

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
АГРОБІОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

ПОГОДЖЕНО
Декан агробіологічного
факультету

доктор с.-г. наук професор

Віталій КОВАЛЕНКО
ЛІТВІНОВ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

Агрохімії та якості продукції
рослинництва ім. О.І. Душечкіна
доктор с.-г. наук професор

Дмитро

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Локальне внесення добрив під кукурудзу на зерно в
системі прецизійного агровиробництва»**

Спеціальність: 201 – Агрономія
(код і найменування)

Освітня програма: Агрохімсервіс у прецизійному агровиробництві
(назва)

Орієнтація освітньої програми: Освітньо-професійна
(освітньо-професійна)

Гарант освітньої програми
доктор с.-г. наук професор

Анатолій БИКІН

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи
доктор с.-г. наук, професор
ЛІТВІНОВ

Дмитро

Виконав
ПОДОРВАН

Олексій

КИЇВ – 2025 р.

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
АГРОБІОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агрохімії та якості
продукції рослинництва ім. О.І. Душечкіна

_____ Дмитро ЛІТВИНОВ

« ____ » _____ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Подорвану Олексію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 201 – Агрономія
(код і найменування)

Освітня програма: Агрохімсервіс у прецизійному агровиробництві
(назва)

Орієнтація освітньої програми: Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Локальне внесення добрив під кукурудзу на зерно в системі прецизійного агровиробництва» затверджена наказом від «18» вересня 2025 р. №1978 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру: _____
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: результати польових досліджень.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Агрохімічні показники світло-сірого ґрунту.
2. Агрохімічний наземний моніторинг.
3. Біометричні показники рослин кукурудзи за локального внесення добрив.
4. Вегетаційні індекси кукурудзи на зерно.
5. Урожаність та якість зерна кукурудзи на зерно.
6. Економічна ефективність вирощування кукурудзи зерно.

Дата видачі завдання: « ____ » _____ 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи: _____ Дмитро ЛІТВИНОВ

Завдання прийняв до виконання: _____ Олексій ПОДОРВАН

РЕФЕРАТ

на магістерську кваліфікаційну роботу Подорвана О.С. на тему «Локальне внесення добрив під кукурудзу на зерно в системі прецизійного агровиробництва»

Магістерська кваліфікаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновку, а також із списку використаної літератури. Дипломна робота представлена на 84 сторінках друкованого тексту, включаючи таблиці і рисунки.

Мета дослідження: визначити ефективність елементів технології Strip-Till, та локального внесення гранульованих добрив за різних норм удобрення на показники родючості ґрунту та формування продуктивності кукурудзи на зерно.

Об'єкт дослідження – процес зміни показників родючості ґрунту та формування продуктивності кукурудзи на зерно залежно від технології обробітку ґрунту та локального внесення гранульованих добрив за різних норм удобрення.

Предмет дослідження – світло-сірі опідзолені ґрунти, ріст і розвиток кукурудзи на зерно, запаси продуктивної вологи в ґрунті, рН сольове ґрунтового розчину, вміст азот, фосфору та калію в ґрунті (мг/кг ґрунту), біометричні показники, площа листової поверхні, суха речовина, вміст хлорофілу в рослині, структура врожаю, урожайність, показники якості зерна, економічна ефективність.

Методи дослідження: польовий метод відбору ґрунтових зразків за допомогою буру; термостатно-ваговий метод визначення запасів продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту; лабораторні методи визначення основних показників ґрунту (визначення кислотності ґрунту (рН сольове) та показників нітратного і амонійного азоту іон-селективним методом, вміст рухомого фосфору за аналітичним методом Кірсанова (спектрофотометрія) та частка рухомого калію за методом полум'яної фотометрії (Кірсанов).

У магістерській роботі представлені результати впливу технології точного посіву з одночасним локальним внесенням різної кількості елементів живлення в залежності від варіанту дослідження.

В першому розділі «Огляд літератури» розглядаються такі питання: особливості вегетації кукурудзи, фізіологія елементів живлення та їх вплив на рослину, частка засвоєння цих елементів в залежності від способу удобрення, виду добрив, кислотності ґрунту тощо.

Другий розділ «Методи досліджень» складається з: геопросторового розташування господарства, характеристики погодно-кліматичних та ґрунтових умов, технології вирощування кукурудзи на зерно, методи та умови проведення польових і лабораторних досліджень.

У третьому розділі «Результати досліджень» наведено результати досліджень, а саме: біометричні показники кукурудзи, супутниковий моніторинг стану посівів (індекси NDVI), запаси продуктивної вологи в ґрунті, результати комплексної агрохімічної діагностики поля станом на весну 2025 р., аналіз ґрунту проведений власноруч, структуру та якість отриманого врожаю тощо.

Четвертий розділ «Економічна ефективність» демонструє економічну доцільність впровадження за технології Strip-Till при попередньою мульчуванні, а також рентабельність різних норм удобрення (NPK) при вирощуванні с/г культури.

Ключові слова: кукурудза на зерно, стрічка, Strip-Till, Strip-Master BEDNAR, ресурсозберігаюча технологія, мульчування рослинних решток, Mulcher BEDNAR, точний посів, гранульовані добрива, NPK, Agromix, локальне внесення добрив, Agrilab, WARD, індекс вегетації NDVI, N-Tester, площа листової поверхні, біометричні показники, агрохімічний аналіз ґрунту, рН ґрунтового розчину, нітрати (NO_3^-), амоній (NH_4^+), рухомий фосфор (P_2O_5), рухомий калій (K_2O), якість врожаю, економічна ефективність.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1. Особливості росту і розвитку кукурудзи	9
1.2. Фізіологічна роль елементів живлення в організмі рослини та їх вплив на ріст і розвиток кукурудзи.....	12
1.3. Чинники доступності елементів живлення	20
1.4. Strip-Till – альтернативна система обробітку ґрунту	26
РОЗДІЛ 2. УМОВИ, МІСЦЕ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	29
2.1. Характеристика господарства, та місця проведення дослідження	29
2.2. Ґрунтові умови господарства	31
2.3. Погодо-кліматичні умови господарства.....	32
2.4. Методика проведення дослідження.....	35
2.5. Технологія вирощування кукурудзи на дослідній ділянці	37
2.6. Аналіз ґрунту	42
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	51
3.1. Схожість насіння кукурудзи залежно від досліджуваних чинників	51
3.2. Визначення вмісту хлорофілу N-Тестером.....	52
3.3. Біометричні показники рослин кукурудзи.....	55
3.4. Проєктована площа листкової поверхні.....	61
3.5. Фази росту і розвитку кукурудзи (BBCH)	63
3.6. Дані дистанційного моніторингу з використання індексу NDVI.....	66
3.7. Вплив досліджуваних чинників на водний режим ґрунту	70
3.8. Вплив досліджуваних чинників на агрохімічні показники ґрунту	71
3.9. Продуктивність кукурудзи на зерно залежно від досліджуваних чинників	74
3.10. Показники якості зерна кукурудзи	82
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛОКАЛЬНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРІВ ПІД КУКУРУДЗУ НА ЗЕРНО В СИСТЕМІ ПРЕЦИЗІЙНОГО АГРОВИРОБНИЦТВА	84
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

ВСТУП

Актуальність теми дослідження: вирощування кукурудзи на зерно є однією з ключових галузей сільського господарства України, яка відіграє важливу роль у забезпеченні продовольчої безпеки, розвитку тваринництва та експортного потенціалу країни. Однак, традиційні методи обробітку ґрунту, що включають оранку, часто призводять до низки негативних наслідків, таких як ерозія ґрунту, зниження вмісту органічної речовини, ущільнення орного шару та пришвидшена втрата продуктивної вологи із ґрунту.

У зв'язку з цим, пошук та впровадження інноваційних, ресурсозберігаючих технологій є надзвичайно актуальним завданням. Однією із таких систем є Strip-Till. Цей спосіб обробітку ґрунту поєднує переваги традиційного та мінімального обробітку ґрунту. Його суть полягає у смуговому обробітку: ґрунт готується лише у вузьких смугах, де згодом будуть висіяні с/г культури. Міжряддя при цьому залишаються необробленими та покритими рослинними рештками.

Окрім основного завдання – нарізання смуг (на глибину до 30 см), даний агротехнічний прийом, за наявних сучасних агрегатів на українському ринку, дозволяє вносити добрива локально, безпосередньо в зону кореневої системи (глибина внесення добрив до 25 см).

Ця технологія має багато сильних сторін для вирощування сільськогосподарських культур, зокрема, кукурудзи на зерно, яку ми досліджуємо в нашій дипломній роботі. Щоб комплексно оцінити її переваги, ми визначили ключові цілі:

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Особливості росту і розвитку кукурудзи

Кукурудза (*Zea mays* L.) є однією з найважливіших зернових культур у світовому сільському господарстві, що використовується для виробництва продуктів харчування, кормів та біопалива. Її висока продуктивність зумовлена специфічними особливостями вегетації, які потребують глибокого розуміння для ефективного управління технологічними процесами [1, 2, с. 79]. Життєвий цикл кукурудзи умовно поділяють на дві основні фази: вегетативну та репродуктивну, кожна з яких має ключові етапи розвитку, що визначають її майбутній урожайний потенціал [3, с. 79].

Вегетативна фаза (стадії VE-VT). *VE (Поява сходів):* ця фаза починається, коли колеоптиль (захисна оболонка першого листка) пробивається на поверхню ґрунту. Її успіх залежить від температури, вологості та аерації ґрунту. Оптимальна температура для проростання становить 25-30 °С, а мінімальна – 8-10 °С [4, с. 79].

V1-Vn (Формування листків): після стадії VE починається швидкий розвиток вегетативних органів. Кожен новий листок (V-стадія) з'являється приблизно кожні 3-5 днів, залежно від умов навколишнього середовища. Ця стадія критично важлива, оскільки в цей час закладається кількість листків, а також починається формування кореневої системи та вузлів [5, с. 79]. У стадіях V3-V5 відбувається диференціація конуса наростання, що призводить до формування потенційної волоті (чоловічого суцвіття), а також визначається довжина майбутнього качана (жіночого суцвіття) [6, 7, с. 79].

VT (Викидання волоті): ця фаза є перехідною від вегетативної до репродуктивної. Рослина досягає максимальної висоти, і з верхівки стебла з'являється волоть. Це ключовий етап для запилення та формування зерна, оскільки волоть виробляє пилок, який буде запилювати приймочки качана.

Репродуктивна фаза (стадії R1-R6). *R1 (Початок цвітіння):* на цьому етапі з'являються приймочки, або «волоски», на верхівці качана. Вони швидко ростуть і покриті клейкою рідиною для захоплення пилку. Запилення відбувається, коли пилок з волоті потрапляє на приймочку. Успішне запилення є запорукою повноцінної формування зернівки [8, с. 79].

R2 (Молочна стиглість): зерно набуває білого кольору, має високий вміст вологи (близько 80%) і м'яку, молочну консистенцію. У цей період відбувається інтенсивний налив зерна за рахунок фотосинтезу.

R3 (Молочно-воскова стиглість): зерно стає щільнішим, а його колір змінюється на жовтуватий. Вміст вологи зменшується (близько 70%). Цей етап є важливим для подальшого накопичення крохмалю.

R4 (Воскова стиглість): зерно стає твердим, але його можна розрізати нігтем. Вміст вологи падає до 40-50%. Цей етап вважається найвигіднішим для збирання зерна на силос [9, с. 79].

R5 (Тверда стиглість): зерно стає твердим і починає утворювати так званий "чорний шар" біля основи, що свідчить про повну фізіологічну зрілість. Вміст вологи становить 30-35%. З цього моменту надходження поживних речовин до зерна припиняється.

R6 (Повна стиглість): зерно повністю тверде, а його вологість знижується до рівня, придатного для зберігання (залежить від гібриду та погодних умов, зазвичай 15-20%). Рослина вважається повністю зрілою, а вегетація завершується [10, с. 79].

Розуміння цих стадій дозволяє оптимізувати внесення добрив, застосування засобів захисту рослин та проведення зрошення. Кожен етап має критичні точки, де зовнішні фактори (температура, волога, живлення) можуть значно вплинути на кінцевий урожай. Тому точне визначення стадії розвитку є ключовим для прийняття ефективних агротехнічних рішень. Зв'язок між фізіологією рослини, її живленням та умовами навколишнього середовища є основою для досягнення високої продуктивності культури [12, с. 80].

Кукурудза є вологолюбною культурою, а її висока врожайність безпосередньо залежить від достатнього рівня зволоження впродовж вегетаційного періоду. Залежно від групи стиглості, для формування врожаю на рівні 8-10 т/га, культура потребує 400-500 мм опадів безпосередньо під час вегетації [31, с. 81]. Найбільш критичними фазами щодо вологозабезпечення є: 1) викидання волоті та цвітіння: у цей період, що триває 15-20 днів, кукурудза використовує близько 50% всієї вегетаційної вологи [31, с. 81]. Нестача вологи в цей час може призвести до порушення запліднення та формування зерна. 2) формування та наливання зерна: у цей період нестача вологи призводить до зниження маси тисячі зерен та загального зниження врожайності [32, с. 81].

Для успішного росту та розвитку кукурудзи сума активних температур є ключовим показником. Сума активних температур ($>10^{\circ}\text{C}$) – це сума середньодобових температур повітря за період, коли вони перевищують $+10^{\circ}\text{C}$ [33, с. 81]. Залежно від групи стиглості гібриду, кукурудза потребує: ранньостиглі гібриди: $2100-2400^{\circ}\text{C}$, середньоранні: $2400-2600^{\circ}\text{C}$, середньостиглі: $2600-2800^{\circ}\text{C}$ [33, с. 81]. Найбільш вразливими щодо стресових факторів є фази 8-10 листків та цвітіння. У фазі 8-10 листків відбувається закладання майбутнього качана, і будь-який стрес (дефіцит вологи, поживних речовин) може призвести до закладання меншої кількості рядів у качані, що є необерненим і впливає на кінцеву врожайність [34, с. 81].

Кукурудза є культурою з високим виносом поживних речовин. Для формування 1 т зерна та відповідної маси соломи, культура виносить з ґрунту (в перерахунку на діючу речовину): азот (N) – 25-30 кг, фосфор (P_2O_5) – 10-12 кг, калій (K_2O) – 25-30 кг [35, с. 81]. Крім макроелементів, кукурудза чутлива до нестачі мікроелементів. Потреба в цинку (Zn) для формування 1 т зерна становить до 120 г, бору (B) – 6-10 г, та міді (Cu) – 10-15 г. Дефіцит цинку є найпоширенішим і проявляється у вигляді білих смуг на молодих листках [36, с. 81]. Вибір попередника має вирішальне значення для успішного вирощування кукурудзи. Кращими попередниками для кукурудзи є: багаторічні трави,

зернобобові культури (горох, соя), озимі зернові (пшениця, ячмінь). Ці культури залишають ґрунт чистим від бур'янів та збагачують його азотом (зернобобові). Небажаними попередниками є культури, що сильно висушують ґрунт та мають спільні хвороби чи шкідники, зокрема: соняшник, цукровий буряк [32, с. 81].

1.2. Фізіологічна роль елементів живлення в організмі рослини та їх вплив на ріст і розвиток кукурудзи

Для досягнення високої продуктивності кукурудзи (*Zea mays L.*) необхідне повноцінне забезпечення рослин усіма елементами живлення [13, с. 80]. Потреба кукурудзи біогенними елементами є значною і визначається фазою розвитку рослини, сортовими особливостями та екологічними умовами [14, с. 80]. Фізіологічна дія кожного елемента в ґрунті та його подальше засвоєння рослиною відіграють ключову роль у формуванні врожаю та якості зерна [53, с. 83]. Розуміння цих процесів є основою для розробки ефективних систем удобрення.

Макроелементи, такі як азот, фосфор і калій, необхідні рослинам у великих кількостях [14, с. 80]. Вони є основними компонентами біологічних молекул і відіграють центральну роль у метаболічних процесах.

Азот є фундаментальним компонентом білків, амінокислот, нуклеїнових кислот та хлорофілу, що робить його найважливішим елементом для росту та розвитку кукурудзи. Азот засвоюється кореневою системою у формі нітратів (NO_3^-) та амонію (NH_4^+) [17, с. 80]. Недостатнє забезпечення азотом призводить до уповільнення вегетативного росту, хлорозу (блідо-зеленого забарвлення) листя, що починається з нижнього ярусу, і значного зниження врожайності (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Дефіцит азоту на листках кукурудзи (Фото з Elixir Ukraine) [43, с. 82].

Надмірне внесення азоту може спричинити надмірне вегетативне зростання, затримку дозрівання і схильність рослин до вилягання [16, с. 80].

Фосфор відіграє ключову роль в енергетичному обміні рослин, оскільки він є компонентом аденозинтрифосфату (АТФ), основного носія енергії в клітинах. Він необхідний для розвитку кореневої системи, формування генеративних органів, цвітіння та дозрівання зерна.

При дефіциті фосфору листя кукурудзи набуває фіолетово-червоного відтінку, особливо на молодих рослинах [18, с. 80] (рис. 1.2). Засвоєння фосфору (H_2PO_4^- та HPO_4^{2-}) значно залежить від рН ґрунту, при цьому оптимальний діапазон для засвоєння – рН ґрунту 6,0-7,0 [19, с. 80].



Рис. 1.2. Дефіцит фосфору на листках кукурудзи (Фото з Agro Times) [44, с. 82].



Рис. 1.3. Дефіцит калію на листках кукурудзи (Фото з Elixir Ukraine) [45, с. 82].

Калій бере участь у регуляції осмотичного тиску, відкритті та закритті продихів, активації понад 50 ферментів, та транспорті цукрів з листя до інших частин рослини. Він підвищує стійкість кукурудзи до посухи, хвороб, та вилягання. Симптомами нестачі калію є пожовтіння країв та кінчиків нижнього листя, яке прогресує до середини листової пластини [54, с. 83] (див. рис. 1.3). Калій знаходиться в ґрунті у різних формах, але доступний для рослин переважно у вигляді обмінного калію (K^+) [21, с. 80].

Мезоеlementи, такі як сірка, магній і кальцій, необхідні в менших кількостях, ніж макроelementи, але їхня роль у фізіологічних процесах є не менш важливою [14, с. 80].

Сірка входить до складу амінокислот (метіоніну, цистеїну) та білків, а також бере участь у формуванні хлоропластів. Дефіцит сірки може бути візуально схожим на дефіцит азоту, але симптоми (блідо-жовте забарвлення) спочатку проявляються на молодих листках, оскільки сірка малорухлива в рослині [22, с. 80].

Магній є центральним атомом молекули хлорофілу, що робить його критично важливим для фотосинтезу. Крім того, він є активатором багатьох ферментів, які беруть участь у синтезі білків і вуглеводів. На кукурудзі дефіцит магнію виражається у вигляді смугастого міжжилкового хлорозу, що починається з нижнього листя, оскільки магній є рухливим елементом [23, с. 80].

Кальцій є структурним компонентом клітинних стінок, забезпечуючи їх міцність і функціональність. Він бере участь у поділі клітин, рості корневих волосків і нейтралізації органічних кислот. Оскільки кальцій малорухливий у флоемі, симптоми його дефіциту проявляються на молодому листі та кінчиках пагонів. Нестача кальцію призводить до уповільнення росту та деформації молодого листя, яке може стати липким і закручуватися [24, с. 80].

Мікроелементи необхідні рослинам у дуже малих кількостях, але їх дефіцит може призвести до значних порушень метаболічних процесів [14, с. 80].

Цинк є кофактором понад 300 ферментів, що беруть участь у синтезі білків, ростових гормонів (ауксинів) та метаболізмі вуглеводів. Він є критичним для початкових стадій росту кукурудзи. Симптомами нестачі цинку є білі або світло-жовті смуги між жилками молодого листя, особливо біля основи [25, с. 81]. Нестача цинку часто зустрічається на ґрунтах з високим рН, високим вмістом фосфору або при низьких температурах (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Сильний дефіцит цинку на листках кукурудзи, перехід в некротичний стан (Фото з Pioneer) [46, с. 82].

