягом вегетації або через карти врожайності отримані з комбайна.

Карта завдання - географічна карта, яка містить інформацію про норми внесення або висіву, завдяки якій контролери встановленні на техніці можуть застосовувати відповідну норму до певного місця з використанням навігаційних приладів в реальному часі.

Для створення таких карт нині існує безліч додатків, проте найпопулярнішими є FieldView від Climate, Farm Works від Trimble, SMS від AG Leader, інші GIS програми типу QGIS.

Розглянемо найпоширеніший спосіб складання карт, взявши за основу агрохімічний аналіз ґрунту, оскільки він дає можливість швидко зреагувати на отриманий результат.

Наприклад, компанія Agrilab для детального обстеження ґрунтового покриття, оцінки рівня його неоднорідності та доцільності впровадження технологій змінних норм внесення добрив використовує сітку з елементарною ділянкою в 10 га, але часто використовує меншу сітку від 5 до 3 і навіть 1 га: чим більш неоднорідні умови (ґрунти, рельєф, зрошення та ін), тим більша деталізація повинна використовуватися.

Наступний етап — створення карти-завдання. До цього етапу потрібно визначити зони з різним потенціалом за урожайністю та рівнем забезпечення елементами живлення, визначити форму добрив і норму для диференційованого внесення на кожну неоднорідну ділянку поля.

Диференційоване внесення комплексних добрив передбачає вплив на зони внесення всіх елементів, що входять до його складу. Наприклад: вносимо сульфоамофос і закриваємо потребу у фосфорі. Відповідно внесені елементи впливають на норму внесення азоту і сірки.

Наприклад, на картах-завдання є зона, де потреби у фосфорних добривах немає. Ця ділянка займає 11% всієї площі. Якби на цю зону внести середньозважену норму сульфоамофосу ми б отримали перевнесення 254

кг/га. В зоні із внесенням 222 кг/га перевнесення становило б 32 кг/га, а в зоні з потребою 319 кг/га — недовнесли 65 кг/га. В цілому, за диференційованого внесення добрив економія сульфоамофосу становить 1,35 т. При цьому на ділянки внесено стільки, скільки потрібно для оптимізації умов росту і розвитку.

1.4 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм

Точне землеробство має на меті збільшити прибутки ферми та зменшити вплив на навколишнє середовище шляхом коригування виробничих ресурсів, таких як добрива, до певних рівнів, що відповідають кожній ділянці поля. Характеристика просторової мінливості ґрунту в межах полів є першим важливим кроком до впровадження точного землеробства. Відбір проб ґрунту за сіткою можна використовувати для визначення просторової мінливості родючості ґрунту в межах поля та зазвичай використовується для забезпечення основи для рекомендацій щодо змінної норми (VR) добрив. Значні варіації у вмісті поживних речовин у ґрунті можна виявити на невеликих ділянках, таких як сітка відбору проб 0,30 м на 0,30 м, особливо для вмісту фосфатів, з коефіцієнтом варіації (CV) до 52%. Подібні результати були отримані, хоча з дещо більшою сіткою відбору проб (2 м на 2 м). Після дослідження на 16 різних ділянках в Австралії з 32 зразками на гектар виявили CV для фосфатів, який коливався від 22% до 57%. Вони також виявили, що CV коливається від 18% до 82% навіть на деяких інтенсивно проаналізованих суб-сайтах із сіткою відбору проб 60 м². Тим не менш, останні дослідження внесення добрив зі змінною нормою (VR) враховували мінливість у межах площі до 1 га. Насправді адаптація VR для таких великих територій загалом подібна до підходу середньої норми внесення (UR), але в меншому масштабі. Оскільки притаманна просторова мінливість поля в межах невеликої сітки відбору проб є значною, технологію VR слід впроваджувати на невеликих площах (наприклад, 2 м²). Дуже

