

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Агробіологічний факультет**

ПОГОДЖЕНО
Дека́н факультету

д.с.-г. наук., професор

_____ Віталій КОВАЛЕНКО
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)
« _____ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
агрохімії та якості продукції
рослиництва ім. О.І. Душечкіна
д.с.-г. наук., професор

_____ Дмитро ЛІТВІНОВ
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)
« _____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Оптимізація умов живлення кукурудзи на зерно за використання елементів точного землеробства»

Спеціальність 201 «Агрономія»

Освітня програма Агрохімсервіс у прецизійному агровиробництві

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

доктор с.г. наук, професор
академік НААН України

_____ Анатолій БИКІН
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

кандидат с.г. наук, доцент

_____ Олена ЛІТВІНОВА
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Виконав

_____ Сніжана КОЗАЧЕНКО
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

КИЇВ 2025 р.

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Агробіологічний факультет**

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

доктор с.г. наук, проф. _____ **Дмитро ЛІТВІНОВ**
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ**

КОЗАЧЕНКО СНІЖАНІ ЮРІЇВНІ

Спеціальність 201 «Агрономія»

Освітня програма Агрохімсервіс у прецизійному агровиробництві

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Оптимізація умов живлення кукурудзи на зерно за використання елементів точного землеробства»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «___» _____ 2025 р. №__

Термін подання завершеної роботи на кафедру «_____» _____

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: результати літературного пошуку, результати польового дослідження та лабораторних досліджень

Перелік питань, що підлягають дослідженню :

1. Встановити закономірності просторової мінливості ключових агрофізичних та агрохімічних показників ґрунту.
2. Визначити вплив різних стратегій внесення азотних добрив на врожайність, показники використання азоту кукурудзою на зерно в межах ідентифікованих зон.
3. Встановити економічну ефективність та екологічну доцільність застосування технологій диференційованого внесення азотних добрив у порівнянні з традиційною схемою живлення кукурудзи на зерно.

Дата видачі завдання – _____ 2025 р

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи
Завдання прийняла до виконання

Олена ЛІТВІНОВА
Сніжана КОЗАЧЕНКО

РЕФЕРАТ

на магістерську кваліфікаційну роботу Козаченко С.Ю. на тему:

«Оптимізація умов живлення кукурудзи на зерно за використання елементів точного землеробства»

Магістерська робота написана комп'ютерним текстом на 61 сторінках, містить 16 таблиць і 4 рисунків, кількість літературних джерел – 50. У роботі представлені результати дослідження з управління мінеральним живленням кукурудзи на зерно за використання елементів точного землеробства.

Об'єктом дослідження є вплив ефективності різних видів і норм азотних добрив на показники врожайності і якості зерна кукурудзи. Основну увагу приділено застосування двох різних видів азотних добрив: КАС та карбаміду у нормі 150 кг/га. Результати досліджень показали, що застосування відповідних азотних добрив значно впливає на підвищення врожайності кукурудзи на зерно залежно від забезпеченості ґрунту поживними елементами. Також, нами було встановлено позитивний вплив на біометричні показники кукурудзи на зерно, що впливають на процеси фотосинтезу та потенціал продуктивності рослин. Окрім підвищення врожайності, азотні добрива впливали на якість зерна, зокрема на вміст білка та інших хімічних елементів, що є важливими показниками харчової цінності продукції.

Проведено аналіз економічної ефективності застосування кожного варіанту добрив, що дозволяє зробити висновки про доцільність використання різних норм та видів азотних добрив для досягнення високих результатів у різних зонах забезпечення ґрунту поживними елементами.

Ключові слова: азотні добрива, мінеральне живлення, кукурудза на зерно, урожайність; якість зерна; економічна ефективність

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТОЧНЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО ЯК ІНСТРУМЕНТ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ЖИВЛЕННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)	9
1.1 Стратегічне значення кукурудзи та роль азоту у формуванні врожаю..	9
1.2. Азот як лімітуючий фактор врожайності кукурудзи	10
1.3 Потреба кукурудзи в азоті та критичні фази розвитку.....	11
1.4 Форми азоту та їхня доступність для кукурудзи.....	12
1.5 Традиційні методи розрахунку норм N: переваги та недоліки.....	13
1.6 Концепція точного землеробства та диференційоване внесення азоту	15
1.7 Ґрунтова діагностика та карти родючості.....	16
1.8 Дистанційне зондування (NDVI) та активні сенсори для N- діагностики	18
РОЗДІЛ 2. ОРГАНІЗАЦІЯ ТА МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	20
2.1 Загальні відомості про господарство.	20
2.2 Ґрунтові умови дослідного поля.....	20
2.3. Природні та кліматичні умови досліджень	24
2.4 Методика проведення дослідження	26
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА АНАЛІЗ ДАНИХ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ЖИВЛЕННЯ КУКУРУДЗИ.....	31
3.1 Вміст поживних елементів у ґрунті за вирощування кукурудзи на зерно.....	31
3.2 Біометрична оцінка ефективності диференційованого азотного живлення кукурудзи.	41
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ УРОЖАЙНОСТІ ТА ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЗЕРНА КУКУРУДЗИ	46
4.1 Порівняльна оцінка формування структури врожаю гібриду кукурудзи ДКС 3972 залежно від форми азотного добрива.....	46

4.2. Порівняльна оцінка приросту урожаю залежно від виду та дози азотних добрив.....	49
4.3 Вплив азотних добрив на показники якості зерна.....	51
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОБРЕННЯ КУКУРУДЗИ РІЗНИМИ ВИДАМИ ТА НОРМАМИ АЗОТНИХ ДОБРИВ.....	53
ВИСНОВОК.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	60

ВСТУП

На теперішньому етапі розвитку українського агросектору пріоритетом є підвищення ефективності використання природно-ресурсного потенціалу через інноваційні технології. Застосування точного землеробства виступає як критично важливий напрям, оскільки воно забезпечує раціональне та диференційоване використання добрив, енергії та інших ресурсів. Це, у свою чергу, сприяє не лише збереженню родючості ґрунтів і стабілізації врожайності, але й істотному зменшенню негативного впливу на довкілля.

Будучи однією з ключових культур світового та вітчизняного сільського господарства, кукурудза на зерно демонструє значний виробничий потенціал. Реалізація цього потенціалу тісно корелює з рівнем забезпечення посівів елементами мінерального живлення. Водночас, недостатня узгодженість між фізіологічними потребами культури та фактичною забезпеченістю ґрунту поживними речовинами створює лімітуючі умови для формування високого та якісного врожаю. З огляду на це, розробка ефективних стратегій оптимізації живлення кукурудзи є критично важливою для інтенсифікації агровиробництва.

Точне землеробство пропонує новітні можливості для управління живленням рослин. Завдяки використанню систем глобального позиціонування (GPS), дистанційного моніторингу та технологій диференційованого внесення добрив (VRT), стає можливим раціоналізувати використання ресурсів. Як наслідок, ці інноваційні агротехнології забезпечують подвійний ефект: зростання продуктивності посівів та покращення економічної і екологічної стійкості виробництва.

Обґрунтування актуальності роботи полягає в гострій потребі оптимізації ресурсокористування: зменшення фінансових витрат на добрива та забезпечення екологічно сталого розвитку агросистем. З огляду на це, тема дослідження набуває подвійного значення (наукового та практичного), оскільки сприяє розробці адаптивних технологій живлення, здатних нівелювати вплив просторової варіабельності ґрунту на продуктивність посівів кукурудзи.

Метою магістерської роботи є визначення ефективності вирощування кукурудзи на зерно шляхом оптимізації умов живлення з використанням елементів точного землеробства.

Об'єктом дослідження є технологічний процес вирощування кукурудзи на зерно.

Предметом дослідження - оптимізація умов живлення кукурудзи за використання елементів точного землеробства.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні закономірностей впливу просторово-диференційованого живлення на ріст, розвиток і продуктивність кукурудзи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження розроблених рекомендацій у виробничих умовах для підвищення урожайності та ефективності використання добрив.

РОЗДІЛ 1. ТОЧНЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО ЯК ІНСТРУМЕНТ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ЖИВЛЕННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

1.1 Стратегічне значення кукурудзи та роль азоту у формуванні врожаю

Кукурудза (*Zea mays* L.) посідає стратегічне місце у світовій аграрній системі, залишаючись однією з трьох найважливіших зернових культур поряд із пшеницею та рисом. Її виробництво має мультифункціональний характер: вона є основною кормовою базою для тваринництва, ключовим компонентом у харчовій промисловості та сировиною для біоенергетики (виробництво біоетанолу) [1, 2, с. 59].

Світове виробництво кукурудзи демонструє стабільне зростання, обумовлене високим попитом, особливо з боку Китаю та країн Південно-Східної Азії. Географічна концентрація виробництва є значною. Основними світовими виробниками є:

- США: Традиційний лідер, що визначає глобальні ціни та торговельні потоки.
- Китай: Найбільший споживач і другий за обсягом виробник.
- Бразилія та Аргентина: Ключові гравці на ринку експорту, що забезпечують поставки у міжсезоння для Північної півкулі.

Глобальна врожайність кукурудзи зростає завдяки селекції високопродуктивних гібридів, проте її стабільність сильно залежить від кліматичних факторів, особливо в умовах зростаючої змінності погодних умов [3, с. 59].

Для України кукурудза має стратегічне економічне та експортне значення. За останні два десятиліття Україна увійшла до п'ятірки світових лідерів-експортерів цієї культури. Основні посіви сконцентровані у Лісостеповій та Степовій зонах, де наявність чорноземів та достатня сума активних температур створюють сприятливі умови для реалізації високого потенціалу врожайності

[4, с. 59]. Кукурудза займає одну з найбільших посівних площ серед зернових і є ключовим джерелом валютних надходжень до країни.

Незважаючи на успіхи, рівень реалізації генетичного потенціалу врожайності в Україні часто нижчий за потенційно можливий. Це пояснюється високою варіабельністю агротехнологій, залежністю від природно-кліматичних умов (особливо водного стресу в Степу) та недостатньо ефективним управлінням ресурсами, насамперед мінеральними добривами [5, 6, с. 59].

1.2. Азот як лімітуючий фактор врожайності кукурудзи

Азот є беззаперечно найважливішим елементом живлення для кукурудзи, що визначає рівень реалізації її генетичного потенціалу врожайності. Його критичне значення зумовлене участю в ключових біологічних процесах [7, с. 59]. Азот є основним компонентом амінокислот, які утворюють білки та ферменти, необхідні для всіх метаболічних реакцій. Він входить до складу молекули хлорофілу [8, с. 59]. Недостатність азоту призводить до хлорозу (пожовтіння листя) та прямого зниження ефективності фотосинтезу і, як наслідок, — до падіння накопичення сухої речовини. N є складовою нуклеїнових кислот (ДНК і РНК), що регулюють ріст, розвиток та поділ клітин.

Саме тому дефіцит азоту в ґрунті часто виступає лімітуючим фактором (тобто тим, що стримує) для врожайності [9, с. 59]. Кукурудза має високу потребу в N, особливо протягом критичних фаз росту (від фази 6–8 листків до викидання волоті), коли формуються основні елементи структури врожаю: розмір качана та потенційна кількість зерен [10, с. 59]. Ранній дефіцит призводить до сповільнення росту, зменшення площі листової поверхні та зниження кількості жіночих квіток. Дефіцит у фазу цвітіння та наливу зерна зменшує відсоток білка в зерні та призводить до щуплості та низької маси 1000 зерен [11, с. 59].

З іншого боку, надмірне внесення азоту також не є оптимальним. Воно може спричинити надмірне наростання вегетативної маси, подовження періоду вегетації, що збільшує ризик вилягання посівів. Крім того, не використаний

рослинами азот є значним екологічним ризиком [12, с. 59]. У формі нітратів (NO_3^-) азот легко вимивається з кореневого шару, забруднюючи ґрунтові води. Через процеси денітрифікації азот може виділятися в атмосферу у вигляді оксидів, які є парниковими газами.

Таким чином, оптимізація азотного живлення полягає не лише у внесенні достатньої кількості добрив, а й у забезпеченні їхньої доступності рослинам саме тоді, коли вони цього потребують, що безпосередньо вимагає застосування елементів точного землеробства [13, с. 59].

1.3 Потреба кукурудзи в азоті та критичні фази розвитку

Потреба кукурудзи в азоті є нерівномірною протягом вегетаційного періоду, підпорядковуючись фазам інтенсивного росту та формування репродуктивних органів. Ефективність азотного живлення визначається саме тим, наскільки точно внесення добрив збігається з піками потреби культури [14, с. 59].

Хоча кукурудза поглинає елементи живлення з моменту проростання, основна маса азоту споживається в середній період вегетації. Загалом динаміку засвоєння можна розділити на три етапи [15, 16, с. 59]:

1. Початковий етап (сходи – 6 листків): Поглинання є мінімальним (близько 5–10% від загальної потреби). На цьому етапі рослина використовує запас N із насіння та кореневого шару. Цей азот важливий для розвитку кореневої системи та формування основи майбутньої біомаси.
2. Етап інтенсивного споживання (6–12 листків): Це період найвищої добової потреби в азоті. Рослина поглинає до 60–70% всього необхідного N. На цьому етапі відбувається інтенсивний ріст стебла та листя, а також диференціація репродуктивних органів – закладається потенційна кількість зерен у качані.
3. Етап наливу зерна (цвітіння – повна стиглість): Поглинання уповільнюється, але залишається значущим (20–30%). Азот активно перерозподіляється з вегетативних органів (листя) до репродуктивних

(зерно) для забезпечення високої якості кінцевого продукту (накопичення білка).