Залізо є необхідним для синтезу хлорофілу, а також бере участь у процесах дихання та фотосинтезу. Хоча залізо є одним із найпоширеніших елементів у ґрунті, його доступність для рослин часто обмежена, особливо у ґрунтах з високим рН [26, с. 81]. Дефіцит заліза спричиняє міжжилковий хлороз на молодих листках, оскільки залізо є нерухомим у флоемі.

Марганець активує ферменти, що беруть участь у фотосинтезі та диханні. Його ключова роль полягає у розщепленні води під час фотосинтезу. Дефіцит марганцю, який найчастіше спостерігається на лужних ґрунтах, виявляється як міжжилковий хлороз на молодому листі, але на відміну від нестачі заліза, на листках можуть з'являтися світлі плями або смуги [27, с. 81].

Мідь є компонентом ферментів, що беруть участь у процесах дихання, синтезі лігніну, який надає міцності клітинним стінкам, та в репродуктивних процесах. Дефіцит міді призводить до уповільнення росту, закручування молодого листя та появи хлоротичних плям [28, с. 81].

Бор є важливим для формування клітинних стінок, транспорту цукрів та формування пилку. Його дефіцит може призвести до стерильності качанів кукурудзи та їх деформації [29, с. 81]. Бор малорухливий у рослині, тому симптоми дефіциту (деформація молодого листа, порушення розвитку качанів) проявляються на кінчиках пагонів.

Натрій не вважається критично важливим елементом для кукурудзи, але може частково замінювати калій у певних фізіологічних функціях, зокрема у регуляції водного обміну. У засолених ґрунтах надлишок натрію може бути токсичним для кукурудзи, спричиняючи осмотичний стрес та порушення засвоєння інших елементів [30, с. 81].

Потреби рослини в живленні не є статичними, а змінюються залежно від фази розвитку, що обумовлено особливостями метаболізму [37, с. 82]. Наприклад, у початкові періоди вегетації кукурудза потребує значної кількості азоту для формування вегетативних органів, тоді як у фазі формування та наливу зерна зростає потреба у фосфорі та калії [38, с. 82]. Ефективність засвоєння одного елемента часто залежить від наявності та концентрації інших, що створює складну систему синергізму та антагонізму в ґрунтовому розчині (рис. 1.5).

Елемент	Джерело	Роль у рослині	Концентрація
Вуглець (C)	Повітря	Складає вуглеводів; необхідний для фотосинтезу.	45%
Кисень (O)	Повітря/Вода	Складає вуглеводів; необхідний для дихання.	45%
Водень (H)	Вода	Підтримує осмотичний баланс; важливий у багатьох біохімічних реакціях, складає вуглеводів.	6%
Азот (N)	Повітря/ґрунт	Складає амінокислот, білків, хлорофілу та нуклеїнових кислот.	1 до 5%
Калій (K)	ґрунт	Бере участь у фотосинтезі, переміщенні вуглеводів, синтезі білків.	0.5 до 1%
Фосфор (P)	ґрунт	Складає білків, коферментів, нуклеїнових кислот та метаболічних субстратів; важливий у передачі енергії.	0.1 до 0.5%
Магній (Mg)	ґрунт	Активатор ферментів; складає хлорофілу.	0.1 до 0.4%
Сірка (S)	ґрунт	Складає деяких амінокислот і рослинних білків.	0.1 до 0.4%
Хлор (Cl)	ґрунт	Бере участь у виробництві кисню та фотосинтезі.	0.01 до 0.1%
Залізо (Fe)	ґрунт	Бере участь у синтезі хлорофілу та перенесенні електронів ферментами.	50 до 250 ppm
Марганець (Mn)	ґрунт	Контролює кілька окисно-відновних систем і фотосинтез.	20 до 200 ppm
Бор (B)	ґрунт	Важливий для переміщення цукрів і метаболізму вуглеводів.	6 до 60 ppm
Цинк (Zn)	ґрунт	Бере участь у роботі ферментів, що регулюють різноманітні процеси.	25 до 150 ppm
Мідь (Cu)	ґрунт	Каталізатор для дихання; складає різних ферментів.	5 до 20 ppm
Молібден (Mo)	ґрунт	Бере участь у фіксації азоту та перетворенні нітратів на амоній.	0.5 до 0.2 ppm
Нікель (Ni)	ґрунт	Необхідний для належного функціонування уреазы та проростання насіння.	0.1 до 1 ppm

From Pagoni, A., Sawyer, J.E., and Mallarina, A.P. 2013. Chapter 1 – Overview of soil fertility, plant nutrition, and nutrient management. In, Site-specific nutrient management. Iowa State University Extension and Outreach.

Рис. 1.5. Основні рослинні елементи, джерело, ролі та відносна кількість у рослині [41, с. 82].

Нестача, як і надлишок, будь-якого елемента може призвести до блокування засвоєння інших, спричиняючи прихований дефіцит та зниження урожайності, навіть за умов наявності інших поживних речовин [39, с. 82]. Розуміння цієї складної взаємодії та унікальної ролі кожного елемента – від макроелементів, що формують основу клітинних структур, до мікроелементів, що є активаторами ферментативних реакцій, – є критично важливим для розробки точних систем живлення, які забезпечують максимальну реалізацію генетичного потенціалу гібридів [40, с. 82].

Ефективність поглинання елементів живлення рослиною залежить не лише від їх наявності в ґрунті, але й від їхньої мобільності (рухливості) всередині самої рослини. Це фундаментальна фізіологічна властивість, яка визначає, як елементи переміщуються з однієї частини рослини в іншу, і, як наслідок, впливає на місце прояву симптомів їх дефіциту (рис. 1.6). Елементи, що класифікуються як мобільні, можуть легко переміщуватися від старих (нижніх) листків до молодих (верхніх). За умов нестачі таких елементів, як азот, фосфор або калій, рослина перенаправляє їх із зрілих тканин для забезпечення росту нових, що призводить до прояву симптомів дефіциту саме на нижньому листі.

Mobile Nutrients	Immobile nutrients
Nitrogen (N)	Sulfur (S)
Phosphorus (P)	Calcium (Ca)
Potassium (K)	Iron (Fe)
Chloride (Cl)	Zinc (Z)
Magnesium (Mg)	Manganese (Mn)
Molybdenum (Mo)	Boron (B)
	Copper (Cu)
	Nickel (Ni)

From Pagoni, A., Sawyer, J.E., and Mallarina, A.P. 2013. Chapter 1 – Overview of soil fertility, plant nutrition, and nutrient management. In, Site-specific nutrient management. Iowa State University Extension and Outreach.

Рис. 1.6. Рухомі та нерухомі поживні речовини в рослині [41, с. 82].

На противагу, нерухомі (імобільні) елементи, такі як сірка, цинк та залізо, не можуть вільно переміщатися між тканинами. За їх нестачі, рослина не

може перемістити їх із старих листків, тому симптоми дефіциту проявляються насамперед на молодому листі та в точках росту. Розуміння цієї відмінності є критично важливим для діагностики дефіциту поживних речовин та прийняття ефективних рішень щодо позакореневого підживлення [41, с. 82].

1.3. Чинники доступності елементів живлення

Кислотність ґрунту, або його рН, є одним із найважливіших чинників, що контролюють доступність поживних речовин для рослин. Рівень рН впливає на хімічну форму елементів у ґрунтовому розчині та їхню здатність до поглинання кореневою системою [42, с. 82]. Оптимальний діапазон рН для більшості сільськогосподарських культур, зокрема кукурудзи, становить від 6,0 до 7,0. У цьому діапазоні більшість макроелементів, таких як азот, фосфор, калій, сірка, кальцій і магній, мають найвищу доступність для рослин [42, с. 82] (рис. 1.7).

Важливо, що різні елементи поведуться по-різному залежно від рівня рН. Наприклад, мікроелементи (залізо, марганець, цинк, мідь і бор) стають менш доступними при підвищенні рН ґрунту, що може призвести до їх дефіциту на нейтральних або лужних ґрунтах. Натомість, молибден є винятком і його доступність збільшується зі зростанням рН [42, с. 82].

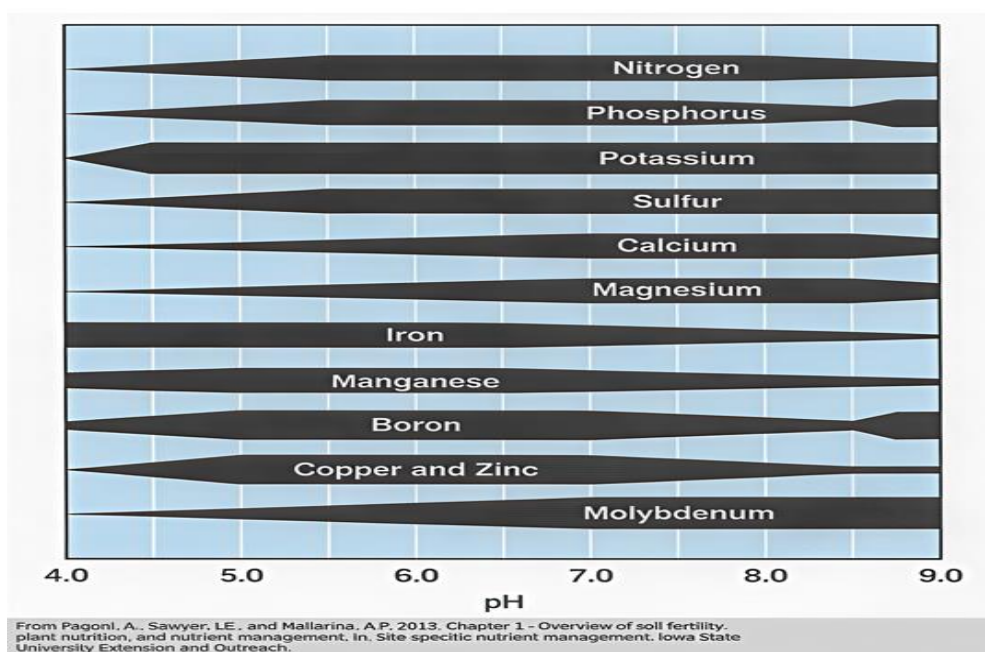


Рис. 1.7. Доступність поживних речовин залежно від рН ґрунту [41, с. 82].

Таким чином, розуміння цієї взаємозалежності є критично важливим для внесення вапна або інших меліорантів для корекції кислотності ґрунту та забезпечення збалансованого живлення рослин.

Світло відіграє фундаментальну роль, оскільки воно є основним джерелом енергії для фотосинтезу. Інтенсивність фотосинтезу безпосередньо корелює з рівнем поглинання поживних речовин, оскільки цей процес забезпечує рослину енергією (у формі АТФ) для активного транспорту іонів через кореневі мембрани [47, с. 83]. Недостатнє освітлення призводить до зниження синтезу вуглеводів, що, в свою чергу, зменшує енергію, необхідну для поглинання елементів живлення, особливо фосфору та калію.

Волога є універсальним розчинником та транспортним середовищем. Вона забезпечує переміщення поживних речовин від ґрунтових частинок до поверхні коренів. За умов дефіциту вологи (посухи) рухливість елементів, таких як нітрати та сульфати, значно знижується, що обмежує їх доступність. Навпаки, надмірне зволоження може призводити до вимивання рухливих форм елементів (наприклад, нітратного азоту) за межі кореневмісного шару або створювати анаеробні умови, які можуть змінювати доступність, наприклад, заліза та марганцю [48, с. 83].

Температурний режим ґрунту впливає на швидкість метаболічних процесів мікроорганізмів, які є ключовими для мінералізації органічної речовини. За умов низьких температур активність бактерій та грибів, що розкладають органічний матеріал, різко знижується. Це призводить до уповільнення вивільнення доступних форм азоту, фосфору, сірки та інших елементів з органічних сполук. Наприклад, при температурі ґрунту нижче 10°C процеси нітрифікації майже повністю припиняються, що обмежує надходження нітратів до рослин [49, с. 83].

Зі зростанням температури збільшується швидкість дифузії іонів у ґрунтовому розчині, що сприяє їх поглинанню. Високі температури також можуть збільшувати розчинність деяких сполук, тоді як низькі температури

можуть призвести до осадження певних елементів, роблячи їх недоступними для рослин. Температура ґрунту є критичною для функціонування коренів. Низька температура негативно впливає на метаболічну активність кореневих клітин, знижуючи швидкість активного транспорту іонів через мембрани. Цей ефект особливо помітний для таких елементів, як фосфор (P) та калій (K), поглинання яких є енергозалежним процесом. Навіть за умов достатньої кількості цих елементів у ґрунті, їх поглинання може бути значно обмежене, якщо температура ґрунту є низькою (рис. 1.8).

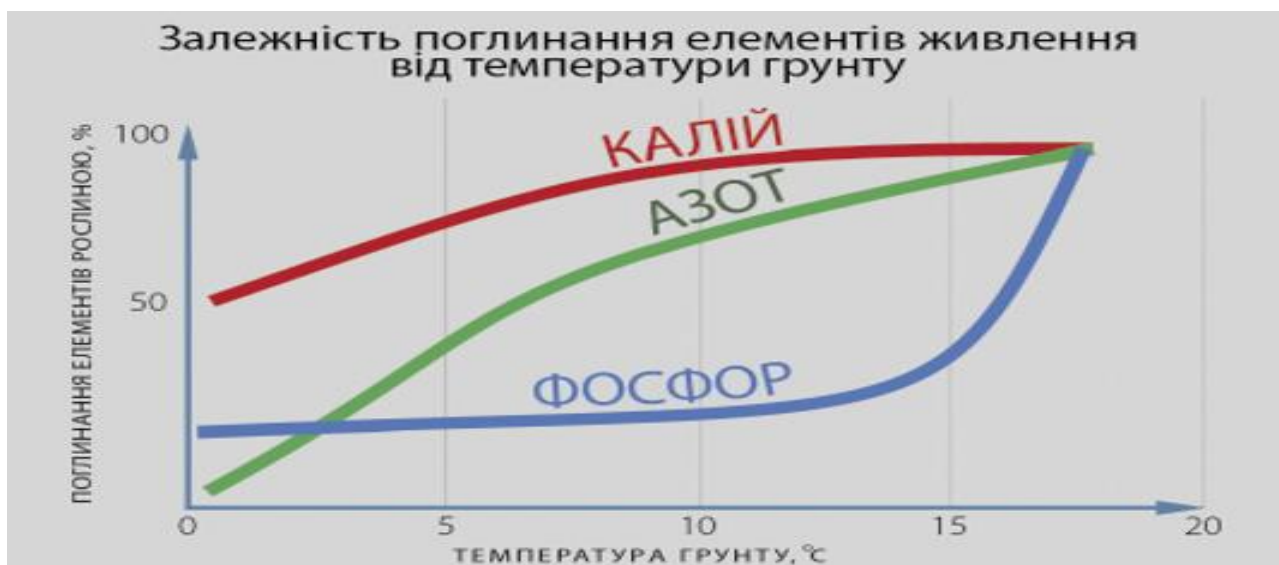


Рис. 1.8. Залежність поглинання елементів живлення від температури ґрунту (Фото з Agro Portal) [51, с. 83].

Навпаки, надмірно високі температури ґрунту можуть спричинити пошкодження коренів, що також порушує їхню здатність поглинати воду та поживні речовини [50, с. 83].

Взаємодія поживних елементів у ґрунті. Доступність поживних речовин для рослин залежить не лише від їх загальної кількості у ґрунті, але й від їхнього співвідношення та взаємодії між собою. Ці взаємодії можуть бути синергічними (коли один елемент сприяє засвоєнню іншого) або антагоністичними (коли один елемент перешкоджає засвоєнню іншого) [53, с. 83] (рис.1.9.).

Азот тісно взаємодіє з іншими елементами. Він посилює поглинання фосфору (P), оскільки обидва елементи необхідні для синтезу органічних сполук, що є критичним для росту рослин [53, с. 83].

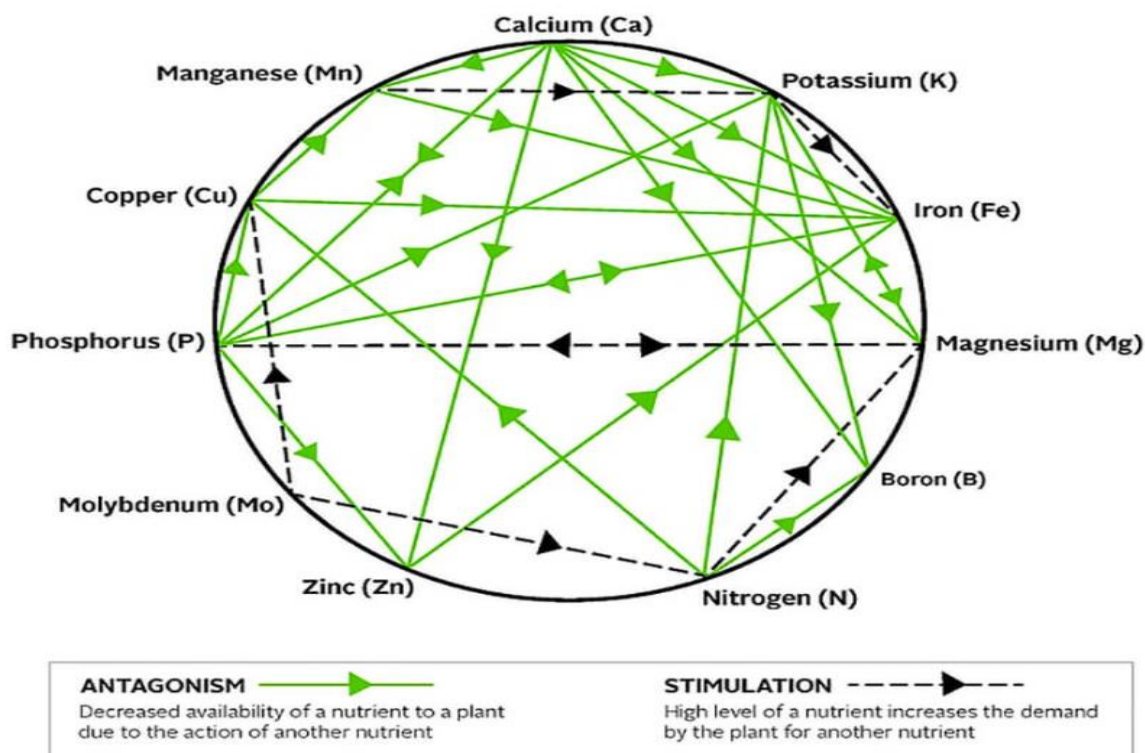


Рис. 1.9. Діаграма Малдерса – взаємодія поживних речовин (Фото з NUTRIAG) [55, с. 83].

Водночас, надмірне внесення азоту, особливо у формі амонію (NH_4^+), може пригнічувати поглинання кальцію (Ca), магнію (Mg) та калію (K). Це відбувається через конкуренцію цих катіонів за місця поглинання на кореневій системі [52, с. 83]. Фосфор сприяє засвоєнню магнію (Mg) та деяких мікроелементів, зокрема цинку (Zn) [53, с. 83]. Однак, надлишок фосфору є відомим антагоністом цинку (Zn) та заліза (Fe), оскільки він утворює з ними нерозчинні фосфатні сполуки. Також високі концентрації фосфору можуть пригнічувати поглинання міді (Cu) [5, с. 79].

Калій покращує засвоєння азоту (N) та фосфору (P), сприяючи їх ефективному використанню [53, с. 83]. З іншого боку, високий вміст калію в

ґрунті є однією з головних причин дефіциту магнію (Mg) та кальцію (Ca), оскільки ці елементи конкурують за поглинання коренями [54, с. 83].

Кальцій сприяє засвоєнню молібдену (Mo), а також відіграє важливу роль у засвоєнні бору (B) [53, с. 83]. Надмірне внесення кальцію, особливо при вапнуванні кислих ґрунтів, може призвести до дефіциту калію (K), магнію (Mg), заліза (Fe) та цинку (Zn). Це відбувається як через конкуренцію за поглинання, так і через зміну рН ґрунту, що впливає на розчинність інших елементів [52, с. 83].