небагато досліджень порівнювали VR і UR для внесення фосфорних (P) добрив з використанням доступного обладнання VR для площ менше 1 га. Це пояснюється тим, що потрібна велика кількість зразків для стандартного аналізу, щоб показати мінливість поля, що збільшує вартість. Малекі та ін. (2008) показали, що традиційні методи відбору зразків не є репрезентативними для потреб у поживних речовинах для удобрення VR P. Вони також показали, що для більш надійної оцінки рівня поживних речовин у полі 20–30 зразків на гектар недостатньо, і порівняння між середнім значенням застосування для VR та UR неможливе. Таким чином, вартість і праця, пов'язані з інтенсивним відбором сітки, змушують прийняти інший підхід. Нещодавні дослідження, що порівнювали реакцію врожайності на P, показали невеликі відмінності або відсутність відмінностей між удобренням VR і UR. На шести полях штату Іллінойс під кукурудзу та сою [14] не виявили відмінностей в урожайності між VR і UR добривами на основі вибірки сітки 1 га. Також дослідження показали, що хоча VR іноді і призводить до підвищення врожайності порівняно з UR, він рідко збільшує чисту віддачу від удобрення через збільшення витрат на відбір проб ґрунту та внесення добрив. Досліди [17] виявили невелике збільшення врожайності для VR, але вони дійшли висновку, що збільшення витрат на відбір зразків ґрунту компенсує перевагу зростання врожайності. Вибірка з розміром сітки менше одного гектара рідко використовується дослідниками, оскільки вважається, що збільшення врожайності при меншому розмірі сітки не може компенсувати вартість відбору та аналізу проб ґрунту. Таким чином, з одного боку, було доведено, що підхід VR здатний підвищити врожайність, але з іншого боку вартість додаткових стандартних тестів ґрунту може переважити дохід від зростання врожайності. Тому відбір більшої кількості проб ґрунту на гектар для аналізу поживних речовин не є економічним варіантом. Тим не менш, рекомендації щодо застосування поживних речовин повинні бути скориговані для якомога дрібнішої сітки відбору проб, щоб просторову мінливість можна було

виявити навіть на невеликій території (до метра). Цього можна досягти на практиці лише за умови використання нового методу вимірювання, такого як система застосування VR на основі датчиків. Метод на основі карти для VR не підходить, оскільки він базується на обмеженій кількості зразків на гектар. Крім того, цей підхід може створювати помилки через використання системи позиціонування під час збору даних та в інтерполяції між дискретними спостереженнями під час створення прикладних карт. Датчик ґрунту у видимому (VIS) та ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах, Дослідження [19] надали багатообіцяючі результати щодо деяких поживних речовин у ґрунті і пропонують можливості для застосування VR-добрив на ходу. Мета цього дослідження полягала в розробці та оцінці оперативної системи внесення добрив VR для внесення фосфату під час посіву кукурудзи за допомогою датчика VIS–NIR для вимірювання рівня P у ґрунті під час руху по полю.

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 Р у ґрунтовий розчин для використання рослинами, але не вимірюють загальну кількість доступного Р. Ці випробування забезпечують індекс Р у ґрунтах, який пов'язаний із потребами фосфорних добрив у ґрунті. Взаємозв'язок між індексом Р, 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.