Найбільш критичними для забезпечення врожайності є фази, на які припадає пік інтенсивного споживання та формування структури врожаю. Дефіцит N у ці періоди є незворотним і не може бути повністю компенсований пізнішим внесенням [17, , с. 59 18, с. 60]:

1. Фаза 6–8 листків: Це початок інтенсивного росту та, що особливо важливо, визначення розміру качана. Достатнє азотне живлення у цю фазу гарантує формування довшого качана з більшою кількістю рядів зерен.
2. Фаза 10–12 листків (перед викиданням волоті): Це період максимальної потреби в N. На цьому етапі відбувається закладення потенційної кількості квіток та активний ріст листя (основного фотосинтетичного апарату). Забезпечення N у цей момент є вирішальним для формування високого індексу листової поверхні та запобігання абортванню (відмиранню) частин качана [19, с. 60].

Саме тому підживлення азотом за принципами точного землеробства, яке здійснюється в період 8–12 листків, є найбільш агрономічно та економічно обґрунтованим, оскільки дозволяє точно скоригувати живлення відповідно до потреби, виявленої за допомогою оптичних сенсорів.

1.4 Форми азоту та їхня доступність для кукурудзи

Кукурудза, як і більшість вищих рослин, здатна поглинати азот із ґрунтового розчину переважно у двох мінеральних формах: нітратній (NO_3^-) та амонійній (NH_4^+) [20, с. 60]. Ефективність живлення залежить від співвідношення цих форм у ґрунті, яке, своєю чергою, визначається процесами мінералізації, нітрифікації та типом внесених добрив.

Нітрати є найбільш поширеною та доступною формою азоту в аеробних (добре провітрюваних) ґрунтах, особливо в теплий період. Нітрат-іон не затримується ґрунтовим поглинальним комплексом (колоїдами), оскільки має негативний заряд. Він вільно переміщується з ґрунтовим розчином до коренів за

градієнтом вологості (пасивне поглинання), що робить його легкодоступним [21, с. 60]. Через високу рухомість нітрати схильні до швидкого вимивання (лювіації) в глибші шари ґрунту, особливо під час інтенсивних опадів або зрошення, що знижує коефіцієнт використання азоту. Для засвоєння нітратів рослина повинна витратити енергію на їх відновлення (редукцію) до амонію всередині клітин за допомогою ферменту нітратредуктази.

Амоній є формою азоту, яка утворюється при мінералізації органічної речовини та міститься в деяких мінеральних добривах. Амоній-іон має позитивний заряд (NH_4^+), завдяки чому він міцно утримується негативно зарядженими ґрунтовими колоїдами. Це робить його менш рухомих і стійкішим до вимивання [22, с. 60]. Амоній поглинається коренями переважно через активне поглинання, що вимагає енергії, але його пряме включення в органічні сполуки (амінокислоти) є енергетично вигіднішим для рослини, ніж відновлення нітратів. У теплом, добре аерованому ґрунті амоній швидко окислюється ґрунтовими бактеріями (*Nitrosomonas* та *Nitrobacter*) до нітритів, а потім до нітратів. Цей процес, відомий як нітрифікація, може бути уповільнений інгібіторами нітрифікації, що використовується в технологіях точного землеробства для пролонгування доступності азоту [23, с. 60].

Хоча кукурудза може ефективно використовувати обидві форми, ідеальне співвідношення $\text{NH}_4^+ : \text{NO}_3^-$ у ґрунтовому розчині вважається сприятливим, оскільки забезпечує баланс між швидкою доступністю (нітрати) та стабільним надходженням (амоній) [24, с. 60]. Технології точного землеробства, зокрема використання добрив із змінною нормою та стабілізованих форм азоту, спрямовані на те, щоб контролювати ці перетворення та максимізувати доступність N саме у критичні фази розвитку кукурудзи.

1.5 Традиційні методи розрахунку норм N: переваги та недоліки

Традиційні методи розрахунку норм внесення азотних добрив (N) базувалися на підходах, розроблених у часи інтенсифікації сільського господарства, коли основною метою було забезпечення високого врожаю без

детального обліку просторової неоднорідності полів. До таких методів належать балансовий метод та ґрунтово-кліматичні нормативи.

Незважаючи на обмеженість, ці методи мають свої незаперечні переваги, які забезпечили їхнє широке використання протягом десятиліть. Методи ґрунтуються на відносно невеликій кількості вхідних даних: планований урожай, середній вміст гумусу або доступного азоту (з усереднених проб) та коефіцієнти використання поживних речовин. Це робить їх легкими у впровадженні без потреби у складному високоточному обладнанні. Вони гарантують внесення мінімально необхідної кількості N для запобігання гострому дефіциту і отримання економічно вигідного, хоча й не максимального, врожаю. На полях, які характеризуються низькою внутрішньопольовою варіабельністю, ці методи можуть бути достатньо точними, забезпечуючи прийнятний коефіцієнт використання азоту (NUE).

Головним недоліком традиційних підходів є їхня агрегація даних та ігнорування просторової мінливості, що в сучасних умовах є критичним. Розрахунок норми N проводиться на основі середньозважених даних для всього поля. Фактично, на одній і тій самій ділянці можуть бути зони з високим і низьким вмістом органічної речовини, різною вологозабезпеченістю та, відповідно, різною потребою в азоті [25, с. 60].

Неефективне використання ресурсів:

На більш родючих ділянках, де фактичний вміст N високий, внесення "середньої" норми призводить до перевитрати добрив, економічних збитків та екологічного забруднення (вимивання нітратів) [26, с. 60]. На менш родючих ділянках "середня" норма є недостатньою, що обмежує врожайність і потенційний прибуток. Методи зазвичай не враховують динамічні фактори – зміни погодних умов, інтенсивність мінералізації органіки чи втрати N через вимивання або денітрифікацію, що відбуваються *протягом* вегетаційного періоду [27, с. 60]. Через неточне дозування значна частина внесеного азоту (в середньому 40–60%) може бути втрачена в навколишнє середовище, що є неприйнятним з точки зору ресурсозбереження та екології [28, с. 60].

Саме ці недоліки зумовили необхідність переходу до диференційованих технологій внесення азотних добрив, які є основою точного землеробства.

1.6 Концепція точного землеробства та диференційоване внесення азоту

Перехід від традиційних методів нормування азоту до точного землеробства є парадигмальною зміною, яка ґрунтується на принципі: робити правильні речі в правильному місці та в правильний час [29, с. 60]. Точне землеробство визнає, що поле не є однорідною одиницею, а складається з ділянок (зони управління) з унікальними агрохімічними та фізичними характеристиками, а отже, й різною потребою в ресурсах.

Концепція точного землеробства інтегрує кілька високотехнологічних інструментів для збору, аналізу та застосування геопросторових даних. Системи глобального навігаційного супутникового зв'язку дозволяють точно визначити місцезнаходження кожної точки поля та пов'язати з нею всі зібрані дані. Збір даних про стан ґрунту (карти родючості, вміст N, органічної речовини) та рослин (дистанційне зондування, NDVI) дозволяє створювати електронні карти неоднорідності. На основі цих карт створюються карти-завдання (prescription maps), які використовуються обладнанням зі змінною нормою внесення (Variable Rate Technology, VRT) для адаптації агротехнічних операцій [30, с. 60].

Диференційоване внесення азоту (VRT-N) є, мабуть, найбільш економічно значущим елементом точного землеробства для кукурудзи. Його мета — забезпечити кожну зону управління оптимальною нормою N, виходячи з її фактичної потреби, а не середньою нормою для всього поля [31, с. 60].

Механізм реалізації VRT-N:

Використовуються оперативні дані зі сенсорів рослин (наприклад, активні оптичні сенсори, що вимірюють NDVI або вміст хлорофілу), які встановлюються на техніці. Ці дані відображають поточний статус азотного живлення рослин у фазі, коли ще можливе коригуюче підживлення (8–12 листків). Дані сенсорів, агрохімічного аналізу та референсних ділянок (зони з

надлишковим N) перетворюються на алгоритм, який визначає, скільки додаткового азоту потрібно внести на кожній конкретній ділянці [32, с. 60]. Розкидачі або обприскувачі, обладнані GPS-приймачами та модулями VRT, автоматично змінюють норму внесення добрив відповідно до інструкцій карти-завдання або даних сенсорів у режимі реального часу (*on-the-go*).

Такий підхід дозволяє не лише збільшити врожайність на бідних ділянках (забезпечуючи їх дефіцитним N), але й заощадити добрива на багатих ділянках, що критично важливо для підвищення коефіцієнта використання азоту (NUE) та зниження виробничих витрат [33, с. 60].

1.7 Грунтова діагностика та карти родючості

Грунтова діагностика є фундаментальною основою точного землеробства (ТЗ) і критично важливою для ефективного управління азотним живленням кукурудзи [34, с. 60]. Вона дозволяє визначити просторову варіабельність фізико-хімічних властивостей ґрунту, що впливають на доступність, трансформацію та втрати азоту.

Основною метою є створення точних електронних карт родючості, які слугують для планування базового та, частково, коригуючого внесення добрив.

1. Сітковий (Grid) Відбір Проб:

Поле розділяється на рівномірні квадрати або прямокутники (наприклад, 1, 2.5 або 5 га), і з центру кожної ділянки відбирається композитна проба (змішана з кількох точок) [35, с. 60]. Забезпечує високу репрезентативність для невеликих і середніх площ. Висока вартість аналізу та ігнорування природних меж ґрунтових контурів.

2. Відбір Проб за Зонами Управління (Zone Sampling):

Поле ділять на зони з однорідними характеристиками (використовуючи супутникові знімки, дані про рельєф або історичну врожайність). Проби відбираються *в межах* цих зон [36 с. 61]. Економічно вигідніший та агрономічно обґрунтованіший метод, оскільки враховує природну варіабельність.

3. Вимірювання Електропровідності Ґрунту (ЕС):

За допомогою спеціальних датчиків (*Veris* або *EM38*) вимірюється електрична провідність ґрунту, яка тісно корелює з вмістом глини, вологи та органічної речовини, дозволяючи делімітувати (розмежувати) зони управління для точного відбору проб [37 с. 61].

Після лабораторного аналізу проб (визначення рН, вмісту гумусу, фосфору, калію та, що критично, мінерального азоту (Nмін)), отримані дані проходять геостатистичну обробку (наприклад, крігінг). Результатом є електронні карти родючості [38 с. 61]. Ці карти показують кількість нітратного (NO₃⁻) та амонійного (NH₄⁺) азоту, доступного для рослин на початок сезону. Вони є основою для розрахунку стартової норми азотних добрив. Органічна речовина є головним депо азоту в ґрунті. Знання її вмісту допомагає спрогнозувати потенціал мінералізації (вивільнення N) протягом вегетації. Ділянки з високим вмістом гумусу можуть потребувати менше додаткового N [39 с. 61].

Обмеження Ґрунтової Діагностики для Азоту

Хоча ґрунтова діагностика є незамінною для фосфору та калію (які є малорухомими), для азоту вона має істотне обмеження: Nмін є надзвичайно динамічним показником [40 с. 61]. Його вміст може різко змінюватися через:

- Інтенсивність мінералізації (залежить від температури та вологості).
- Втрати через вимивання або денітрифікацію (залежать від опадів).

Таким чином, карти Nмін, складені навесні, можуть бути нерелевантними під час критичних фаз живлення кукурудзи (8–12 листків). Це зумовлює необхідність доповнення ґрунтової діагностики оперативним моніторингом посівів за допомогою дистанційного зондування, що розглядається у наступному розділі.

1.8 Дистанційне зондування (NDVI) та активні сенсори для N-діагностики

На відміну від ґрунтової діагностики, яка надає інформацію про потенціал ґрунту, дистанційне зондування та використання активних оптичних сенсорів дозволяють здійснювати оперативний моніторинг фактичного стану рослин і їхньої поточної потреби в азоті [41 с. 61]. Ці методи є критично важливими для коригуючого підживлення кукурудзи у критичні фази розвитку (8–12 листків).

Ключовим інструментом дистанційної діагностики є Нормалізований Диференційний Індекс Вегетації (NDVI) (Normalized Difference Vegetation Index).

Індекс NDVI базується на різниці в інтенсивності відбиття сонячної енергії рослинним покривом у двох спектральних діапазонах:

- Червоний діапазон (RED): Здорова рослина з високим вмістом хлорофілу активно поглинає червоне світло для фотосинтезу.
- Близькій інфрачервоний діапазон (NIR): Здорова рослина з високою біомасою та клітинною структурою сильно відбиває інфрачервоне світло.

Індекс розраховується за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Значення NDVI коливається від -1 до $+1$. Для здорової, густої вегетації цей показник близький до $+1$ (зазвичай >0.6 для кукурудзи) [42 с. 61].

Азот є складовою хлорофілу. Дефіцит азоту призводить до зниження синтезу хлорофілу, викликаючи хлороз, що, своєю чергою, збільшує відбиття у червоному діапазоні та знижує загальне значення NDVI. Таким чином, NDVI виступає як індикатор дефіциту азоту [43,44 с. 61].

Джерелами даних для NDVI можуть бути супутникові знімки (наприклад, Sentinel-2, Landsat), безпілотні літальні апарати (БПЛА) або наземні сенсори.