Магній працює в синергії з фосфором (P) та азотом (N), особливо при синтезі АТФ та білків [53, с. 83]. Проте, поглинання магнію може бути пригнічене надлишком калію (K), кальцію (Ca) та амонійного азоту (NH₄⁺), що є поширеною проблемою в сільському господарстві [52, с. 83].

Взаємодії між мікроелементами також мають велике значення. Надлишок фосфору або марганцю може викликати дефіцит заліза (Fe) [52, с. 83]. Високі концентрації марганцю (Mn) в ґрунті можуть спричинити дефіцит заліза (Fe), цинку (Zn) та міді (Cu) [5, с. 79]. Доступність цинку (Zn) значно знижується при надлишку фосфору, кальцію та заліза [52, с. 83]. Також, надмірний вміст кальцію та високий рН ґрунту знижують доступність бору (B) [54, с. 83].

1.4. Strip-Till – альтернативна система обробітку ґрунту

Технологія смугового обробітку ґрунту (Strip-Till) є інноваційною системою мінімального обробітку, яка поєднує переваги традиційної оранки та нульового обробітку. Ця система дозволяє створити оптимальні умови для сівби та початкового росту культури, одночасно мінімізуючи вплив на ґрунт і зберігаючи його структуру в міжряддях. Технологічний процес включає кілька етапів, що зазвичай виконуються за один прохід агрегату [56, с. 83].

Смуговий обробіток ґрунту виконується за допомогою спеціалізованих багатофункціональних агрегатів. Процес включає одночасне очищення смуги

від рослинних решток, розпушення ґрунту на задану глибину (зазвичай 15-25 см) та формування посівного ложа. Ця операція може виконуватися восени, після збирання врожаю, для підготовки ґрунту до весняної сівби, або ж навесні, безпосередньо перед сівбою [57, с. 83].

Ключовим елементом технології є одночасне внесення добрив. Мінеральні добрива, як правило, вносяться локально в розпушену смугу, що забезпечує їхню доступність для кореневої системи рослин. Добрива можуть бути розміщені на одному або кількох рівнях глибини, що сприяє ефективному живленню як на початкових, так і на пізніших етапах росту [58, с. 83].

Переваги Strip-Till. За рахунок зменшення кількості проходів техніки по полю, технологія Strip-Till значно скорочує витрати пального та робочого часу порівняно з традиційним обробітком ґрунту [56, с. 83]; локальне внесення добрив забезпечує їхнє розміщення безпосередньо в зоні росту коренів, що дозволяє підвищити коефіцієнт використання поживних речовин та, відповідно, зменшити норми внесення добрив [58, с. 83]; залишення рослинних решток у міжряддях захищає ґрунт від вітрової та водної ерозії, допомагає зберегти вологу та підтримує біологічну активність ґрунту [57, с. 83]; локальне розпушення ґрунту створює ідеальні умови для проростання насіння, тоді як міжряддя залишаються щільними, що сприяє збереженню ґрунтової структури та її міцності [57, с. 83].

Недоліки та обмеження. Незважаючи на значні переваги, технологія має певні обмеження. Висока вартість спеціалізованого обладнання може бути значним бар'єром для впровадження. Крім того, ефективність технології значною мірою залежить від своєчасного виконання робіт та погодних умов, оскільки надмірна вологість ґрунту може ускладнити проведення смугового обробітку [56, с. 83].

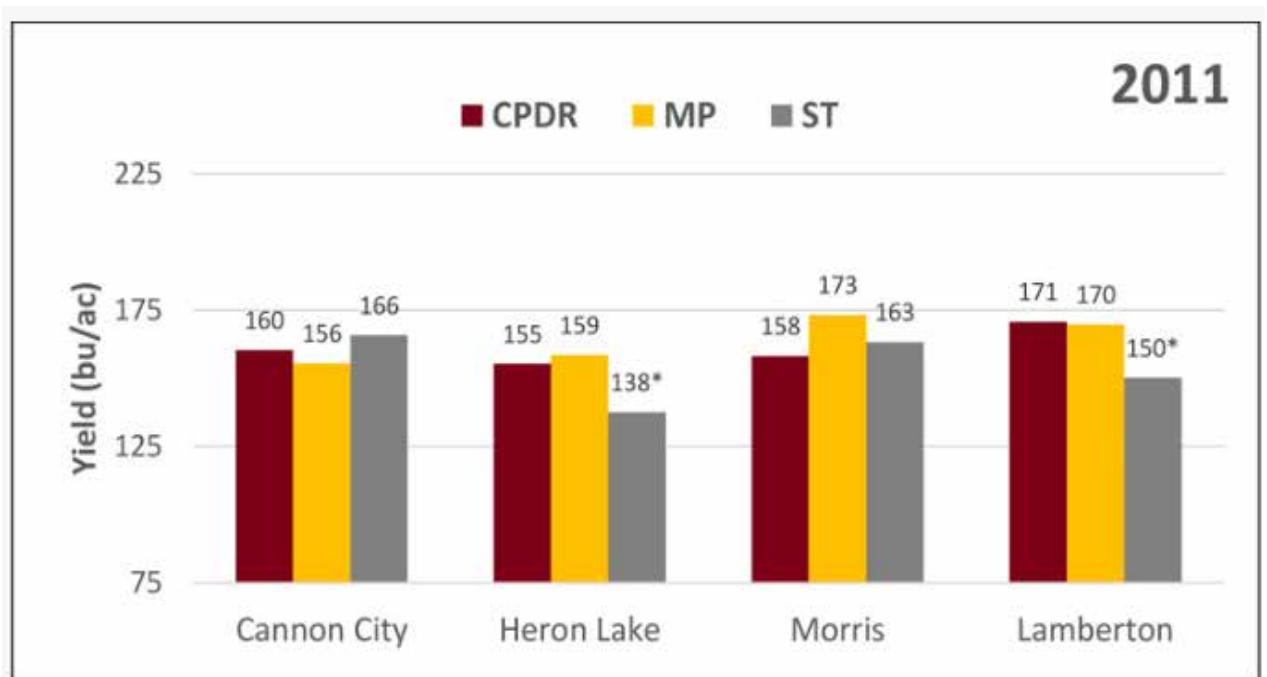


Рис. 1.10. Середня врожайність кукурудзи (буш/акр) за різних систем обробітку в різних районах США (Фото з University Minnesota Extension) [59, с. 84].

Примітка. *MP* – відвальний плуг та один або два весняних обробітки поля; *ST* – смугова обробка з держакком; *CPDR* чизельний плуг або дисковий розпушувач та весняний обробіток поля [59, с. 84].

У дослідженні обробітку ґрунту, проведеному Університетом Міннесоти з 2008 по 2011 рік на погано дренованих суглинистих та суглинистих ґрунтах на чотирьох ділянках у південно-західній та західно-центральної Міннесоті, порівнювався вплив трьох систем обробітку ґрунту на безперервну врожайність кукурудзи [59, с. 84] (див. рис. 1.10).

РОЗДІЛ 2. УМОВИ, МІСЦЕ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика господарства, та місця проведення дослідження

ТОВ «AgriLab» є передовою аграрною компанією, яка спеціалізується на інтеграції інноваційних рішень у галузі точного землеробства, агродіагностики та оптимізації управління аграрними ресурсами. Засноване у 2014 році, підприємство здобуло позицію одного з провідних консультаційних центрів для агровиробників в Україні. Головний офіс розташований в селі Велика Олександрівка, київської області. ТОВ «AgriLab» провадить діяльність на загальнонаціональному рівні, надаючи послуги господарствам різного формату – від невеликих фермерських до масштабних агрохолдингів. Окрім зазначених напрямів діяльності, ТОВ «AgriLab» активно проводить науково-дослідну роботу по всій Україні у співпраці з компаніями-партнерами. Що свідчить про глибоку інтеграцію компанії в аграрну науку та її прагнення не лише надавати консультаційні послуги, а й сприяти розвитку інноваційних технологій безпосередньо в умовах вітчизняного агропромислового комплексу. ТОВ «AgriLab» активно популяризує екологічно орієнтоване та економічно обґрунтоване сільське господарство, зокрема використання технологій Strip-Till, No-Till, диференційованого обробітку та внесення добрив. У своїй роботі компанія використовує сучасне обладнання, автоматизовані аналітичні платформи та програмне забезпечення, що дозволяє забезпечити точність і достовірність отриманих даних. Оскільки, основна діяльність господарства направлена на роботу в галузі точного землеробства, тому тут немає власного МТП, а площа земель, яка належить господарству досить мала – 33,2 га. В основному ці землі використовуються для проведення різноманітних наукових досліджень у вирощуванні с/г культур. Сівозміна за останні 4 роки була наступною (табл 2.1).

Таблиця 2.1

Сівозміна господарства ТОВ «AgriLab»

№ поля	Площа, га	Культура 2022 рік	Врожайність, т/га	Культура 2023 рік	Врожайність, т/га	Культура 2024 рік	Врожайність, т/га	Культура 2025 рік	Врожайність, т/га
4	25,5	Пар	–	Соняшник	3,2	Кукурудза	10,5	Кукурудза	–
				Кукурудза	10,3				
5	2,54	Пар	–	Соняшник	2,5	Кукурудза	8,0	Кукурудза	–
				Кукурудза	9,3				
6	5,15	Пар	–	Соняшник	2,6	Кукурудза	7,9	Кукурудза	–

2.2. Ґрунтові умови господарства

Ґрунтовий покрив на території господарства представлений світло-сірими лісовими ґрунтами. Світло-сірі лісові ґрунти (інша назва – світло-сірі опідзолені ґрунти) належать до ґрунтів підзолисто-типової генези, формуються переважно в умовах помірно зволоженого клімату Лісостепу України під широколистяними лісами, переважно дубово-грабовими.



Рис. 2.1. Карта ґрунтів Бориспільського району та географічне розташування господарства

Типовий ґрунтовий профіль світло-сірих лісових ґрунтів складається з таких горизонтів:

- **Н (гумусовий)** – 20-30 см, темно-сірий, зернисто-горіхуватий, містить 2,0-3,0% гумусу;
- **Е (елювіальний)** – 10-15 см, світліший, зменшений вміст гумусу, структура розпилена;
- **В (ілювіальний)** – до 40-60 см, більш ущільнений, з накопиченням глинистих і колоїдних часток, бурого або коричнюватого відтінку;
- **С (материнська порода)** – лесовидні суглинки.

Вміст органічної речовини в ґрунті становить в середньому 2-3%, рН: слабокислий 5,5-6,2 у верхньому горизонті, поглинальний комплекс – переважно кальцієвий, але відносно нестійкий до вимивання, ємність катіонного обміну (ЄКО) – середня (20-25 мг-екв/100 г ґрунту), механічний склад – середньо- та важкосуглинковий, що забезпечує добру водоутримуючу здатність, але вимагає агротехнічного контролю ущільнення.

Світло-сірі лісові ґрунти мають помірну водопроникність, гарно дреновані, але в зоні Е-В перехідного шару часто спостерігається ущільнення (плужна підшва), що знижує інфільтрацію води. У разі посухи – схильні до пересихання верхнього шару. У природному стані ці ґрунти мають середній або нижчий за середній рівень родючості. Найбільше обмеження – невисокий вміст гумусу, дефіцит азоту, фосфору та калію, а також схильність до закислення.

2.3. Погодо-кліматичні умови господарства

Господарство знаходиться на території бориспільського району і належить до помірної, з недостатньою вологістю агро-кліматичної зони. Середня річна температура, за даними багаторічних спостережень, становить +7,2°C. Опади: в середньому 640 мм за рік; найбільша їх кількість припадає на червень-липень. Осінь часто є тепла й суха. Для літа характерна велика кількість сонячних днів і тривалий вегетаційний період. Кліматичні умови сприятливі для вирощування сільськогосподарських культур помірної зони, розвитку садівництва, городництва й виноградарства. Серед несприятливих кліматичних явищ – інтенсивні зливові дощі з грозами, град, бездощові періоди, сухоті (до 5-10 днів), пилові бурі влітку, льодова кірка, ожеледь тощо.

Температурний режим у 2025 році демонструє класичні сезонні коливання, які в цілому відповідають потребам кукурудзи. Ця культура починає активно розвиватися при температурі ґрунту вище +10°C, що спостерігалось вже у квітні, а її оптимальна температура для росту становить +20...+25°C. Літні

місяці (червень-серпень) були спекотними, з максимальними температурами, що регулярно перевищували $+25^{\circ}\text{C}$ і досягали пікових значень $+30\dots+33^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.2).

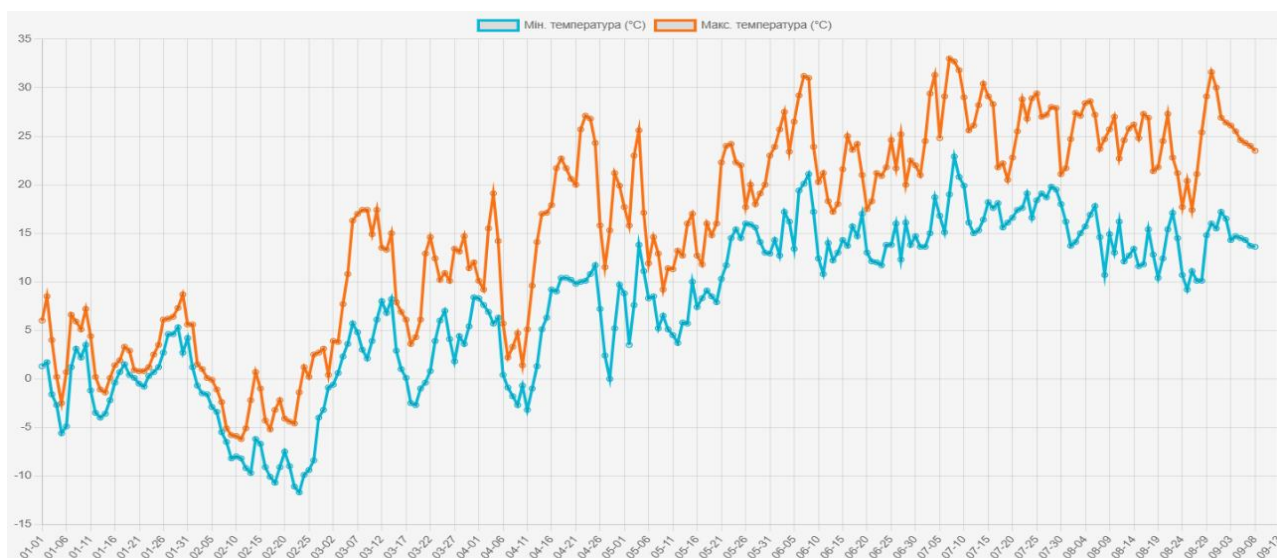


Рис. 2.2. Мінамальні та максимальні температури в Бориспільському районі в 2025 р.

Такі високі температури, особливо в період цвітіння та наливу зерна, можуть спричинити стрес для рослин, знижуючи ефективність запилення та призводячи до зменшення врожайності.

Що стосується опадів, їх розподіл виявився вкрай нерівномірним, що є критичним фактором для вирощування кукурудзи. Ця культура є вологолюбною і особливо чутливою до нестачі вологи в період активного росту (липень-серпень). Графік щоденних опадів показує, що значна частина річної норми випала під час короточасних, але інтенсивних злив, зокрема в травні та липні (рис. 2.3).

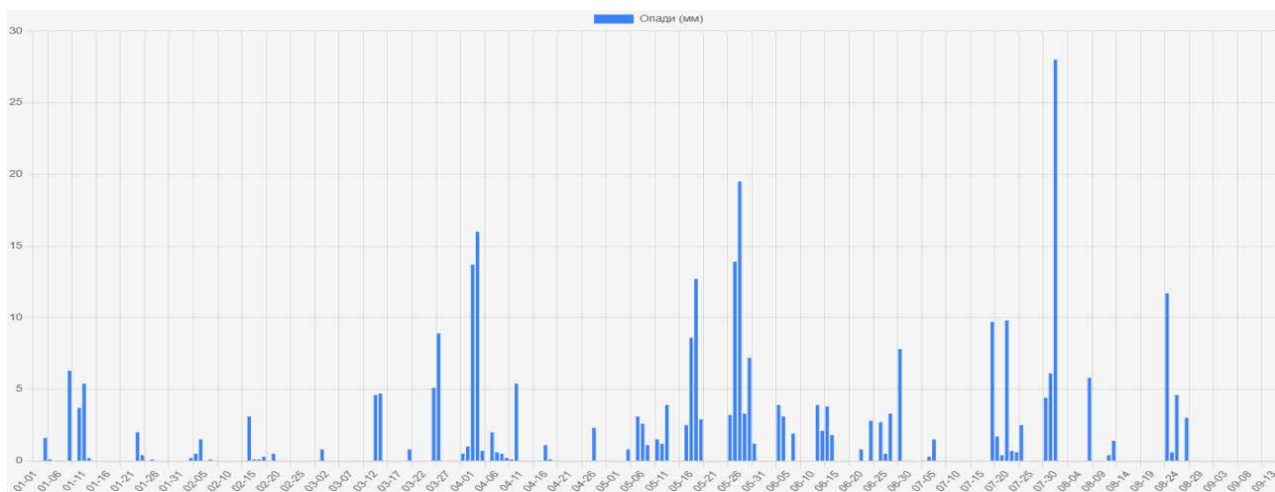


Рис. 2.3. Кількість щоденних опадів в Бориспільському районі в 2025 р.

Водночас, між цими періодами спостерігалися тривалі посушливі проміжки. Така нерівномірність опадів негативно впливає на формування кореневої системи та призводить до стресу для рослин. Місячний розподіл опадів підтверджує, що найбільш вологими місяцями були травень і липень. Якщо опади в травні сприяли початковому розвитку рослин, то їх концентрація в липні в період максимальної потреби у волозі є позитивним фактором (рис. 2.4).

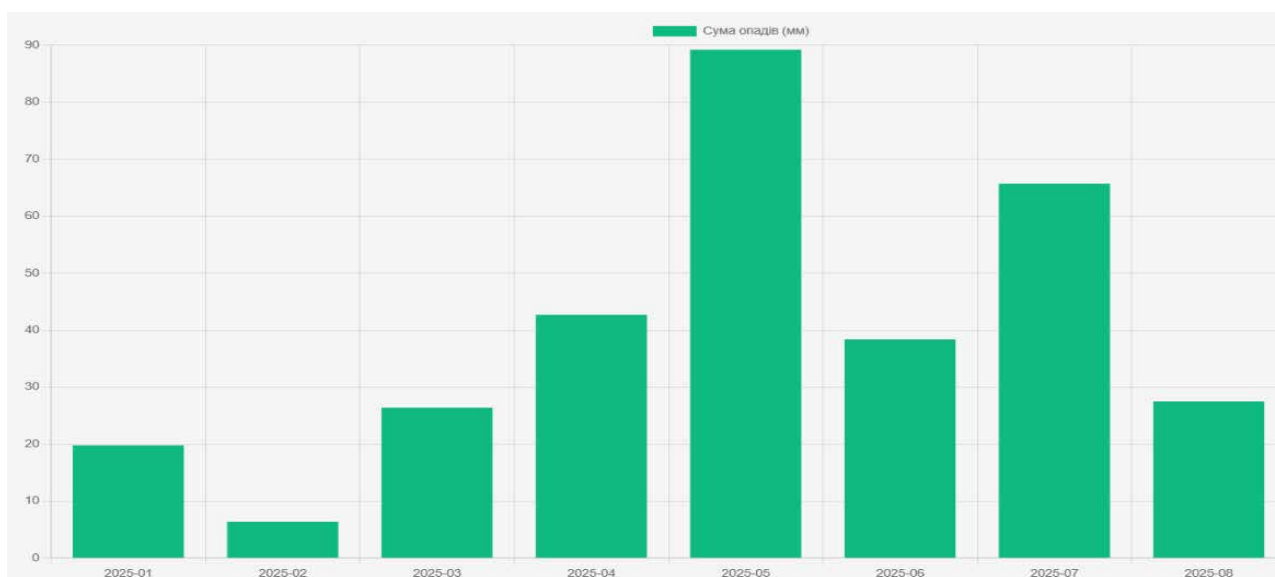


Рис. 2.4. Сума опадів по місяцях в Бориспільському районі в 2025 р.