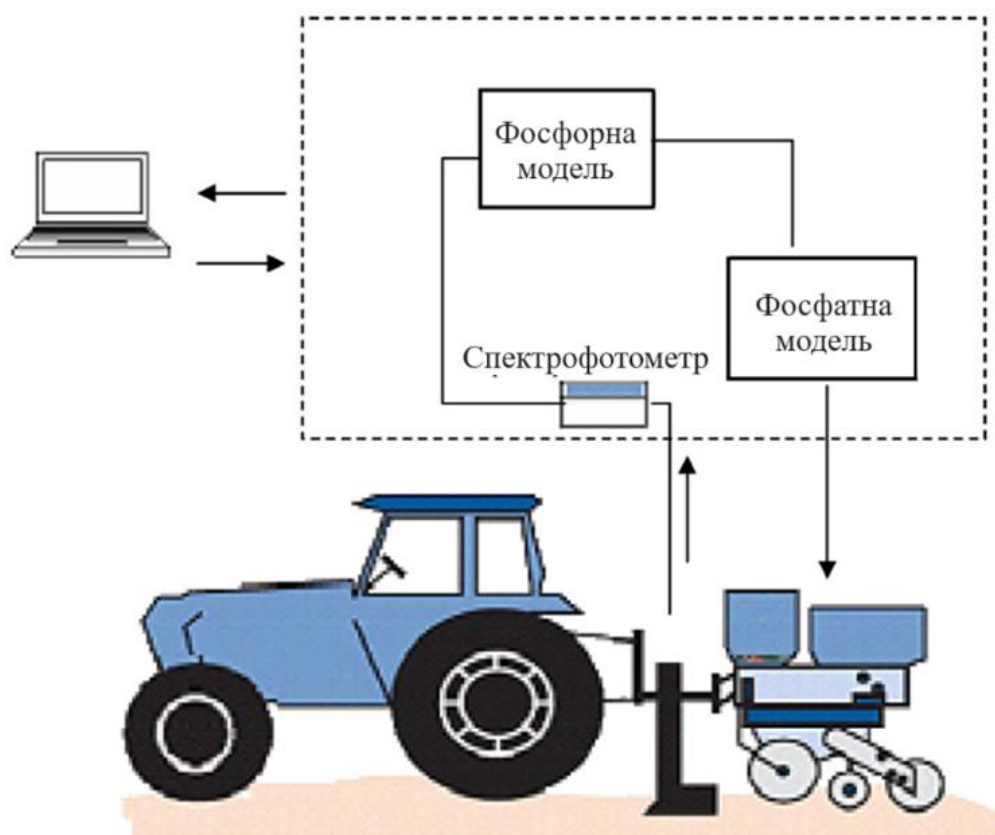


Рис. 1 - Схематична діаграма VR-аплікатора на основі датчика ґрунту
Програма виконала ті ж самі етапи попередньої обробки спектрів, що й ті, які використовувалися під час створення моделі калібрування P-ext. Цими етапами попередньої обробки були, відповідно, максимальна нормалізація та перше виведення Савіцького–Голяя. 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.

