МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Агрономічний факультет
Кафедра ґрунтознавства та землеробства

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Плешивенко Олексій Олександрович

УДК 633.15:631.559:631.58:631.4(477.42)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ДИНАМІКА ПРОДУКТИВНОСТІ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО В СИСТЕМІ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА ЗА УМОВ НЕОДНОРІДНОСТІ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ В УМОВАХ ТОВ «АГРОСТЕМ» ЖИТОМИРСЬКОГО РАЙОНУ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

201 «Агрономія»

Подається на здобуття освітнього ступеня «Магістр»

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело_____ О.О. Плешивенко.

Керівник роботи канд. с.-г. наук, доцент Кравчук М.М.

Житомир–2026

ЗМІСТ

	сторінка
АНОТАЦІЯ	3
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ПРОСТОРОВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ КУКУРУДЗИ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА (огляд літературних джерел)	12
1.1. Просторова мінливість ґрунтового покриву як чинник формування продуктивності агроценозів	12
1.2. Точне землеробство як інструмент управління просторовою неоднорідністю агроландшафтів	13
1.3. Біологічні особливості кукурудзи та її реакція на просторову неоднорідність ґрунтових умов	14
1.4. Геостатистичні методи в дослідженні просторових закономірностей системи «ґрунт–рослина»	15
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	18
2.1. Місце та умови проведення досліджень	18
2.2 Програма та методика проведення досліджень	22
РОЗДІЛ 3. ПРОСТОРОВА ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ РОДЮЧОСТІ ГРУНТОВОГО ПОКРИВУ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ КУКУРУДЗИ В УМОВАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА	28
3.1. Оцінка неоднорідності ґрунтового покриву дослідного масиву	28
3.2. Динаміка врожайності кукурудзи та чинники її просторової мінливості	30
3.3. Ідентифікація зон менеджменту та аналіз зв'язку врожайності з показниками родючості	32
3.4. Ефективність диференційованого управління посівами на основі виділених зон	34
3.5. Економічна та енергетична ефективність диференційованого вирощування кукурудзи	36
ВИСНОВКИ	39
ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	43

АНОТАЦІЯ

Плешивенко О.О. Динаміка продуктивності кукурудзи на зерно в системі точного землеробства за умов неоднорідності ґрунтового покриву в умовах ТОВ «Агростем» Житомирського району Житомирської області – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 201 «Агрономія». – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Кваліфікаційна робота виконана комп'ютерним набором на 46 сторінках, в ній міститься 2 таблиці та 9 ілюстрацій. Вміщує такі розділи, як вступ, аналітичний, методичний, експериментальний розділи, висновки та рекомендації виробництву. Список використаних літературних джерел нараховує 30 найменувань.

У кваліфікаційній роботі викладено результати досліджень щодо впливу просторової неоднорідності ґрунтового покриву на формування продуктивності кукурудзи на зерно в системі точного землеробства. Дослідження виконано в умовах високотехнологічного сільськогосподарського підприємства ТОВ «Агростем», на земельному масиві, розташованому в межах Висоцької сільської територіальної громади Житомирського району Житомирської області, з метою виявлення закономірностей впливу варіабельності агрохімічних і фізичних властивостей ґрунтів Полісся на врожайність культури.

У процесі роботи виконано комплексний аналіз просторової мінливості ґрунтових характеристик та врожайності кукурудзи. Оцінювання здійснювали шляхом інтеграції даних карт врожайності, отриманих із систем моніторингу зернозбиральних комбайнів, результатів агрохімічного обстеження ґрунту та супутникових вегетаційних індексів, що характеризують динаміку розвитку посівів упродовж вегетації. Оброблення та візуалізацію просторової інформації проведено з використанням цифрових платформ управління господарством (Cropwise

Operations Center та John Deere Operations Center), що дало змогу акумулювати різнорідні агрономічні та геопросторові дані в єдиній системі точного землеробства. Для виділення зон менеджменту та встановлення кореляційних зв'язків між параметрами ґрунту й урожайністю застосовано геостатистичні методи та засоби ГІС-аналізу. Ґрунтовий покрив дослідних ділянок представлений переважно світло-сірими лісовими ґрунтами (Haplic Albeluvisols) із незначними включеннями темно-сірих опідзолених ґрунтів (Haplic Phaeozems), що є типовим для регіону досліджень.

У результаті досліджень підтверджено суттєву просторову варіабельність урожайності в межах поля, яка тісно пов'язана з відмінностями у родючості ґрунту. Встановлено, що визначальний вплив на продуктивність кукурудзи мають вміст гумусу, показники кислотності (pH) та забезпеченість елементами живлення. На основі аналізу просторових даних обґрунтовано доцільність диференційованого застосування добрив відповідно до виявлених агрохімічних контурів. Доведено, що впровадження інструментів точного землеробства навіть у межах однієї ґрунтової відміни дає змогу оптимізувати використання ресурсів, мінімізувати вплив лімітуючих факторів та підвищити економічну ефективність вирощування зернової кукурудзи в умовах Полісся. Результати роботи мають практичну цінність для адаптації технологічних карт до умов просторової неоднорідності агроландшафтів Житомирської області.

Ключові слова: точне землеробство, просторова неоднорідність, ґрунтовий покрив, картування врожайності, кукурудза на зерно, продуктивність кукурудзи, ГІС-аналіз.

ANNOTATION

Pleshvenko O.O. Dynamics of grain maize productivity in the precision farming system under conditions of soil cover heterogeneity at Agrostem LLC, Zhytomyr district, Zhytomyr region. – Qualifying thesis manuscript.

Qualifying thesis for the Master's degree in specialty 201 "Agronomy". – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The qualifying thesis is computer-typed and consists of 42 pages, contains 2 tables and 9 illustrations. It includes the following sections: introduction, analytical section, methodological section, experimental section, conclusions, and recommendations for production. The list of references comprises 30 sources. The master's thesis presents the research results on the impact of spatial heterogeneity of the soil cover on the formation of grain maize productivity within a precision farming system. The study was conducted under the conditions of a high-tech agricultural enterprise, Agrostem LLC, located within the Vysoke rural territorial hromada of the Zhytomyr district, Zhytomyr region. The aim was to identify patterns of how the variability of agrochemical and physical properties of Polissia soils affects crop yield.

A comprehensive analysis of the spatial variability of soil characteristics and maize yield was performed. The assessment was carried out by integrating yield map data obtained from combine harvester monitoring systems, results of soil agrochemical surveys, and satellite-derived vegetation indices characterizing the dynamics of crop development throughout the growing season. Spatial data processing and visualization were conducted using digital farm management platforms (Cropwise Operations Center and John Deere Operations Center), which enabled the accumulation of heterogeneous agronomic and geospatial data within a single precision agriculture system. Geostatistical methods and GIS analysis tools were employed to delineate management zones and establish correlations between soil parameters and yield. The soil cover of the experimental plots is predominantly represented by Haplic Albeluvisols (Light Grey Forest

Soils) with minor inclusions of Haplic Phaeozems (Dark Grey Podzolized Soils), which is typical for the Ukrainian Polissia zone.

The research results confirmed significant spatial variability of yield within the field, closely related to differences in soil fertility. It was established that the humus content, acidity (pH) levels, and nutrient availability have a decisive influence on maize productivity. Based on the spatial data analysis, the feasibility of variable-rate fertilizer application according to the identified agrochemical contours was substantiated. It has been proven that the implementation of precision farming tools, even within a single soil type, allows for optimizing resource use, minimizing the impact of limiting factors, and increasing the economic efficiency of grain maize cultivation in the Polissia region. The results of the work have practical value for adapting technological operations to the conditions of spatial heterogeneity of agricultural landscapes in the Zhytomyr region.

Keywords: precision agriculture, spatial variability, soil cover, yield mapping, grain maize, maize productivity, GIS analysis.

ВСТУП

Актуальність теми. Просторова мінливість властивостей ґрунту є одним із визначальних чинників, що впливають на продуктивність сільськогосподарських культур та ефективність використання ресурсів у сучасних аграрних системах. Сільськогосподарські угіддя рідко бувають однорідними: варіабельність гранулометричного складу, вмісту органічної речовини, забезпеченості елементами живлення та мікрорельєфу призводить до суттєвих відмінностей у рості й розвитку рослин навіть у межах одного поля. Ігнорування цієї неоднорідності під час застосування усереднених агротехнологічних підходів спричиняє неефективне використання добрив, зниження врожайності та підвищення екологічних ризиків, зокрема через вимивання елементів живлення у ґрунтові води.

Технології точного землеробства відкривають нові можливості для виявлення внутрішньопольової варіабельності та керування нею шляхом інтеграції геопросторових даних, систем моніторингу врожайності, матеріалів дистанційного зондування Землі та цифрових платформ управління агровиробництвом. Побудова карт врожайності, отриманих під час збирання врожаю, у поєднанні з даними агрохімічного обстеження ґрунтів та вегетаційними індексами (NDVI, EVI) дає змогу ідентифікувати просторові закономірності формування продуктивності культур і виділяти зони менеджменту для диференційованого застосування агроресурсів.

Кукурудза (Zea mays L.) є однією з найважливіших зернових культур у світі та відіграє ключову роль в аграрній економіці України. Водночас продуктивність цієї культури характеризується високою чутливістю до умов родючості ґрунту та його просторової неоднорідності. Для регіонів Українського Полісся, де переважають ґрунти з відносно невисокою природною родючістю (дерново-підзолисті, сірі лісові) та значною просторовою мінливістю агрохімічних показників, розуміння кореляційних зв'язків між властивостями ґрунтового покриву та продуктивністю

кукурудзи набуває особливого значення для підвищення ефективності галузі.

Сучасні дослідження засвідчують, що інтеграція даних моніторингу врожайності з геостатистичними методами та засобами дистанційного зондування дає змогу не лише кількісно оцінити просторову мінливість продуктивності, а й розробити адаптивні стратегії управління посівами. Такі підходи, як аналіз просторової автокореляції, моделювання варіограм та інтерполяція методом кригінгу, широко застосовуються для дослідження просторових закономірностей агрохімічних показників ґрунтів та врожайності культур у системах точного землеробства.