Річні дані щодо опадів за період 2020-2024 років свідчать про відносну стабільність кліматичних умов для вирощування кукурудзи (рис. 2.5).

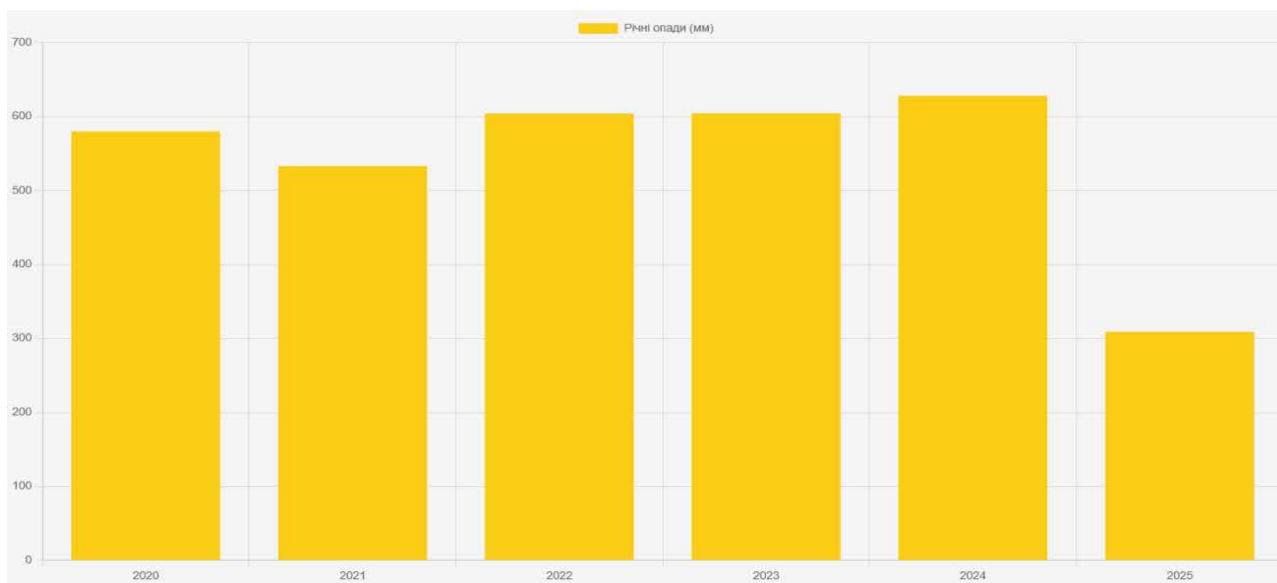


Рис. 2.5. Річні опади в Бориспільському районі за 2020-2025 рр.

Впродовж цих років сума опадів коливалася в межах 530-620 мм, що відповідає кліматичній нормі для регіону і є достатнім для забезпечення потреби культури у волозі. Наявність достатньої кількості опадів у ці роки, особливо в критичні фази розвитку рослин (формування качана та наливу зерна), була сприятливим фактором для отримання стабільно високих врожаїв.

Однак, навіть у ці відносно стабільні роки спостерігалася нерівномірність опадів, з концентрацією їх у вигляді інтенсивних, але короткочасних злив. Це може створювати ризик для сільського господарства, адже така нерівномірність не завжди забезпечує рівномірне зволоження ґрунту, що є необхідним для кукурудзи. Така тенденція, що спостерігалась у попередні роки, вказує на потенційну вразливість аграрного сектору до кліматичних змін, що можуть посилитися у майбутньому.

2.4. Методика проведення дослідження

Дослід було закладено за шістьма варіантами, де застосовувалися добрива від компанії AGROMIX. Ця компанія є виробником високоякісних комплексних гранульованих добрив. Кожен варіант дослідження охоплював 8 рядків кукурудзи із міжряддям 70 см, що відповідало ширині 5,6 м. Довжина кожного варіанту

складала 250 м. Таким чином, площа одного варіанту становила 0,14 га, а загальна площа всього досліджу – 0,84 га (табл. 2.1, рис. 2.6).

Таблиця 2.1

Схема досліджу

Номер варіанту	Обробіток ґрунту	Вид добрив	Норма внесення
1	STRIP MASTER	Без добрив (контроль)	–
2		AGROMIX, NPK (7-18-36) + 4SO ₃ + 2Mg	100 кг/га
3		AGROMIX, NPK (9-24-24) + 4SO ₃ + 2Mg	100 кг/га
4	MULCHER + STRIP MASTER	Без добрив (контроль)	–
5		AGROMIX, NPK (7-18-36) + 4SO ₃ + 2Mg	100 кг/га
6		AGROMIX, NPK (9-24-24) + 4SO ₃ + 2Mg	100 кг/га



Рис. 2.6. Схематичне відображення варіантів дослідження

Для порівняння був використаний фоновий гібрид – LG31305. Дослідження проводилось за допомогою комплексної методології, що поєднувала польовий, лабораторний та дистанційний моніторинг. Польовий моніторинг був поетапним. Спочатку, після появи сходів, визначали схожість та густоту стояння рослин. На етапі 3-5 листків вимірювали висоту рослин. 12

червня було проведено комплексний аналіз, що включав визначення вмісту хлорофілу в листках, вимірювання довжини та ваги надземної і підземної частин, а також вологості стебла. Протягом усього вегетаційного періоду фіксували фази росту і розвитку культури за шкалою BBCH.

Поza польовими вимірюваннями, був проведений дистанційний моніторинг з використанням платформи Cropwise Operation, де визначались індекси вегетації, зокрема NDVI, для оцінки загального стану посівів.

Хоча компанія AgriLab виконувала агрохімічний аналіз поля, для точності проводились лабораторні дослідження ґрунту в університеті. Кислотність (рН сольове) та нітратний азот визначалися іон-селективним методом. Для аналізу рухомих форм фосфору застосовувався метод Кірсанова, для рухомого калію – полум'яневий метод Кірсанова (спектрофотометрія) [60, с. 84]. Зразки ґрунту для визначення запасів продуктивної вологи відбиралися до посіву та під час інтенсивного росту.

На завершальному етапі проводився облік врожаю шляхом визначення біологічної врожайності на кожній ділянці з урахуванням фактичної густоти стояння.

2.5. Технологія вирощування кукурудзи на дослідній ділянці

Поле, на якому проводилось дослідження за нумерацією господарства становить – № 6, із загальною площею 5,15 га. Його місцерозташування – село Велика Олександрівка, бориспільський район. Попередня культура на полі – кукурудза. З осені і до весни не проводились жодних агротехнічних операцій. В кінці березня був проведений відбір зразків автоматичним пробовідбірником AgriSoilSampler з використанням GPS для агрохімічного аналізу показників. В цей же період на частині ділянки було проведено мульчування таким агрегатом як Mulcher MZ 6000 від компанії BEDNAR, на іншій частині – залишилась стерня кукурудзи (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Агрегат MULCHER MZ 6000, BEDNAR

Пізніше, на початку квітня, було внесено КАС-32 100 л/га як фонове удобрення. Таким чином, підготовчий етап до закладання досліду закінчено. Посів проведено 13 травня, в роботі був задіяний агрегат від тієї ж компанії – Strip-Master EN 6000. Даний агрегат проводив попереднє стрічкове нарізання рядків ґрунту на глибину до 25 см, одночасно вносилося сухе гранульоване добриво AGROMIX із вмістом NPK (7-18-36) + 4SO₃ + 2Mg та NPK (9-24-24) + 4SO₃ + 2Mg на глибину 20-21 см, фізична норма удобрення – 100 кг/га (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Агрегат STRIP-MASTER EN 6000, BEDNAR

Глибина висіву становила 4,5-5,5 см. Висівався один гібрид – LG31305 – це середньоранній гібрид (ФАО 290-300) з зубовидним типом зерна. Висівали

кукурудзу сівалкою Kinze (8-ми рядковою), із обладнаною системою точного землеробства – Precision Planting. Норма висіву насіння складала – 65 тис. шт/га, міжряддя стандартне – 70 см (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Сівалка Kinze, обладнаною системою точного землеробства – Precision Planting

Догляд за посівами кукурудзи, переважно, як і в більшості господарств, котрі займаються вирощування даної культури – не складний, переважно з використанням лише гербіцидів. Після посіву було застосовано (18.05.2025) гербіцид суцільної дії – Гліфомакс в нормі 3 л/га (д.р. калійна сіль гліфосату, 614 г/л) (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Вирощування кукурудзи на зерно на дослідній ділянці за технології Strip-Till (варіанти №1-№3) та мульчування на (варіанти №4-№6)

№ п/п	Агрооперація	Дата	Назва препарату, добрива, характеристика	Норма внесення	Трактор + агрегат
1	Мульчування	27.03.2025	Поверхнево (варіанти № 4-6)	–	Case Magnum 310 + Mulcher MZ

					6000
--	--	--	--	--	------

Продовження таблиці 2.2

2	Внесення КАС на мінералізацію	05.04.2025	КАС-32	100 л/га	T-25 + ОП - 400
3	Нарізання стрічки з одночасним внесенням добрив	13.05.2025	AGROMIX 1 NPK (7-18-36), AGROMIX 2 NPK (9-24-24)	100 кг/га	FENDT 1038 Vario + Strip-Master EN 6000
4	Посів	14.05.2025	Глибина сівби насіння - 5 см	65000 шт/га	FENDT 1038 Vario + Kinze Precision Planting
5	Внесення ЗЗР	18.05.2525	Гліфомакс	3,0 л/га	T-25 + ОП - 400
6	Внесення ЗЗР	09.06.2025	Альфа Дикамба	0,6 л/га	T-25 + ОП - 400
			Мілано	1,25 л/га	
7	Внесення ЗЗР	15.06.2025	Лаудіс	0,5 кг/га	T-25 + ОП - 400
			Меро	1,5 л/га	

Наступний етап гербіцидного захисту посівів передбачав застосування комбінованого післясходового захисту у фазі 4-5 листків (09.06.2025). Було використано два гербіциди. 1. Альфа-Дикамба (д.р. дикамби диметиламінна сіль, 460 г/л) в нормі 0,6 л/га, що забезпечує контроль однорічних та деяких багаторічних дводольних бур'янів. 2. Мілано (д.р. нікосульфурон, 40 г/л) в нормі 1,25 л/га, ефективний проти однорічних і багаторічних злакових, а також дводольних бур'янів. Крім того, для боротьби з ваточником сирійським (*Asclepias syriaca* L.) застосовувався післясходовий гербіцид Лаудіс (д.р. темботріон 200 г/кг, ізоксадіфен 100 г/кг) в нормі 0,5 кг/га. Ця обробка була проведена диференційовано по бур'янам (15.06.2025) з додаванням прилипача Меро (1,5 л/га), що сприяло покращенню змочування поверхні бур'янів і, як

наслідок, пришвидшенню та підвищенню ефективності проникнення діючих речовин гербіциду.

2.6. Аналіз ґрунту

Перед початком дослідження було проведено комплексний аналіз ґрунту. Для відбору зразків використовувався автоматичний пробовідбірник ґрунту AgriSoilSampler власного виробництва господарства. Зібрані зразки пройшли первинну підготовку, що включала сушіння та подрібнення, після чого були направлені до лабораторії WARD (США) для подальшого хімічного аналізу. Отримані результати наведено нижче (рис. 2.10). Згідно з протоколом, для комплексного аналізу було відібрано 12 зразків. Аналіз зразків № 9-12 показав загальну тенденцію, сприятливу для цієї культури. Рівень рН ґрунту становить 5,9-6,0, що є слабкокислим та оптимальним для вирощування кукурудзи, оскільки вона добре росте в діапазоні рН 5,5-7,5. Вміст органічної речовини середній, що забезпечує нормальне живлення. Головною особливістю цієї ділянки є надлишок фосфору у ґрунті. Вміст фосфору (понад 111 мг/кг ґрунту) значно перевищує норми, що свідчить про інтенсивне внесення цих добрив у минулому.

ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ
№ 090400519/15450 від 10.04.2025 р.

Замовник: AgriSpace Код замовника: 15450 № договору: -	№ поля: 6 Площа: 5.15 га Метод і спосіб відбору зразків: Автоматичним пробовідбірником AgriSoilSampler з використанням GPS, елементарна ділянка 5 га, h=0-30см	Вимірювання проведено: WARD, Laboratories, Inc., США Дата відбору зразків: 25.03.2025 р. Дата вимірювань: 08.04.2025 р.
---	--	--

Номер зразка	рН (1:1) ґрунту	рН буф.	Розчинні солі, ммоль/см	Орг. речовина, %	Нітрати (NO ₃), мг/кг	Фосфор (P), мг/кг	Амонійно-ацетатний буфер, мг/кг				Сірка (S), мг/кг	ДТРА				Бор (В), мг/кг	Сума катіонів, мг-екв/100г	Насиченість основи, %				
							К	Са	Мg	Na		Zn	Fe	Mn	Cu			Н	К	Са	Mg	Na
1	6.0	6.6	0.10	2.7	3.7	159	117	1310	156	22	13	0.83	71.4	9.9	0.74	0.47	11.9	30	3	55	11	1
2	5.9	6.6	0.14	2.5	3.7	132	102	1215	159	20	12	0.79	74.6	11.5	0.91	0.47	11.4	32	2	53	12	1
3	6.0	6.6	0.10	2.4	3.9	86	88	1162	141	23	13	0.81	72.3	12.8	0.79	0.44	11.7	37	2	50	10	1
4	5.7	6.3	0.10	2.9	4.8	171	184	1195	118	17	13	1.19	106.5	14.1	0.96	0.55	14.1	47	3	42	7	1
5	5.8	6.4	0.11	2.2	3.4	139	86	982	99	20	12	1.11	77.8	12.3	0.80	0.44	12.3	51	2	39	7	1
6	6.0	6.6	0.10	2.2	3.5	141	79	1162	135	22	12	0.99	75.8	10.5	0.86	0.45	10.7	33	2	54	10	1
7	6.7	7.2	0.14	2.4	3.2	113	84	1535	171	18	11	0.96	51.9	6.4	0.79	0.46	9.4	0	2	82	15	1
8	6.1	6.6	0.09	2.4	3.2	188	93	1277	152	18	10	0.94	68.8	8.0	0.82	0.44	12.2	35	2	52	10	1
9	6.0	6.6	0.10	2.4	3.7	151	178	1344	151	21	12	0.90	84.0	11.0	0.88	0.54	12.4	31	4	54	10	1
10	6.0	6.5	0.10	2.2	2.9	111	103	1115	138	19	11	0.81	67.0	10.5	0.82	0.43	12.3	42	2	45	9	1
11	5.9	6.6	0.08	2.1	3.2	121	86	1015	127	19	12	0.69	67.2	11.8	0.78	0.42	10.6	39	2	48	10	1
12	5.9	6.7	0.08	1.9	2.9	155	94	933	119	25	11	0.79	68.5	10.2	0.78	0.40	8.6	30	3	54	12	1

Рис. 2.10. Протокол вимірювань показників ґрунту

Такий надлишок може негативно впливати на засвоєння інших елементів, зокрема цинку, оскільки ці елементи є антагоністами. Нестача цього

мікроелементу негативно впливає на ріст і розвиток культури, що може призвести до зниження врожайності.

Також потребують уваги вміст калію, магнію та бору, які знаходяться на середньому рівні, що робить їх обмежувачами факторами на полі. Для кукурудзи це особливо критично, оскільки калій забезпечує стійкість до стресів, магній є основою для фотосинтезу, а бор – критично важливий для запилення та формування зерна. Крім того, аналіз суми ЄКО, який становить 9,4-12,3 мг-екв/100 ґрунту, свідчить про помірну здатність ґрунту утримувати поживні речовини.

Для детальної візуалізації та просторового аналізу, далі наведено серію картограм, створених на основі даних геоінформаційної системи. Ці карти ілюструють розподіл ключових агрохімічних показників поля, таких як вміст органічної речовини, рівень рН ґрунту, нітратного азоту та рухомих форм фосфору, калію і сірки. Візуальне відображення просторової неоднорідності є важливим для точного землеробства, оскільки дозволяє виявити ділянки з дефіцитом або надлишком поживних речовин

Просторовий аналіз виявив ключові особливості хімічного складу ґрунту на дослідній ділянці (рис. 2.12-2.13). Розподіл показника рН свідчить про слабо кислу реакцію. Вміст нітратного азоту на всій площі є низьким, коливаючись у межах 2,9-3,7 мг/кг, що відповідає очікуваному стану ґрунту без внесення добрив.

Щодо органічної речовини, лише одна невелика ділянка характеризується низьким вмістом (1,9%), тоді як решта поля має середню забезпеченість цим показником на всіх варіантах. Аналіз картограм рухомих форм Р, К та S виявив такі закономірності на дослідній ділянці: забезпеченість ґрунту фосфором є переважно дуже високою. Однак, у центральній частині ділянки спостерігається зниження показника на 30-40 мг/кг порівняно з максимальним значенням (155 мг/кг); розподіл калію є гетерогенним, з плавним переходом від ділянок з високим вмістом до зон із середньою забезпеченістю; на відміну від інших елементів, розподіл сірки є рівномірним по всій площі, з мінімальними коливаннями показника (різниця в 1 мг/кг).

Тому використання стандартизованих лабораторних методів є обов'язковим. В даній дипломній роботі були визначені наступні показники: рН ґрунту, яке надає розуміння щодо рівня кислотності, і є основою для подальшого визначення рухомих елементів живлення, таких як N, P та K. Визначення кислотності ґрунту відбувалось іон-селективним методом на приладі I-160 МІ відповідними електродами для прямого вимірювання концентрації рН (рис. 2.11.).