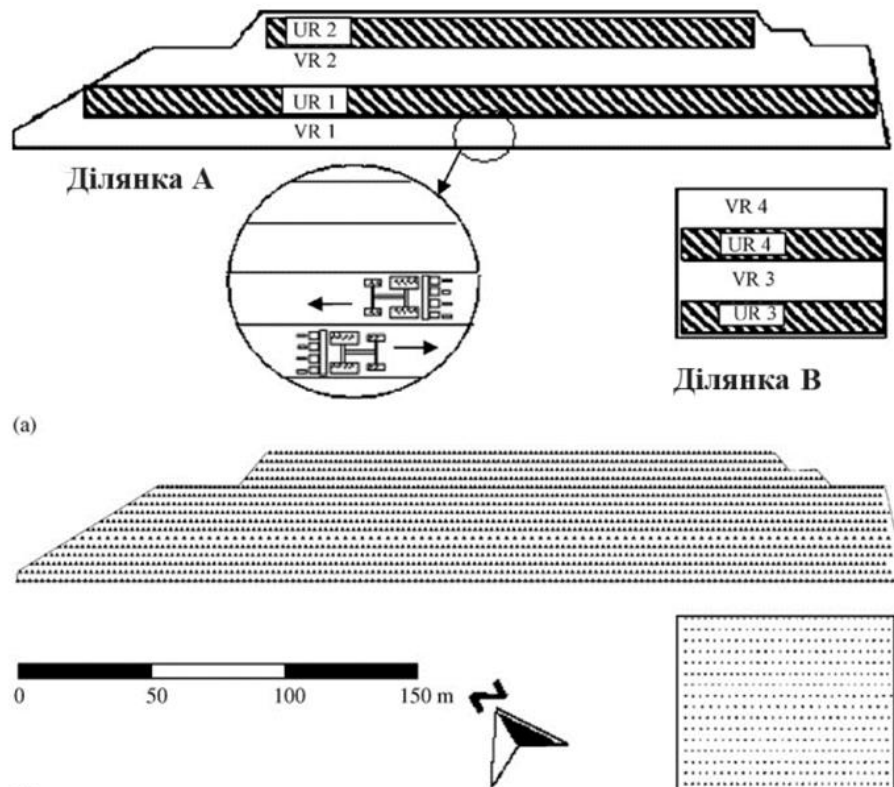


Рис. 3 - (а) Схематична діаграма експериментального дизайну двох частин поля; заштриховану ділянку відводили для рівномірного нанесення фосфату; кожна ділянка містить чотири ряди посіву та загалом 16 рядків кукурудзи; (б) положення кожного спектру ґрунту, отриманого аплікатором у двох частинах; VR і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

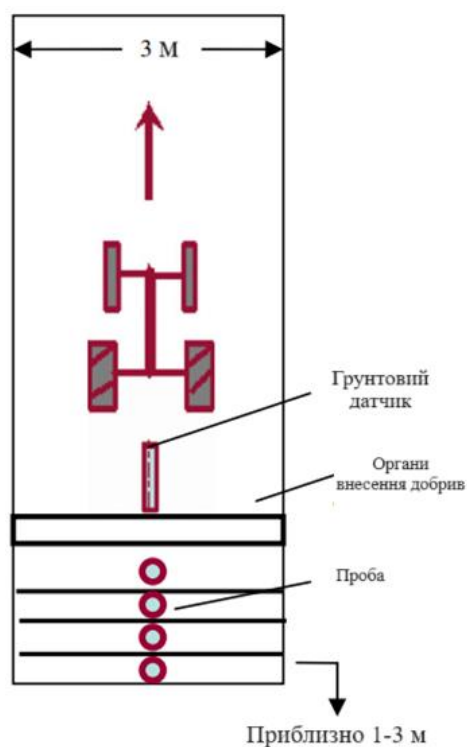


Рис. 4 – Схематична діаграма розміру комірки для вибірки

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 між кількістю записаних на ходу ґрунтових спектрів до площі всього поля показало, що один спектр знімався приблизно кожні 4 м² (3 м ширина машини на приблизно 1,3 м шляху), або загалом 2500 проб на гектар. Відсоток відбору проб для VR (VRPS) на одиницю площі (1 м²), визначений як критерій для вибірки VR для цього дослідження становив 25%.

Аналіз якості зареєстрованих на ходу ґрунтових спектрів показав, що близько 10–15% були погано зареєстровані, що можна пояснити двома основними причинами. По-перше, делікатне налаштування датчика ґрунту потрібно було провести разом із налаштуванням сівалки. Поверхня датчика ґрунту має бути горизонтальною під час руху всередині борозни. По-друге, на це регулювання впливає вібрація трактора під час руху. Крім того, якість вторинної підготовки ґрунту перед посівом може вплинути на показання датчика на ходу. На деяких ділянках поля спостерігалася неналежна підготовка ґрунту, включаючи наявність грудок та нерівну поверхню ґрунту. На цій ділянці поля спостерігалися деякі шумові ґрунтові спектри.

3.2 Варіації фосфору та фосфатів у ґрунті

Варіації P-ext по всьому полю, виражені CV, становили від 5% до 51%. Мінімальні та максимальні значення P-ext становили 9 і 70 мг на 100 г на всіх ділянках, що вказує на високу варіацію рівня P на всьому полі площею 1,55 га. Ці значення P охоплювали майже всі класи інтерпретації випробувань ґрунту. Таблиця 2 підсумовує однофакторну статистику рівнів фосфату, зареєстровану для всіх ділянок на ділянках VR або UR. Слід зазначити, що лише ділянки, призначені для обробки VR, отримали норму VR на основі збору даних на ходу, а інші ділянки отримали 30 кг га⁻¹. На рис. 5 показано варіацію фосфату в 170 послідовних клітинах для відбору