Активні сенсори становлять наступний етап розвитку дистанційної діагностики, оскільки вони дозволяють проводити вимірювання в режимі

реального часу (*on-the-go*) та не залежать від зовнішнього сонячного освітлення:

Сенсори, такі як GreenSeeker або N-Sensor, самостійно випромінюють світло (червоний та інфрачервоний діапазони) і вимірюють відбиття рослинами [45,46 с. 61]. Можливість роботи в хмарну погоду та безпосередня інтеграція з системами внесення добрив VRT. Вони миттєво передають дані до бортового комп'ютера VRT-розкидача, який коригує норму N диференційовано кожні кілька метрів руху агрегату. Використання активних сенсорів базується на концепції референсних ділянок (*reference strips*), які заздалегідь надмірно удобрюються азотом [47,48 с. 61]. Сенсор порівнює показник NDVI (або інший вегетаційний індекс) із референсною ділянкою (яка має максимальне N-живлення) і розраховує, наскільки необхідно додати азоту на поточній ділянці, щоб наблизити її показник до максимального [49,50 с. 61].

Таким чином, дистанційне зондування та активні сенсори забезпечують оперативність та адаптивність азотного живлення, дозволяючи аграрію приймати рішення про підживлення кукурудзи протягом сезону, а не лише перед сівбою, мінімізуючи втрати та максимізуючи врожай.

РОЗДІЛ 2. ОРГАНІЗАЦІЯ ТА МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальні відомості про господарство.

Товариство з обмеженою відповідальністю «Агро - С» розташоване за адресою: с. Селище, Броварський район, Київська область, вул. Григорія Халаїма, 5. До районного центру м. Бровари – 50 км, до обласного центру м. Київ – 100 км.

Підприємство засноване у 2013 р., земельний банк Селещанського відділення — 9,78 тис. га. Сільське господарство займається вирощуванням зернових та технічних культур, які використовуються для виробництва комбікормів.

Рослинництво включає вирощування таких культур: озима пшениця, озимий ріпак, кукурудза, соняшник, соя, ярий ріпак, тритикале озиме, жито озиме, льон, гірчиця біла, кукурудза на силос, багаторічні трави, однорічні трави.

Кількість одиниць та видів сільськогосподарської техніки: важкі трактори - 6 од., легкі трактори - 15 од., автомобіль вантажний - 5 од., автомобіль легковий - 15 од., дискова борона - 3 од., комбайн - 5 од., культиватори - 3 од., обприскувач причіпний - 3 од., плуг - 5 од., розкидач міндобрив - 5 од., сівалка - 2 од.

Також на господарстві є елеватори: потужність зберігання зерна - 45 тис. т, потужність сушіння зерна — 35 т/год.

2.2 Ґрунтові умови дослідного поля

Домінуючим типом ґрунту на полях сівозміни є чорноземи типові. Вони характеризуються середньосуглинковим гранулометричним складом, забезпечуючи основну площу ріллі господарства.

Чорноземи типові – це зональні ґрунти Лісостепу України, що формуються під трав'янистим покривом і вважаються одними з найродючіших у світі. Їхня

виняткова продуктивність забезпечується поєднанням високого вмісту гумусу та оптимальних фізико-хімічних властивостей.

Формування цих ґрунтів відбулося під трав'янистою степовою та лучно-степовою рослинністю. Домінуючим є гумусово-акумулятивний процес, який забезпечив утворення глибоко гумусового профілю. Розташування у зоні нестійкого або недостатнього зволоження сприяє інтенсивному накопиченню органічної речовини, мінімізуючи її вимивання.

Реакція ґрунтового розчину переважно оптимальна для більшості культур, варіюючи від слабокислої до слаболужної (рН 5.8–7.0); у карбонатних відмінах рН може зростати до 7.2–7.4. Ці ґрунти мають високу насиченість основами, головним чином завдяки насиченню гумусу кальцієм, що сприяє формуванню стійких гуматів кальцію. Крім того, висока ємність катіонного обміну (ЄКО), що становить 30–60 мг-екв/100 г ґрунту, забезпечує відмінну здатність ґрунту утримувати поживні речовини та мінімізувати їх вимивання. У верхньому, орному горизонті (0–30 см) чорнозему типового вміст гумусу зазвичай становить 2,5–6,2%.

Вміст загального азоту корелює з вмістом гумусу, оскільки більша частина азоту знаходиться в органічній формі. Вміст рухомих форм азоту (нітратний та амонійний) залежить від мінералізації органічної речовини і може бути динамічним. На чорноземах типових вміст рухомого азоту може бути високим, але для підтримки оптимального рівня потрібне регулярне внесення азотних добрив, особливо за інтенсивних технологій вирощування.

Незважаючи на те, що переважна частина поля має середній та підвищений рівень забезпеченості основними елементами, для підтримки оптимальної продуктивності критично важливе диференційоване внесення азотних, фосфорних та калійних добрив. Зміна норм внесення відповідно до зони забезпечення дозволить ефективніше використовувати поживні речовини, максимізуючи ріст рослин і підвищуючи прогнозовану врожайність. (табл. 2.1, 2.2).

Таблиця 2.1

Характеристика ґрунтового покриву дослідного поля

№ п/п	Сільсько-господарські угіддя	Агро виробничі групи за типами ґрунтів, їх шифр	Основні ґрунтові відміни		Показник властивостей і їх оцінка		Заходи підвищення родючості
			Назва ґрунту	Площа, га	Середній вміст гумусу, %	Гранулометричний склад	
1	Рілля	58 г, типові	Чорноземи типові	7565	3,1	легкосуглинковий	Внесення органічних і мінеральних добрив, захист від ерозії

Таблиця 2.2

Результати агрохімічного обстеження поля №58 в господарстві ТОВ «Агро - С»

Господарство	ТОВ «Агро - С»		Культура	Кукурудза	Прогнозована врожайність	9 т/га	Область	Київська						
Поле	№ 58		Попередник	Озимий ріпак	Площа	150 га	Район	Броварський						
Тип ґрунту	Склад	Зони	Гумус, %	рН	Вміст елементів в різних зонах забезпечення, мг/кг									
					N-NH ₃ + N-NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca мг/єкв/ 100 г	S	Mg мг/єкв/ 100 г	Zn	Cu	Mn	Na
Чорноземи типові легкосуглинкові	пісок 22,5% глина 17,5% мул 65%	I	3	6,9	28	145	120	9,35	8,8	2,5	4,40	0,45	24,6	14,8
		II	3,1	6,8	36	150	145	9,66	8,35	2,4	3,60	0,50	25,3	14,5
		III	3,2	6,7	44	155	180	8,80	8,90	2,9	3,75	0,50	26,5	12,9

2.3. Природні та кліматичні умови досліджень

Клімат Київської області, де розташоване господарство ТОВ «Агро- С», є помірно континентальним. Зими тут порівняно м'які, часто з відлигами, а літо - помірно тепле та вологе. Весна й осінь зазвичай затяжні, із поступовим переходом температурних режимів.

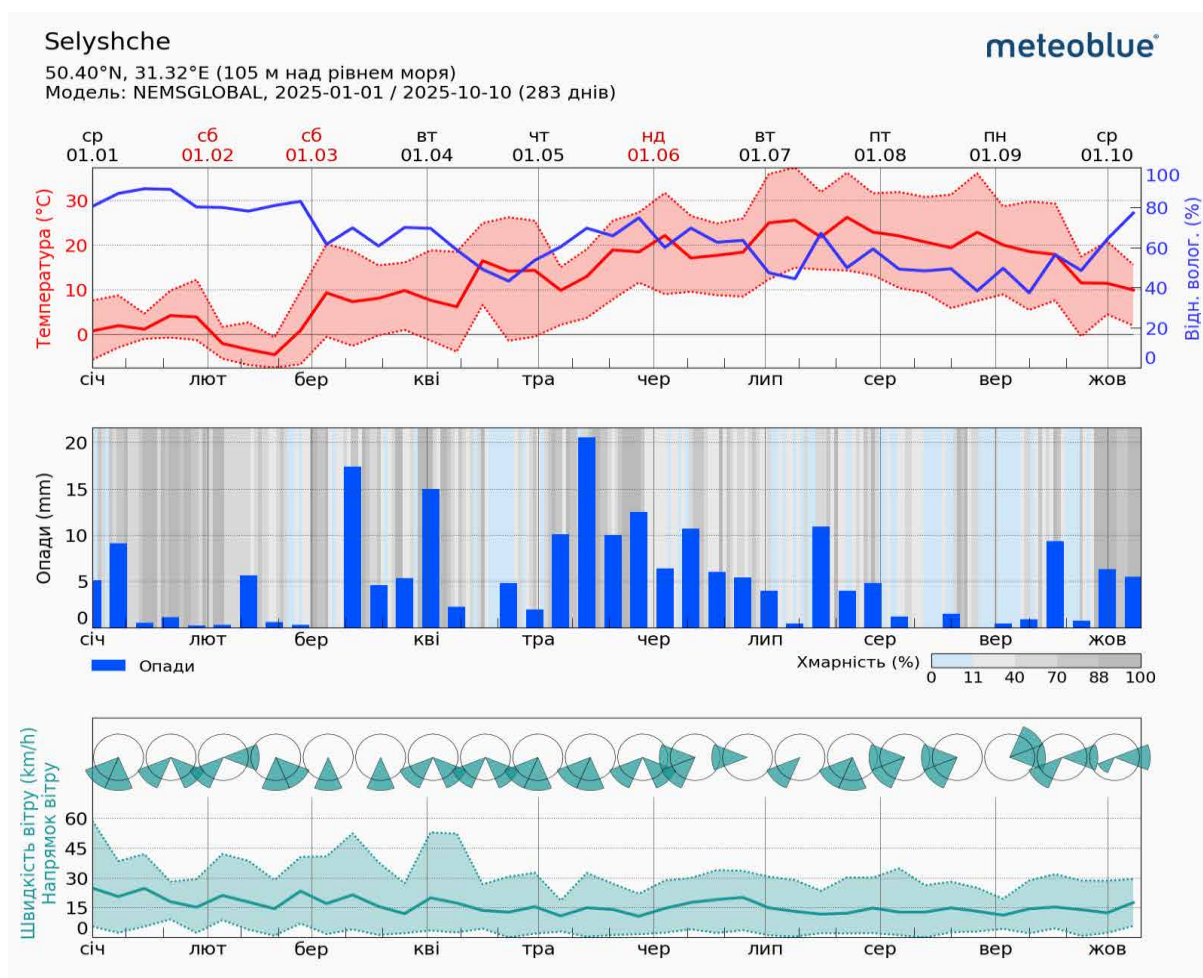


Рисунок 2.1. Показники погодних умов у Селищі за 2025 рік.

Середньорічна температура повітря становить близько +7,1...+7,5 °С. Максимальна температура в літній період може сягати +36...+37 °С, тоді як мінімальна взимку опускається до -24...-26 °С. Тривалість періоду з середньодобовою температурою повітря вище +10 °С становить у середньому 160–175 днів, що забезпечує повний цикл розвитку кукурудзи.

Річна кількість опадів у регіоні коливається в межах 480–540 мм, з яких близько 70 % припадає на теплий період року (з квітня по вересень). Найбільша кількість опадів випадає у червні–липні, що збігається з періодом інтенсивного росту та формування генеративних органів кукурудзи. У посушливі роки кількість опадів може знижуватися до 400 мм, що негативно впливає на урожайність і потребує застосування системи зрошення або вологозберігаючих технологій.

Зимовий період триває в середньому 90–95 днів, починаючись наприкінці листопада і закінчуючись на початку березня. Стійкий сніговий покрив зберігається від 75 до 90 днів, із середньою висотою снігу 5–12 см. Глибина промерзання ґрунту коливається в межах 25–35 см, залежно від температури та вологості повітря.

Літній період, коли середньодобова температура перевищує +15 °С, триває близько 120–135 днів — з кінця квітня до початку жовтня. У цей період спостерігаються найсприятливіші умови для росту кукурудзи, формування листового апарату та наливу зерна. Проте підвищені температури в червні–серпні (до +35 °С) у поєднанні з низькою кількістю опадів можуть призводити до дефіциту ґрунтової вологи, що особливо негативно впливає на процес запилення і формування врожаю.

За результатами агрометеорологічних спостережень, проведених за допомогою метеостанції, розташованої на відстані близько 2 км від виробничих ділянок господарства, встановлено, що середньомісячна температура вегетаційного періоду (травень–вересень) у середньому становить +18,5...+20,2 °С, а сумарна кількість опадів за цей період — 320–350 мм. Такі кліматичні умови є сприятливими для формування високопродуктивних посівів кукурудзи на зерно за умови оптимізації системи живлення і вологозабезпечення.

2.4 Методика проведення дослідження

Схема досліду на господарстві має 6 варіантів. Дослід створений для аналізу впливу різних норм внесення азотних добрив та їх оптимізація умов живлення кукурудзи на зерно. Площа досліджуваної ділянки відповідно 7,2 га (рис. 2.2., табл. 2.3.).

Агрохімічним фоном даного поля слугує:

- Амофос внесений в основне удобрення у нормі 90 кг/га;
- NPK 7:18:36 в припосівному внесенні у нормі 35 кг/га.