Рис. 2.11. Визначення рН ґрунту на приладі I-160 МІ

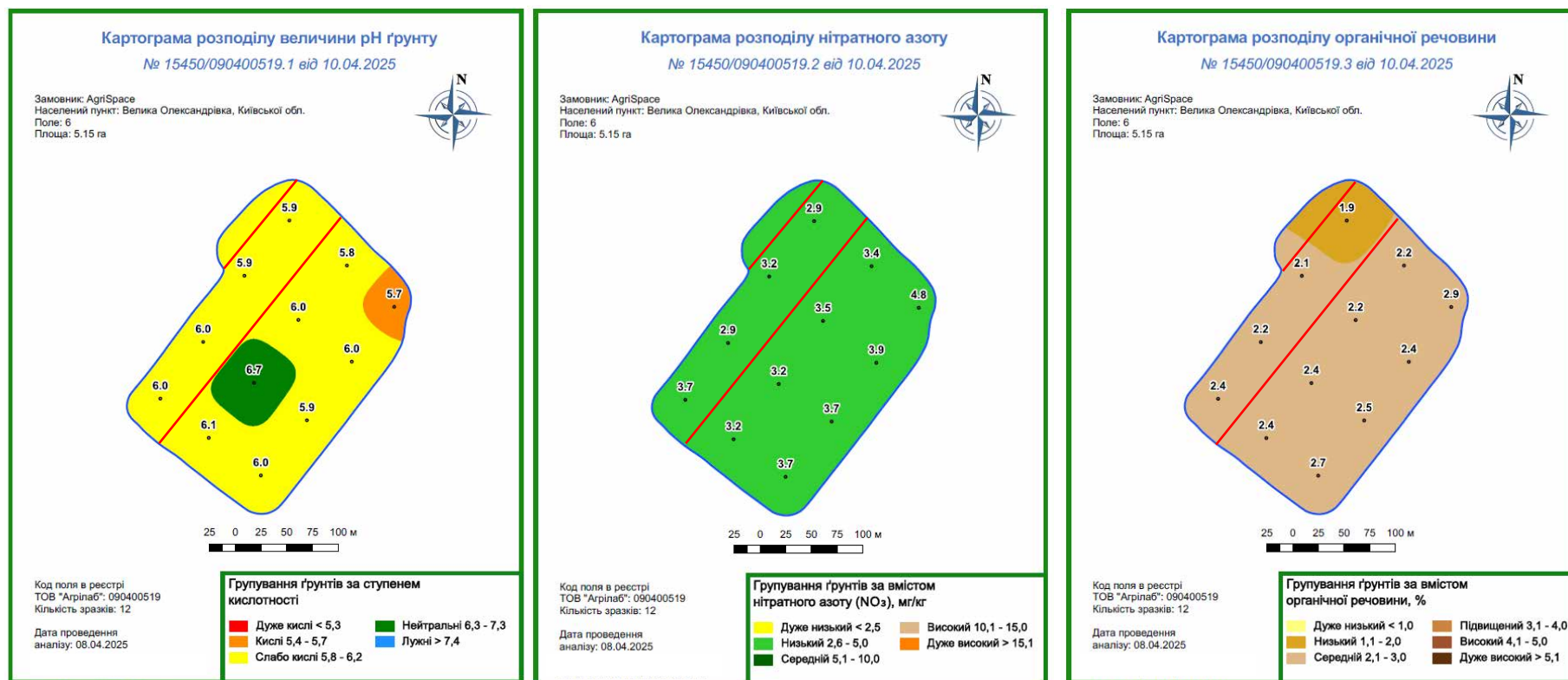


Рис. 2.12. Картограми розподілу величини рН, нітратного азоту та органічної речовини

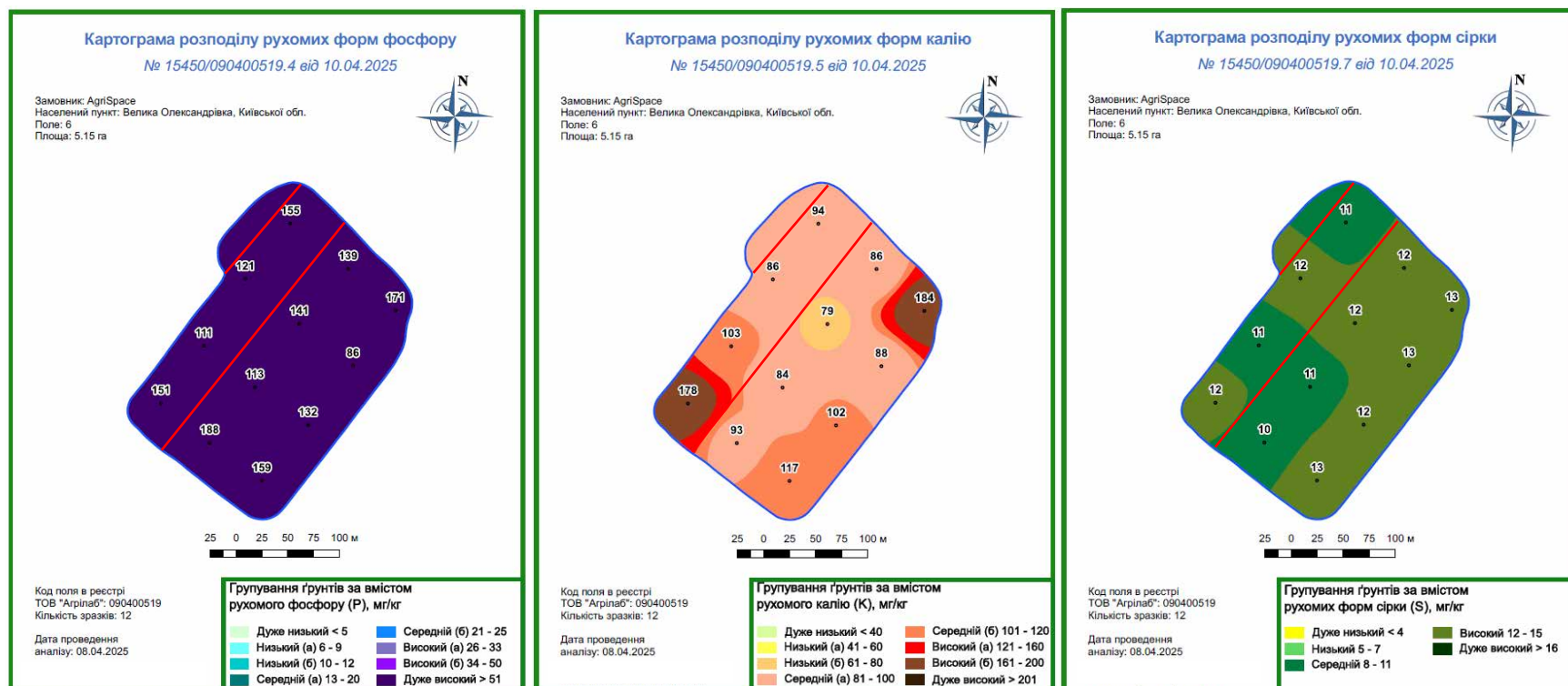


Рис. 2.13. Картограми розподілу рухомих форм фосфору, калію та сірки

Для приготування досліджуваного фільтрату ми брали середню наважку ґрунту 20 г і додавали до нього 50 мл КСl (рН сольове). Вміст нітратного азоту проводилося на такому самому приладі, лише змінений електрод для прямого вимірювання концентрації нітрат-іонів (NO_3^-), який надавав значення за величиною рХ. Рухомі форми азоту в ґрунті екстрагували 1% розчином алюмокалієвих квасців (20 г ґрунту на 50 мл екстрагента). Після змішування і фільтрування вимірювання проводили безпосередньо у витяжці.

Визначення амонійного азоту в ґрунті починається з етапу екстракції. Для цього бралась наважка ґрунту 20 г і поміщалась в колбу на 100 мл. Далі додавали 50 мл екстрагуючого розчину (1 н. КСl). Суміш ретельно збовтали і через 18 годин відфільтрували. З отриманої ґрунтової витяжки відбирали 1 мл фільтрату, перенесли в конічну колбу на 100 мл, додали 1 мл розчин порівняння та 20 мл РЗР, перемішали і ще додали 1 мл РРГН. Після цього розчин фотометрують через 1 годину. В результаті всіх реакції утворюється світло-зелене забарвлення.

Вміст рухомого фосфору визначався фотометричним методом Кірсанова, який підходить для кислих і слабокислих ґрунтів. Екстракцію проводили 0,2 н. НСl (10 г ґрунту на 50 мл екстрагента). До фільтрату додавали амоній молібдат кислий 2 мл та відновник хлорид олова (SnCl_2) для отримання синього забарвлення. Інтенсивність забарвлення вимірювалася на спектрофотометрі DR 3900, що дозволило визначити концентрацію фосфат-іонів з подальшим розрахунком і побудою калібрувальної кривої.



Рис. 2.14. Калібрувальна шкала для визначення вмісту P_2O_5

Визначення рухомого калію (K_2O) проводилось полум'яно-фотометричним методом Кірсанова. Екстракція здійснювалась 0,2 н. HCl (10 г ґрунту на 50 мл екстрагента). Аналіз виконувався на полум'яному фотометрі, який визначає концентрацію калію, вимірюючи інтенсивність світіння атомів елемента у полум'ї (рис. 2.15).



Рис. 2.15. Полум'яний фотометр PFP-7 JENWAY

Всі методи забезпечили надійне визначення таких основних показників, як і кислотність ґрунту, так і вміст рухомих форм N , P та K , що є основою для раціонального планування норм внесення добрив. Застосування точних методик знижує ризики економічних збитків від недобору врожаю або зайвих витрат на вже присутні в ґрунті елементи.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Схожість насіння кукурудзи залежно від досліджуваних чинників

Схожість насіння кукурудзи є першочерговим біологічним показником, що визначає здатність насіння формувати нормально розвинені сходи. Високий відсоток схожості прямо забезпечує досягнення запланованої густоти стояння рослин, що є необхідною умовою для максимального використання площі живлення та ресурсів поля. Низька схожість призводить до зріджених посівів і, як наслідок, до зниження потенційної врожайності. Одночасні сходи запобігають появі пригнічених рослин. Якщо рослини сходять нерівномірно, більші рослини швидко створюють тінь і відбирають світло, вологу та живлення. Це призводить до появи малопродуктивних рослин на полі. Також однорідний посів забезпечує рівномірний розподіл усіх ресурсів між усіма рослинами. Це дозволяє кожній рослині максимально реалізувати свій генетичний потенціал і створює оптимальний, високопродуктивний фітоценоз. Синхронний розвиток рослин дозволяє точно визначати оптимальні терміни для всіх агрозаходів. Це важливо, коли йде мова про захист рослин пестицидами, підживлення добривами та збирання врожаю.

Результати досліджень схожості насіння кукурудзи залежно від вивчаємих чинників наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Схожість насіння та рівномірність сходів після сівби

STRIP-MASTER EN 6000			MULCHER MZ 6000 + STRIP-MASTER EN 6000		
Густота стояння – 65000 шт/га			Густота стояння – 63000 шт/га		
1 день	40000 шт/га	62%	1 день	40000 шт/га	63%

2 день	10000 шт/га	15%	2 день	17000 шт/га	27%
--------	-------------	-----	--------	-------------	-----

Продовження таблиці 3.1

3 день	12000 шт/га	18%	3 день	3000 шт/га	5%
Не зійшло	3000 шт/га	5%	Не зійшло	3000 шт/га	5%

Контрольний замір для правильності обліку був проведений на 5 варіанті, де вносилося добриво із д.р. NPK (7-18-36) в кількості 100 кг/га. Зіставлення обох технологічних груп свідчить, що мульчування на Strip-Till сприяє більш швидкому та рівномірному проростанню, про що свідчить вищий відсоток сходів – за 2 дні проросло 90%, а на звичайному Strip-Till лише 77%.



Рис. 3.1. Сходи кукурудзи: загальний вигляд (праворуч) та деталізований (ліворуч)

3.2. Визначення вмісту хлорофілу N-Тестером

N-Тестер – це портативний прилад, який використовується для швидкого, неруйнівного вимірювання відносної концентрації хлорофілу в листках кукурудзи. Прилад вимірює, скільки червоного світла (яке поглинає хлорофіл) проходить через лист порівняно з інфрачервоним світлом (яке не поглинається).

Результат видається як безрозмірний індекс SPAD. Чим вище значення SPAD, тим більше хлорофілу і, відповідно, азоту міститься в рослині.

Аналізуючи дані таблиці 3.2, можемо говорити про те, що найвищі показники вмісту хлорофілу зафіксовані у варіантах, де застосовувалось мульчування перед нарізанням стрічки (варіанти №4-6). Варіант № 6 – це абсолютний лідер досліду за вмістом хлорофілу, що свідчить про найкраще засвоєння азоту та найвищий фотосинтетичний потенціал у цій фазі. Варіант № 5 – також має дуже високий показник, підтверджуючи ефективність комбінації мульчування та живлення NPK (7-18-36).

Таблиця 3.2

Вміст хлорофілу, вимірний приладом «N-tester» у фазу росту і розвитку 5-6 листків

Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Варіант №4	Варіант №5	Варіант №6
STRIP-MASTER EN 6000			MULCHER MZ 6000 + STRIP-MASTER EN 6000		
Контроль (0 кг/га)	NPK (7-18-36), 100 кг/га	NPK (9-24-24), 100 кг/га	Контроль (0 кг/га)	NPK (7-18-36), 100 кг/га	NPK (9-24-24), 100 кг/га
342	430	450	475	495	507

Варіант № 4 – навіть контрольний варіант з обробітком агрегатом MULCHER MZ 6000 демонструє високий результат, що говорить про позитивний вплив самого мульчування на мінералізацію азоту з ґрунту та загальну життєздатність рослин.

Найнижчі показники спостерігаються у варіантах за звичайної технології Strip-Till. Варіант № 1 – демонструє найнижчий показник, який слугує базою для порівняння. Він свідчить про явний дефіцит азоту у рослин, які не отримали стартового живлення.



Рис. 3.2. Порівняння двох контрольних варіантів (№1 та № 4). Ліворуч звичайна технологія Strip-Till, праворуч – з попереднім мульчуванням (фаза росту і розвитку – 5-6 листків, 12.06.2025)

3.3. Біометричні показники рослин кукурудзи

Біометричні показники кукурудзи є важливим індикатором ефективності агротехнологій та відображають адаптивну реакцію культури на просторову неоднорідність умов вирощування. За дослідженнях різних варіантів удобрення за різних систем обробітку ґрунту було проаналізовано ряд таких показників. Основні з них продемонстровані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Густота стояння рослин та їхня висота у відповідні фази

№ п/п	Варіант дослідю	Показник	Фаза росту і розвитку за ВВСН		
			14-15	35-36	84-85
1	Strip-Master Контроль, 0 кг/га	Висота, см	13	33	265
		Густота, шт/га	63506	63506	61569
2	Strip-Master NPK (7-18-36), 100 кг/га	Висота, см	14	37	270
		Густота, шт/га	64932	64932	64549

Продовження таблиці 3.3

3	Strip-Master	Висота, см	16	36	270
	НРК (9-24-24), 100 кг/га	Густота, шт/га	64932	64932	64932
4	Mulcher + Strip-Master	Висота, см	17	39	265
	Контроль, 0 кг/га	Густота, шт/га	63556	63556	63208
5	Mulcher + Strip-Master	Висота, см	17	45	270
	НРК (7-18-36), 100 кг/га	Густота, шт/га	63556	63556	63208
6	Mulcher + Strip-Master	Висота, см	18	45	270
	НРК (9-24-24), 100 кг/га	Густота, шт/га	63556	63556	63208

Найкращі результати за показниками росту демонструють варіанти, де застосовувалося попереднє мульчування (№4-6), зокрема, де вносили добрива НРК. Фактична густота стояння рослин майже у всіх варіантах близька до норми висіву насіння (65000 шт/га).

Проглядається тенденція, що за Strip-Till показники густоти дещо вищі, на відміну від варіанту із мульчуванням (що забезпечило як і кращу рівномірність сходів, так і відповідну густоту до посіву). Впродовж вегетаційного періоду культури цей параметр був максимально стабільним, лише в заключні фази кількість рослин на контрольному варіанті має показник в 61569 шт/га, що є найнижчим серед усіх (рис. 3.3-3.4).



Рис. 3.3. Варіанти дослідження №1-3, розвиток надземної та підземної частини рослин за обробітку Strip-Master. Фаза росту і розвитку за ВВСН 15-17



Рис. 3.4. Варіанти дослідження №4-6, розвиток надземної та підземної частини рослин за обробіток Mulcher + Strip-Master. Фаза росту і розвитку за ВВСН 15-

17

Висота рослин кукурудзи прямо корелює з рівнем живлення та технологією обробітку. На ранніх фазах (4-5 листків) найкращі показники (17-18 см) показали варіанти № 4, № 5 та № 6, підтверджуючи, що якісне стартове живлення та мульчування дають сильний поштовх на початку. Ця тенденція посилюється до фази витягування стебла, де абсолютними лідерами стають варіанти № 5 та № 6 із висотою рослин 45 см.

Наприкінці росту і розвитку (ВВСН 84-85) різниця у висоті дещо нівелюється, але найкращі результати (270 см) зберігають варіанти з

ефективним живленням – № 2, № 3 та № 5, № 6. Найменша висота (265 см) спостерігається у контрольних варіантах № 1 та № 4, що підтверджує наступне: для досягнення максимальних лінійних розмірів кукурудзі необхідне додаткове мінеральне живлення, незалежно від технології обробітку. Без сумніву, комбінація Mulcher + Strip-Master із стартовими добривами забезпечує кращий старт.

Проаналізувавши таблицю 3.4, що відображає масу та вологість рослин кукурудзи у фазі 5-6 листків, ми спостерігаємо, що найкращі показники загальної маси рослини і, відповідно, найбільше накопичення біомаси демонструють варіанти, де застосовувався комплексний підхід із мульчуванням та добривами.

Абсолютним лідером на цьому етапі є варіант № 5, де маса всієї рослини досягає 114,0 г. Друге місце посідає варіант №6 з масою 97,5 г. Це свідчить про те, що поєднання мульчування та мінерального живлення забезпечило найбільш інтенсивний старт і накопичення біомаси.

Порівнюючи обробітки, помітно, що контрольний варіант № 4 (90,4 г) значно перевершує контрольний варіант №1 (40,0 г). Це вкотре підтверджує, що попереднє мульчування навіть без стартового живлення істотно покращує ґрунтові умови (структура, мінералізація, тепловий режим) для початкового росту. Найбільша частка підземної частини відносно надземної (1 до 3,7) зафіксована у контролі № 4.

Вологість рослин та її маса у фазу 5-6 листків (ВВСН 15-16)

Дата обліку та вимірювань – 12.06			Маса надземної частини, г	Маса підземної частини, г	Співвідношення кореня/стебла	Маса всієї рослини г	Вологість рослини, %
STRIP-MASTER EN 6000	Варіант №1	Контроль (0 кг/га)	29,0	11,0	1 до 2,6	40,0	86,9
	Варіант №2	NPK (7-18-36) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	46,1	18,8	1 до 2,5	64,9	88,2
	Варіант №3	NPK (9-24-24) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	62,0	18,9	1 до 3,3	80,9	87,7
MULCHER MZ 6000 + STRIP-MASTER EN 6000	Варіант №4	Контроль (0 кг/га)	71,0	19,4	1 до 3,7	90,4	88,3
	Варіант №5	NPK (7-18-36) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	87,4	26,6	1 до 3,3	114,0	88,9
	Варіант №6	NPK (9-24-24) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	72,4	25,1	1 до 2,9	97,5	88,5



Рис. 3.5. Демонстрація кореневої системи за технології Mulcher + Strip-Till (праворуч) в порівнянні з Mini-Till, Living Soil Power (ліворуч). Фаза росту і розвитку за ВВСН 55-57 (викидання волоті середина-початок)

Хоча це може свідчити про активне нарощування кореневої системи для пошуку живлення, у варіантах із кращим живленням (№5) співвідношення є більш збалансованим (1 до 3,3), що характерно для здорових і високопродуктивних рослин.

Щодо вологості рослин у фазу ВВСН 15-16, то вона у всіх варіантах є високою (86,9-88,9%), що є нормою для інтенсивно зростаючої кукурудзи на ранній фазі. Найнижчий показник вологості (86,9%) зафіксовано на контрольному варіанті №1

Загальний висновок до розділу за біометричними показниками: технологія Mulcher + Strip-Master у поєднанні з NPK 7-18-36 (варіант №5) створює найбільш сприятливі умови для початкового росту, забезпечуючи максимальне накопичення біомаси вже на ранній фазі 5-6 листків

3.4. Проектована площа листкової поверхні

Площа листкової поверхні (ППЛ) є ще одним біометричним показником, що визначає фотосинтетичний потенціал посіву та використовується для прогнозування врожайності. У точному землеробстві найчастіше виражається через *індекс листкової поверхні (LAI)* – відношення сумарної площі листя до площі ґрунту (m^2/m^2).

На відміну від класичного визначення площі листкової поверхні, в дослідженні була саме *проектована площа*, яка відображає двовимірну проєкцію листя відносно ґрунтої поверхні, розрахунки проводились за допомогою програми ImageJ (рис. 3.6).