проб, зібраних уздовж 225-метрової відстані через частину поля А, взятого як приклад: норма внесення змінювалася 17 разів на цій відстані та коливалася від 5 до 30 кг/га. Для моніторингу просторової варіації Р-ext було розроблено дві карти, одну з використанням індивідуальних значень прогнозованого Р-ext, а іншу — з використанням середнього десяти послідовних сканувань (рис. 6 і 7). Подібність між цими двома картами доводить, що усереднення 10 послідовних прогнозованих значень Р-ext можна використовувати для адаптації норми внесення. Діапазони просторової варіації, отримані цими двома методами, дуже схожі. Незважаючи на невеликий розмір досліджуваної площі (12000 і 3500 м²), значні варіації Р були виявлені по всій площі поля, які коливалися від 9 до 70 і від 16 до 70 мг на 100 г для частин А і В поля, відповідно. Рис. 8 і 9 показують карти, створені для внесення фосфатів для частин А і В поля відповідно. Дві карти фосфатів, а саме рекомендовані [рис. 8(a) і 9(a)] і нанесені показані на рис. 8(b) і 9(b). На застосованій карті VR-ділянки отримували різні норми, оскільки додаток ґрунтувався на прогнозуванні Р-ext ґрунту на ходу, тоді як UR-ділянки отримували лише 30 кг/га. Різна норма на межі ділянок UR була спричинена інтерполяцією даних під час розробки карти.

3.3 Витрата добрив

При порівнянні VR і UR одним з найважливіших параметрів є фактичні норми внесення добрив. Багато дослідників вказували, що застосування VR має потенціал для зменшення норми у місцях, де підживлення UR призведе до надмірного внесення добрив.

На ділянках, відібраних для рівномірного внесення, вносили 30 кг/га; Р-ext означає екстрагований амоній лактат фосфору.

Середнє з усіх прогнозованих значень Р-ext ґрунту по полю становило 45,21 мг /100 г, що трохи менше, ніж результат стандартного випробування Р, який становив 51 мг/100 г. На полі з високим рівнем Р було показано, що,

беручи більше зразків для усереднення, загальне середнє значення внесення добрив зменшується. Оскільки 2500 зразків було зібрано з усього поля, очікувалося, що загальне середнє значення Р для ґрунту буде нижчим. У цьому випадку з результатами вологого аналізу 51 мг на 100г. не рекомендується вносити фосфат UR, оскільки рекомендується відсутність застосування фосфату для Р-ext більше 50 мг на 100 г.

Таблиця 2 – Статистика вмісту фосфору в ґрунті та рекомендованого фосфату (P₂O₅) 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