Незважаючи на зростаюче впровадження технологій точного землеробства в Україні, дослідження, присвячені вивченню впливу просторової неоднорідності ґрунтового покриву на продуктивність кукурудзи в місцевих агроекологічних умовах, залишаються фрагментарними. Зокрема, недостатньо вивченими є питання кількісного взаємозв'язку між варіабельністю агрохімічних властивостей сірих лісових ґрунтів Полісся та формуванням врожайності зерна кукурудзи в межах окремих господарств. Це зумовлює необхідність проведення досліджень, спрямованих на виявлення просторових закономірностей і розробку науково обґрунтованих підходів до диференційованого управління родючістю.

Метою дослідження було проаналізувати просторову мінливість продуктивності кукурудзи на зерно та встановити її взаємозв'язок із властивостями ґрунтового покриву в умовах застосування технологій точного землеробства в господарстві Житомирського району.

Для досягнення поставленої мети передбачалося виконання наступних **завдань**:

- провести аналіз літературних джерел щодо впливу просторової неоднорідності ґрунтів на продуктивність сільськогосподарських культур;

- оцінити просторову варіабельність агрохімічних показників ґрунту (вміст гумусу, кислотність, забезпеченість елементами живлення) у межах дослідного масиву;
- здійснити збір та оброблення даних карт врожайності кукурудзи з використанням цифрових платформ точного землеробства;
- провести геостатистичний аналіз та ГІС-моделювання для виявлення зв'язків між властивостями ґрунту та врожайністю культури;
- виділити однорідні зони менеджменту та обґрунтувати доцільність диференційованого посіву та застосування добрив;
- узагальнити отримані результати та розробити практичні рекомендації для виробництва.

Об'єкт дослідження. Процес формування просторової мінливості продуктивності кукурудзи на зерно під впливом неоднорідності ґрунтового покриву за родючістю.

Предмет дослідження. Варіювання урожайності кукурудзи, закономірності просторового розподілу показників родючості ясно-сірих лісових ґрунтів, вегетаційні індекси посівів, картограми врожайності кукурудзи, кореляційні зв'язки в системі «ґрунт – рослина» в умовах застосування технологій точного землеробства.

Методи дослідження. У роботі використано комплекс загальнонаукових (аналіз, індукція, синтез, дедукція) та спеціальних методів: польовий (агрохімічне обстеження ґрунтів, відбір зразків), лабораторний (визначення агрохімічних показників), інструментальний (супутниковий моніторинг, знімання даних із моніторів урожайності комбайнів), геоінформаційний (просторовий аналіз, інтерполяція даних, побудова цифрових карт і виділення зон менеджменту в середовищі ГІС), статистичний (варіаційний, кореляційний та геостатистичний аналіз).

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше для умов Житомирського району на прикладі конкретного сільськогосподарського підприємства здійснено комплексну оцінку просторової варіабельності продуктивності кукурудзи на зерно у взаємозв'язку з неоднорідністю ґрунтового покриву з використанням інструментів точного землеробства.

Поглиблено наукові уявлення про характер і ступінь впливу агрохімічних показників (гумус, pH, N, P, K) на формування врожайності культури в межах ясно-сірих лісових ґрунтів Полісся. Відпрацьовано методичні підходи до виділення зон менеджменту на основі інтеграції даних дистанційного зондування, агрохімічного обстеження та карт врожайності.

Практичне значення одержаних результатів. Виявлені просторові закономірності та встановлені кореляційні залежності можуть бути використані для оптимізації системи удобрення кукурудзи шляхом диференційованого внесення добрив відповідно до агрохімічних контурів. Результати дослідження впроваджено у виробничу діяльність ТОВ «Агростем» та можуть бути рекомендовані для інших господарств Житомирської області, що впроваджують елементи точного землеробства. Основні положення роботи доцільно використовувати в навчальному процесі при підготовці фахівців з агрономії.

Особистий внесок здобувача. Автором особисто здійснено аналіз літературних джерел, проведено польові дослідження та збір даних із моніторів урожайності комбайнів та інших джерел, виконано оброблення та інтерпретацію цифрових даних з платформ точного землеробства, проведено геоінформаційний та статистичний аналіз, сформульовано висновки та підготовлено рекомендації виробництву.

Апробація результатів дослідження. Основні положення та результати кваліфікаційної роботи були апробовані на 2 міжнародних науково-практичних конференціях та опубліковані у виданні з високим індексом цитування у вигляді 2 наукових статей.

Перелік публікацій автора за темою досліджень:

1. Dovbysh L., Kravchuk M., Skolub A., Sokhatska A., Pleshivenko O. The influence of complex fertilizer norms on growth dynamics and biomass accumulation of maize under precision farming in the conditions of the right-bank forest-steppe of Ukraine. *Scientific Collection «InterConf+».* 2025. 62(268). 155-167 (Index Copernicus) https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.10.2025.018.

2. Kravchuk M., Zhuravel S., Dovbysh L., Pleshivenko O. Spatial variability of soil properties and its influence on maize yield formation in precision farming systems of the Ukrainian Polissia. *Scientific Collection «InterConf+»*. 2026. 67(287). 129-140 (Index Copernicus). https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.03.2026

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота виконана комп'ютерним набором на 46 сторінках, в ній міститься 2 таблиці та 9 ілюстрацій. Вміщує такі розділи, як вступ, аналітичний, методичний, експериментальний розділи, висновки та рекомендації виробництву. Список використаних літературних джерел нараховує 30 найменувань.

РОЗДІЛ 1
ВПЛИВ ПРОСТОРОВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ КУКУРУДЗИ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА (огляд літературних джерел)

1.1. Просторова мінливість ґрунтового покриву як чинник формування продуктивності агроценозів

Ґрунтовий покрив сільськогосподарських угідь практично ніколи не буває абсолютно однорідним. Його властивості формуються під впливом складної взаємодії ґрунтотворних порід, рельєфу місцевості, гідрологічних умов, тривалого антропогенного навантаження та інших чинників. У сучасних агрономічних дослідженнях просторову мінливість визнано одним із ключових факторів, що лімітують ефективність використання ресурсів та визначають рівень продуктивності сільськогосподарських культур [1, 2, 3].

У межах навіть невеликого поля можуть спостерігатися суттєві відмінності за гранулометричним складом, вмістом органічної речовини, кислотністю, забезпеченістю елементами мінерального живлення, а також за фізичними і фізико-механічними властивостями – твердістю, щільністю будови, вологістю, аерацією. Ця варіабельність безпосередньо впливає на ріст і розвиток рослин, зумовлюючи строкатість посівів та нерівномірність достигання врожаю [4, 5, 6]. Застосування усереднених технологічних підходів без урахування просторової неоднорідності призводить до того, що на одних ділянках поля рослини відчувають дефіцит елементів живлення, тоді як на інших – спостерігається (формується) їх надлишок, що є економічно неефективним та екологічно небезпечним [6, 7, 8, 9].

В агрономічній науці прийнято розрізняти систематичну (закономірну) та випадкову просторову мінливість. Систематична мінливість пов'язана з дією стабільних у часі факторів (рельєф, тип ґрунту, глибина залягання ґрунтових вод) і може бути передбачена. Випадкова

мінливість зумовлена короткочасними або локальними впливами (мікрозниження, ущільнення внаслідок проходу техніки, локальне накопичення органічних решток) і є важкопрогнозованою. Обидва типи мінливості потребують різних підходів до управління, що актуалізує пошук методів їхньої ідентифікації та кількісної оцінки [9, 10, 11, 12].

1.2. Точне землеробство як інструмент управління просторовою неоднорідністю агроландшафтів

Розвиток цифрових технологій та геоінформаційних систем наприкінці XX – на початку XXI століття створив передумови для формування принципово нової парадигми ведення сільського господарства – точного землеробства. Ця концепція базується на врахуванні внутрішньопольової варіабельності агроекологічних умов та диференційованому застосуванні агротехнічних впливів відповідно до реальних потреб рослин у кожній елементарній ділянці поля [1, 2, 3, 13].

Технологічне підґрунтя точного землеробства становить інтеграція кількох інформаційних потоків: даних глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) різного просторового розрізнення, результатів агрохімічного та агрофізичного обстеження ґрунтів, а також даних моніторингу врожайності, отриманих безпосередньо під час збирання врожаю за допомогою спеціалізованих сенсорів, встановлених на зернозбиральних комбайнах [11, 12, 13].

Особливе місце в системі точного землеробства посідають вегетаційні індекси, які розраховують на основі супутникових знімків. Найпоширенішим з них є нормалізований відносний вегетаційний індекс (NDVI), який корелює з біомасою, вмістом хлорофілу та фотосинтетичною активністю рослин. Аналіз часових серій вегетаційних індексів упродовж вегетаційного періоду дає змогу виявляти просторові закономірності

розвитку посівів та оперативно коригувати технологічні процеси, зокрема виконання азотних підживлень [5, 1, 2].

Сучасним етапом розвитку точного землеробства є використання цифрових платформ управління агропідприємством (Farm Management Information Systems – FMIS). Такі платформи, як Cropwise Operations Center, John Deere Operations Center, OneSoil тощо, забезпечують накопичення, зберігання, оброблення та візуалізацію різнорідних просторових даних, формування електронних карт полів, створення завдань для диференційованого внесення матеріалів і аналіз ефективності виконаних операцій. Інтеграція всіх компонентів у єдиному цифровому середовищі відкриває шлях до побудови адаптивних систем управління агротехнологіями [2, 5, 6, 14].

1.3. Біологічні особливості кукурудзи та її реакція на просторову неоднорідність ґрунтових умов

Кукурудза (Zea mays L.) належить до культур інтенсивного типу з високим потенціалом продуктивності, реалізація якого значною мірою залежить від ґрунтово-кліматичних умов, а також рівня агротехніки. Вона характеризується підвищеними вимогами до родючості ґрунту, особливо до вмісту азоту, фосфору та калію в легкодоступних формах, а також до реакції ґрунтового середовища. Оптимальними для вирощування кукурудзи вважаються ґрунти з близькою до нейтральною реакцією (pH 6,5–7,0) та високим вмістом гумусу [17, 18, 19, 20].

Біологічні особливості культури, зокрема потужна коренева система, яка проникає на глибину до 2–3 метрів, теоретично дають їй змогу певною мірою компенсувати просторову нерівномірність розподілу елементів живлення. Однак на практиці чутливість кукурудзи до строкатості ґрунтового покриву залишається високою [17, 18, 19, 20]. Дослідження показують, що варіабельність урожайності культури в межах одного поля часто корелює з просторовим розподілом таких показників, як вміст

органічної речовини, гідролізованого азоту, рухомих сполук фосфору та калію, а також із потужністю гумусового горизонту [10, 11, 12].