Рис. 2.2. Схема дослідних ділянок

Таблиця 2.3

Схема досліду

Основне внесення	Передпосівне	Припосівне
Фон поля: Амофос 90 кг/га	Контроль	Фон поля: NPK 7:18:36 35кг/га
Фон поля: Амофос 90 кг/га	КАС 150кг/га	Фон поля: NPK 7:18:36 35кг/га
Фон поля: Амофос 90 кг/га	КАС 250 кг/га	Фон поля: NPK 7:18:36 35кг/га

Фон поля: Амофос 90 кг/га	КАС 350 кг/га	Фон поля: NPK 7:18:36 35кг/га
Фон поля: Амофос 90 кг/га	КАС 450 кг/га	Фон поля: NPK 7:18:36 35кг/га
Фон поля: Амофос 90 кг/га	Еталон Карбамід 150 кг/га	Фон поля: NPK 7:18:36 35кг/га

Дослідження має на меті визначити оптимальні види та норми азотного живлення шляхом зіставлення їхньої дії на продуктивність культури за вирощування кукурудзи на зерно. Зокрема, таких добрив як Карбамід 150 кг/га та різні норми КАСу. Дані добрива були внесені в перепосівне удобрення.

Карбамідно-аміачна суміш (КАС) — це високоефективне рідке азотне добриво, що не містить вільного аміаку і є водним розчином трьох хімічних форм азоту. КАС містить 28% – 32% загального азоту (залежно від марки) і є одним із найбільш універсальних азотних добрив, оскільки завдяки комбінації трьох форм забезпечує пролонговане та комплексне живлення кукурудзи протягом тривалого періоду. Можливість дрібного, диференційованого внесення та поєднання з пестицидами робить КАС ідеальним інструментом для точного землеробства.

Дане добриво було внесене 19.04.2025 р. в період передпосівного удобрення з допомогою самохідного обприскувача New Holland. Оброблена площа становить 7,2 га, температура повітря становила 15°C, опадів не спостерігалось під час внесення.

Фоном поля в основному удобрені виступає амофос, який диференційно внесли 10.09.2024 р. у нормі 90 кг/га, за допомогою трактора John Deere 8345 та розкидача Amazone zg-ts 8200 hydro (ширина 36 м). Оброблена площа становить 7,2 га, температура повітря була 16 °C, опадів не спостерігалось під час внесення.

Останнє удобрення проводилося при сівбі 25.04.2025 р. добриво NPK 7:18:36 35 кг/га, за допомогою трактора John Deere 410 і сівалки точного висіву Horsch maestro 24, оброблювана площа становить 7,2 га, температура повітря була 15 °С, кількість опадів за день становило 0,50 мм.

У фазу цвітіння за спостереженнями варіанти з більшими нормами КАСу на знімку NDVI мають темніше забарвлення, відповідно це означає, що на даних частинах поля рослини мають інтенсивнішу вегетацію, тобто проходять швидше фази росту та розвитку порівняно з контролем (рис. 2.3).

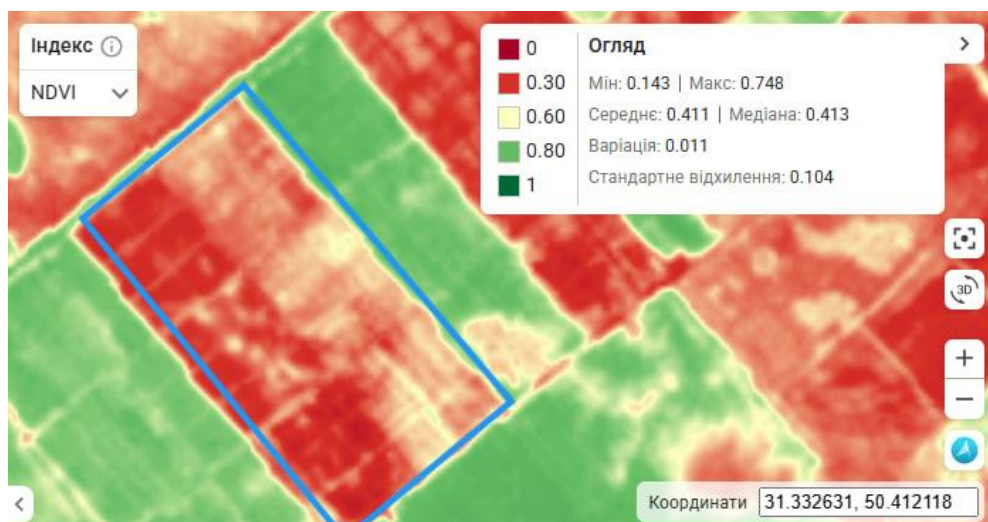


Рис. 2.3 Знімок NDVI (05.07.25) мікростадія ВВСН 51-53

Технологія висіву кукурудзи

Попередником для кукурудзи був озимий ріпак. Для посіву був вибраний середньопізній гібрид кукурудзи ДКС 3972, ФАО – 300, тип зерна – зубоподібна, посухостійкий, має швидку вологовіддачу при дозріванні, висока толерантність до поширених захворювань, вміст крохмалю понад 72%, потенційна врожайність 15 т/га.

Обробіток ґрунту полягав у глибокому розпушенні трактор John Deere – 410 + QUIVOGNE на глибину 40 см. Ранньою весною було проведено боронування John Deere – 410 + McFarLane, потім провели передпосівну культивування John Deere – 410 + CaseIH Tiger Mate. Посів проводився за допомогою сівалки Horsch maestro 24 і трактора John Deere 410. Сівба проводилась 25 квітня з густотою 60 тис/га, за температури 16 °С, опадів в день

сівби не спостерігалось, глибина посіву становила 5 см, відстань між насінням в рядку 24 см, міжряддя 70 см (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

Система застосування засобів захисту під кукурудзу на зерно

Назва препарату	Класифікація	Вміст д.р.	Норма кг(л)/га	Об'єкт дії	Період внесення
Примекстра голд	(Грунтовий гербіцид)	S-метолахлору - 400 г/л; атразин - 400 г/л	3,5	дводольні бур'яни, однорічні бур'яни, злакові	Після посіву
Елюміс	(Страховий гербіцид)	Нікосульфурон 30 г/л; мезотріон 75 г/л	1,8	багаторічні бур'яни, злакові бур'яни, дводольні бур'яни, однорічні злакові бур'яни	4 -листки

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ УОБРЕННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО

3.1 Вміст поживних елементів у ґрунті за вирощування кукурудзи на зерно

На початковому етапі вегетації, після прогрівання ґрунту, було проведено відбір зразків ґрунту для оцінки вихідних запасів основних елементів живлення (N, P, K). За результатами агрохімічного аналізу, дослідне поле було поділено на 6 зон забезпечення. У цих зонах застосовували диференційоване азотне живлення за різними варіантами: 1 варіант – контроль, 2 варіант – КАС 150 кг/га, 3 варіант – КАС 250 кг/га, 4 варіант – КАС 350 кг/га, 5 варіант – КАС 450 кг/га, 6 варіант – Еталон (Карбамід 150 кг/га).

Відбір ґрунтових зразків проводився поетапно протягом вегетації, починаючи з початкового етапу (наприкінці весни, після внесення добрив), для оцінки стартового рівня та подальшої динаміки азоту в ґрунті.

Зразки відбиралися з кореневмісного шару 0-20 см, як основного щодо накопичення поживних елементів та раннього росту кукурудзи. На кожній експериментальній ділянці неоднорідності відбиралося 15 точкових проб. Точкові проби змішувалися для отримання середнього зразка (масою 0,5 кг), який забезпечував репрезентативність ділянки. Кожен зразок був детально маркований (зона, добриво, норма, дата). Зразки зберігалися у сухих та затінених умовах для мінімізації зміни вологості та хімічного складу (зокрема, азоту) та оперативно транспортувалися до лабораторії для забезпечення достовірності аналізу.

Аналіз ґрунтових зразків, представлений у таблицях 3.1–3.3, дозволив встановити ключові закономірності вмісту поживних елементів на критичному етапі вегетації кукурудзи (фаза BBCH 13–15).

Вміст мінерального азоту ($N-NO_3 + N-NH_4$) у ґрунті безпосередньо корелював із зоною забезпечення. Відповідно на перших трьох ділянках він коливався в межах 28-33 мг/кг, при цьому найвищий показники (33 мг/кг) було

отримано за внесення КАСу у нормі 250 кг/га. На трьох інших варіантах забезпечення показники вмісту азоту варіювалися в межах 32-40 мг/кг, де також було отримано найвищий результат (40 мг/кг) за внесення КАСу у нормі 450 кг/га (табл. 3.1).

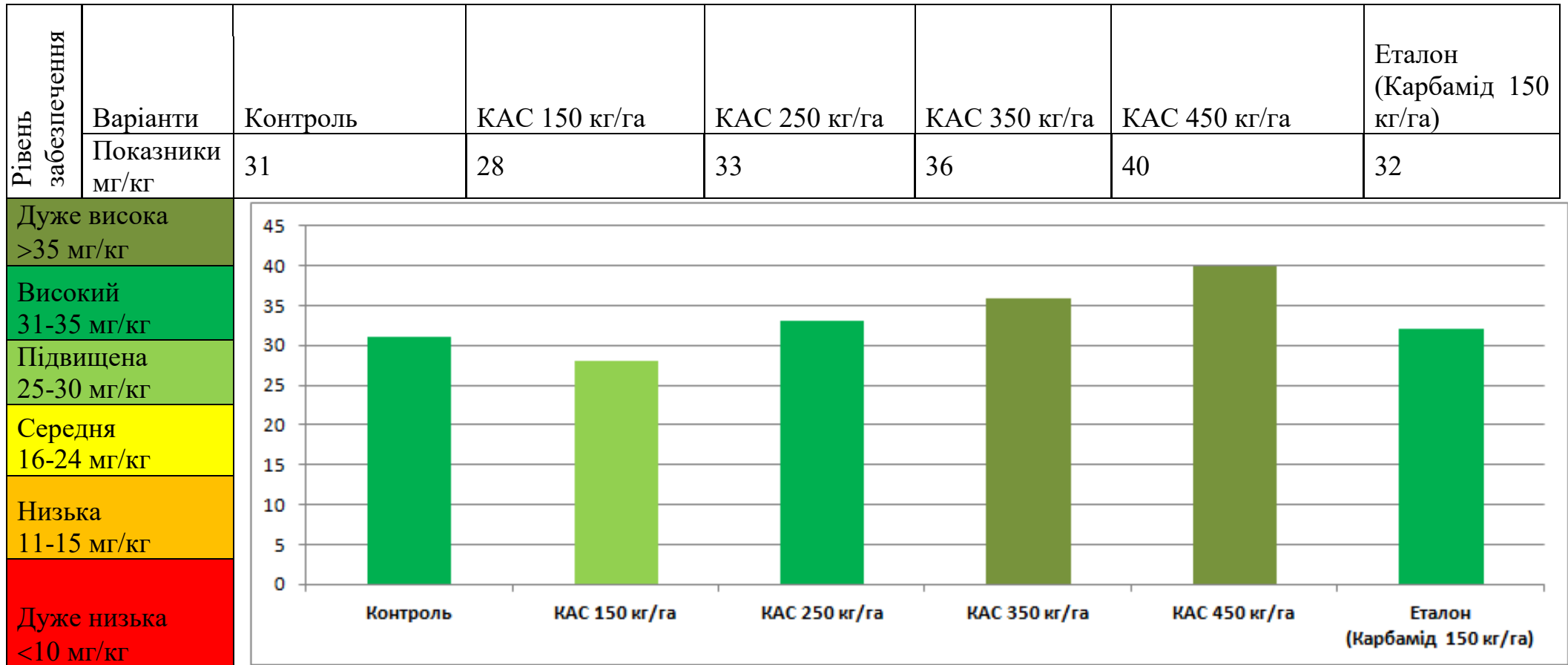
Результати агрохімічного аналізу ґрунту за вмістом рухомого фосфору (P_2O_5) показали, що на перших трьох варіантах значення було в діапазоні 113-141 мг/кг. На інших ділянках показники варіювали в межах 96-134 мг/кг (табл. 3.2).

Вміст рухомого калію (K_2O) у ґрунті характеризувався наступними показниками: 1 варіант - 96мг/кг, 2 варіант – 232 мг/кг, 3 варіант – 284 мг/кг, 4 варіант – 149 мг/кг, 5 варіант – 188 мг/кг, 6 варіант – 158 мг/кг. Найвищі значення можемо спостерігати на варіантах 2 і 3, які мають дуже високий вміст рухомого калію (табл. 3.3).

За результатами аналізу ґрунту у мікрофазу розвитку культури ВВСН 13-15 визначили, що внесення КАСу 350 кг/га та 450 кг/га забезпечує більший вміст мінерального азоту в шарі ґрунту 0-30 см порівняно з внесенням карбаміду у нормі 150 кг/га. Визначено, збільшення норми внесення КАСу мало прямопропорційну залежність із збільшенням вмісту мінерального азоту в ґрунті.