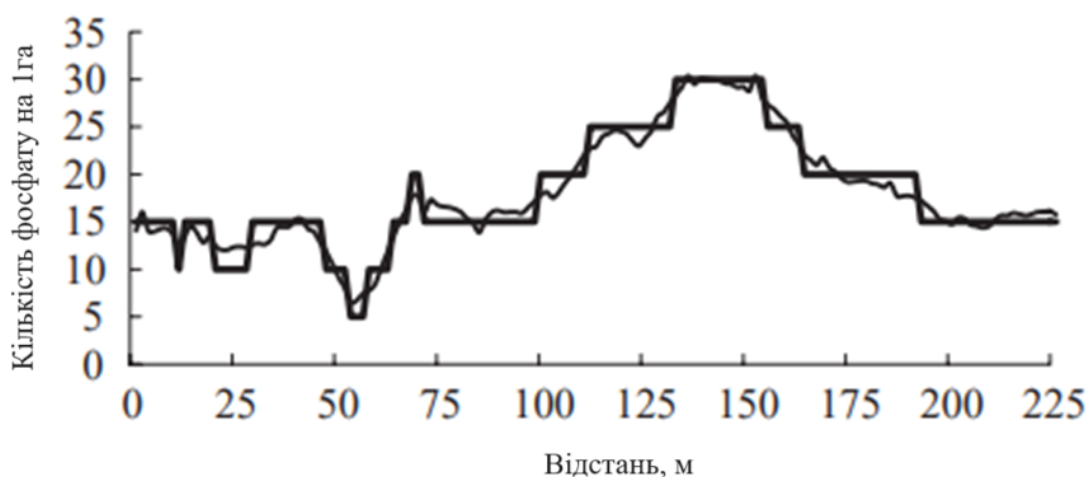


Рис. 5 – Порівняння теоретично визначеного фосфату (тонка крива) і фактичного (жирна крива) внесення фосфату, класифікованого на 5 кг/га інтервалів за один польовий цикл, взятий як приклад

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.

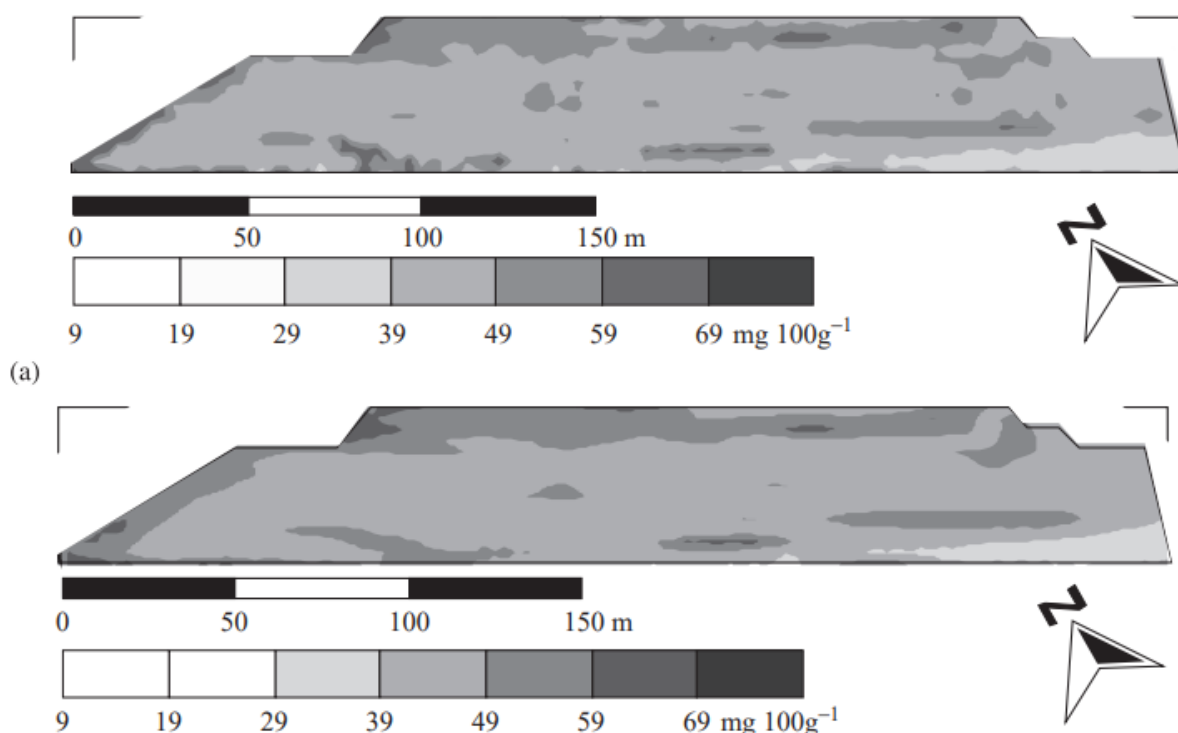


Рис. 6 – Карти P-ext ґрунту частини А поля з використанням окремих P-ext (a) та середнього 10 послідовних значень P-ext (b)