Особливого значення ця проблема набуває в зоні Українського Полісся, де переважають дерново-підзолисті та ясно-сірі лісові ґрунти, які характеризуються природною низькою родючістю, кислою реакцією та високою просторовою мінливістю агрохімічних показників. Значна строкатість ґрунтового покриву Полісся зумовлена складним рельєфом, чергуванням піщаних, супіщаних та суглинкових відкладів, близьким заляганням ґрунтових вод, а також історією господарського використання окремих ділянок. За таких умов навіть незначні, на перший погляд, відмінності в елементах родючості можуть призводити до суттєвої диференціації посівів за рівнем розвитку та продуктивності [7, 10, 3].

1.4. Геостатистичні методи в дослідженні просторових закономірностей системи «ґрунт–рослина»

Для кількісного опису просторової мінливості властивостей ґрунту та врожайності сільськогосподарських культур у системах точного землеробства дедалі ширше застосовують апарат геостатистики. На відміну від класичних статистичних методів, які розглядають об'єкти дослідження як незалежні, геостатистика враховує просторову залежність між сусідніми точками спостережень, що є важливою властивістю просторово-розподілених агроекологічних даних [6, 9, 12].

Основним інструментом геостатистичного аналізу є варіограма, яка описує залежність напівдисперсії (міри розкиду значень) від відстані між точками вимірювань. Моделювання варіограми дає змогу оцінити просторову структуру даних, визначити радіус (діапазон) просторової кореляції та співвідношення між систематичною і випадковою компонентами мінливості. Отримані параметри варіограмної моделі використовують для інтерполяції значень у непроміряних точках методом

кригінгу, який забезпечує найкращий лінійний незміщений прогноз просторового розподілу досліджуваних показників [6, 9, 11].

Важливим етапом аналізу є оцінка кореляційних зв'язків між просторово-розподіленими змінними, зокрема між властивостями ґрунту та врожайністю культури. Для цього використовують методи просторової кореляції та регресійного аналізу, які дають змогу не лише встановити наявність зв'язку, але й кількісно оцінити його силу та напрям. Результатом таких досліджень є виділення однорідних зон менеджменту (management zones) – ділянок поля, в межах яких агроекологічні умови є відносно стабільними та потребують застосування єдиної стратегії управління [12, 21, 22].

Аналіз наукової літератури засвідчує, що впродовж останніх двох десятиліть у світі накопичено значний досвід застосування технологій точного землеробства для оптимізації вирощування кукурудзи. Дослідження, проведені в США, країнах Європейського Союзу, Бразилії, демонструють високу ефективність диференційованого внесення добрив, особливо азотних, з урахуванням просторової варіабельності ґрунтових умов та стану посівів [1, 2, 5, 8].

В Україні, незважаючи на зростаючий інтерес аграріїв до цифрових технологій, системні наукові дослідження впливу просторової неоднорідності ґрунтового покриву на продуктивність кукурудзи залишаються поодинокими. Більшість публікацій мають оглядовий характер або висвітлюють окремі аспекти впровадження елементів точного землеробства без поглибленого аналізу просторових закономірностей. Зокрема, недостатньо вивченими є питання кількісного взаємозв'язку між агрохімічними показниками сірих лісових ґрунтів Житомирського Полісся та врожайністю зерна кукурудзи на рівні конкретних господарств, які впроваджують сучасні цифрові платформи управління [7, 10, 3].

Відсутність регіональних досліджень ускладнює розробку науково обґрунтованих рекомендацій щодо диференційованого застосування добрив

та інших агротехнічних заходів у межах технологій точного землеробства для умов Полісся. Це стримує практичне впровадження прецизійних технологій та знижує потенційну ефективність інвестицій у цифровізацію агровиробництва.

Таким чином, актуальність дослідження, результати якого висвітлено в цій роботі, зумовлена необхідністю заповнення прогалини в науковому знанні щодо просторових закономірностей формування продуктивності кукурудзи на зерно в умовах неоднорідності ґрунтового покриву Полісся з використанням інструментарію точного землеробства та цифрових платформ управління агровиробництвом. Поглиблене вивчення цих питань дасть змогу розробити практичні рекомендації для підвищення ефективності вирощування культури в регіоні дослідження.

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Місце та умови проведення досліджень.

Місце проведення досліджень. Експериментальну частину роботи виконано впродовж 2023–2025 років на базі товариства з обмеженою відповідальністю «Агростем». Для цілей дослідження було обрано ряд земельних ділянок господарства, які розташовані в межах Висоцької сільської територіальної громади Житомирського району Житомирської області. Територія дослідного полігону простягається в північно-західній частині Житомирського Полісся – природно-сільськогосподарської зони, яка вирізняється специфічними ґрунтово-кліматичними умовами, що безпосередньо впливають на агротехнологічні підходи до вирощування польових культур.

Загальна площа проаналізованого масиву, на якому розгорталися дослідження, становить 677 гектарів. Такий значний розмір виробничої ділянки дає змогу з високою достовірністю оцінити характер і масштаби просторової мінливості як властивостей ґрунтового покриву, так і результуючих показників урожайності кукурудзи на зерно. Цільова територія характеризується складним мезорельєфом із чергуванням положистих підвищень та неглибоких западин, що також вносить додаткову варіабельність у розподіл вологи й елементів живлення.

Ґрунтовий покрив досліджуваного масиву сформувався на лесовидних суглинках та водно-льодовикових відкладах, що є типовим для цього регіону Полісся. Переважаючими ґрунтами є ясно-сірі лісові (Haplic Albeluvisols за міжнародною класифікацією WRB), які займають близько 75–80 % площі. Вони характеризуються невисоким вмістом гумусу (1,1–1,8 %), кислою або слабкокислою реакцією ґрунтового розчину (pH сольове 4,8–5,5) та незначною потужністю гумусово-елювіального горизонту. На окремих підвищених елементах рельєфу трапляються включення темно-сірих опідзолених ґрунтів (Haplic Phaeozems) та, навіть, чорноземів

опідзолених (Haplic Chernozems), які відзначаються дещо кращими агрохімічними показниками. Така строкатість ґрунтового покриву створює передумови для суттєвої диференціації умов живлення рослин у межах навіть одного поля.

Погодні умови за роки проведення досліджень. Метеорологічні умови протягом вегетації кукурудзи характеризувалися досить значною мінливістю у роки досліджень (2023-2025 роки), проте відповідали типовим для даної зони показникам, що обґрунтовує можливість широкого застосування досягнутих результатів у зональній системі точного землеробства.

Клімат зони проведення досліджень помірно континентальний із м'якою зимою та теплим вологим літом. Середньорічна температура повітря коливається в межах +6,5…+7,5 °С, сума активних температур (вище +10 °С) становить 2400–2600 °С. Середньорічна кількість опадів – 550–650 мм, причому основна їх частина випадає в теплий період року, що загалом сприятливо для вирощування кукурудзи, однак нерівномірність розподілу опадів у часі може створювати дефіцит вологи в критичні фази росту.

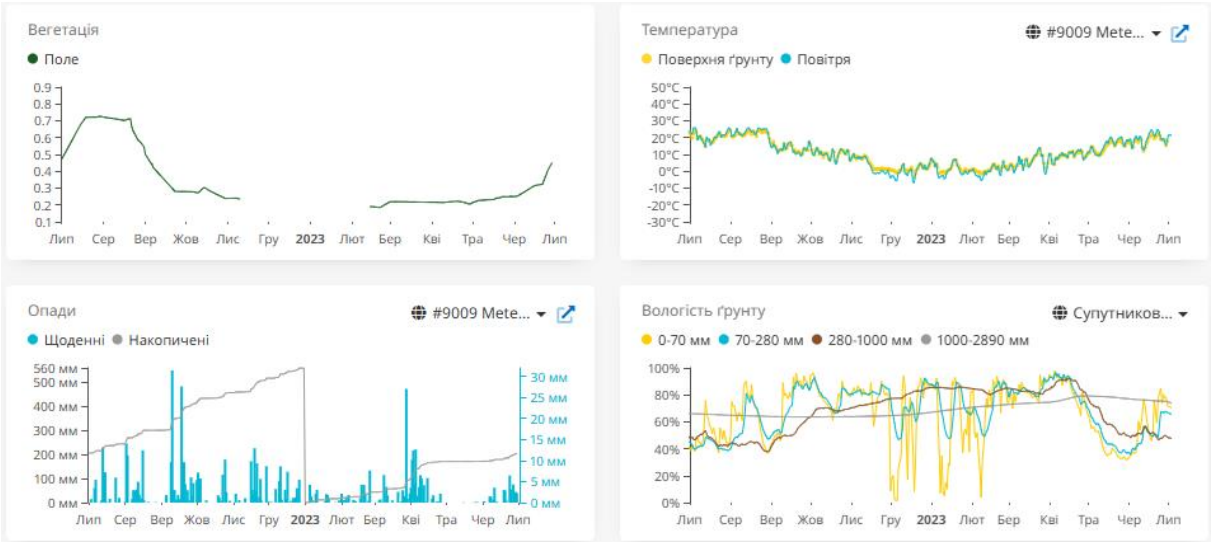


Рис. 1. **Погодно-кліматичні умови вегетаційного періоду 2023 року** (за даними платформи Cropwise Operations Center, усереднене з погодних сервісів та місцевих метеостанцій)

Безпосередньо в роки проведення досліджень погодні умови мали певні відхилення від середніх багаторічних показників.

Вегетаційний період 2023 року вирізнявся контрастним температурним режимом та нерівномірним зволоженням упродовж сезону. Весняний період характеризувався помірними температурами, сприятливими для початкового росту кукурудзи. Однак у другій декаді червня спостерігалося різке зниження температури повітря на 7–11 °C за добу, спричинене надходженням холодних атмосферних мас із північного сходу, що призвело до похолодання до показників, характерних для початку травня. В останні дні червня температурний режим нормалізувався і максимальна температура повітря підвищилася до 31–33 °C. Розподіл опадів упродовж вегетації мав вкрай нерівномірний характер. У червні на території досліджень відмічалися сильні дощі, добовий максимум опадів подекуди досягав 21–54 мм, що становило 1–2 декадні норми. Водночас у багатьох районах Житомирщини зберігався дефіцит зволоження, який тривав ще з кінця квітня, і невеликі дощі другої декади червня не призвели до суттєвого поповнення вологозапасів ґрунту. Загалом гідротермічні умови 2023 року були сприятливими для формування врожайності кукурудзи.