Таблиця 3.1

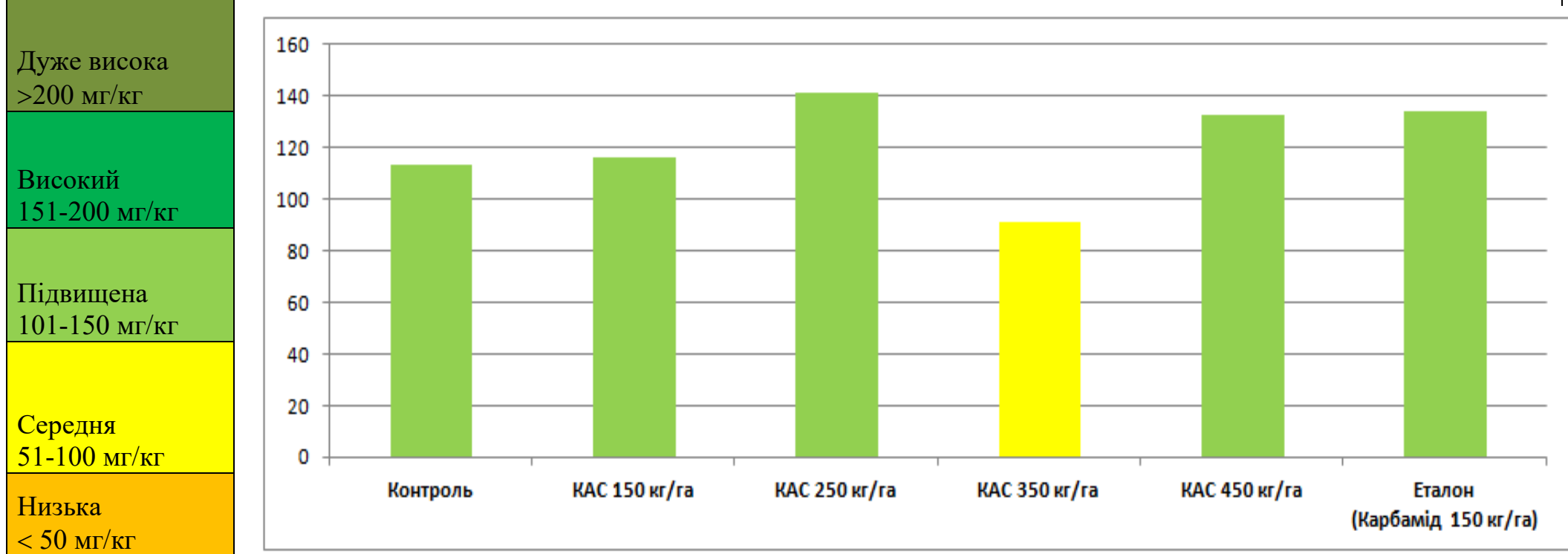
Вміст мінерального азоту ($N-NO_3 + N-NH_4$) в ґрунті у мікростадію ВВСН 13-15 (19.05.2025 р)



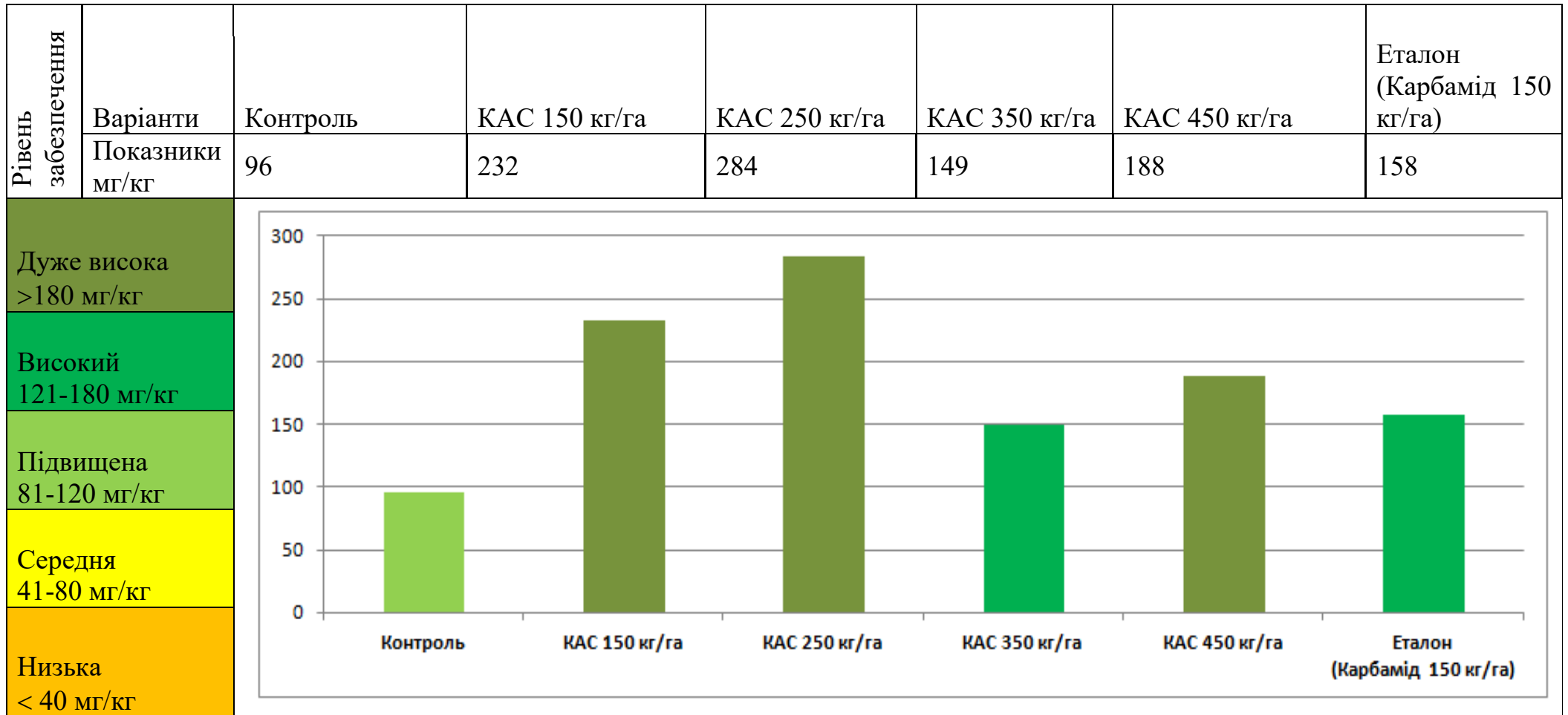
Таблиця 3.2

Вміст фосфору (P_2O_5) в ґрунті у мікростадію ВВСН 13-15 (19.05.2025 р)

Рівень забезпечення	Варіанти	Контроль	КАС 150 кг/га	КАС 250 кг/га	КАС 350 кг/га	КАС 450 кг/га	Еталон (Карбамід 150 кг/га)
	Показники мг/кг	113	116	141	91	133	134



Таблиця 3.3

Вміст калію K_2O в ґрунті у мікростадію ВВСН 13-15 (19.05.2025 р)

Концентрація поживних речовин як у ґрунті, так і в самій рослині, постійно змінюється протягом вегетаційного циклу, оскільки різні фази розвитку культури вимагають специфічних співвідношень цих елементів.

Ранніх етапах росту азот відіграє ключову роль у формуванні листового апарату, стимулюючи інтенсивне нарощування вегетативної маси та посилюючи фотосинтетичну активність. Пік споживання азоту припадає на період активного вегетативного росту, який передує цвітінню. Після проходження цієї критичної фази, потреба в ньому суттєво знижується. Важливо контролювати рівень N, оскільки його надлишок на пізніх етапах може уповільнювати процеси дозрівання та негативно впливати на накопичення сухої речовини, знижуючи якість кінцевого врожаю.

Фосфор є незамінним на початкових стадіях для формування потужної та розгалуженої кореневої системи, що особливо важливо під час проростання та вкорінення. Крім того, P є каталізатором енергетичних процесів (АТФ) та підвищує стійкість рослин до стресових умов. Хоча потреба у фосфорі зберігається протягом усієї вегетації, його критичне значення зростає у фазах цвітіння та наливу зерна для забезпечення репродуктивної функції.

Калій виконує життєво важливі функції, насамперед забезпечуючи регуляцію водного режиму рослин (осмотичний тиск), що є ключовим для їхньої стійкості до посухи. Він також активує численні ферментативні процеси, підтримує імунітет та підвищує опірність кукурудзи до хвороб і температурних стресів (мороз).

Для досягнення максимальної продуктивності та оптимального розвитку кукурудзи необхідний ретельний моніторинг вмісту ключових поживних елементів у ґрунті, з обов'язковим урахуванням фази розвитку культури та її специфічних потреб.

На етапі вегетації ВВСН 51-53 (фаза цвітіння) спостерігається інтенсивне виснаження ґрунту основними елементами живлення. Цей період вимагає від кукурудзи значних енергетичних витрат, необхідних для формування репродуктивних органів та закладання майбутнього врожаю зерна.

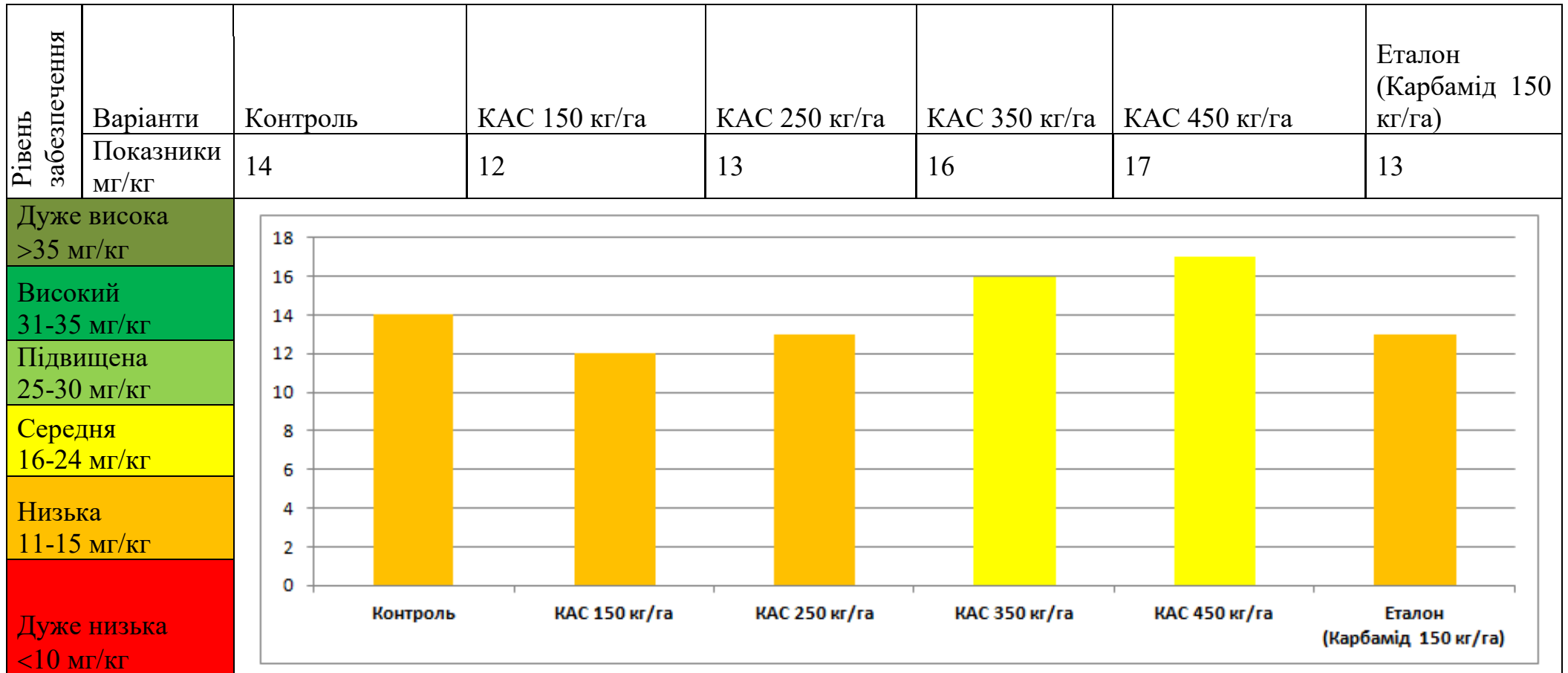
Аналіз ґрунтових зразків, представлений у таблицях 3.4–3.6, показав, що вміст мінерального азоту ($N_{\text{мін}}$) у ґрунті знизився приблизно на 55-60%. Основною причиною такого різкого падіння є висока кумулятивна потреба кукурудзи. На ранніх стадіях N активно використовувався для нарощування біомаси та листового апарату. У фазу цвітіння потреба в азоті залишається високою, оскільки він необхідний для синтезу білків у генеративних органах. Однак через швидке та масове поглинання рослинами, на цьому етапі азот часто переходить у стан дефіциту в ґрунтовому розчині.

Вміст рухомого фосфору у ґрунті мав більш повільні темпи зниження – приблизно на 35-40%. Хоча фосфор необхідний для розвитку кореневої системи та регуляції енергообміну, його поглинання кукурудзою є нижчим у порівнянні з азотом і калієм. Під час цвітіння P критично важливий для формування зерна та забезпечення енергією репродуктивних процесів, проте інтенсивність його виснаження поступає іншим макроелементам.