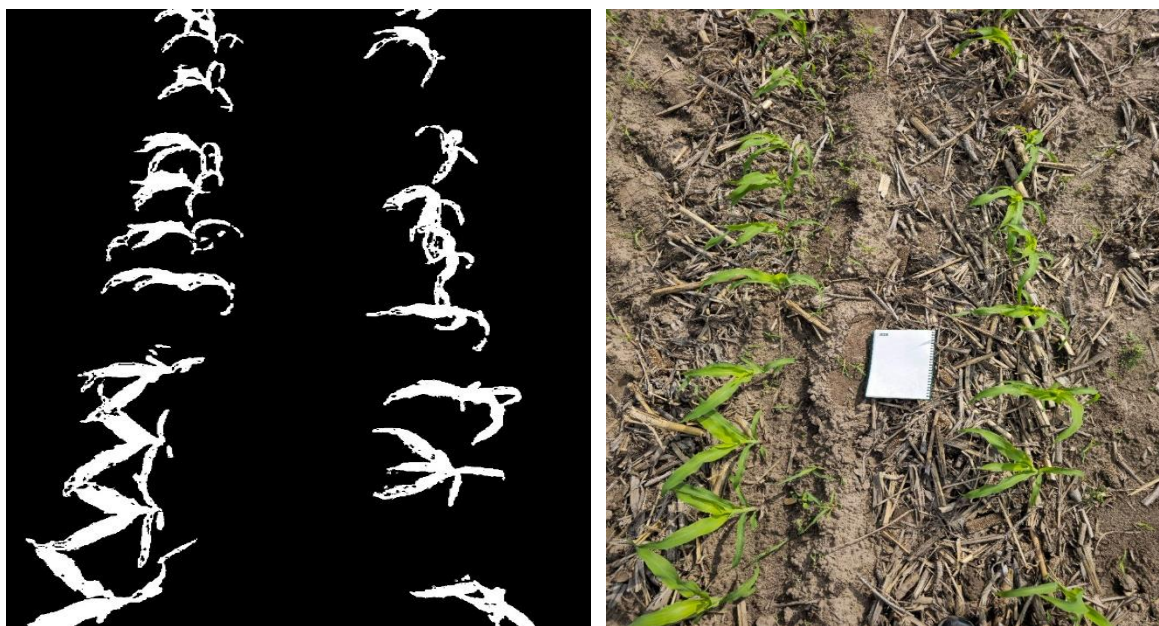


Рис. 3.6. Процес проектування площі листкової поверхні. Ліворуч знімок рослин кукурудзи із орієнтиром, праворуч – відреговане чорно-біле фото, за яким відбувався вимір площі

Суть методу полягала у виділенні зелених листків кукурудзи за їхнім відтінком та подальшому перетворенні зображень в чорно-білий контраст. Це дозволило виміряти *проектовану площу* кожного листка у cm^2 з використанням

масштабу (орієнтир: відома площа об'єкта на фото, а саме – блокнот). Фінальний результат отримано шляхом сумування площ усіх листків у кадрі та перерахунку цих значень на площу гектара для отримання показників у м²/га.

Дослідження проіводили у фазу 5-7 листків (фаза залежала від розвитку кожного варіанту), що є етапом активного вегетативного росту. Для цієї фази оптимальний LAI, який свідчить про здоровий розвиток, знаходиться в діапазоні 0,8 - 1,8 (8000 - 18000 м²/га) (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Проектована площа листкової поверхні кукурудзи

Фаза росту і розвитку: ВВСН 15-17			ППЛ, м ² /га	Індекс LAI
STRIP-MASTER EN 6000	Варіант №1	Контроль (0 кг/га)	10771	1,08
	Варіант №2	NPK (7-18-36) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	18315	1,83
	Варіант №3	NPK (9-24-24) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	15109	1,51
MULCHER MZ 6000 + STRIP-MASTER EN 6000	Варіант №4	Контроль (0 кг/га)	16969	1,70
	Варіант №5	NPK (7-18-36) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	21512	2,15
	Варіант №6	NPK (9-24-24) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	18553	1,86

Більшість варіантів демонструють LAI, що знаходиться на верхній межі або перевищує типові значення для фази 7 листків. Це вказує на інтенсивний ріст, що, є результатом оптимального живлення та сприятливих ґрунтово-кліматичних умов.

Високий LAI на ранній стадії є надійним індикатором високого потенціалу кінцевої урожайності, за умови достатнього забезпечення вологою протягом наступних критичних фаз розвитку.

Варіанти № 2 та № 5, із застосуванням NPK (7-18-36), показали найкращі результати. На відміну від формули NPK (9-24-24), ця суміш містить більшу частку калію (K_2O), що було важливо, оскільки вміст калію на полі згідно з картограмою та протоколом мав середнє значення. Рослини на цих варіантах з показали такий результат, оскільки калій підвищив їхню стійкість до холоду завдяки регуляції водного балансу (червень був прохолодним). Додаткове калійне живлення допомогло активізувати метаболізм та забезпечило кращий стартовий розвиток кореневої системи.

3.5. Фази росту і розвитку кукурудзи (ВВСН)

Для забезпечення точності та достовірності агрономічних досліджень, усі біометричні вимірювання та спостереження необхідно прив'язувати до конкретного фізіологічного віку рослин. З цією метою протягом усього вегетаційного періоду здійснювався постійний фенологічний моніторинг посівів, фіксуючи ключові етапи розвитку кукурудзи згідно з міжнародною шкалою ВВСН (табл. 3.6). Дана таблиця систематизує отримані дані та відображає терміни настання основних фаз росту і розвитку (від появи сходів до повної стиглості) для кожного варіанту дослідів, що дозволяє об'єктивно зіставити продуктивні показники з динамікою розвитку культури.

Таблиця 3.6

Фази росту і розвитку кукурудзи (ВВСН)

Дата обліку	Фенологічна фаза	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Варіант №4	Варіант №5	Варіант №6	
		STRIP-MASTER EN 6000			MULCHER MZ 6000 + STRIP-MASTER EN 6000			
		Контроль (0 кг/га)	AGROMIX NPK (7-18-36) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	AGROMIX NPK (9-24-24) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	Контроль (0 кг/га)	AGROMIX NPK (7-18-36) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	AGROMIX NPK (9-24-24) + 4SO ₃ + 2Mg (100 кг/га)	
20.05.2025	Проростання (колеоптиле)	ВВСН 07	ВВСН 08	ВВСН 08	ВВСН 08	ВВСН 08	ВВСН 08	
05.05.2025	Розвиток листіків (1-й листок)	ВВСН 09	ВВСН 10	ВВСН 10	ВВСН 10	ВВСН 10	ВВСН 10	
12.06.2025	Розвиток листіків (5-6 листіків)	ВВСН 15	ВВСН 16	ВВСН 16	ВВСН 16	ВВСН 16	ВВСН 16	
23.06.2025	Розвиток листіків (7-9 листок)	ВВСН 17	ВВСН 18	ВВСН 19	ВВСН 19	ВВСН 19	ВВСН 19	
30.06.2025	Розвиток листіків (9-10 листок)	ВВСН 19	ВВСН 20	ВВСН 20	ВВСН 20	ВВСН 20	ВВСН 20	
07.07.2025	Витягування стебла (початок)	ВВСН 30	ВВСН 32	ВВСН 31	ВВСН 32	ВВСН 32	ВВСН 32	
15.07.2025	Витягування стебла (середина)	ВВСН 35	ВВСН 36	ВВСН 36	ВВСН 36	ВВСН 36	ВВСН 36	
21.07.2025	Викидання волоті (початок)	ВВСН 51	ВВСН 52	ВВСН 52	ВВСН 52	ВВСН 52	ВВСН 52	

Продовження таблиці 3.6

31.07.2025	Цвітіння	ВВСН 61	ВВСН 65	ВВСН 65	ВВСН 65	ВВСН 65	ВВСН 65
08.08.2025	Молочна стиглість (середина)	ВВСН 73	ВВСН 75	ВВСН 75	ВВСН 75	ВВСН 75	ВВСН 75
13.08.2025	Молочна стиглість (кінець)	ВВСН 77	ВВСН 79	ВВСН 79	ВВСН 79	ВВСН 79	ВВСН 79
10.09.2025	Воскова стиглість	ВВСН 85	ВВСН 85	ВВСН 85	ВВСН 85	ВВСН 85	ВВСН 85
30.09.2025	Фізіологічна стиглість (чорна точка)	ВВСН 87	ВВСН 87	ВВСН 87	ВВСН 87	ВВСН 87	ВВСН 87
30.10.2025	Відмерла рослина	ВВСН 99	ВВСН 99	ВВСН 99	ВВСН 99	ВВСН 99	ВВСН 99

3.6. Дані дистанційного моніторингу з використання індексу NDVI

Однією із ключових інноваційних технологій є дистанційне зондування планети Земля, яке дозволяє отримувати актуальні дані про стан посівів без необхідності безпосереднього фізичного обстеження. Серед переліку спектральних індексів, що використовуються для аналізу стану рослинного покриву, особливе місце займає вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

NDVI – це стандартизований показник, що розраховується на основі відбивної здатності рослин у ближньому інфрачервоному та червоному діапазонах спектра.

Значення індексу знаходяться в діапазоні від -1 до +1, де високі позитивні значення свідчать про густий, здоровий рослинний покрив, тоді як низькі або від’ємні – про голий ґрунт, воду чи інші нерослинні об’єкти. Однак, при аналізі великих масивів даних або полів з незначними відмінностями, стандартна візуалізація NDVI може бути недостатньо інформативною для виявлення локальних проблемних зон.

Саме тому в рамках даного дослідження було використано режим візуалізації NDVI-контраст на платформі Cropwise Operation. Цей інструмент дозволяє підкреслити навіть мінімальні відмінності у вегетації в межах одного поля, що є критично важливим для точного землеробства. Замість використання загальної шкали, NDVI-контраст динамічно адаптує палітру кольорів до конкретного діапазону значень, які присутні на полі (рис. 3.7).

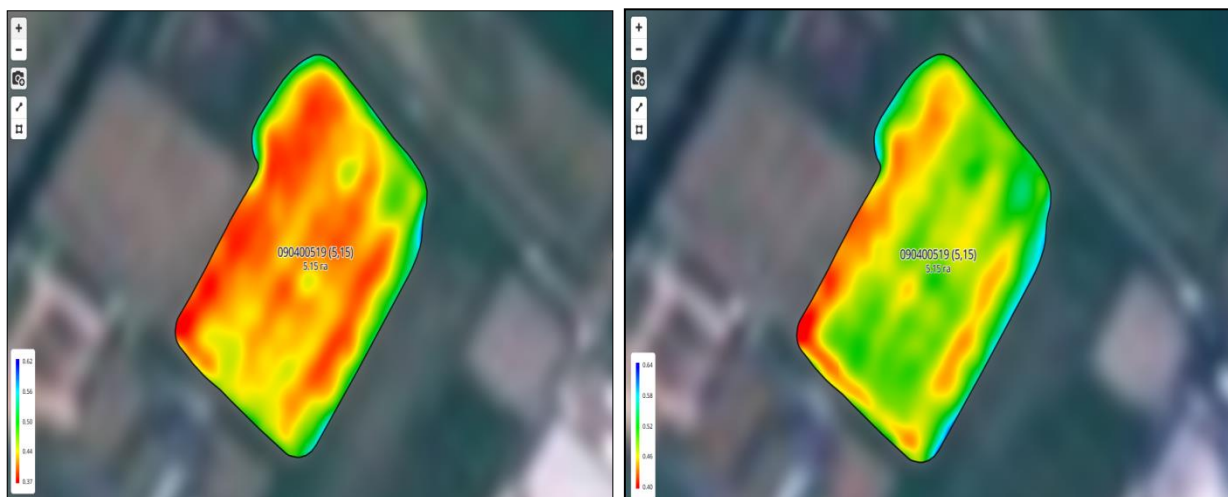


Рис. 3.7. Знімки NDVI-контрасту, фаза розвитку за ВВСН 16-19. Фаза розвитку культури: 6-9 листків. Період вегетації 18.06.2025 та 23.06.2025 відповідно

На наданій візуалізації видно, що кольорова гама NDVI-контрасту, на відміну від стандартної, може не відповідати класичному зеленому спектру. У цьому випадку, палітра кольорів простягається від червоного (що відповідає найнижчим значенням NDVI на полі, тобто найслабшим ділянкам) до синього (найвищим значенням NDVI, тобто найпродуктивнішим зонам). Так, червоні ділянки на карті можуть вказувати на стрес, спричинений нестачею води, живлення, або іншими агротехнічними проблемами, тоді як сині зони є індикатором оптимального розвитку рослинності.

Використання NDVI-контрасту на платформі Cropwise Operation дозволило виявити гетерогенність стану посівів, яка була б непомітна при традиційному моніторингу, і слугувало основою для диференційованого підходу до управління цими ділянками, включаючи цілеспрямоване внесення добрив чи засобів захисту рослин. Це підкреслює високу практичну цінність і актуальність даної технології для сучасного агрономічного менеджменту.

Аналіз індексу NDVI-контраст у фазі 6 листків кукурудзи NDVI (к) $\approx 0,37$ не виявив значущих візуальних відмінностей між дослідними варіантами. Низьке значення індексу на цій фазі є очікуваним і пояснюється мінімальним покриттям ґрунту листовою поверхнею, а не стресовим станом.

Проте, вже у фазу 9 листків відбулося чітке розмежування: варіанти №4-6, де застосовувалося попереднє мульчування стерні, продемонстрували вищий показник NDVI (κ) $\approx 0,52$ у порівнянні з варіантами №1-3 NDVI (κ) $\approx 0,42$. Ця різниця свідчить про ранній позитивний ефект мульчування на інтенсивність нарощування біомаси, що було підтверджено безпосередніми обліками біометричних показників на полі (рис. 3.8).

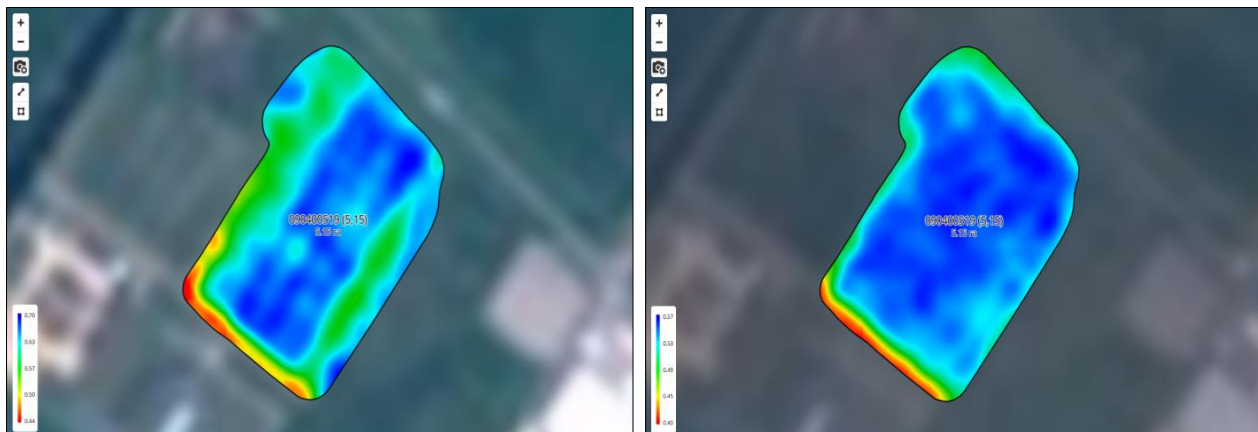


Рис. 3.8. Знімки NDVI-контрасту, фаза розвитку за ВВСН 25-36. Фаза розвитку культури: витягування стебла (початок-середина). Період вегетації 03.07.2025 та 15.07.2025 відповідно

Ситуація на дослідній ділянці станом на 03.07.2025 залишалася аналогічною, зберігаючи тенденцію до кращого розвитку варіантів №4-6. Однак, у наступний період, 15.07.2025, що відповідає середині фази витягування стебла, візуальна відмінність між варіантами №1-3 та №4-6 стала менш вираженою. Імовірно, це пов'язано з інтенсивним наростанням загальної вегетативної маси, яка нівелювала або маскувала початковий вплив дослідного фактору. На цій карті індексу спостерігаються лише локальні неоднорідності у вигляді невеликих плям із високим показником NDVI (κ) $\approx 0,52$, що може вказувати на ділянки з найкращим місцевим забезпеченням ресурсами.

На рисунку 3.9 ліворуч (перед піком вегетації) ділянки № 1-3 (без мульчування) демонструють незначну просторову неоднорідність у вигляді вкраплень світло-голубих тонів. Водночас, на ділянках №4-6 (з мульчуванням) візуалізується більш однорідний та щільний покрив рослинності, що може бути

непрямим підтвердженням кращої стабілізації волого-температурного режиму ґрунту.



Рис. 3.9. Знімки NDVI-контрасту, фаза розвитку за BBCH 82-84. Фаза розвитку культури: рання воскова стиглість. Період вегетації 21.08.2025 та 03.09.2025 відповідно

Знімок праворуч (початок вересня) відображає фазу початку природного старіння (сенесценції) рослин, коли більшість посівів досягла свого піку вегетації. Зниження загального індексу NDVI (κ) в цей час є очікуваним, але служить важливим етапом для кінцевої оцінки відмінностей.

Заключне порівняння стану рослин за знімками на період середини та кінця вересня є найбільш інформативним для підтвердження сформованої тенденції (рис. 3.10).

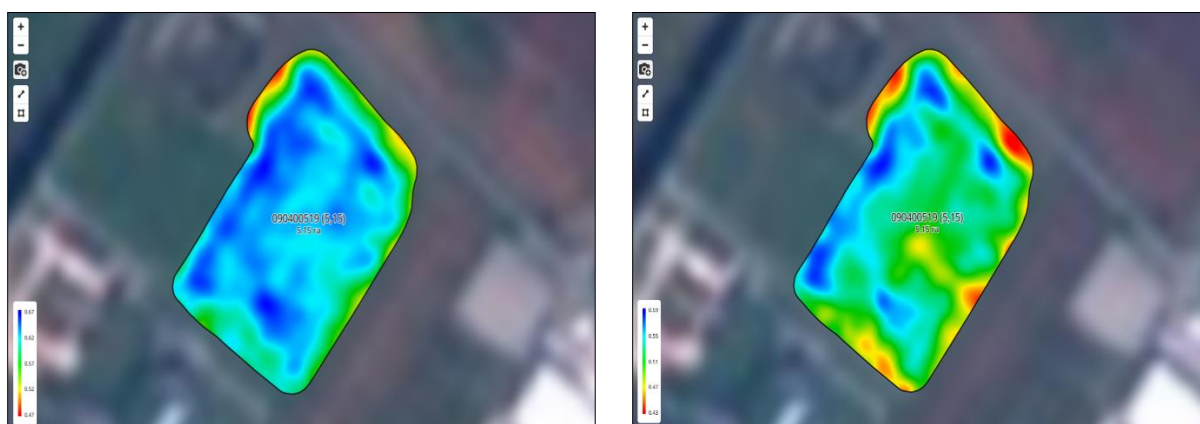


Рис. 3.10. Знімки NDVI-контрасту, фаза розвитку за BBCH 85-86. Фаза розвитку культури: воскова стиглість. Період вегетації 11.09.2025 та 21.09.2025 відповідно

Саме у закінчення вегетаційної активності найкраще окреслюються зони продуктивності та чіткіше проявляються кумулятивні відмінності між дослідними варіантами.

3.7. Вплив досліджуваних чинників на водний режим ґрунту

Запаси продуктивної вологи – це кількість води у ґрунтовому шарі, яка доступна для поглинання рослинами і може бути ними використана для життєдіяльності та формування врожаю. Вона визначається як різниця між загальною вологою ґрунту та вологою стійкого зав'ядання (ВЗ), нижче якої рослина не може поглинати воду і починає в'янути.

Кукурудза – культура з високою потребою у воді. Оптимальні запаси продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту критично залежать від фази її розвитку. На початкових фазах (від сходів до 5-7 листків) достатні запаси мають становити 60-80 мм. Нестача вологи ускладнює формування сильної кореневої системи. Критичний період (викидання волоті – цвітіння – налив зерна) найбільш відповідальний етап, коли дефіцит вологи є вирішальним для врожаю. Оптимальні запаси повинні становити 100-120 мм і більше. Зниження запасів нижче 50% від найменшої польової вологості (НПВ) призводить до значного зменшення кількості зерен у качані. Кінець вегетації запаси поступово знижуються. На час фізіологічної стиглості достатньо 60-80 мм для нормального завершення наливу зерна.

Перед сівбою та на початкових етапах росту кукурудзи (ВВСН 16-17) за технологій Strip-Till та Strip-Till з мульчуванням відмічено достатній рівень вологи, на даний момент істотної різниці в запасах немає (табл. 3.6).