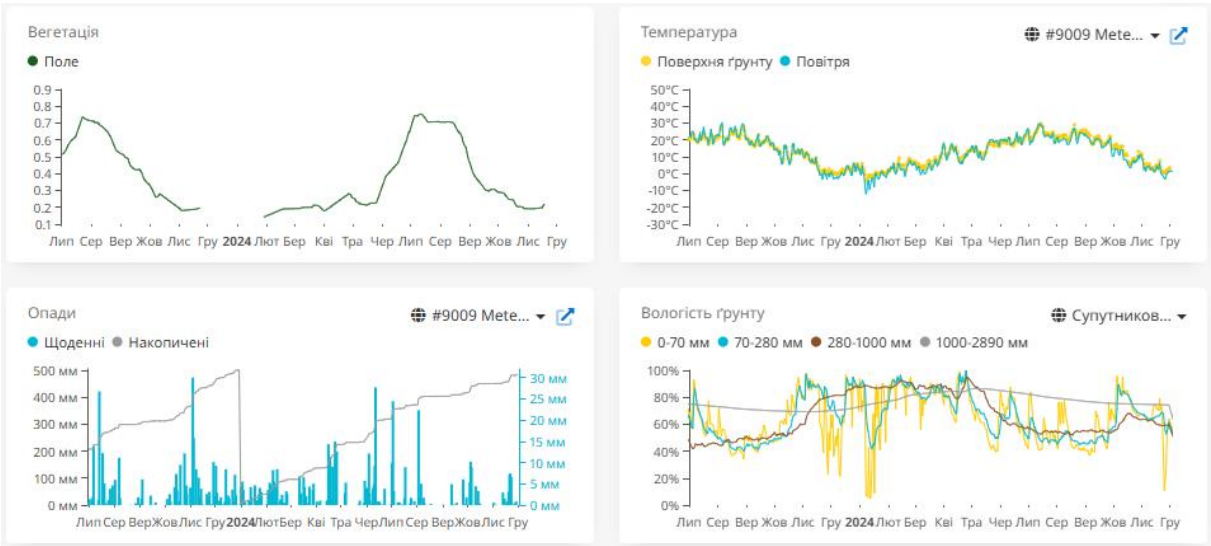


Рис. 2. **Погодно-кліматичні умови вегетаційного періоду 2024 року (за даними платформи Cropwise Operations Center, усереднене з погодних сервісів та місцевих метеостанцій)**

Вегетаційний період 2024 року характеризувався підвищеним температурним режимом у липні-серпні, що співпало з фазою цвітіння та наливу зерна кукурудзи, та нерівномірним розподілом опадів. Травень був помірно теплим із достатньою кількістю вологи, що забезпечило дружні сходи та початковий ріст рослин. Однак у другій половині червня спостерігався короткочасний посушливий період, який міг позначитися на формуванні генеративних органів на окремих ділянках поля з легшим гранулометричним складом ґрунту.

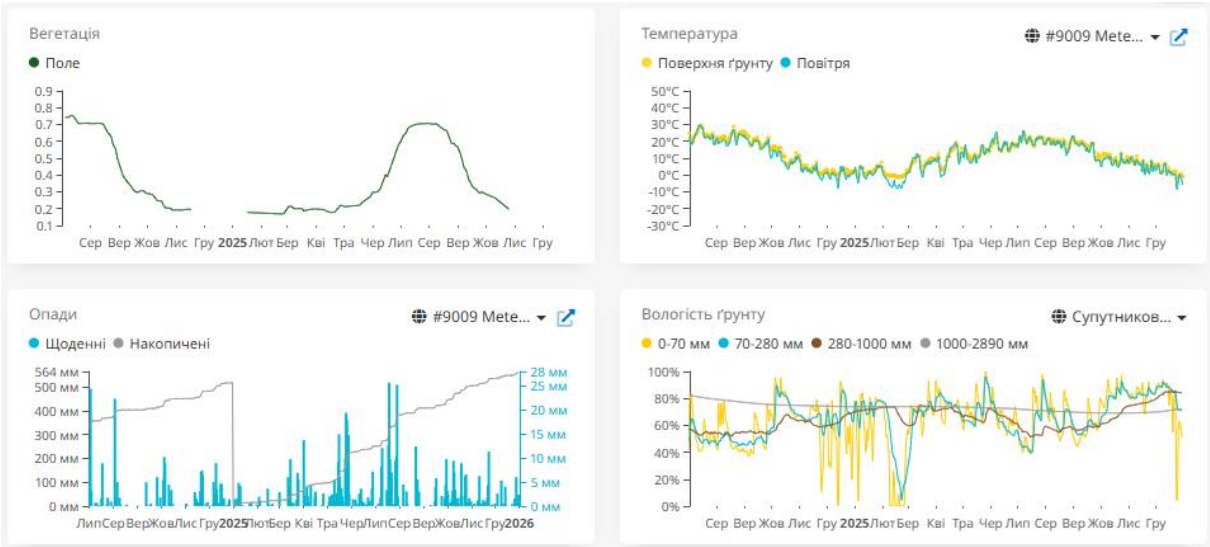


Рис. 3. **Погодно-кліматичні умови вегетаційного періоду 2025 року** (за даними платформи Cropwise Operations Center, усереднене з погодних сервісів та місцевих метеостанцій)

На початку вегетації 2025 року відмічався дефіцит тепла, що дещо уповільнило темпи початкового росту культури. Однак починаючи з фази викидання волоті, температурний режим нормалізувався, а рясні опади в липні сприяли активному наливу зерна. Така міжрічна варіабельність погодних умов є типовою для Полісся і дала змогу оцінити стабільність виявлених просторових закономірностей та реакцію культури на зміну гідротермічних умов на різних елементарних ділянках поля.

2.2. Програма та методика проведення досліджень.

Метою дослідження було проаналізувати просторову мінливість продуктивності кукурудзи на зерно та встановити її взаємозв'язок із властивостями ґрунтового покриву в умовах застосування технологій точного землеробства в господарстві Житомирського району.

Для досягнення поставленої мети передбачалося виконання наступних **завдань**:

- провести аналіз літературних джерел щодо впливу просторової неоднорідності ґрунтів на продуктивність сільськогосподарських культур;
- оцінити просторову варіабельність агрохімічних показників ґрунту (вміст гумусу, кислотність, забезпеченість елементами живлення) у межах дослідного масиву;
- здійснити збір та оброблення даних карт врожайності кукурудзи з використанням цифрових платформ точного землеробства;
- провести геостатистичний та ГІС-аналіз для виявлення зв'язків між властивостями ґрунту й врожайністю культури;
- виділити однорідні зони менеджменту та обґрунтувати доцільність диференційованого посіву й застосування добрив;
- узагальнити отримані результати та розробити практичні рекомендації для виробництва.

Об'єкт дослідження. Процес формування просторової мінливості продуктивності кукурудзи на зерно під впливом неоднорідності агрохімічних властивостей ґрунтового покриву.

Предмет дослідження. Варіювання урожайності кукурудзи, закономірності просторового розподілу показників родючості ясно-сірих лісових ґрунтів, вегетаційні індекси посівів, картограми врожайності кукурудзи, кореляційні зв'язки в системі «ґрунт – рослина» в умовах застосування технологій точного землеробства.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети й вирішення конкретних завдань у роботі застосовано комплексний підхід, що поєднує загальнонаукові та спеціальні методи агрономічних досліджень. Теоретичний рівень пізнання реалізовано через аналіз, синтез та узагальнення інформації з наукових літературних джерел вітчизняних і зарубіжних авторів. Емпіричну частину виконано із залученням методів:

Польового методу, який передбачав відбір ґрунтових зразків за регулярною сіткою, візуальне обстеження посівів, фіксацію просторових координат точок спостереження.

Лабораторного методу для визначення основних агрохімічних показників ґрунту (гумус, pH, рухомі сполуки фосфору та калію, мінеральний азот) із використанням стандартизованих (загальноприйнятих) методик.

Інструментального (сенсорного) методу, що базується на автоматичному збиранні даних про врожайність безпосередньо під час роботи зернозбирального комбайна, оснащеного системою моніторингу Yield Monitoring та GPS-приймачем.

Методу дистанційного зондування Землі, який полягає в отриманні та аналізі багатоспектральних супутникових знімків (платформа Sentinel-2) для розрахунку вегетаційних індексів (NDVI), що відображають просторову неоднорідність фітомаси та фотосинтетичної активності посівів.

Геоінформаційного методу (ГІС), що забезпечує просторову прив'язку всіх даних, їх візуалізацію у вигляді електронних карт, проведення оверлейних операцій та просторового моделювання з використанням цифрових платформ управління агровиробництвом (Cropwise Operations Center, John Deere Operations Center, OneSoil).

Статистичного та геостатистичного методів, які застосовано для оцінки параметрів розподілу даних (середнє, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації), перевірки достовірності відмінностей між вибірками (ANOVA), а також для аналізу просторової структури мінливості

(варіографічний аналіз) та подальшої просторової інтерполяції (ординарний кригінг).

Методика проведення досліджень

Програмою досліджень передбачалося виконання низки послідовних етапів, спрямованих на виявлення, кількісний опис та інтерпретацію просторових закономірностей формування продуктивності кукурудзи.

Ґрунтове обстеження. Відбір зразків ґрунту проводили з використанням регулярної сітки з кроком, який відповідає щільності однієї проби на 5 гектарів. Така щільність є загальноприйнятою в системах точного землеробства для деталізації просторової варіабельності агрохімічних показників на етапі створення електронних карт. Координати кожної точки відбору фіксували за допомогою портативного GPS-приймача з точністю до 1 метра. Зразки відбирали автоматичним пробовідбірником із глибини орного шару (0–20 см), формуючи змішану пробу з 10–12 індивідуальних уколів у радіусі 5–10 метрів навколо вузлової точки.

Лабораторні аналізи відібраних зразків виконано в сертифікованій лабораторії. Визначали такі показники:

- вміст гумусу – за методом Тюріна в модифікації Симакова;
- pH сольової витяжки – потенціометричним методом;
- вміст рухомих сполук фосфору (P_2O_5) та обмінного калію (K_2O) – за методом Кірсанова в модифікації ЦІНАО (для кислих ґрунтів);
- вміст мінерального азоту (нітратного $N\text{-}NO_3$ та амонійного $N\text{-}NH_4$) – іонометричним методом.