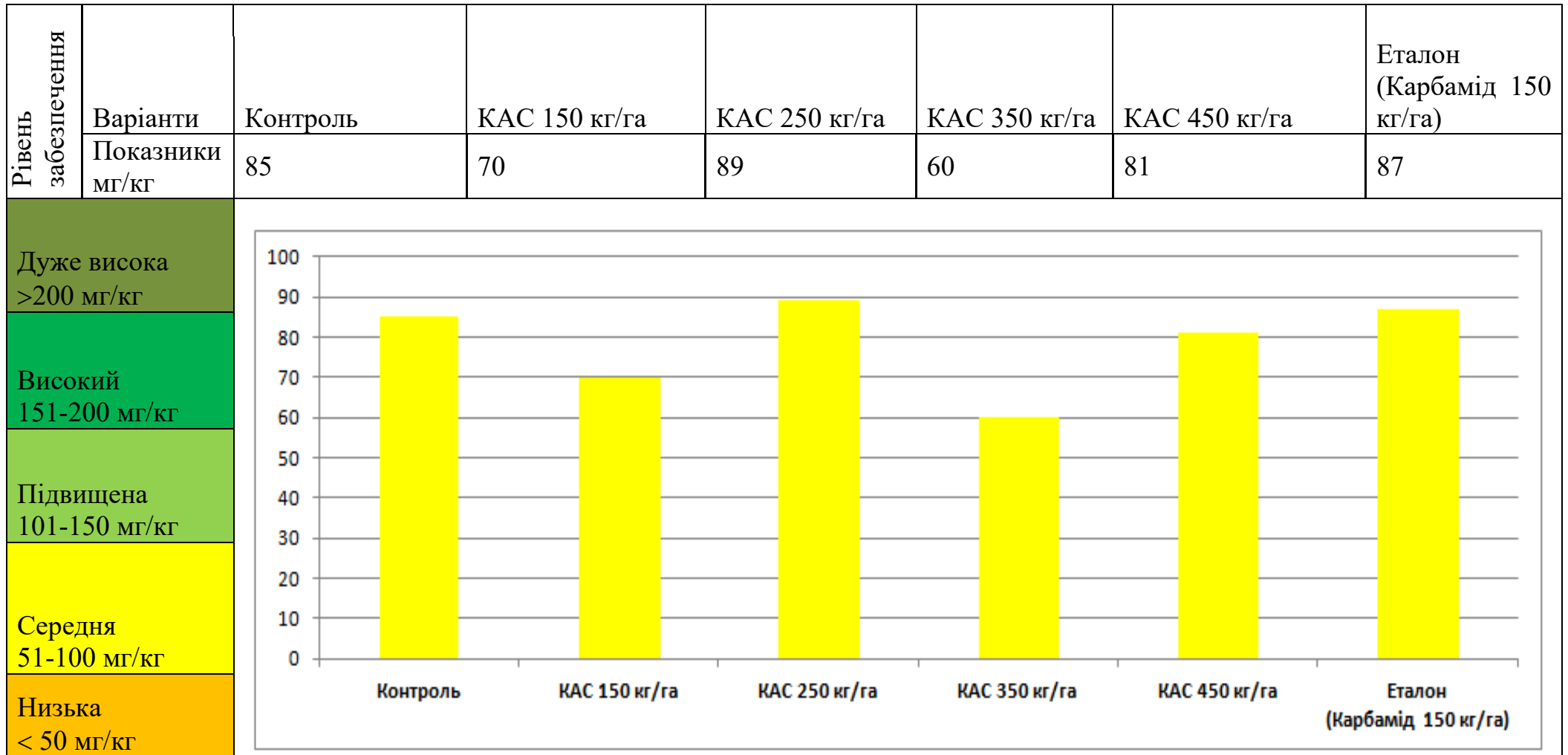
Найбільш значне зменшення зафіксовано у вмісті рухомого калію — на 65-70%. Калій активно поглинається культурою в період найбільшого вегетативного росту завдяки своїй ролі в регуляції водного балансу, активації ферментів та підвищенні стресостійкості. Під час цвітіння його функція розширюється, оскільки він забезпечує транспортування асимілянтів (поживних речовин) до зерна. Ця надзвичайно висока потреба на критичному етапі й зумовлює найшвидше зниження концентрації K у ґрунті.

Узагальнюючи, на мікрофазі ВВСН 51-53 кукурудза демонструє максимальне споживання макроелементів, що спричиняє істотне виснаження запасів азоту, калію та фосфору в ґрунті.

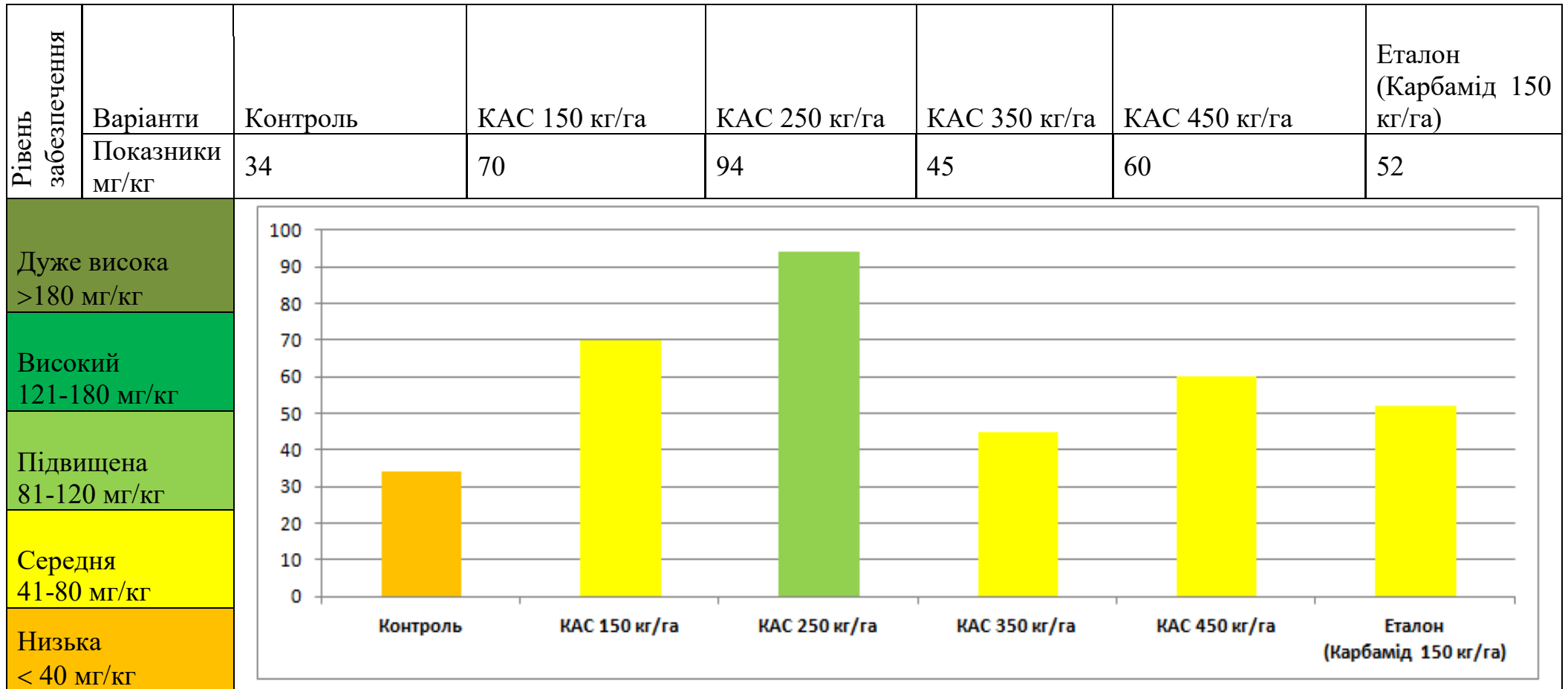
Таблиця 3.4

Вміст мінерального азоту ($N-NO_3 + N-NH_4$) в ґрунті у мікростадію ВВСН 51-53 (01.07.2025 р.)

Таблиця 3.5

Вміст фосфору (P_2O_5) в ґрунті у мікростадію ВВСН 51-53 (01.07.2025)

Таблиця 3.6

Вміст калію (K_2O) в ґрунті у мікстаїю ВВСН 51-53 (01.07.2025 р)

3.2 Біометрична оцінка ефективності азотного живлення кукурудзи

Систематичний моніторинг біометричних показників є ключовим інструментом для оцінки реакції культури на застосовану систему живлення на різних етапах онтогенезу. Це забезпечує можливість об'єктивно визначити, чи відповідають обрані види та норми добрив фактичним потребам рослин у забезпеченні належної динаміки росту та розвитку.

Біометричні параметри (такі як висота рослин, діаметр стебла та площа листкової поверхні) виступають як візуальні індикатори балансу поживних елементів. Наприклад, уповільнення росту та відставання у розвитку можуть прямо вказувати на дефіцит макроелементів (особливо азоту), тоді як надмірне, непропорційне нарощування біомаси без належного розвитку генеративних органів може сигналізувати про надлишок.

Регулярне вимірювання таких показників, як площа листкової поверхні та кількість листків, дозволяє оцінити фотосинтетичну активність посіву. Це, своєю чергою, дає можливість із високою точністю прогнозувати потенціал урожайності кукурудзи задовго до збору.

Періодичний аналіз біометричних даних дає змогу оперативно реагувати на стресові фактори, спричинені несприятливими погодними умовами (посуха, перезволоження). Своєчасна корекція програми підживлення, що базується на цих показниках, дозволяє компенсувати вплив стресів і підтримувати оптимальний фізіологічний стан кукурудзи.

Отже, інтеграція регулярного біометричного вимірювання з інформацією про систему живлення є основою для оптимізації агротехнічних рішень та максимального підвищення ефективності використання внесених добрив.

Таблиця 3.7

**Біометричні показники рослин кукурудзи за мікростадії ВВСН 13-15 в різних зонах забезпечення,
2025 р**

Варіанти	Висота, см	Довжина міжвузля, см	Діаметр стебла	Маса надземної частини, г	Кількість листіків, шт/роsl.	Площа листікової поверхні, см ²
Контроль (без добрив)	15	0,5	1,0	55	5	135
КАС 150 кг/га	17	1,1	1,0	61	5	142
КАС 250 кг/га	18	1,5	1,0	63	5	150
КАС 350 кг/га	20	1,8	1,0	65	5	153
КАС 450 кг/га	22	1,9	1,0	67	5	156
Еталон (Карбамід 150 кг/га)	21	1,8	1,0	66	5	154

Таблиця 3.8

Біометричні показники рослин кукурудзи за мікростадії ВВСН 51-53 в різних зонах поля, 2025 р

Варіанти	Висота, см	Довжина міжвузля, см	Діаметр стебла	Маса надземної частини, г	Кількість листіків, шт/роsl.	Площа листікової поверхні, см ²
Контроль (без добрив)	296	22	3,7	655	13	6543
КАС 150 кг/га	298	22	3,8	660	14	6673
КАС 250 кг/га	299	22	3,8	667	14	6756
КАС 350 кг/га	302	22	3,9	672	14	6852
КАС 450 кг/га	304	23	3,9	680	14	6945
Еталон (Карбамід 150 кг/га)	301	22	3,8	677	14	6892

Експериментальні дані (таблиці 3.7–3.8), отримані шляхом моніторингу біометричних характеристик кукурудзи протягом трьох основних мікрофаз росту (ВВСН 13-15, ВВСН 51-53), підтверджують, що ріст і розвиток рослин суттєво залежать від застосованих добрив. Дослідження включало порівняння різних норм внесення КАСу та карбаміду 150 кг/га, як еталону.

Аналіз біометричних параметрів, отриманих у ході експерименту, чітко засвідчив залежність росту та розвитку кукурудзи від рівня забезпеченості ґрунту та застосованих норм і форм азотних добрив. Найбільш ефективним у більшості вимірювань виявився КАС у дозі 450 кг/га, тоді як варіант, де не вносились добрива стабільно демонстрував найнижчі результати. Карбамід 150 кг/га показав також позитивну тенденцію до збільшення.

На етапі 3-5 листків усі біометричні показники зростали прямо пропорційно забезпеченості поживними елементами зони живлення. Висота рослин знаходилася в діапазоні 15-22 см. Максимальні значення були зафіксовані на варіантах із КАС 450 кг/га. Довжина міжвузля також була максимальною в зонах високої забезпеченості та при застосуванні КАС 450 кг/га (0,5-1,9 см). Маса надземної частини коливалася від 55 до 67 г залежно від зони забезпечення. Кількість листків на цій фазі залишалася стабільною та однаковою для всіх експериментальних варіантів. Площа листкової поверхні корелювала з родючістю ґрунту; найвищі значення були отримані, за застосування КАС 450 кг/га.

Під час цвітіння, коли рослини досягли максимального вегетативного розвитку, біометричні параметри також варіювалися залежно від зони забезпечення. Висота рослин в межах 296-304 см за внесення КАС 450 кг/га була характерна також і для варіанту із застосуванням карбаміду 150 кг/га тоді як на варіанті контроль — значення були найнижчі. Довжина міжвузля була відносно стабільною (22-23 см) і не виявила суттєвої залежності від зони забезпечення. Маса надземної частини коливалася в діапазоні 655-680 г, Кількість листків була в межах 13-14 шт. Площа листкової поверхні також

досягла максимальних значень на варіантах із найвищою нормою КАСу (450 кг/га).

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ УРОЖАЙНОСТІ ТА ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЗЕРНА КУКУРУДЗИ

4.1 Порівняльна оцінка формування структури врожаю гібриду кукурудзи ДКС 3972 залежно від форми азотного добрива

Формування структурних елементів урожаю кукурудзи суттєво залежить від рівня забезпеченості ґрунту поживними елементами у межах дослідного поля. Виявлено пряму кореляцію між родючістю зони та ключовими показниками продуктивності.