Порівняння запасів продуктивної вологи за технології Strip-Till та з попереднім мульчуванням

09.05.2025 (перед сівбою)			
Без обробітку, стерня		MULCHER	
ЗПВ 0-20 см, мм	ЗПВ 0-100 см, мм	ЗПВ 0-20 см, мм	ЗПВ 0-100 см, мм
26,6	138,0	26,1	127,4
18.06.2025 (ВВСН 16-17)			
STRIP-MASTER		MULCHER + STRIP-MASTER	
ЗПВ 0-20 см, мм	ЗПВ 0-100 см, мм	ЗПВ 0-20 см, мм	ЗПВ 0-100 см, мм
24,9	123,1	24,8	122,5
16.07.2025 (ВВСН 35-36)			
STRIP-MASTER		MULCHER + STRIP-MASTER	
ЗПВ 0-20 см, мм	ЗПВ 0-100 см, мм	ЗПВ 0-20 см, мм	ЗПВ 0-100 см, мм
11,9	83,2	8,3	65,8

Однак, на момент витягування стебла у фазі ВВСН 35-36, перед викиданням волоті, спостерігається істотне зниження запасів продуктивної вологи, причому на варіантах з попереднім мульчуванням рівень ЗПВ виявився нижчим, ніж на ділянках без мульчування.

3.8. Вплив досліджуваних чинників на агрохімічні показники ґрунту

Для ефективного ведення сільського господарства вкрай важливо знати, скільки поживних речовин доступно рослинам у ґрунті. Аналіз ґрунту дає точну інформацію про вміст елементів живлення, зокрема, азоту, фосфору та калію, що є основою для внесення добрив. Без регулярної діагностики ґрунту аграрії ризикують або не внести необхідну кількість добрив на запланований

врожай, що веде до зниження врожаю, або витратити гроші даремно, вносячи елементи, яких у ґрунті вже достатньо.

За результати досліджень усі варіанти демонструють істотне падіння мінерального азоту від високого і середнього рівня забезпечення до низького та дуже низького (менше 23 мг/кг ґрунту) між відборами, що свідчить про активне використання легкодоступного азоту культурою, та, можливим, промиванням його в нижчі шари ґрунту (визначення було на глибині 0-20 см) (табл 3.8).

Таблиця 3.8

Агрохімічні показники ґрунту

Показник	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Варіант №4	Варіант №5	Варіант №6
	STRIP-MASTER EN 6000			MULCHER MZ 6000 + STRIP-MASTER EN 6000		
	Контроль, 0 кг/га	НPK (7-18-36), 100 кг/га	НPK (9-24-24), 100 кг/га	Контроль, 0 кг/га	НPK (7-18-36), 100 кг/га	НPK (9-24-24), 100 кг/га
Дата першого відбору: 12.06.2025 (ВВСН 15-16)						
pH _(сольове) , од.	5,3	5,1	5,7	5,3	5,5	5,7
N _{min} , мг/кг	74	64	66	61	59	64
P ₂ O ₅ , мг/кг	92	98	94	84	62	112
K ₂ O, мг/кг	242	273	242	248	242	212
Дата другого відбору: 13.08.2025 (ВВСН 77-79)						
pH _(сольове) , од.	5,1	5,2	5,1	5,2	5,2	5,1
N _{min} , мг/кг	17	20	23	22	15	18
P ₂ O ₅ , мг/кг	70	88	54	144	74	70
K ₂ O, мг/кг	285	357	412	436	406	333

Вміст фосфору стабільно знаходиться у межах середнього рівня (51-100 мг/кг ґрунту) для більшості варіантів та двох відборів, за винятком варіанта №4 у другому відборі, рівень якого за класифікацією Кірсанова має «підвищений» – 144 мг/кг ґрунту.

По всіх варіантах вміст калію має значний надлишок. На початку вміст фіксувався на високому або дуже високому рівні (більше 212 мг/кг ґрунту) і до другого відбору зріс до дуже високого рівня (більше 285 мг/кг ґрунту). Аналіз агрохімічних показників у динаміці показує, як змінювався вміст ґрунтового розчину під час вегетації кукурудзи, і як рослина використовувала елементи живлення до фази молочної стиглості (рис. 3.11).

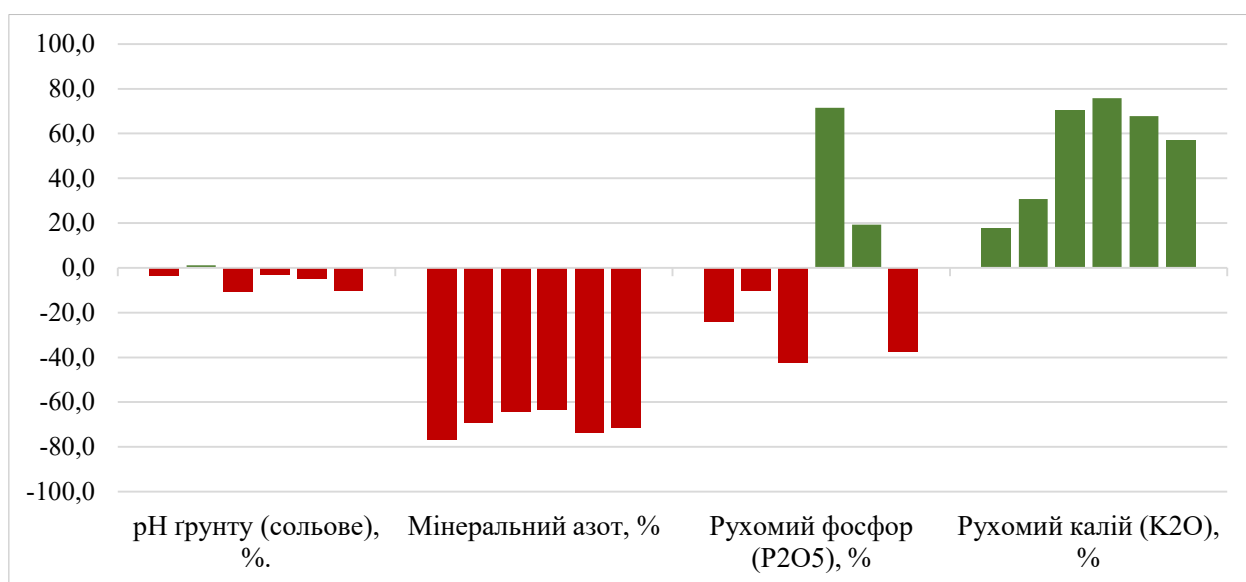


Рис. 3.11. Динаміка зміни агрохімічних показників ґрунту під час вегетації культури між першим і другим відборами (12.06.2025 – ВВСН 15-16 та 13.08.2025 – ВВСН 77-79)

Показники мінерального азоту демонструють найбільшу негативну динаміку (зниження на 60%-80%), що є очікуваним у період активного споживання. Вміст N_{\min} знизився з високого рівня (61-74 мг/кг ґрунту) до дуже низького (15-18 мг/кг ґрунту) наприкінці вегетації. Цей спад до значень менше 20 мг/кг ґрунту означає, що легкодоступний запас азоту вичерпано і досягнуто дефіциту.

На початковому етапі вміст рухомого калію (212-273 мг/кг ґрунту) знаходився на межі високого та дуже високого рівнів (згідно зі шкалою Кірсанова, високий 171-250 мг/кг ґрунту та дуже високий > 250 мг/кг ґрунту). Внесення калійних добрив у складі NPK призвело до надлишкового зростання вмісту до 285-436 мг/кг ґрунту (дуже високий рівень). Такий значний надлишок калію створює ризик антагоністичного впливу на засвоєння інших катіонів, зокрема кальцію та магнію. Це є економічно недоцільним та агрохімічно небезпечним порушенням мінерального живлення рослин. Вміст рухомого фосфору на більшості варіантів фіксувався у діапазоні середнього рівня (51-100 мг/кг ґрунту). Загалом, забезпеченість фосфором є прийнятною, хоча й має тенденцію до нижньої межі середнього рівня.

Кислотність ґрунту також піддалась змінам, в основному динаміка була до зниження, рівень рН 5,1-5,7 є середньо- та слабокислим, що є типовим для світло-сірих лісових ґрунтів. Для покращення реакції ґрунтового розчину варто звернути уваги на вапнування ґрунту, висівати сидерати та не використовувати добрива, які підкислюють ґрунтове середовище.

В цілому, система удобрення продемонструвала низьку ефективність та дисбаланс. На даному полі варто виключити внесення калію і зосередитися на збільшенні та диференціації норм азоту і фосфору для уникнення подальшого дефіциту.

3.9. Продуктивність кукурудзи на зерно залежно від досліджуваних чинників

Аналіз структури та показників урожайності кукурудзи на зерно за різних варіантів підживлення включає детальні агрономічні параметри. Ці дані охоплюють морфологічні характеристики качана (довжина, кількість рядів і зерен у ряду), масу 1000 зерен, передзбиральну густоту (кількість качанів на

гектар), а також ключові результати: біологічну врожайність (у т/га) та приріст урожайності у відсотках (табл. 3.9, рис. 3.12-3.14).

На основі таблиці 3.9. можна зробити порівняльний аналіз ефективності двох технологічних схем: 1) обробітку Strip-Master із варіантами №1-№3 та 2) комбінованого обробітку Mulcher + Strip-Master – це варіанти №4-№6.

За обробітку ґрунту Strip-Master найкращий результат продемонстрував варіант № 2, формулою вмісту елементів живлення: NPK (7-18-36), даний варіант забезпечив абсолютно максимальну врожайність 10,7 т/га та найбільший приріст – 36,1% порівняно з контролем, врожайність якого досягає лише 7,8 т/га. Максимальна врожайність у дослідженні підтверджується вищою кількістю зерен на початок та масою 1000 зерен. У цій схемі варіант №3 NPK (9-24-24) також був ефективним (10,0 т/га), що вказує на високу віддачу від внесення добрив, оскільки контрольний рівень врожайності був низьким.

Натомість, у комбінованій схемі обробітку Mulcher + Strip-Master контрольний варіант № 4 із врожайністю 9,9 т/га без удобрення має високу врожайність, що свідчить про значний позитивний вплив мульчування на збереження вологи та доступність ґрунтових поживних речовин. Внаслідок цього, подальше внесення мінеральних добрив виявилось менш рентабельним – варіант №5 із вмістом NPK (7-18-36) дав лише 10,3 т/га, що становить 3,9% приросту врожайності, а варіант №6 із складом NPK (9-24-24) взагалі показав зниження врожайності на 4,9%, що робить його економічно недоцільним.

Таким чином, для досягнення максимальної біологічної врожайності в цьому досліді кращою технологією є обробіток Strip-Master у поєднанні з живленням NPK (7-18-36), оскільки ця формула добрива з підвищеним вмістом калію оптимально компенсує середній вміст калію в ґрунті, забезпечуючи найвищий агрономічний результат.

Таблиця 3.9

Структура врожаю та врожайність кукурудзи на насіння

№ п/п	Варіант дослід	Довжина початка, см	Кількість рядів зерен, шт	Кількість зерен в ряду, шт	Кількість зерна на початок, шт	Маса 1000 зерен, г	Кількість початків, шт/га	Біологічна урожайність, т/га	Приріст урожайності, %
1	SM: Контроль, 0 кг/га	19,0	14,7	33,2	486,6	261	61569	7,8	-
2	SM: NPK (7-18-36), 100 кг/га	19,0	15,9	35,9	569,8	289	64549	10,7	36,1
3	SM: NPK (9-24-24), 100 кг/га	18,5	15,9	35,0	556,3	279	64549	10,0	28,0
4	M + SM: Контроль, 0 кг/га	18,3	15,4	34,7	533,2	293	63208	9,9	26,9
5	M + SM: NPK (7-18-36), 100 кг/га	18,0	16,3	34,2	555,3	292	63208	10,3	32,0
6	M + SM: NPK (9-24-24), 100 кг/га	18,0	15,3	33,4	510,3	291	63208	9,4	20,5

Пояснення до таблиці: **M** – обробіток агрегатом Mulcher, **SM** – обробіток агрегатом Strip-Master.



Рис 3.12. Порівняння початків у двох повторностях контрольних варіантів №1 (ліворуч) та №4 (праворуч).



Рис 3.13. Порівняння початків у двох повторностях варіантів із удобрення НРК (7-18-36) 100 кг/га №2 (ліворуч) та №5 (праворуч).



Рис 3.14. Порівняння початків у двох повторностях варіантів із удобрення НРК (9-24-24) 100 кг/га №3 (ліворуч) та №6 (праворуч).

Варіант № 5 продемонстрував найкращі показники стійкості до шкідників, зафіксувавши найменшу кількість уражених рослин та найнижчу частку втрат насіння. Цей результат можна пояснити позитивним впливом мульчування на знищення зимуючих личинок стеблового метелика та бавовникової совки у стерні кукурудзи (табл. 3.10).

Таблиця 3.10

Ураженість шкідниками початків кукурудзи

№ п/п	Варіант дослідю	Показники			
		Кількість рослин, уражених шкідниками, шт/га	Кількість рослин, уражених шкідниками, %	Частка ураженого насіння шкідниками, т/га	Частка ураженого врожаю шкідниками, %
1	SM: Контроль, 0 кг/га	8003	12,8	0,2	2,5
2	SM: NPK (7-18-36), 100 кг/га	20007	31,1	0,95	10,7
3	SM: NPK (9-24-24), 100 кг/га	22008	34,1	0,75	8,1
4	M + SM: Контроль, 0 кг/га	10004	15,8	0,25	3,4
5	M + SM: NPK (7-18-36), 100 кг/га	6002	9,5	0,2	2,3
6	M + SM: NPK (9-24-24), 100 кг/га	18006	28,4	0,6	7,4

Примітка: **M** – обробіток агрегатом Mulcher, **SM** – обробіток агрегатом Strip-Master.

На противагу цьому, варіант №2, який мав ідентичну систему удобрення NPK (7-18-36), але без мульчування, показав айже п'ятикратне перевищення

рівня ураження, підкреслюючи важливість мульчування у комплексній системі захисту.

Для оцінки істотності впливу досліджуваних варіантів обробітку ґрунту та мінеральних добрив на показник біологічної врожайності (т/га) був застосований однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA). Мета аналізу полягала у перевірці нульової гіпотези (H_0) про відсутність істотних відмінностей між середніми значеннями врожайності всіх 6 варіантів досліду.

Однофакторний дисперсійний аналіз було проведено на первинних даних урожайності, отриманих з 2 повторень ($r=2$) для кожного з 6 варіантів ($k=6$) досліду. Всі розрахунки наведено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11

Джерело варіації	Сума квадратів, (SS)	Ступені свободи, (v)	Середній квадрат, (MS)	$F_{\text{розн.}}$	$F_{\text{крит.}} (\alpha=0,05)$	Висновок
Фактор (варіанти)	10,57	5	2,114	2,81	4,39	$F_{\text{розн.}} < F_{\text{крит.}}$
Помилка (залишок)	4,51	$v_e=6$	$MS_e=0,752$			
Загальна	15,08	11				

Розрахункове значення F-критерію (2,81) виявилось меншим за критичне значення F-критичне (4,39) для $\alpha=0,05$. Це означає, що загалом вплив фактора (різних систем живлення та обробітку) на урожайність не є статистично значущим для всього масиву даних. Незважаючи на це, для ідентифікації значущих відмінностей між окремими варіантами, які демонструють високий приріст, було застосовано критерій НІР.

Критерій НІР розраховується на основі середнього квадрату помилки (MS_e) та критичного t -значення для обраного рівня значущості. Розрахунок наведено нижче:

$$\text{НІР}_{0,05} = 2,447 \times \sqrt{\frac{2 \times 0,752}{2}} = 2,12 \text{ т/га}$$

Аналіз із використанням критерію найменшої істотної різниці дозволив встановити, що найбільший істотний приріст урожайності відносно варіанта №1 (контролю) отримано у варіанті №2.

Різниця склала 2,90 т/га, що істотно перевищує НІР (2,12 т/га). Використання добрив NPK (7-18-36) та NPK (9-24-24) у системі обробітку Strip-Master (варіанти №2 та №3) забезпечило статистично значуще збільшення врожайності.

Комбінація обробітку Mulcher + Strip Master (варіант №5) також забезпечила істотний приріст (2,55 т/га) порівняно з варіантом №1.

Варіант №4, незважаючи на високий фактичний приріст (2,10 т/га), статистично не відрізняється від варіанта №1, оскільки різниця (2,10 т/га) не досягає порогу НІР (2,12 т/га). Це свідчить про високу варіативність даних, що необхідно врахувати при обговоренні.

3.10. Показники якості зерна кукурудзи

Якісні показники зерна кукурудзи є визначальним фактором для її подальшої переробки та споживчих властивостей. Основними показниками, які регламентуються ДСТУ, є вологість, вміст білка, жиру та крохмалю. Оптимальна вологість насіння, як правило, не повинна перевищувати 14-15% для безпечного зберігання, тоді як ДСТУ може встановлювати різні класи залежно від цього показника [61, с. 84].

Залежно від призначення, вміст білка в якісному насінні кукурудзи зазвичай коливається в межах 8-10%, жиру – 4-5%, а крохмалю – до 70-75%. На вміст цих показників істотно впливають гібридні особливості, погодні умови під час вегетації та система живлення. Зокрема, азотні добрива сприяють збільшенню вмісту білка, фосфорно-калійні та магнієві добрива позитивно впливають на накопичення жирів та крохмалю.

Дослідження показників якості насіння було проведено на приладі FOSS Infratec 1241, це експрес аналізатор, який аналізує широкий спектр с/г культур. Діагностика одного зразка демонструє результати одразу по декільком показникам, при цьому зразки не потребують спеціальної підготовки перед аналізом (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Аналізатор якості зерна FOSS Infratec 1241

Аналіз якісних показників зерна кукурудзи вказує на те, що істотної різниці між варіантами по всім показникам якості немає. Внесення комплексних добрив NPK (7-18-36) та NPK (9-24-24) з нормою 100 кг/га мало мізерний вплив на ці показники (табл. 3.12).

Таблиця 3.12

Показники якості насіння кукурудзи

№ п/п	Варіант досліджу	Показник			
		Вологість, %	Вміст жиру, %	Білок, %	Крохмаль, %
1	SM: Контроль, 0 кг/га	18,1	3,6	5,9	71,1
2	SM: NPK (7-18-36), 100 кг/га	17,2	4,0	6,7	72,7
3	SM: NPK (9-24-24), 100 кг/га	16,2	4,0	6,4	72,3
4	M + SM: Контроль, 0 кг/га	17,9	3,9	6,5	71,9
5	M + SM: NPK (7-18-36), 100 кг/га	17,4	4,1	6,3	72,4
6	M + SM: NPK (9-24-24), 100 кг/га	16,2	4,0	6,5	72,1

Пояснення до таблиці: M – обробіток агрегатом Mulcher, SM – обробіток агрегатом Strip-Master.

Є незначна закономірність, що варіанти на контролі мають вищу вологість насіння, оскільки додаткове мінеральне живлення прискорює процес дозрівання кукурудзи, що, своєю чергою, призводить до швидшого зниження вологості зерна.

Варіант №2 виділяється як один із найбільш ефективних, демонструючи найкращі показники за вмістом білка та крохмалю. Вміст жиру відрізняється з найменшою похибкою на 0,3 %, вміст білку на 0,4%, а вміст крохмалю на 0,8% на контрольному варіанті №1 в порівнянні з іншими. Решта варіантів мають дуже близькі значення між собою.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛОКАЛЬНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРІВ ПІД КУКУРУДЗУ НА ЗЕРНО В СИСТЕМІ ПРЕЦИЗІЙНОГО АГРОВИРОБНИЦТВА

Економічна вигода від вирощування кукурудзи за технологією Strip-Till з локальним внесенням добрив формується завдяки двом основним факторам: зменшенню витрат і збільшенню доходу від урожаю. Теоретично, Strip-Till у будь-якому варіанті забезпечує зниження собівартості порівняно зі звичайною оранкою, адже ми економимо пального (до 40 %) завдяки меншій кількості проходів і економимо добрива (до 25 %), оскільки їх локальне внесення прямо під рядок робить поживні речовини доступнішими для коренів.

Однак, найбільший чистий прибуток отримуємо завдяки технології з мульчуванням. У цьому варіанті поживні рештки в міжряддях зберігають вологу в ґрунті і захищають його від ерозії, що забезпечує стабільніше та вище зростання врожайності, особливо у посушливі роки. Проведені економічні розрахунки дозволяють кількісно оцінити доцільність локального внесення добрив та впровадження мульчування, встановивши, наскільки отриманий приріст врожаю компенсує і перевищує відповідні експлуатаційні витрати.