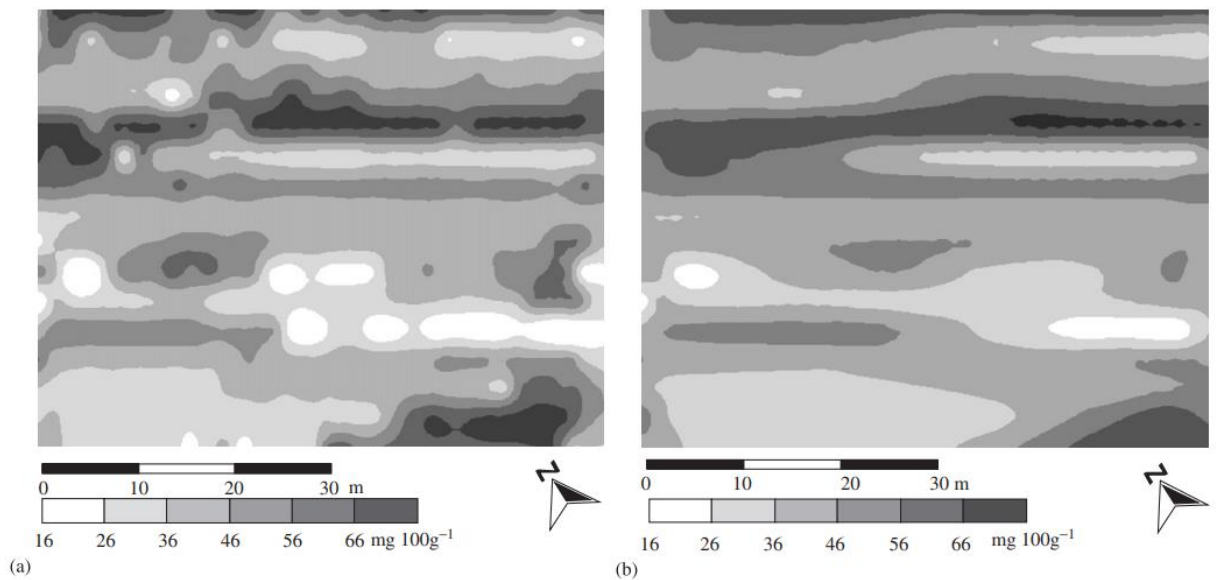


Рис. 7 – Карти Р-ехт ґрунту частини В поля з використанням окремих Р-ехт (а) та середнього 10 послідовних значень Р-ехт (б)