Отримання та оброблення даних урожайності. Дані про врожайність кукурудзи отримано під час збирання врожаю зернозбиральним комбайном, оснащеним системою моніторингу врожайності фірми John Deere. Система фіксує миттєві показники маси зерна, вологості та відповідні координати з інтервалом 1 секунда, що відповідає проходженню комбайном відстані приблизно 5–7 метрів залежно від швидкості руху.

Первинний («сирий») масив даних містить значну кількість технічних артефактів, зумовлених нерівномірним рухом агрегату, заповненням бункера, проходами на розворотних смугах, в'їздом на поле та з'їздом з нього. Тому обов'язковим етапом була процедура попереднього очищення даних. З масиву вилучали записи, що відповідають моментам різкого прискорення чи уповільнення комбайна, а також значення врожайності, які виходили за межі фізіологічно можливих (наприклад, нижче 1 т/га та вище 20 т/га), та ті, що мали критичні відхилення від середнього по полю (більше 3 стандартних відхилень). Після очищення дані були скориговані на стандартну 14 % вологість зерна.

Просторову інтерполяцію очищених даних для побудови безперервної поверхні врожайності виконано методом звичайного кригінгу (ordinary kriging) з використанням експоненціальної моделі варіограми, яка найкраще описувала просторову структуру даних. Отриману картограму врожайності використано для аналізу просторової мінливості продуктивності та виділення стабільних зон із різним рівнем урожайності.

Супутниковий моніторинг. Для оцінки просторової неоднорідності росту та розвитку рослин кукурудзи впродовж вегетаційного сезону використано супутникові знімки платформи Sentinel-2 Європейського космічного агентства. Ця платформа забезпечує зйомку з просторовим розрізненням 10 м у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах із періодичністю 5 діб. На основі спектральних каналів розраховували нормалізований вегетаційний індекс (NDVI) за формулою: NDVI = (NIR – RED) / (NIR + RED), де NIR – рівень значення в ближньому інфрачервоному діапазоні, RED – у червоному діапазоні. Візуалізацію отриманих даних виконували, використовуючи можливості і ресурси платформи Cropwise Operations Center (рис. 4).

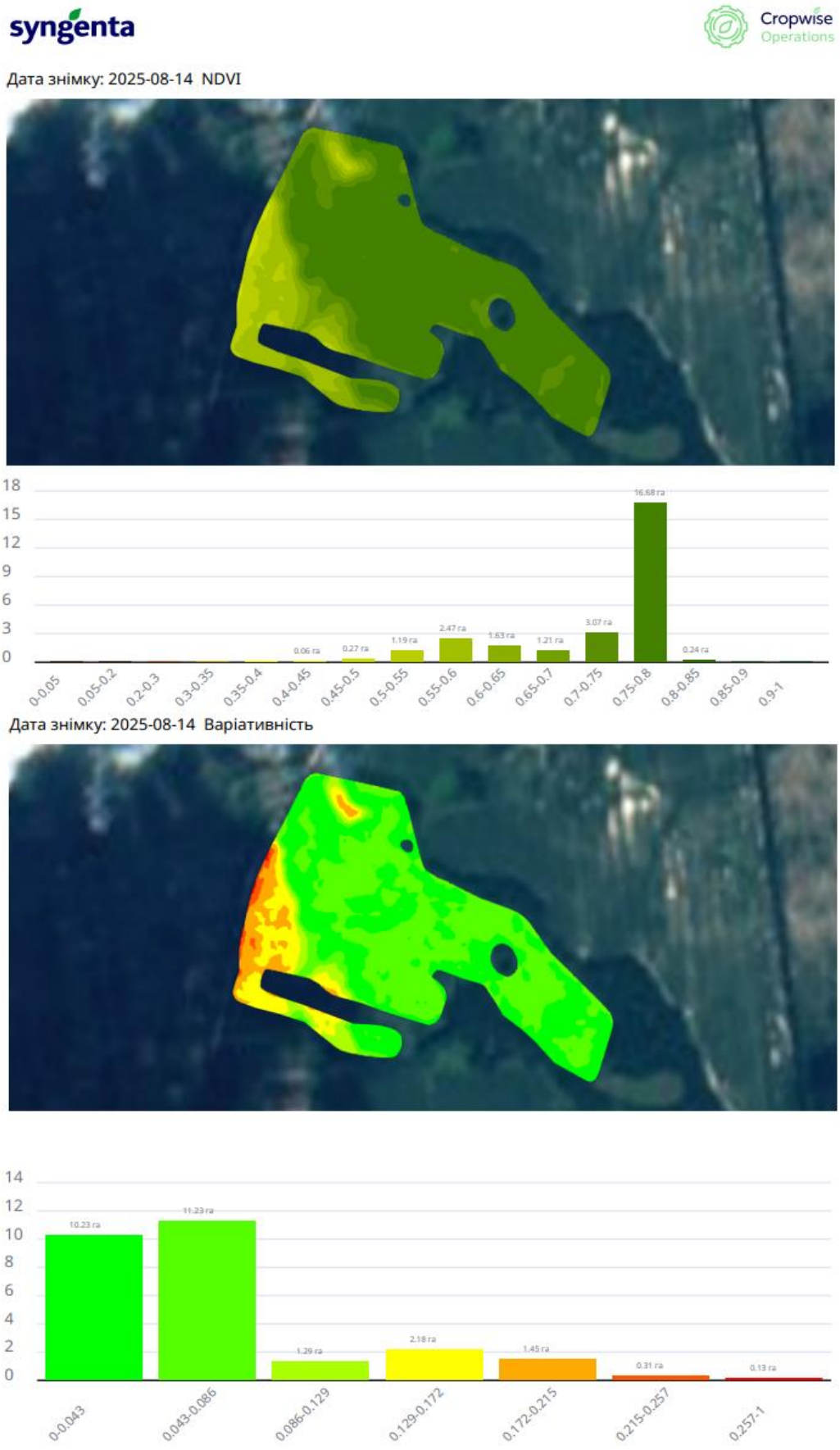


Рис. 4. **Приклад просторової мінливості стану посівів кукурудзи гібриду Amarok за показником NDVI (А - фактичний NDVI, Б – контрастний)**

Аналіз проводили за серією знімків, що охоплювали основні фази росту культури: початок вегетації, вихід у трубку, цвітіння та налив зерна. Просторову мінливість NDVI оцінювали як у межах усього поля, так і в розрізі попередньо виділених зон менеджменту.

Статистичний аналіз даних. Для узагальнення отриманих даних розраховували ключові статистичні показники: середнє арифметичне (Mean), стандартне відхилення (SD), коефіцієнт варіації (CV), який обчислювали як відношення стандартного відхилення до середнього арифметичного значення, виражене у відсотках: $CV = (SD / Mean) \times 100$. Коефіцієнт варіації використовували для якісної оцінки ступеня мінливості показників (за рівнями: незначна, середня, значна).

Для перевірки статистичної значущості відмінностей урожайності між виділеними зонами різної продуктивності застосовано однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA). Попередньо перевіряли відповідність розподілу наявних даних нормальному закону за критерієм Шапіро-Уїлка. Усі статистичні розрахунки та графічні побудови виконано з використанням пакетів програм Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США) та інструментів просторового аналізу, інтегрованих у платформу Cropwise Operations Center.

РОЗДІЛ 3
ПРОСТОРОВА ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ РОДЮЧОСТІ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ КУКУРУДЗИ В УМОВАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

3.1. Оцінка неоднорідності ґрунтового покриву дослідного масиву

Вихідним етапом досліджень стало вивчення просторової мінливості основних агрохімічних та агрофізичних показників ґрунту в межах виділеного для аналізу масиву. Попри те, що добір ділянок здійснювався за принципом генетичної спорідненості ґрунтів (переважання світло-сірих лісових відмін) та вирощування однакових гібридів культури в межах одного поля в конкретний рік, результати лабораторних аналізів засвідчили наявність суттєвої внутрішньопольової строкатості (рис. 5).



Рис. 5. **Приклад внутрішньопольової неоднорідності за агрохімічними показниками (обмінний калій) ясно-сірого лісового грунту**

Статистичне опрацювання даних агрохімічного обстеження показало, що ступінь варіабельності різних показників неоднаковий. Найменшою мінливістю характеризувався показник кислотності (pH сольове) – коефіцієнт варіації (CV) тут не перевищував 7–9 %, що дозволяє віднести цей параметр до категорії з низьким рівнем просторової неоднорідності. Така відносна стабільність розподілу pH пояснюється, ймовірно,

генетичними особливостями ясно-сірих і сірих лісових ґрунтів, що залягають на лесовидних породах, а також застосуванням вапнякових матеріалів у межах господарства, що призвело до певного вирівнювання цього показника.

Помірний ступінь мінливості зафіксовано для вмісту гумусу (CV = 15–22 %) та обмінного калію (K_2O). Найвищі значення коефіцієнта варіації спостерігалися для вмісту рухомого фосфору (P_2O_5) – на окремих ділянках CV сягав 35–48 %, що свідчить про дуже значну строкатість забезпечення рослин цим елементом живлення. Така нерівномірність розподілу фосфатів є типовою для ґрунтів Полісся і може бути наслідком як неоднорідності ґрунтотворних порід, так і тривалої практики внесення добрив без урахування просторових особливостей.