Економічний аналіз свідчить, що найвища рентабельність 89,7% досягнута у варіанті №4 (контроль Mulcher), що підкреслює ефективність даного обробітку у формуванні прибутку. Водночас, найбільша врожайність 10,7 т/га та друга за рівнем рентабельність 88,7% зафіксована у варіанті №2 (Strip-Till з добривом NPK (7-18-36)). Порівняння варіантів підтверджує, що локальне внесення добрив є економічно доцільним, варіанти №2 і №3 значно переважають контроль №1, причому формула NPK (7-18-36) виявилася ефективнішою за NPK (9-24-24).

Проте, найменш рентабельним серед варіантів з добривами став варіант №6, що вказує на не вигідність агрономічного прийому, однак, підштовхує на

думку повторного дослідження, оскільки випадковість факторів не може бути відхилена. Всі результати наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

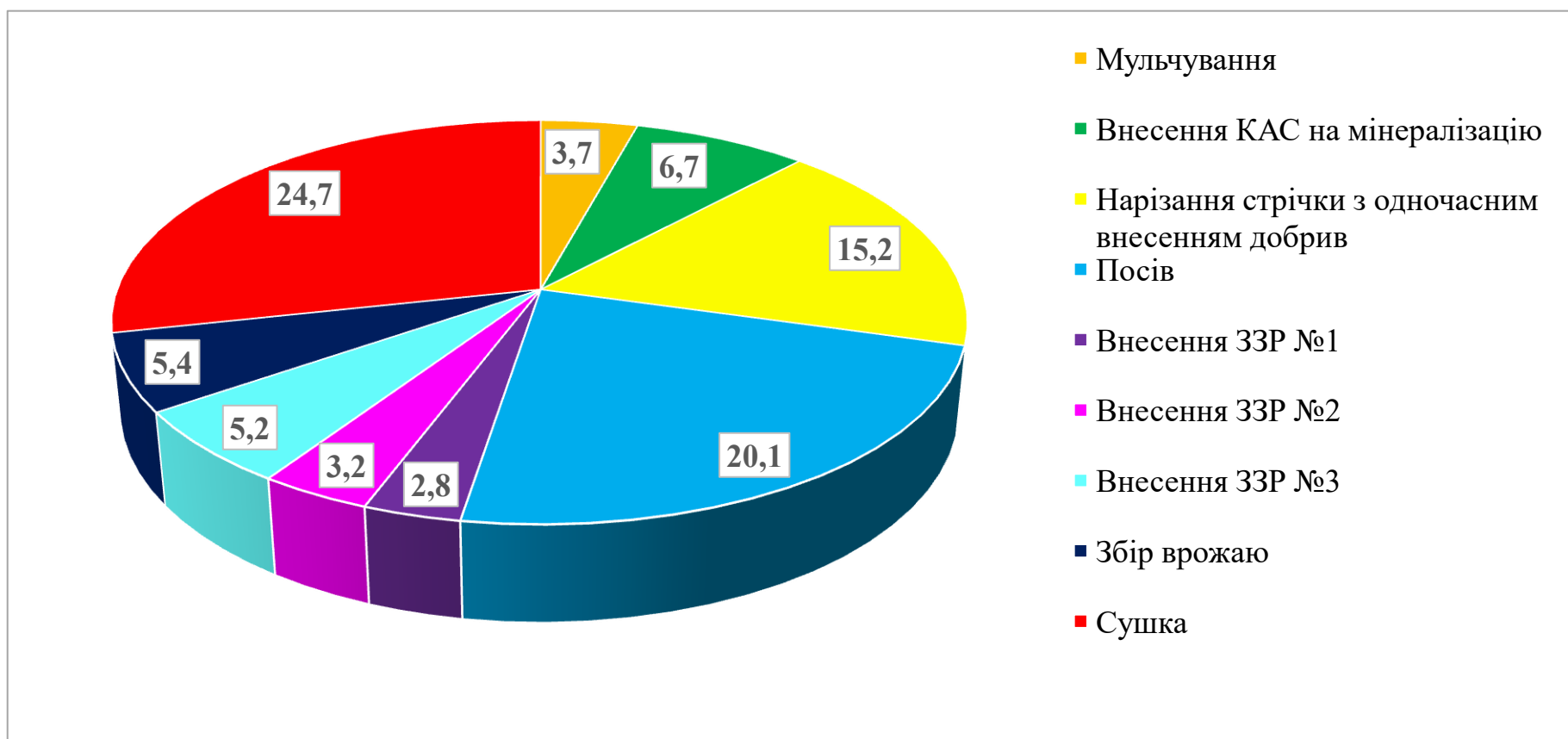
**Економічна ефективність вирощування кукурудзи на зерно за локального внесення добрив та проведення
мульчування**

№	Варіант дослід	Урожайність, т/га	Приріст урожайності, т/га	Вартість врожаю, грн	Вартість приросту врожайності, грн	Загальні витрати, грн/га	Дохід, грн	Рентабельність, %	Окупність 1 грн затрат, грн
1	SM: Контроль, 0 кг/га	7,8	–	62400	–	38060	24340	64,0	1,64
2	SM: NPK (7-18-36), 100 кг/га	10,7	2,9	85600	23200	45366	40234	88,7	1,89
3	SM: NPK (9-24-24), 100 кг/га	9,9	2,1	79200	16800	44368	34832	78,5	1,79
4	M + SM: Контроль, 0 кг/га	10,0	2,2	80000	17600	42162	37838	89,7	1,90
5	M + SM: NPK (7-18-36), 100 кг/га	10,3	2,5	82400	20000	46618	35782	76,8	1,77
6	M + SM: NPK (9-24-24), 100 кг/га	9,4	1,6	75200	12800	45392	29808	65,7	1,66

Пояснення до таблиці: M – обробіток агрегатом Mulcher, SM – обробіток агрегатом Strip-Master.

Графік 4.1

Співвідношення витрат для кожної агрооперації, за вирощування кукурудзи на зерно за технології Strip-Till із попереднім мульчуванням, %



Примітка: врожайність кукурудзи 10 т/га, вологості насіння 20 %, загальні витрати 46110 грн.

ВИСНОВКИ

Мета даного дослідження полягала у визначенні ефективності елементів технології Strip-Till та локального внесення гранульованих добрив за різних норм удобрення на показники родючості ґрунту та формування продуктивності кукурудзи на зерно. Порівняння було в поєднанні з локальним внесенням різних формул комплексних добрив, зокрема: NPK (7-18-36) та NPK (9-24-24).

1. За результатами дослідження встановлено, що на початкових етапах розвитку кукурудзи (до фази 5-6 листків) застосування комплексу Mulcher + Strip-Master забезпечило рослинам кращий старт. Це підтверджується вищою рівномірністю сходів (90% протягом двох днів), більшою біомасою (варіант №5, 114 г маса всієї рослини у фазу 5-6 листків) та високими показниками вмісту хлорофілу (варіант №6, 507 од. у фазу 5-6 листків), що вказувало на активний фотосинтез. Мульчування позитивно вплинуло на мінералізацію ґрунтового азоту і дало кращу життєздатність рослинам, навіть на контролі без добрив. На цьому етапі росту і розвитку рослин проєктована площа листкової поверхні рослин становить від 10771 до 21512 м²/га, найвищі показники мають варіанти №2 та №5 (18315 м²/га та 21512 м²/га відповідно).

2. Агрохімічний аналіз ґрунту досліджуваних варіантів зазначив зниження вмісту мінерального азоту на 70%, а також підвищення вмісту рухомого калію від 18% до 76%. Всі наступні наведені дані усереднено за другим відбором (13.08.2025, фаза ВВСН 77-79), отримані результати за наступними показниками рН (сольове) ґрунту (5,1 од.); вміст нітратного азоту (19 мг/кг ґрунту); а також вміст рухомих фосфору (83 мг/кг ґрунту) та калію (372 мг/кг ґрунту) – за методом Кірсанова. В цілому між варіантами не виявлено суттєвої різниці. Однак, варіант №4 має відмінності за показниками P₂O₅ (144 мг/кг ґрунту) та K₂O (436 мг/кг ґрунту) – що є найвищими серед усіх. Це має безпосередньо вплив на врожайність кукурудзи та результати дослідження.

3. Внесення мінеральних добрив NPK у нормі 100 кг/га суттєво покращило біологічні показники продуктивності кукурудзи порівняно з контролем (14,7

кількість рядів, 487 шт зерен в качані). Середня довжина початку становила близько 18,3-19,0 см, кількість рядів зерен – 15,3-16,3 шт., а кількість зерен на качані коливалася від 510 до 570 шт., що значно вище, ніж у контролі. Найбільш ефективним виявився варіант №2, де приріст біологічної врожайності становив 36,1% (досягнувши 10,7 т/га), що корелювало зі значним збільшенням кількості зерен на качані (570 шт.) та маси 1000 зерен (289 г).

4. Аналіз показників якості зерна показав, що система удобрення сприяла збільшенню вмісту білка (в середньому 6,4-6,7%) та крохмалю (72,3-72,7%) порівняно з контролем (без внесення добрив), де ці показники становили 5,9% та 71,1% відповідно. Найвищий вміст білка (6,7%) та крохмалю (72,7%) зафіксовано у варіанті №2.

5. Аналіз структури загальних витрат показав, що найбільша їх частка припадають на збір врожаю (20,1%), сушку (24,7%) та нарізання стрічки з одночасним внесенням добрив (15,2%). Ці дані підтверджують, що витрати на сам Strip-Till є значними, але вони компенсуються завдяки високій врожайності та економії на обробітку порівняно з традиційними технологіями. Найвища рентабельність (89,7%) та окупність (1,90 грн на 1 грн затрат) зафіксована у варіанті №4. Це доводить, що найбільший економічний ефект у цьому досліді дало збереження ґрунтової вологи та оптимальне використання природних запасів ґрунту, що забезпечило високу врожайність 10,0 т/га. Найвища врожайність (10,7 т/га) та друга за рівнем рентабельність (88,7%) досягнута у варіанті №2. Це свідчить про високу віддачу від локального внесення добрива з підвищеним вмістом калію. Економічна доцільність локального внесення добрив була доведена, оскільки варіанти №2 та №3 забезпечили значне зростання чистого доходу порівняно з контролем.

6. Варіант №6 виявився найменш рентабельним серед усіх варіантів з добривами (65,7%) і навіть показав зниження врожайності (9,4 т/га) порівняно з контролем на мульчуванні (варіант №4).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Наркевич, М.А., Войтович, М.Д., Набока, О.О., та ін. Агротехнологія вирощування кукурудзи. Навчальний посібник. Київ: Аграрна освіта, 2018. С. 14-20.
2. Lutt, A. B., J. S. Lytton. Corn Production Guide. University of California Agriculture and Natural Resources, 2022. С. 21-23.
3. Abendroth, L. J., R. J. Elmore, M. J. Boyer, and S. K. Barnhart. Corn Growth and Development. Iowa State University Extension and Outreach publication PMR-1009, 2011. С. 3-5.
4. Маліновський, А.С., Мельничук, М.О., Іваненко, І.М. Технологія вирощування кукурудзи. Київ: Аграрна наука, 2017. С. 84-86.
5. Nielsen, R.L. Determining Corn Leaf Stages. Purdue University Extension, 2019. С. 15-18.
6. Growing Corn: Stages of Development. Syngenta Crop Protection, 2023. С. 3-4.
7. Mylavarapu, R.S., H.J. Reichenbach, D.A. Parnes, and M.A. Malla. Nutrient Management for Corn Production. University of Florida Extension, 2020. С. 4-6.
8. Li, P., et al. Optimizing Nutrient Management in Maize: A Review of Sustainable Practices. Journal of Agricultural Science, 2021, Vol. 159, Iss. 3. С. 245-260.
9. Nafziger, E. Corn Production Handbook. University of Illinois Extension, 2017. С. 70-75.
10. Slaton, N.A., and C.A. Gentry. Nutrient Cycling and Management in Maize Cropping Systems. In: Maize: Production and Management. American Society of Agronomy, 2020. С. 115-135.
11. Mengel, D.B., E.D. Nafziger, and A.P. Mallarino. *Corn Field Guide*. Purdue University Extension, 2019. С. 32-35.

12. Sawin, E.N., T.A. Gentry, M.J. Albus, and K.A. Gentry. *Timing of Nutrient Uptake in Corn*. *Crop & Soil Science Journal*, 2022, Vol. 67, No. 2, pp. 112-120.
13. Brady, N.C. and Weil, R.R. *The Nature and Properties of Soils*. 15th ed. Pearson Education, 2016. P. 473-492.
14. Mengel, K. and Kirkby, E.A. *Principles of Plant Nutrition*. 5th ed. Springer, 2001. P. 1-25.
15. Lambers, H. and Finnegan, P.M. Phosphorus nutrition of plants. An overview of phosphorus acquisition and use efficiency. *Plant and Soil*. 2010. Vol. 334. P. 1-13.
16. Lawlor, D.W., Lemaire, G. Nitrogen in crop production: physiological and ecological aspects. *Advances in Plant Physiology*. 2011. Vol. 16. P. 1-28.
17. Marschner, H. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. Academic Press, 2012. P. 209-224.
18. Rengel, Z. and Marschner, P. Nutrient uptake by plants. *Plant Physiology, Biochemistry and Molecular Biology*. 2016. P. 273-294.
19. Brady, N.C. and Weil, R.R. *The Nature and Properties of Soils*. 15th ed. Pearson Education, 2016. P. 473-492.
20. Mengel, K. Functions of potassium in plants. *Potassium in Agriculture*. 1980. P. 109-122.
21. Römheld, V., Kirkby, E. A. Research on K and other mineral nutrients in plants. *Plant Physiology*. 2013. Vol. 162. No. 4. P. 1475-1486.
22. Blake-Kalff, M.M.A. Sulfur deficiency in arable crops: a case for re-evaluating diagnostic criteria. *Plant and Soil*. 2014. Vol. 377. P. 391-408.
23. Verbruggen, N. and Hermans, C. Physiological aspects of magnesium nutrition in plants. *Physiologia Plantarum*. 2013. Vol. 149. No. 2. P. 182-192.
24. White, P.J. and Broadley, M.R. Calcium in plants. *Annals of Botany*. 2003. Vol. 92. No. 4. P. 487-511.

25. Alloway, B.J. Zinc in Soils and Crop Nutrition. 2nd ed. IZA & IFA, 2008. P. 1-13.
26. Römheld, V. and Marschner, H. Genotypical differences in the iron nutrition of plants. *Plant Nutrition: Physiology and Applications*. 1986. P. 235-244.
27. Houtz, R.L., et al. Manganese in plants. *Current Science*. 2008. Vol. 94. No. 12. P. 1551-1558.
28. Rengel, Z. Copper in plants. *Handbook of Plant Nutrition*. 2001. P. 249-266.
29. Brown, P.H. and Shelp, B.J. Boron nutrition in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 1997. Vol. 16. No. 2. P. 161-180.
30. Tester, M. and Davenport, R. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in plants. *Annals of Botany*. 2003. Vol. 91. No. 5. P. 503-527.
31. Мазур В.А., Поліщук І.С. Особливості формування врожаю кукурудзи залежно від мінерального живлення та вологозабезпечення. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 2017, № 4. С. 13-17.
32. Шлапак Л.М., Горбатенко А.І., Горбатенко О.І. Вплив попередників і удобрення на врожайність кукурудзи в Лісостепу України. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Серія «Агрономія», 2017. Вип. 268. С. 20-29.
33. Мельник М.М. Вимоги кукурудзи до теплового режиму. *Агрономія сьогодні*, 2019. С. 5-7.
34. Скрипник С.В. Кукурудза: особливості розвитку та формування врожаю. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2015. Вип. 21. С. 10-15.
35. Завірюха М.В. Система мінерального живлення кукурудзи. *Агробіологія*, 2020. С. 11-15.
36. Козловський М.А., Романенко І.М. Значення мікроелементів у підвищенні врожайності кукурудзи. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 2019. Вип. 1. С. 22-26.

37. Білоконь Г. П. Динаміка поглинання елементів живлення кукурудзою та її вплив на урожайність. *Вісник аграрної науки*, 2018, № 12. С. 2-5.
38. Лапа О. О., Бойко В. П. Особливості мінерального живлення кукурудзи. *Агрохімія і ґрунтознавство*, 2019, № 3. С. 18-22.
39. Марченко В. В., Коваленко А. В. Взаємодія елементів живлення в системі удобрення кукурудзи. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Агрономія»*, 2017. Вип. 268. С. 13-17.
40. Козловський М.А., Романенко І.М. Значення мікроелементів у підвищенні врожайності кукурудзи. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 2019. Вип. 1. С. 25.
41. Pagoni, A., Sawyer, J.E., & Mallarino, A.P. Chapter 1 - Overview of soil fertility, plant nutrition, and nutrient management. In, *Site-specific nutrient management*. Iowa State University Extension and Outreach. 2013. С. 2.
42. Fernández, F.G., & Hoef, R.G. Managing Soil pH and Nutrients for Field Crops. In *Illinois Agronomy Handbook*. 2009. pp. 2-4.
43. Elixir Ukraine. *Дефіцит азоту (Кукурудза)*. Доступно за адресою: [<https://elixir-ukraine.com/zhivlennya-roslin/kukuruzda/defitsit-azotu/>].
44. Agro Times. *Через низькі температури в кукурудзи спостерігався псевдо дефіцит фосфору*. Доступно за адресою: [<https://agrotimes.ua/agronomiya/cherez-nyzki-temperatury-v-kukurudzy-sposterigavsya-psevdo-deficzyt-fosforu-agrarij/>].
45. Elixir Ukraine. *Дефіцит калію (Кукурудза)*. Доступно за адресою: [<https://elixir-ukraine.com/zhivlennya-roslin/kukuruzda/defitsit-kaliya/>].
46. Pioneer. *Zinc Deficiencies and Fertilization in Corn Production*. Доступно за адресою: [https://www.pioneer.com/us/agronomy/zinc_deficiencies_and_fertilization.html/].

47. Brady, N.C., & Weil, R.R. *The Nature and Properties of Soils*. 15th ed. Pearson Education, 2016.
48. Marschner, P. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. Academic Press, 2012.
49. Pierzynski, G.M., Sims, J.T., Vance, G.F., & Fanning, D.S. *Soils and Environmental Quality*. 3rd ed. CRC Press, 2005.
50. Jones, J.B. *Agronomic Handbook: Management of Corn, Soybeans, Alfalfa, and Small Grains*. University of Wisconsin Extension, 2003.
51. Agro Portal. *Фосфатмобілізуючий ефект, або Як уникнути фосфорної кризи*. Доступно за адресою: [<https://agroportal.ua/publishing/lichnyi-vzglyad/fosfatmobiliziruyushchii-effekt-ili-kak-izbezhat-fosfornogo-krizisa>].
52. Brady, N.C., & Weil, R.R. *The Nature and Properties of Soils*. 15th ed. Pearson, 2017.
53. Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., & Beaton, J.D. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 8th ed. Prentice Hall, 2014.
54. Pierzynski, G.M., Sims, J.T., Vance, G.F., & Fanning, D.S. *Soils and Environmental Quality*. 3rd ed. CRC Press, 2005.
55. NUTRIAG. *Mulders Chart: Nutrient Interactions*. Доступно за адресою: [<https://www.nutriag.com/mulderschart/>].
56. Lal R. (2007). *Soil Conservation and Sustainable Agriculture*. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 112-115.
57. Blevins R.L., Frye W.W. (1998). *Conservation Tillage Systems: A Review of the Research and Management Implications*. *Journal of the Soil and Water Conservation Society*, 53(2), pp. 165-171.
58. Vyn T.J., Raimbault B.A. (1993). *Strip Tillage for Corn Production: A Review of the Research and Management Implications*. *Agronomy Journal*, 85(4), pp. 881-887.

59. University Minnesota Extension. *Economics of tillage*. Доступно за адресою [<https://extension.umn.edu/soil-management-and-health/economics-tillage#tillage-costs-when-growing-corn-1177511>].
60. Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів. ДСТУ 4362:2004.
61. Кукурудза. Технічні умови. ДСТУ 4525:2006.