У варіантах контроль, КАС 150 кг/га та КАС 250 кг/га зафіксовано визначено нижчі значення всіх вимірюваних показників структури врожаю. До них належать: довжина та діаметр качана, кількість рядів зерен у качані, кількість зерен у ряду, маса зерна з одного качана та маса 1000 зерен. Таке обмеження в розвитку та формуванні качанів, імовірно, спричинене нижчим агрохімічним фоном цієї ділянки порівняно з іншими варіантами. Менший вміст азоту призвів до формування недорозвинених качанів та значного зниження маси 1000 зерен, що стало головним чинником, який негативно вплинув на кінцеву врожайність.

Варіанти КАС 350 кг/га, КАС 450 кг/га та карбамід 150 кг/га дозволили гібриду кукурудзи ДКС 3972 реалізувати свій максимальний потенціал. На цій ділянці були отримані найвищі показники структури врожаю в порівнянні з усім полем. Це є прямим наслідком високого рівня забезпеченості ґрунту поживними елементами, що сприяло максимальному розвитку та повноцінному формуванню качанів, забезпечуючи, відповідно, найвищий рівень урожайності.

Аналіз формування структурних елементів урожаю гібриду кукурудзи ДКС 3972 (таблиця 4.1) чітко засвідчив, що рівень забезпеченості ґрунту є ключовим фактором, що визначає параметри качана та зерна. У більшості випадків, КАС у дозі 450 кг/га забезпечував максимальні показники.

Формування структурних елементів урожаю гібриду ДКС 3972 продемонструвало чітку залежність від зони забезпеченості ґрунту та застосованої норми азотних добрив. Найбільш ефективним у стимулюванні

ключових показників забезпечило внесення КАС у дозі 450 кг/га, особливо за сприятливих умов.

Довжина качана помітно коливалась: у перших чотирьох варіантах 18,2 - 18,5 вона становила . У варіанті КАС 450 кг/га зросла до 20 см. Діаметр качана коливався в межах 2,5-2,8 см. Найвищі показники діаметра у всіх зонах були отримані саме за застосування КАС 450 кг/га.

Кількість рядів зерна була стабільною майже у всіх варіантах (16 рядів), незалежно від кількості добрива. Однак у варіантах КАС 350 та 450 кг/га відзначено зростання до 18 рядів. Кількість зерен у ряду також змінювалася: від 32-38 шт. Загальна кількість насінин була найменшою у трьох варіантів (512-576 шт.). Показники значно варіювалися, досягаючи 684 шт. (КАС 350 та 450 кг/га). Маса зерен з 1 качана зросла від 98-175 г, найменше у першому варіанті контроль – 98 г. Відповідно, маса 1000 насінин зростала з 176 - 297 г, але найбільше у варіанті п'ять – КАС 450 кг/га.

Загалом, результати чітко вказують на те, що КАС у нормі 450 кг/га дозволив максимально реалізувати потенціал гібриду, особливо в умовах високої забезпеченості ґрунту поживними елементами.

Таблиця 4.1

Структура врожаю рослин кукурудзи на зерно гібрид ДКС 3972 в різних зонах забезпечення, 2025 р

Варіанти	Показники							
	Довжина качана, см	Діаметр качана, см	Кількість рядів, шт	Кількість зерен в ряду, шт	Кількість насінин, шт	Маса качана без зерна, г	Маса зерен з 1 качана, г	Маса 1000 насінин, г
Контроль (без добрив)	18,3	2,5	16	32	512	25,08	98	176
КАС 150 кг/га	18,4	2,7	16	36	576	26,38	156	257
КАС 250 кг/га	18,2	2,7	16	36	576	27,23	158	271
КАС 350 кг/га	18,5	2,7	18	38	684	28,97	161	296
КАС 450 кг/га	20,0	2,8	18	38	684	30,85	175	297
Еталон (Карбамід 150 кг/га)	19,0	2,8	16	38	608	28,62	166	261

4.2. Ефективність різних норм і видів азотних добрив

Результати аналізу впливу різних видів і норм азотних добрив на приріст урожайності гібриду кукурудзи ДКС 3972 чітко засвідчили, що ефективність застосування добрив безпосередньо залежить від вихідної забезпеченості ґрунту поживними елементами.

У варіанті без внесення добрив (контроль) було виявлено, що відмова від внесення азотних добрив забезпечила менший приріст урожайності порівняно із варіантами за різних норм КАСу та карбаміду. Найвищі показники врожайності були забезпечені за внесення КАС 350 та 450 кг/га. Ці варіанти забезпечили максимальну ефективність, дозволивши найповніше реалізувати генетичний потенціал гібриду ДКС 3972. Варіант з карбамідом (150 кг/га) також забезпечив приріст, але він був значно меншим порівняно з найвищою нормою КАСу.

Дослідження однозначно підтвердило, що ділянки, на яких застосовувався КАС у нормі 450 кг/га, демонстрували найбільшу ефективність та приріст урожайності порівняно з варіантом контроль (без добрив) та карбамідом 150 кг/га, які хоча й забезпечили позитивні результати, значно поступалися за рівнем продуктивності.

Таблиця 4.2

Порівняння приросту врожаю рослин кукурудзи на зерно ДКС 3972 в різних зонах забезпечення, 2025 р

Варіанти	Урожайність, т/га	Приріст урожаю:	
		т/га	%
Контроль	5,4	-	-
КАС 150 кг/га	9,4	4,0	74,1
КАС 250 кг/га	10,2	4,6	85,2
КАС 350 кг/га	12,9	7,5	138,9
КАС 450 кг/га	12,9	7,5	138,9
Еталон (Карбамід 150 кг/га)	10,4	5	92,6

4.3 Вплив азотних добрив на показники якості зерна

Аналіз впливу різних форм і норм азотних добрив на якість зерна гібриду ДКС 3972 (таблиця 4.3) підтвердив, що азот сприяє покращенню ключових показників якості, зокрема вмісту білка, крохмалю та олії. Ефект добрив, однак, суттєво варіюється залежно від вихідної забезпеченості ґрунту.

У варіанті контроль (без добрив) вплив азотних добрив на якість зерна був незначний, що пояснюється низьким загальним вмістом поживних елементів у ґрунті.

Вміст крохмалю мав найнижчі значення у варіантах контроль (без добрив), КАС 150 та 250 кг/га, а найвищі КАС 450 кг/га та Еталон (карбамід 150 кг/га). За внесення КАС 350 та 450 кг/га визначено найвищий вміст білка серед усіх тестованих варіантів. Вміст олії майже не залежав від добрива чи зони поля, коливався у вузькому діапазоні 3,9-4,1%.

Таблиця 4.3

Якісні показники зерна кукурудзи гібриду ДКС 3972 в різних зонах поля, 2025 р

Варіант дослідження	Показник			
	Вологість, %	Вміст жиру, %	Білок, %	Крохмаль, %
Контроль (без добрив)	23,0	3,9	6,8	70,5
КАС 150 кг/га	20,8	3,9	6,8	70,5
КАС 250 кг/га	26,5	3,9	7,1	70,6
КАС 350 кг/га	21,7	4,1	7,2	70,7
КАС 450 кг/га	23,1	4,1	7,2	71,1
Еталон (Карбамід 150 кг/га)	26,8	4,0	6,9	70,8

Вміст ключових якісних компонентів у зерні кукурудзи варіюється залежно від агрохімічної зони та типу внесених добрив. Дослідження показало, що такі показники як білок, вміст жиру та крохмаль, залежить від забезпеченості ґрунту, чим вона вища тим більші показники даних досліджуваних зразків зерна. Вибір оптимальної стратегії удобрення повинен ґрунтуватися на кінцевій меті виробництва, чим вища доза внесення добрив тим можливо досягнути більших показників якості зерна. Але в цілому якщо оцінюючи результати, то сильно великого коливання не спостерігали.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОБРЕННЯ КУКУРУДЗИ РІЗНИМИ ВИДАМИ ТА НОРМАМИ АЗОТНИХ ДОБРІВ

Вартість добрив є визначальним чинником при виборі оптимальної стратегії азотного живлення. У даному дослідженні порівнюються різні норми внесення КАС та карбамід (у нормі 150 кг/га). Ці добрива відрізняються ціною, а також ефективністю, яка залежить від умов застосування та вихідної забезпеченості ґрунту поживними елементами.

Карбамід є значно дорожчим добривом, але його ефективність у підтримці живлення протягом вегетації часто виправдовує вищу ціну. Ціна в 2025 році в середньому становить близько 21500 грн/т. Витрати на 1 га суттєво вищі, особливо за норми 150 кг/га. Проте, це зростання витрат, як правило, повністю компенсується збільшенням урожайності в сприятливих умовах.

Основна перевага карбаміду полягає в рівномірному та пролонгованому вивільненні азоту. Його амідна форма (NH_2) поступово гідролізується до амонійної форми (NH_4^+), а потім перетворюється на нітратну форму (NO_3). Цей процес забезпечує ефективне та тривале живлення кукурудзи протягом усього вегетаційного циклу, що робить його ефективним у всіх зонах забезпечення.

Головний недолік — висока ціна. Також, при поверхневому внесенні існує ризик втрат азоту через випаровування (летючість).

Карбамідо-аміачна суміш (КАС) є високоефективним рідким азотним добривом, популярність якого обумовлена балансом між швидкою доступністю та пролонгованою дією азоту.

КАС вирізняється вмістом азоту в трьох формах (N-NO_3 , N-NH_4 , N-NH_2). Таке поєднання забезпечує як миттєве живлення рослин (нітратна та амонійна форми), так і пролонгований ефект завдяки поступовій мінералізації амідної форми. Це гарантує стабільне постачання елемента протягом усього вегетаційного періоду. Як рідке добриво, КАС забезпечує ідеальну рівномірність розподілу по площі, що неможливо досягти при застосуванні гранульованих форм, і сприяє ефективному засвоєнню поживних речовин.

КАС дозволяє проводити комплексні операції, оскільки вона сумісна з більшістю рідких мікроелементів та засобів захисту рослин. Це значно оптимізує логістику та знижує операційні витрати за рахунок зменшення кількості проходів техніки. Дане добриво є негорючою та невибухонебезпечною речовиною, що спрощує її зберігання та транспортування порівняно з безводним аміаком. При внесенні безпосередньо в ґрунт або з подальшим закладенням, втрати азоту через випаровування значно нижчі, ніж при поверхневому застосуванні гранульованого карбаміду.

Головним агрономічним недоліком є ризик опіків листової поверхні при позакореновому підживленні, особливо за високих температур або яскравого сонця. Це вимагає строгого дотримання концентрації та погодних умов під час обприскування. Якщо КАС вноситься по поверхні ґрунту без подальшого заробляння, існує ризик втрат азоту (випаровування аміаку), особливо на ґрунтах із високим рН або великою кількістю нерозкладених рослинних решток. Рідка форма вимагає наявності спеціальних резервуарів для зберігання та використання обприскувачів, стійких до корозії (зазвичай з нержавіючої сталі або пластику), що підвищує початкові інвестиції господарства. Незважаючи на безпеку, великий об'єм і вага рідкого добрива можуть ускладнювати його транспортування та обробку в польових умовах.

Результати дослідження (таблиця 5.1 та рисунок 5.1) узагальнюють показники економічної ефективності використання різних форм і доз азотного живлення в умовах неоднорідності ґрунтового забезпечення.

Таблиця 5.1

Економічна ефективність застосування добрив на різних рівнях забезпечення

Варіанти	Урожайність т/га	Ціна продукції грн/т	Валовий прибуток грн	Виробничі витрати грн/га	Витрата на добрива грн/га	Собівартість грн	Чистий прибуток грн/га	Рентабельність %
КАС 150 кг/га	9,4	8000	75200	23500	2568	2773	49132	59
КАС 250 кг/га	10,2	8000	81600	23500	4280	2724	53820	57
КАС 350 кг/га	12,9	8000	103200	23500	5992	2286	73708	43
КАС 450 кг/га	12,9	8000	103200	23500	7704	2419	71996	47
Еталон (Карбамід 150 кг/га)	10,4	8000	83200	23500	4280	2671	55420	56