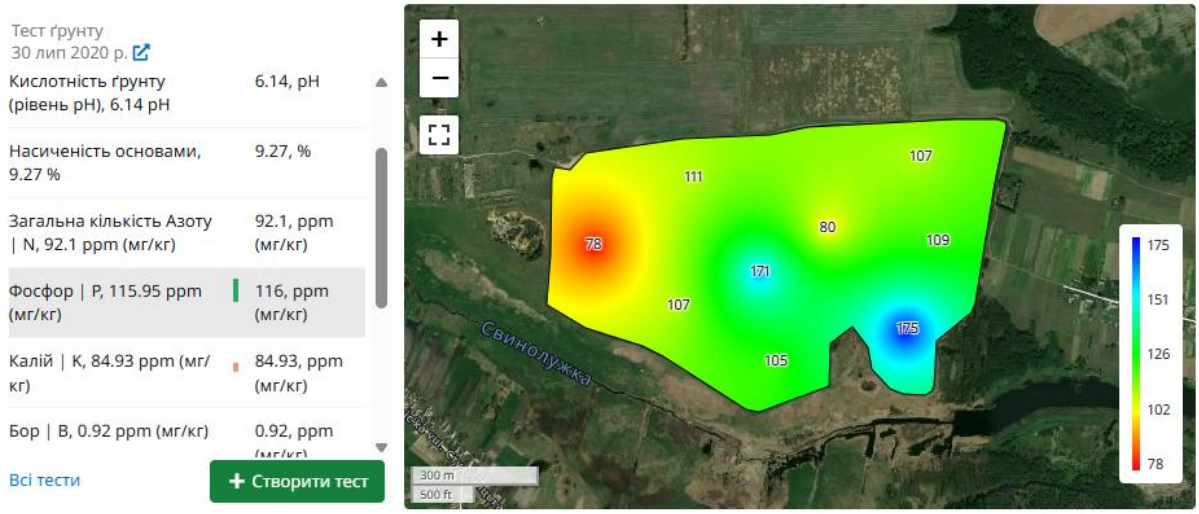


Рис. 6. **Приклад внутрішньопольової неоднорідності за вмістом рухомого фосфору у ясно-сірому лісовому грунті**

Окрему увагу приділено аналізу просторової мінливості фізичних властивостей, зокрема показника твердості грунту. Найвища варіабельність за цим параметром виявлена в шарі 5–15 см, де CV перевищував 25 %. Це свідчить про суттєву диференціацію ущільнення орного горизонту, що може бути пов'язано як з природними факторами (гранулометричний склад та вміст органічної речовини), так і з техногенним впливом (траєкторії руху важкої техніки).

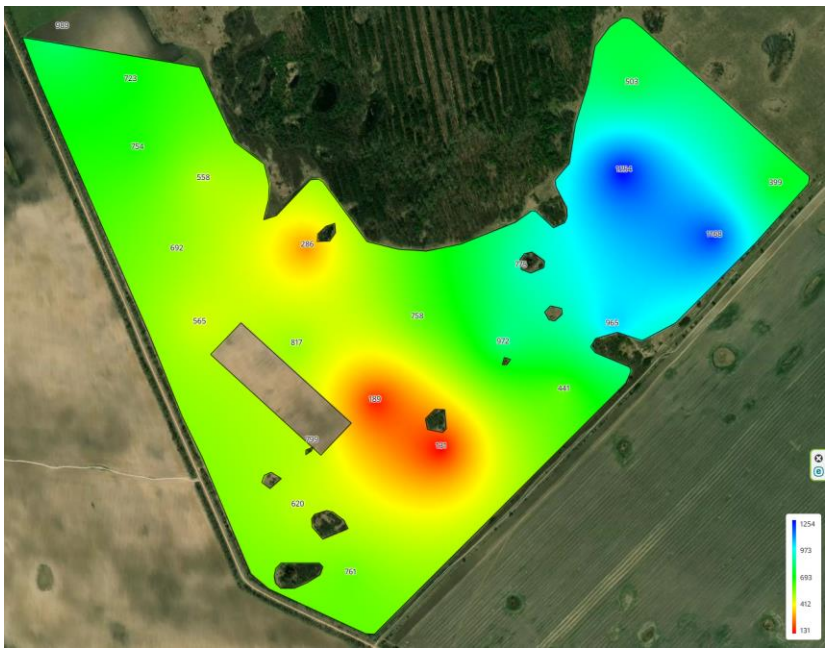


Рис.7. **Варіювання твердості грунту в межах поля (глибина 10 см)**

Ділянки з підвищеною твердістю ґрунту в подальшому можуть лімітувати проникнення кореневої системи та засвоєння елементів живлення, що безпосередньо впливає на продуктивність кукурудзи.

3.2 Динаміка врожайності кукурудзи та чинники її просторової мінливості

Аналіз даних моніторингу врожайності, отриманих із комбайнів, обладнаних відповідними сенсорними системами, охопив три вегетаційні сезони – 2023, 2024 та 2025 роки. За цей період простежувалася чітка залежність рівня продуктивності як від генетичних особливостей гібридів, так і від специфіки погодних умов кожного року (табл. 1).

Таблиця 1

Варіювання урожайності кукурудзи на обраному масиві земельних ділянок (n=11)

Рік досліджень	Гібрид кукурудзи	Урожайність, т/га	Коефіцієнт варіації (CV), %
2023	RGT MAXXATAK	8,27±0,65	7,82%
2024	P8816	6,77±0,95	14,00%
2025	Amarok	9,98±1,47	14,72%

Найвищу середню врожайність зафіксовано у 2025 році при вирощуванні гібрида Амарок (оригінатор – ВНІС, Україна). Середній показник по полю становив 9,98 т/га зі стандартним відхиленням ±1,47 т/га. Цей гібрид продемонстрував найкращу адаптацію до ґрунтово-кліматичних умов Полісся в поточному році, реалізувавши потенціал продуктивності на рівні, близькому до біологічно можливого для зони.

Дещо нижчою продуктивністю характеризувався гібрид RAGT МАХХАТАК у 2023 році, де середня врожайність зупинилася на позначці 8,27 т/га при стандартному відхиленні ±0,65 т/га. Найменший середній врожай отримано у 2024 році на посівах гібрида P8816 (бренд Pioneer) – лише 6,77 т/га з варіацією ±0,95 т/га. Такий суттєвий міжрічний контраст зумовлений комплексом причин, серед яких чільне місце посідають погодні аномалії 2024 року (дефіцит вологи в критичні фази) та, ймовірно, нижча адаптивна здатність цього гібриду до місцевих умов.

Важливим результатом аналізу стало кількісне розмежування часток впливу різних факторів на загальну варіабельність урожайності. Проведений дисперсійний аналіз показав, що на частку генетичних особливостей гібрида та погодних умов року (гідротермічного режиму) припадає близько 62 % загальної мінливості. Своєю чергою, внесок просторової неоднорідності ґрунтових умов у загальну дисперсію врожайності сягає 32 %. Решта 6 % припадають на неконтрольовані випадкові фактори та похибки вимірювань. Діаграму, що ілюструє це співвідношення, наведено на рисунку 8.

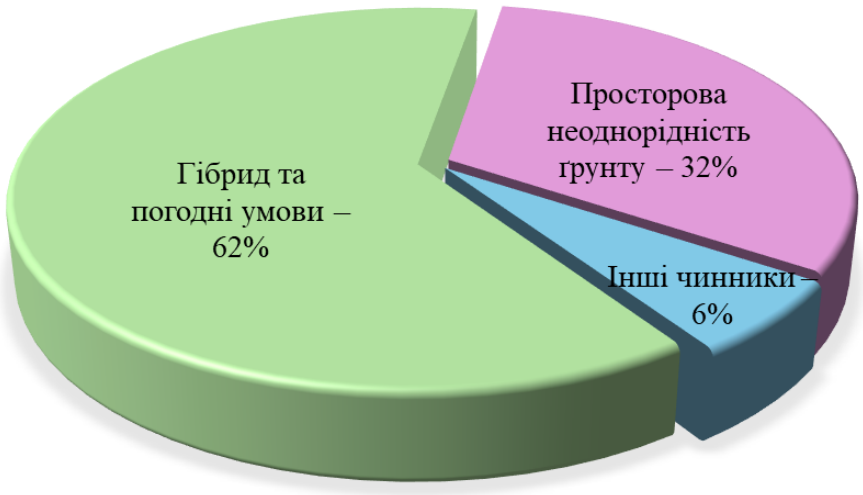


Рис. 8. **Частка впливу генетичних, метеорологічних факторів та ґрунтової неоднорідності на мінливість урожайності кукурудзи (2023–2025 рр.), %**

Рівень внутрішньопольової мінливості врожайності також суттєво різнився за роками. Коефіцієнт варіації (CV) для очищеного масиву даних моніторингу становив: у 2023 році – 7,8 %, у 2024 – 14,0 %, а в 2025 – 14,7 %. Така динаміка свідчить про те, що в роки з більш напруженими погодними умовами (2024) або з високою реалізацією потенціалу гібрида (2025) просторова строкатість проявляється яскравіше. Помірний рівень варіації, зафіксований у всі роки, є типовим для агроландшафтів Полісся з їхнім мозаїчним ґрунтовим покривом і підтверджує доцільність застосування диференційованих технологій.

3.3. Ідентифікація зон менеджменту та аналіз зв'язку врожайності з показниками родючості

Наступним завданням було оцінювання доцільності впровадження елементів точного землеробства, зокрема диференційованого висіву насіння та внесення рідких комплексних добрив, з урахуванням просторової варіабельності продуктивності. Такий підхід має на меті оптимізацію

використання ресурсів та підвищення загальної ефективності технології вирощування кукурудзи.

Для поглибленого аналізу обрано конкретне поле загальною площею 125,3 га, яке, за даними попередніх спостережень, характеризувалося вираженою строкатістю як ґрунтових показників, так і врожайності. Ґрунтові умови оцінювали за результатами лабораторного аналізу зразків, відібраних із 25 елементарних ділянок, із подальшою просторовою візуалізацією та аналізом даних в середовищі цифрової платформи Cropwise Operations Center (рис. 9).



Рис. 9. **Схема розміщення елементарних ґрунтових ділянок при проведенні ґрунтового обстеження поля**

Просторова інтерполяція даних урожайності методом кригінгу дозволила виявити чіткі закономірності розподілу продуктивності в межах поля. Візуалізація отриманої картограми засвідчила наявність просторових кластерів – ділянок із стабільно вищою та стабільно нижчою врожайністю. Зони з підвищеною продуктивністю просторово корелювали з ділянками, де за даними агрохімічного обстеження фіксувалися кращі показники родючості, насамперед вищий вміст гумусу та підвищена забезпеченість елементами живлення. Така просторова структурованість даних підтверджує, що мінливість урожайності зумовлена не випадковими флуктуаціями, а дією закономірних, просторово-детермінованих факторів.

Кореляційний аналіз виявив тісні зв'язки між урожайністю кукурудзи та окремими агрохімічними характеристиками. Найсильнішу залежність зафіксовано між продуктивністю культури та вмістом органічної речовини в ґрунті. Коефіцієнт детермінації (R^2) для цієї пари показників становив 0,69, що свідчить про визначальну роль гумусованості ґрунту в формуванні врожаю на даному масиві. Дещо слабші, але статистично значущі кореляційні зв'язки встановлено між урожайністю та вмістом рухомого фосфору ($R^2 = 0,56$), а також обмінного калію ($R^2 = 0,49$).