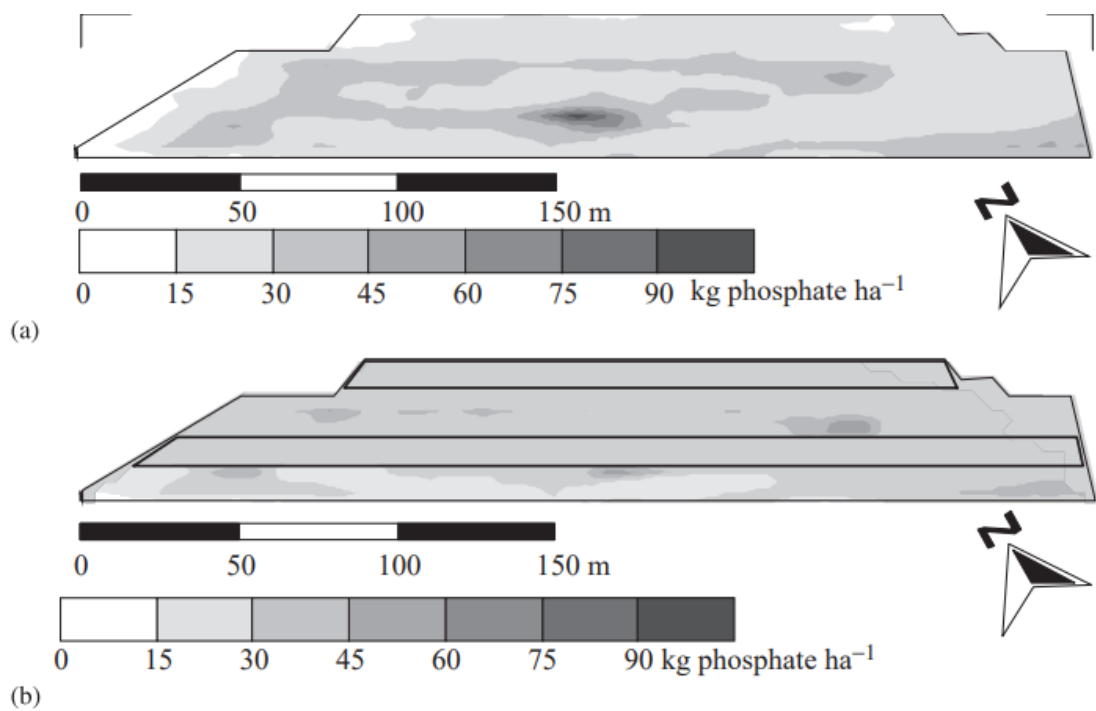


Рис. 8 – Рекомендована (а) і застосована (б) фосфатна карта частини А поля, яка була створена з використанням середнього десяти послідовних прогнозованих Р-ехт у напрямку руху трактора; ділянки, призначені для рівномірної норми внесення (30 кг/га), позначені багатокутниками в (б)

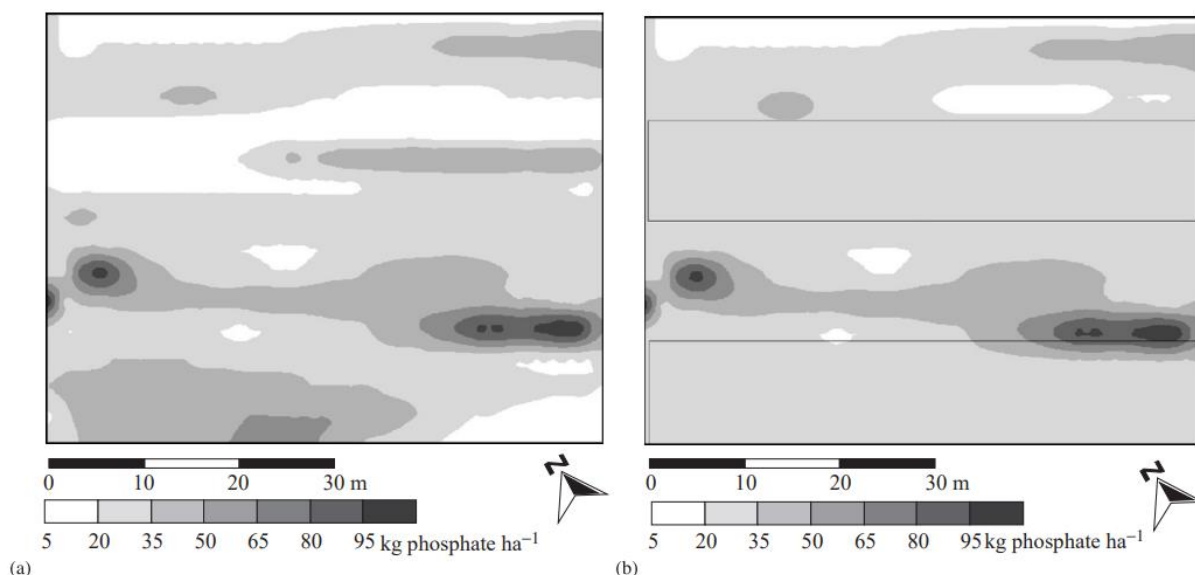


Рис. 9 – Рекомендована (а) і застосована (б) фосфатна карта частини В родовища, яка була створена з використанням середнього значення 10 послідовних прогнозованих Р-ext у напрямку руху поля; ділянки, призначені для рівномірної норми внесення (30 кг/га), позначені багатокутниками в (b)

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 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.

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 досліджу 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-polovyyh-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