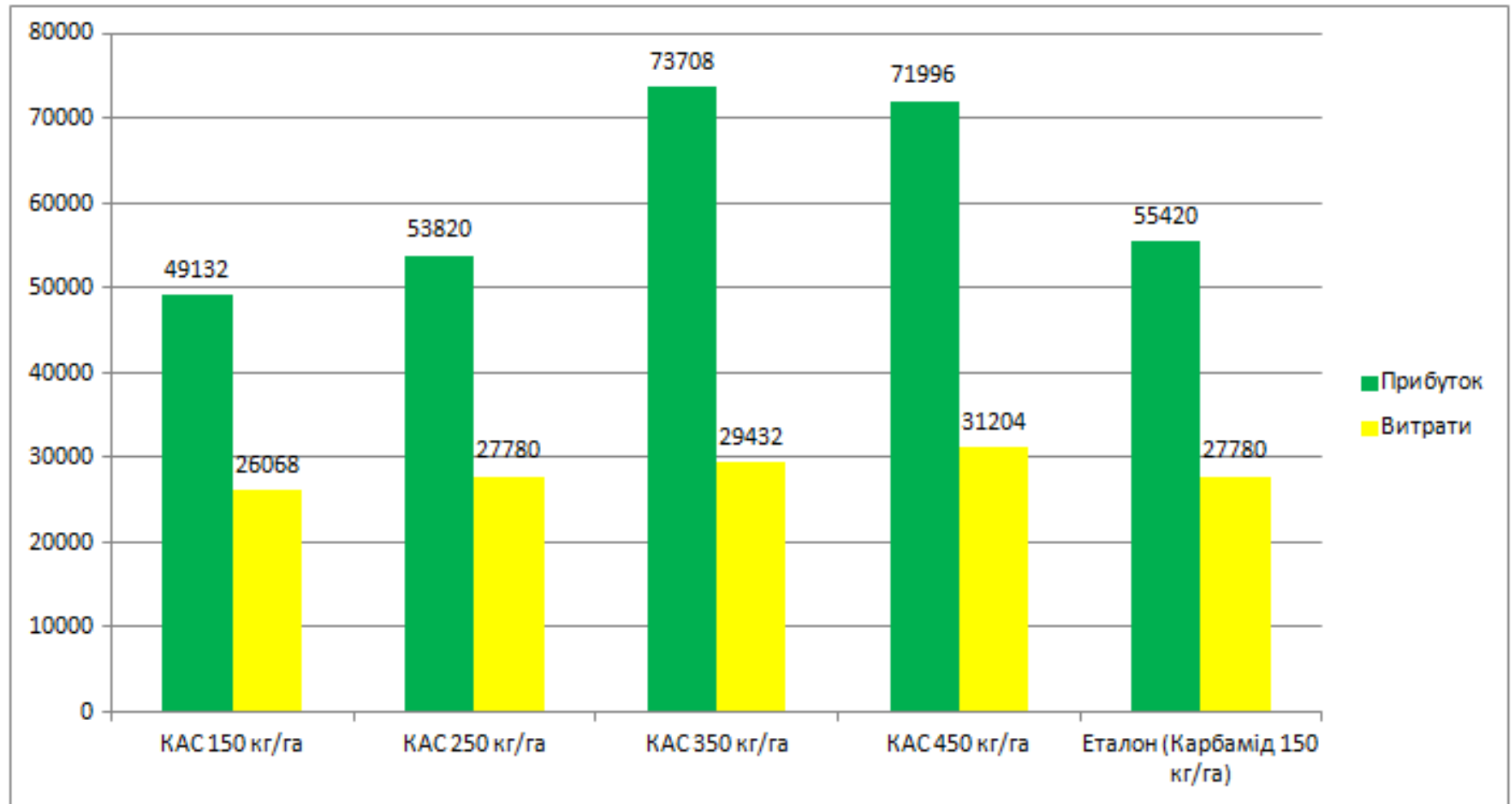


Рис. 5.1 Економічна ефективність застосування добрив на різних рівнях забезпечення

У варіантах з внесенням різних норм КАСу витрати на добрива були на рівні 2568-7704 грн/га, ціна варіювалась від кількості норми внесення, а собівартість становить 2286 - 2773 грн. Це забезпечує чистий прибуток 49132 - 73708 грн/га та відмінну рентабельність в середньому 52 %.

На варіантах внесення карбаміду у нормі 150 кг/га витрати на добрива становлять 4280 грн/га, при цьому собівартість становить 2671 грн/т. Чистий прибуток склав 55420 грн/га, що дещо нижче порівняно із КАСом, а рентабельність склала 56%. Отже, в даному досліді найкращий економічний результат показав КАС 350 кг/га – він забезпечив доволі високу врожайність та чистий прибуток серед усіх варіантів.

Отже, менші норми КАСу 150-250 кг/га підходить для господарств із обмеженим бюджетом, які прагнуть мінімізувати витрати на добрива. Він показує стабільні результати на різних рівнях забезпечення, але потребує точного внесення через летючість.

Карбамід у нормі 150 кг/га є оптимальним вибором для господарств, які готові інвестувати більше для досягнення максимальної врожайності. Він показує високу економічну ефективність, також є хорошим вибором для забезпечення довготривалого забезпечення культури азотом.

ВИСНОВОК

Було доведено, що види та норми азотних добрив є визначальними факторами, які впливають на вміст поживних елементів у ґрунті протягом вегетаційного періоду, що, своєю чергою, безпосередньо позначається на інтенсивності росту, розвитку, продуктивності та якості зерна кукурудзи.

1. Внесення азотних добрив суттєво стимулювало вегетативний ріст кукурудзи. Найбільш інтенсивний приріст біометричних показників (висота рослин, маса надземної частини) протягом вегетації зафіксовано на варіантах із максимальною нормою КАС (450 кг/га), що свідчить про повну реалізацію потенціалу гібриду за високого рівня азотного живлення. Виявлено пряму залежність між нормою азоту та ключовими структурними елементами. Варіанти 350 кг/га та 450 кг/га КАС забезпечили максимальні показники довжини качана, загальної кількості зерен та маси 1000 зерен порівняно з еталоном (Карбамід 150 кг/га) та нижчими нормами КАС.

2. Встановлено чітку позитивну кореляцію між нормою азоту та врожайністю. Найвищий показник урожайності (12,9 т/га) був досягнутий на варіантах КАС 350 кг/га та КАС 450 кг/га, що на 2,5 т/га перевищує показник еталону (карбамід 150 кг/га – 10,4 т/га). Збільшення норми азоту позитивно вплинуло на якісні показники, зокрема на вміст білка. При цьому, вміст крохмалю та олії демонстрував незначні варіації.

3. Найвища економічна ефективність (Рентабельність 43% та Чистий прибуток 73708 грн/га) досягнута на варіанті КАС 350 кг/га. Хоча варіант КАС 450 кг/га дав таку ж врожайність (12,9 т/га), чистий прибуток (71996 грн/га) нижчий через значне зростання витрат на добрива. Еталонний варіант (карбамід 150 кг/га) показав середню рентабельність (56%), підтверджуючи, що КАС у високих нормах є більш продуктивним добривом.

4. На основі отриманих даних, для досягнення максимальної агрономічної та економічної ефективності, виробникам кукурудзи в аналогічних умовах рекомендується застосовувати КАС у нормі 350 кг/га. Що дозволить

забезпечити оптимальний баланс між високою врожайністю та контролем виробничих витрат.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бабич А. О. Кукурудза: біологія, технологія вирощування, використання. — К.: Урожай, 2017. — 480 с.
2. Мельник І. П., Коваленко С. В. Технологія вирощування кукурудзи на зерно в умовах Лісостепу України. — К.: Аграрна наука, 2020. — 232 с.
3. Василенко О. В., Петренко П. С. Агрохімічні основи живлення сільськогосподарських культур. — Харків: ХНАУ, 2018. — 355 с.
4. ДСТУ 7368:2013. Добрива мінеральні. Терміни та визначення понять. — К.: Мінекономрозвитку України, 2013. — 28 с.
5. Літвінов Д. О. Вплив азотних добрив на продуктивність кукурудзи за різних умов зволоження. // Вісник аграрної науки. — 2019. — №3. — С. 44–49.
6. Кучеренко В. М. Технологічні прийоми вирощування кукурудзи на зерно в умовах центрального Лісостепу. — К.: НУБіП України, 2021. — 264 с.
7. Balboa, G. R., Ciampitti, I. A., et al. Revisiting maize nitrogen requirements: a meta-analysis. *Field Crops Research*, 2021, 267, 108157.
8. Hawkesford, M. J. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(3), 276–283.
9. Ciampitti, I. A., Vyn, T. J. A comprehensive nitrogen management approach for corn. *Agronomy Journal*, 2013, 105(3), 735–746.
10. FAO. *Precision Agriculture and Nitrogen Management*. — Rome: FAO, 2020. — 88 p.
11. Raun, W. R., Johnson, G. V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*, 1999, 91, 357–363.
12. Сидоренко О. П. Точне землеробство: сучасні технології внесення добрив. // Землеробство і рослинництво. — 2020. — №2. — С. 12–18.
13. Дьяків О. І., Тищенко Л. О. Агрохімічні аспекти живлення кукурудзи на зерно. — Суми: УАБС, 2019. — 144 с.
14. Труфанов О. М., Лазаренко В. І. Оптимізація азотного живлення кукурудзи на зерно. // Агрохімія і ґрунтознавство. — 2018. — №89. — С. 55–62.
15. Vetsch, J. A., Randall, G. W. Corn production as affected by nitrogen management and tillage. *Agronomy Journal*, 2004, 96, 502–509.
16. Mkhabela, M. S., et al. Use of remote sensing for crop nitrogen management. *Precision Agriculture*, 2011, 12, 575–593.
17. Robertson, G. P., Vitousek, P. M. Nitrogen in agriculture: balancing productivity and environmental costs. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34, 97–125.

- 18.Лень О. В., Кравченко І. П. Ефективність використання КАС для живлення кукурудзи. // *Агрохімія сьогодні*. — 2021. — №4. — С. 25–29.
- 19.Кардаш В. В. Оптимальні строки внесення азотних добрив під кукурудзу. // *Зернові культури*. — 2020. — №2. — С. 34–39.
- 20.Козак М. В. Технологічні аспекти використання КАС у системі удобрення кукурудзи. — К.: ІАЕ, 2019. — 120 с.
- 21.Hussain, S., et al. Precision nitrogen management in maize: a global review. *Soil Use and Management*, 2022, 38(1), 142–156.
- 22.Бабенко І. І. Агрохімічний моніторинг та оптимізація системи удобрення зернових культур. — К.: НУБіП України, 2018. — 212 с.
- 23.Stewart, W. M., Dobb, D. W., et al. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal*, 2005, 97, 1–6.
- 24.Соколовський А. А. Агроекологічні аспекти застосування добрив у сучасному землеробстві. — Львів: ЛНАУ, 2017. — 188 с.
- 25.Лавренко А. І., Синиця М. В. Продуктивність кукурудзи залежно від доз азоту та густоти стояння. // *Вісник аграрної науки*. — 2020. — №7. — С. 72–78.
- 26.Peng, S., et al. Nitrogen use efficiency in crop production: advances and challenges. *Field Crops Research*, 2011, 122, 91–98.
- 27.Li, S., et al. Spatial variability of soil nitrogen and its management in precision agriculture. *Precision Agriculture*, 2019, 20, 342–360.
- 28.Микитюк О. М. Використання сенсорних систем для контролю азотного живлення. // *Наукові праці НУБіП*. — 2021. — Т. 27. — С. 63–69.
- 29.Ткаченко В. С. Застосування диференційованого внесення добрив у точному землеробстві. — Полтава: ПДАА, 2022. — 180 с.
- 30.Dobermann, A. Nitrogen use efficiency: trends and challenges. *Annual Review of Plant Biology*, 2005, 56, 203–226.
- 31.Kravchenko, A. N., Bullock, D. G. Spatial variability of soil nitrogen and crop yield. *Agronomy Journal*, 2000, 92, 127–135.
- 32.Лихочвор В. В. Рослинництво з основами кормовиробництва. — Львів: НВФ «Українські технології», 2021. — 624 с.
- 33.Гаврилук О. В. Вплив азотних добрив на показники родючості ґрунту. // *Агрохімія і ґрунтознавство*. — 2018. — №87. — С. 41–48.
- 34.Sela, S., et al. Precision agriculture and nutrient management: new opportunities. *Agricultural Systems*, 2018, 163, 1–6.
- 35.Zhang, X., et al. Managing nitrogen for sustainable agriculture. *Nature*, 2015, 528, 51–59.

- 36.Лисенко В. А. Вплив форм азоту на врожайність кукурудзи. // *АгроСвіт*. — 2021. — №9. — С. 20–25.
37. Волошин П. П. Ефективність добрив у сівозмінах кукурудзи. — К.: Аграрна освіта, 2020. — 162 с.
38. Neffer, P. Assessment of fertilizer use by crop. *IFA Report*, 2019. — 72 p.
39. Ritchie, S. W., Hanway, J. J. How a corn plant develops. *Iowa State University*, 2019. — 40 p.
40. Гринь О. В. Вплив погодних факторів на ефективність азотного живлення кукурудзи. // *Аграрна наука і практика*. — 2022. — №2. — С. 88–93.
41. Lal, R. Soil degradation and nitrogen cycle. *Soil and Tillage Research*, 2021, 208, 104894.
42. Кузнєцова Л. В. Системи удобрення в сучасному землеробстві. — Харків: ХНАУ, 2020. — 240 с.
43. McBratney, A., et al. Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 2018, 19, 783–800.
44. Кравець Л. І., Гуменюк Н. І. Використання дистанційного зондування в агрохімічному моніторингу. — К.: Аграрна наука, 2021. — 136 с.
45. Ju, X. T., et al. Reducing nitrogen overuse in China. *Nature*, 2009, 475, 597–600.
46. Hammad, H. M., et al. Optimization of nitrogen fertilization for maize. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27, 23302–23313.
47. Янчук С. В., Лисак М. П. Вплив біопрепаратів на азотне живлення кукурудзи. // *Вісник Полтавської ДАА*. — 2021. — №3. — С. 56–62.
48. FAO. *The State of Food and Agriculture: Innovation in Agriculture*. — Rome: FAO, 2022. — 192 p.
49. Ситник Т. А. Оптимізація живлення кукурудзи з урахуванням сучасних технологій точного землеробства. — К.: НУБіП України, 2023. — 168 с.
50. International Plant Nutrition Institute (IPNI). *Nutrient stewardship and precision agriculture*. — Georgia, USA: IPNI, 2019. — 64 p.