Подальший статистичний аналіз із застосуванням дисперсійного аналізу (ANOVA) підтвердив, що відмінності між середніми значеннями врожайності у виділених зонах різної продуктивності є статистично значущими на рівні $p < 0,05$. Це означає, що виділені зони менеджменту є не штучним утворенням, а реально існуючими елементарними ареалами агроландшафту, які потребують диференційованого підходу до управління.

Аналіз глобальної просторової автокореляції з обчисленням індексу Морана (Moran's I) підтвердив наявність статистично значущої просторової кластеризації даних урожайності. Це ще раз доводить, що варіабельність продуктивності на дослідному полі не є випадковою, а зумовлена дією просторово структурованих факторів, головним чином – властивостей ґрунту. Отримані результати створили наукове підґрунтя для виділення сталих зон менеджменту та розробки карт-завдань для диференційованого застосування агроресурсів.

3.4. Ефективність диференційованого управління посівами на основі виділених зон

Практичне впровадження елементів точного землеробства на основі виділених зон продуктивності дозволило оцінити реальну ефективність диференційованого підходу до управління технологічними процесами. На основі аналізу просторової мінливості врожайності та агрохімічних показників було розроблено технологічні карти для впровадження системи

диференційованого висіву насіння (Variable-Rate Seeding) та диференційованого внесення рідких комплексних добрив (Variable-Rate Fertilization).

Результати застосування цього підходу виявилися цілком позитивними. У 2023 році середня врожайність на полі, де впроваджували диференційовані технології, зросла з 7,6 т/га (фоновий рівень до диференціації) до 8,38 т/га після її застосування. Приріст становив 0,78 т/га, або 10,3 % відносно початкового рівня. У 2024 році ефект був ще дещо виразнішим: середня врожайність підвищилася з 7,3 до 8,10 т/га, що відповідає приросту 0,8 т/га, або 10,9 %.

Аналіз просторового розподілу приростів урожайності показав, що найбільший ефект від диференціації досягнуто в зонах, які попередньо характеризувалися помірним лімітуванням продуктивності. Оптимізація норми висіву та адресне внесення добрив у цих зонах дозволили зняти обмеження, спричинені нерівномірністю ґрунтової родючості, і максимально наблизити рівень урожайності до потенційно можливого для даних ґрунтових умов. У високопродуктивних зонах, де лімітуючі фактори були виражені слабше, приріст забезпечувався переважно за рахунок більш раціонального використання ресурсів, без їх надлишкового застосування.

Отримані дані переконливо свідчать, що адаптація агротехнологій до просторової мінливості ґрунтових умов шляхом виділення однорідних зон менеджменту є дієвим інструментом підвищення як продуктивності агроценозів, так і ефективності використання матеріально-технічних ресурсів. Застосування такого підходу є особливо виправданим в умовах Полісся з його природною строкатістю ґрунтового покриву. Це дозволяє не лише збільшити врожайність, але й забезпечити її просторову стабільність, нівелюючи негативний вплив лімітуючих факторів на окремих ділянках поля.

3.5. Економічна та енергетична ефективність диференційованого вирощування кукурудзи

Завершальним етапом досліджень стало визначення економічної доцільності та енергетичної оцінки впровадження диференційованого підходу до вирощування кукурудзи на зерно в умовах просторової неоднорідності ґрунтового покриву. Оцінювання ефективності проводили шляхом порівняння базової (контрольної) технології, яка передбачала усереднене внесення ресурсів без урахування варіабельності ґрунтових умов, та адаптивної технології з використанням диференційованого висіву насіння та диференційованого внесення рідких комплексних добрив (РКД) відповідно до виділених зон продуктивності.

Обчислення економічних показників здійснювали на основі середніх закупівельних цін на зерно кукурудзи в Україні, актуальних на період збирання врожаю протягом 2023–2025 рр., та нормативів виробничих витрат відповідно до технологічних карт вирощування культури. Вартісні показники коригували з урахуванням інфляційних процесів та зміни ринкової кон'юнктури. Згідно з даними моніторингу аграрного ринку, середня ціна реалізації зерна кукурудзи в 2023 році становила 6200 грн/т, у 2024 – 6800 грн/т, у 2025 – 8950 грн/т. Енергетичну ефективність оцінювали за співвідношенням енергії, акумульованої в урожаї, до сукупних енерговитрат на технологію [26, 27, 28, 29, 30].

На підставі проведених розрахунків виявлено, що виробничі витрати на варіантах із застосуванням елементів точного землеробства були дещо вищими порівняно з контролем (табл. 2). У середньому за три роки досліджень загальні витрати на вирощування кукурудзи за традиційною технологією становили 34280 грн/га. Впровадження диференційованого висіву та внесення РКД супроводжувалося додатковими витратами, пов'язаними з проведенням агрохімічного обстеження за сіткою, оцифруванням даних, придбанням ліцензій на програмне забезпечення цифрових платформ (Cropwise Operations Center, John Deere Operations

Center) та амортизацією відповідного обладнання. Сумарні виробничі витрати на варіантах із застосуванням елементів точного землеробства становили в середньому 35870 грн/га, що на 4,6% вище за контроль.

Таблиця 2

Економічна ефективність вирощування кукурудзи на зерно за різних технологій (середнє за 2023–2025 рр.)

Показник	Контроль (базова технологія)	Диференційована технологія	Відхилення (+/-)
Урожайність, т/га	7,45	8,24	+0,79
Виробничі витрати, грн/га	34 280	35 870	+1 590
Собівартість 1 т зерна, грн	4 601	4 353	-248
Ціна реалізації 1 т зерна (сер.), грн	7 317	7 317	–
Вартість продукції з 1 га, грн	54 512	60 292	+5 780
Чистий прибуток з 1 га, грн	20 232	24 422	+4 190
Рівень рентабельності, %	59,0	68,1	+9,1в.п.

Джерело: власні розрахунки автора на основі виробничих даних ТОВ «Агростем»

Перехід на диференційований висів і диференційоване внесення рідких комплексних добрив продемонстрував значний вплив на показник економічної ефективності вирощування кукурудзи. Якщо на контрольному варіанті (базовий рівень показника на полі без врахування трьох зон продуктивності) собівартість 1 тони зерна складала 4601 грн, то за

диференційованого внесення цей показник знижувався до 4 353 грн. Зниження собівартості на 248 грн/т (5,7%) відбулося насамперед завдяки приросту врожайності, який компенсував додаткові витрати на впровадження прецизійних технологій.

Чистий прибуток з одного гектара при застосуванні диференційованої технології зріс у середньому на 4190 грн/га порівняно з контролем і досяг рівня 24 422 грн/га. Це забезпечило підвищення рівня рентабельності виробництва зерна кукурудзи з 59,0 % до 68,1 %, тобто на 9,1 відсоткових пункти. Варто зазначити, що найвищі показники рентабельності (понад 72%) були досягнуті у 2025 році, коли склалися найсприятливіші цінові умови на ринку зерна.

Енергетична оцінка підтвердила доцільність застосування диференційованого підходу з погляду ефективності використання енергоресурсів. Незважаючи на певне зростання енерговитрат, пов'язаних із додатковими операціями збору та обробки інформації, сумарний вихід енергії з урожаєм збільшився більш суттєво завдяки приросту продуктивності. Коефіцієнт енергетичної ефективності (відношення енергії, отриманої з урожаєм, до сукупних енерговитрат) на варіанті з диференційованою технологією становив 3,12, що перевищує аналогічний показник на контролі (2,94). Це свідчить про раціональніше використання енергоресурсів та вищу біоенергетичну ефективність запропонованого підходу.

Таким чином, результати економічного та енергетичного аналізу переконливо доводять, що впровадження диференційованих технологій вирощування кукурудзи на основі врахування просторової неоднорідності ґрунтового покриву є не лише агрономічно виправданим, але й економічно доцільним заходом. Досягнутий рівень приросту врожайності (0,79 т/га) у поєднанні з оптимізацією використання матеріально-технічних ресурсів забезпечує стале підвищення прибутковості виробництва зерна кукурудзи в умовах Полісся України.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи, на основі аналізу та узагальнення даних польових досліджень, лабораторних аналізів, супутникового моніторингу та математико-статистичного опрацювання матеріалів, можна зробити такі підсумкові узагальнення:

1. У межах досліджуваного агроландшафту ТОВ «Агростем» підтверджено наявність вираженої просторової неоднорідності агрохімічних властивостей ґрунтового покриву та відповідного варіювання врожайності кукурудзи. Навіть на полях, відібраних за принципом генетичної однорідності ґрунтів, зафіксовано суттєву варіабельність ключових показників родючості та продуктивності культури. Найвищий ступінь мінливості (CV > 35 %) характерний для вмісту рухомого фосфору, тоді як показник pH виявився відносно стабільним у просторі (CV < 9 %).

2. За результатами моніторингу врожайності впродовж 2023–2025 років встановлено істотні відмінності в продуктивності кукурудзи, зумовлені як генетичними особливостями гібридів, так і специфікою погодних умов вегетаційних періодів. Максимальну середню врожайність зафіксовано у 2025 році для гібрида Амарок (9,98 ± 1,47 т/га), мінімальну – у 2024 році для гібрида Р8816 (6,77 ± 0,95 т/га). Внутрішньопольова варіабельність урожайності коливалася в межах коефіцієнтів варіації від 7,8 % до 14,7 %, що відповідає низькому та помірному рівням мінливості, типовим для агроекосистем зони Полісся.

3. Декомпозиція загальної дисперсії врожайності показала, що на частку гібрида та погодних умов припадає близько 62 % загальної мінливості. В той же час, внесок просторової неоднорідності ґрунтових властивостей становить 32 %, що підкреслює вагому роль едафічного фактора у формуванні просторових патернів продуктивності кукурудзи в умовах господарства.

4. Просторова інтерполяція даних урожайності методом кригінгу та наступний геостатистичний аналіз підтвердили наявність чітко виражених

градієнтів продуктивності в межах дослідного поля. Ділянки зі стало вищою врожайністю просторово приурочені до зон із покращеними показниками родючості, насамперед із підвищеним умістом органічної речовини та кращою забезпеченістю елементами живлення.

5. Кореляційний аналіз виявив найтісніший зв'язок між урожайністю кукурудзи та вмістом гумусу в ґрунті (R^2 = 0,69). Дещо слабші, але статистично значущі кореляції встановлено для вмісту рухомого фосфору (R^2 = 0,56) та обмінного калію (R^2 = 0,49). Отримані залежності підтверджують визначальну роль органічної речовини у формуванні просторової варіабельності продуктивності культури на ґрунтах Полісся.

6. Аналіз просторової автокореляції з використанням індексу Морана (Moran's I) засвідчив, що спостережувана мінливість урожайності має не випадковий, а структурований просторовий характер. Це створює об'єктивне наукове підґрунтя для виділення в межах поля сталих зон менеджменту, однорідних за рівнем продуктивності та агрохімічними показниками.

7. Виокремлення просторово однорідних зон менеджменту створило передумови для практичного впровадження елементів точного землеробства, зокрема диференційованого висіву насіння та диференційованого внесення рідких комплексних добрив. Застосування таких технологічних підходів у виробничих умовах ТОВ «Агростем» забезпечило приріст урожайності на 10,3 % у 2023 році та 10,9 % у 2024 році порівняно з базовим (усередненим) рівнем.

8. Економічна оцінка підтвердила доцільність впровадження диференційованих технологій. Попри зростання виробничих витрат на 1590 грн/га (4,6 %), собівартість тонни зерна знизилася на 248 грн (5,7 %) завдяки приросту врожайності. Чистий прибуток з гектара зріс на 4190 грн, а рівень рентабельності підвищився з 59,0 % до 68,1 %. Коефіцієнт енергетичної ефективності на варіанті з диференційованою технологією становив 3,12

проти 2,94 на контролі, що свідчить про раціональніше використання енергоресурсів.

9. Інтеграція даних моніторингу врожайності, агрохімічного обстеження ґрунтів та просторового статистичного аналізу зарекомендувала себе як дієвий інструмент підтримки прийняття агрономічних рішень. Застосування такого підходу у виробничих умовах дає змогу адаптувати технологічні операції до реальної строкатості ґрунтового покриву, оптимізувати використання матеріально-технічних ресурсів та підвищити загальну стійкість виробництва зерна кукурудзи в неоднорідних ландшафтах Полісся.

10. Отримані результати засвідчують високий потенціал технологій точного землеробства для підвищення продуктивності та сталості виробництва кукурудзи в умовах гетерогенного ґрунтового покриву Житомирської області. Подальші дослідження доцільно спрямувати на накопичення багаторічних даних та залучення додаткових просторових змінних (рельєф, дані електропровідності ґрунтів, детальніші вегетаційні індекси) для підвищення стійкості виділених зон менеджменту та точності диференційованих агрозаходів.

ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

На основі результатів проведених досліджень, аналізу просторової мінливості ґрунтового покриву та врожайності кукурудзи, а також з огляду на підтверджену економічну ефективність диференційованих технологій, для впровадження у виробничу діяльність ТОВ «Агростем» та інших господарств Житомирського району, що працюють в аналогічних ґрунтово-кліматичних умовах, пропонуються такі практичні рекомендації:

1. Проводити агрохімічне обстеження ґрунтів за регулярною сіткою 5 га з GPS-прив'язкою для створення точних картограм просторового розподілу показників родючості.

2. Використовувати багаторічні дані карт врожайності з комбайнів як основу для виділення стабільних зон продуктивності в межах полів. Виділяти зони менеджменту шляхом інтеграції даних агрохімічного обстеження, карт врожайності та вегетаційних індексів (NDVI) у цифрових платформах (Cropwise, John Deere Operations Center).

3. Застосовувати диференційований висів насіння відповідно до виділених зон: у високопродуктивних зонах використовувати повну норму висіву, у низькопродуктивних – зменшувати її на 10–15 %. Впровадити диференційоване внесення добрив на основі картограм забезпеченості елементами живлення, коригуючи дози відповідно до фактичного вмісту поживних речовин у кожній зоні.

4. Для оперативного контролю посівів використовувати супутникові знімки (Sentinel-2) для виявлення проблемних ділянок та своєчасного проведення позакореневих підживлень. Формувати базу просторових даних господарства (ГІС-архів) з накопиченням інформації за кілька років для підвищення точності прогнозування та ефективності управлінських рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*. 3(4). 254–256. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0.
2. Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision Agriculture and Food Security. *Science*. 327(5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899.
3. Lykhovyd, P. (2022). Theoretical bases of crop production on the reclaimed lands in the conditions of climate change. *RS Global Sp. z O.O*. https://doi.org/10.31435/rsglobal/050.
4. McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2005). Future Directions of Precision Agriculture. Precision Agriculture. 6(1). 7–23. https://doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8.
5. Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*. 114(4). 358–371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.
6. Nyéki, A., Daróczy, B., Kerepesi, C., Neményi, M., & Kovács, A. (2022). Spatial Variability of Soil Properties and Its Effect on Maize Yields within Field – A Case Study in Hungary. *Agronomy*. https://doi.org/10.3390/agronomy12020395.
7. Nykytiuk, Y., & Kravchenko, O. (2025). Agroecological assessment of maize suitability in the Polissia and Forest-Steppe of Ukraine under future climate projections. *Agrology*. https://doi.org/10.32819/202515.
8. Norberto, M., Sillero, N., Coimbra, J., & Cunha, M. (2023). Filling the maize yield gap based on precision agriculture - A MaxEnt approach. *Comput. Electron. Agric.*, 211, 107970. https://doi.org/10.2139/ssrn.4374834.
9. Bhagwan, P., Anjaiah, T., Ravali, C., Devi, M., Neelima, T., Chary, D., & Chatterjee, S. (2025). Delineating soil fertility management zones using geostatistics and fuzzy clustering in semi-arid maize systems in India.

Environmental Monitoring and Assessment, 197. https://doi.org/10.1007/s10661-025-14608-z.

10. Derevenets-Shevchenko, K., Shevchenko, S., Shevchenko, O., Tkalich, Y., & Hulenko, O. (2025). Modern trends in maize cultivation in Ukraine: National practices and international experience. *Agrology*. https://doi.org/10.32819/202520.
11. Moemeni, F., & Amirinejad, A. (2025). Enhancing Soil Health and Crop Productivity through Spatial Variability Analysis in Precision Agriculture. *Smart Agricultural Technology*. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100972.
12. Abdel-Rahman, M., Zakarya, Y., Metwaly, M., & Koubouris, G. (2020). Deciphering Soil Spatial Variability through Geostatistics and Interpolation Techniques. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su13010194.
13. Niu, J., Tang, H., Zhang, Y., Gao, B., Ji, W., Yu, Q., & Huang, Y. (2025). Optimization of Crop Yield Prediction Models Based on Stratified Soil Properties. *Smart Agricultural Technology*. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101466.
14. Feng, P., Wang, B., Harrison, M., Wang, J., Liu, K., Huang, M., Liu, D., Yu, Q., & Hu, K. (2022). Soil properties resulting in superior maize yields upon climate warming. *Agronomy for Sustainable Development*. 42. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00818-z.
15. Alasinrin, S., Sainju, U., Busari, M., Salako, F., Isimikalu, T., Ologunde, O., Kareem, I., Affinnih, O., & Bello, S. (2025). Selected soil physical properties and maize yield influenced by tillage systems and fertilizer types in southwest Nigeria. *Plant Science Today*. https://doi.org/10.14719/pst.7109.
16. Chen, F., Xu, X., Chen, S., Wang, Z., Wang, B., Zhang, Y., Zhang, C., Feng, P., & Hu, K. (2024). Soil buffering capacity enhances maize yield resilience amidst climate perturbations. *Agricultural Systems*. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103870.

17. Рослинництво з основами кормовиробництва: Підручник / С. М. Каленська, М. Я. Дмитришак, Г. І. Демидась [та ін.]. Вінниця: ТОВ «Нілан ЛТД». 2014. 650 с.
18. Каленська С. М. Рослинництво / [Каленська С. М, Шевчук О. Я., Дмитришак М. Я. та ін.]. К. : НАУ, 2005. 502 с.
19. http://www.fas.usda.gov/regions/europe-and-eurasia/ukraine
20. Паламарчук В. Д., Каленська С. М., Єрмакова Л. М. Біологія та екологія сільськогосподарських рослин: підручник. Вінниця, 2013. 724 с.
21. Зіньчук П.Й. Мікродобрива та їх раціональне використання. *Землевласникам - про ґрунт, добриво і землеробство: [методичний посібник]* / П.Й. Зіньчук, М.І. Зінчук, М.Й. Шевчук. Луцьк, 2007. С. 33-39.
22. Агрохімічний аналіз грунту, рослин і добрив на лабораторно-практичних заняттях з агрохімічної хімії / І. М. Карасюк, О. М. Геркіял, М. В. Недвига [та ін.]; за ред. І. М. Карасюка. К.: Нічлава, 2001. 192 с.
23. Методичні вказівки щодо проведення польових досліджень і вивчення технології вирощування зернових культур. Чабани: Інститут землеробства УААН, 2001. 22 с
24. Дисперсійний і кореляційний аналіз у землеробстві та рослинництві: навчальний посібник / [В. О. Ушкаренко, В. Л. Нікішенко, С.П. Голобородько, С. В. Коковіхін]. Херсон: Айлант, 2008. 272 с
25. Медведовський О. К. Енергетичний аналіз інтенсивних технологій в сільськогосподарському виробництві / О. К. Медведовський, П. І. Іваненко. К.: Урожай, 1988. 204 с.
26. Біоенергетична оцінка систем удобрення і агротехнологій / [за ред. Ю.О. Тараріко, М.М. Городнього]. К.: НАУ, 2005 40 с.
27. Енергетична оцінка агроекосистем / О. Ф. Смаглій, А. С. Малиновський, А. Т. Кардашов [та ін.]. Житомир : Волинь, 2004. 132 с.

28. Казакова І. В. Економічна та енергетична оцінка ресурсозберігаючих технологій вирощування сільськогосподарських культур. *Інноваційна економіка: всеукр. наук.-виробн. журнал.* 2012. № 2. С. 113-116.
29. Система організаційно-економічних механізмів функціонування основних агропродовольчих підкомплексів рослинництва України / за ред. О. М. Шпичака. К.: ЗАТ «Нічлава», 2009. 406 с.
30. Мойсейченко В.Ф., Єщенко В.О. Основи наукових досліджень в агрономії. К.: Вища школа, 1994. 335 с.