

DOI: 10.32636/01308521.2026-(80)-1-5

**Оригінальна наукова стаття**

УДК 633.15:631.84[1+2]:631.95:771.735

**ВПЛИВ НОРМ УДОБРЕННЯ  
НА УРОЖАЙНІСТЬ ЗЕРНОВОЇ КУКУРУДЗИ  
ЗА ВИКОРИСТАННЯ СТАБІЛІЗАТОРІВ АЗОТУ  
НА ТЕМНО-СІРОМУ ОПІДЗОЛЕНОМУ ҐРУНТІ****П. С. Гнатів<sup>1</sup>, Ю. В. Піцик<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут сільського господарства  
Карпатського регіону НААН  
вул. Грушевського, 5, с. Оброшине,  
Львівський р-н., Львівська обл.,  
81115

<sup>2</sup>Львівський національний  
університет ветеринарної  
медицини та біотехнологій  
імені С. З. Гжицького  
вул. Пекарська, 50, м. Львів, 79010

**Про авторів:**

Петро ГНАТІВ,  
доктор біологічних наук  
ORCID: 0000-0003-2519-3235

Юрій ПІЦИК,  
аспірант  
ORCID: 0000-0003-0868-6716

**Для листування:**

Юрій ПІЦИК  
e-mail: pshnativ@ukr.net

**Інформація про фінансування:**

Національна академія  
аграрних наук України

Отримано:  
14 липня 2026 р.  
Погоджено до друку:  
11 вересня 2026 р.  
Опубліковано:  
30 вересня 2026 р.

Азотний цикл у ґрунті зумовлений бактеріями, археями, грибами та водоростями, які спричинюють перетворення азоту добрив у не завжди бажаному руслі й темпі. Тому віддача азотних дотацій для забезпечення врожаю сягає не більше 60–70 %. Решта азоту поглинається колоїдами, мікробіотою, але найбільша частина вивітрюється в атмосферу. Від неконтрольованої нітрифікації велика частка азотних солей потрапляє у підорні горизонти за межі ризосфери та у ґрунтові води. Наша мета – випробувати синтетичні стабілізатори азоту в ґрунті, що пригнічують розщеплення карбаміду та сповільнюють утворення нітратів з амонію добрив та органіки ґрунту. В умовах Західного Лісостепу на темно-сірому лісовому легкосуглинковому ґрунті досліджено, що внесення під зернову кукурудзу гібриду Pioneer P8834 простого карбаміду та карбаміду PULREA® + INu у поєднанні з інгібітором N-Lock™ сприяло істотному підвищенню врожаю зерна за збільшення норм від N<sub>90</sub> до N<sub>150</sub> на фоні N<sub>1,25</sub>P<sub>69,4</sub>K<sub>81,3</sub>Mg<sub>34</sub>S<sub>24,6</sub> (осіннє і припосівне внесення) та під впливом стабілізаторів азоту. Найвищий врожай у середньому за два роки зібрали за норми N<sub>150</sub> під культивування на фосфорно-калійному фоні у формі карбаміду PULREA® + INu та N-Lock™ – 16,4 т/га. Інгібітор уреазы NBPT у складі карбаміду сприяв підвищенню врожаю на 0,4 т/га, а нітрапирин – на 0,5 т/га порівняно з удобренням простим карбамідом за норми N<sub>150</sub>, що є статистично достовірною прибавкою (НІР<sub>05</sub> за 2024 р. становила 0,4 т/га, 2025 р. – 0,3 т/га). Статистичні і графічні моделі закономірностей показали, що норми внесення N<sub>0-1,25-90-120-150</sub> достовірно позитивно діють на рівень збагачення ґрунту поживними формами азоту, які тісно корелюють між собою (r = 0,84–0,98), а що найважливіше – достовірно позитивно впливають на рівень врожаю зерна кукурудзи з коефіцієнтом кореляції r = 0,79–0,96.

**Ключові слова:** карбамід, інгібітор уреазы, нітрапирин, легкогідролізний азот, амоній, врожай зерна, моделі зв'язків.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons.

**Effect of fertiliser application rates on grain maize yield using nitrogen stabilisers in a dark-grey podzolised soil**

<sup>1</sup>Institute of Agriculture of Carpathian Region of NAAS  
Hrushevskoho street, 5,  
Obroshyne village, Lviv district,  
Lviv region, 81115

<sup>2</sup>Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv  
Pekarska Street, 50, Lviv, 79010

**About authors:**

Petro HNATIV  
ORCID: 0000-0003-2519-3235

Yuriy PITSYK  
ORCID: 0009-0005-3633-9369

**Corresponding author:**  
Yuriy PITSYK  
e-mail: pshnativ@ukr.net

**Funding information:**  
National Academy  
of Agrarian Sciences of Ukraine

Received:  
July 14, 2026  
Accepted:  
September 11, 2026  
Published:  
September 30, 2026

The nitrogen cycle in soil is driven by bacteria, archaea, fungi, and algae, which mediate the transformation of fertiliser nitrogen in ways and at rates that are not always desirable. Consequently, the efficiency of nitrogen fertilisation in terms of crop yield does not exceed 60–70 %. The remaining nitrogen is absorbed by soil colloids and microbiota, while the largest proportion is lost to the atmosphere. As a result of uncontrolled nitrification, a substantial proportion of nitrogen salts enters the subsoil horizons beyond the rhizosphere and reaches groundwater. Therefore, our aim was to evaluate synthetic nitrogen stabilisers applied to soil that inhibit urea decomposition and slow down the formation of nitrates from ammonium derived from fertilisers and soil organic matter. Under the conditions of the Western Forest-Steppe, on a dark-grey forest light loamy soil, it was established that the application of conventional urea and PULREA® + INu urea in combination with the N-Lock™ inhibitor to Pioneer P8834 hybrid grain maize resulted in a significant increase in grain yield with increasing nitrogen rates from N<sub>90</sub> to N<sub>150</sub> on a background of N<sub>1,25</sub>P<sub>69,4</sub>K<sub>81,3</sub>Mg<sub>34</sub>S<sub>24,6</sub> (autumn and pre-sowing applications) under the influence of nitrogen stabilisers. The highest mean grain yield over the two-year study period, 16.4 t/ha, was obtained with the N<sub>150</sub> rate applied before cultivation on a phosphorus–potassium background in the form of PULREA® + INu urea combined with N-Lock™. The urease inhibitor NBPT incorporated into the urea increased grain yield by 0.4 t/ha, whereas nitrapyrin increased it by 0.5 t/ha compared with the application of conventional urea at the N<sub>150</sub> rate. This increase was statistically significant (LSD<sub>05</sub> = 0.4 t/ha in 2024 and 0.3 t/ha in 2025). Statistical and graphical models of the identified relationships demonstrated that the application rates N<sub>0-1,25-90-120-150</sub> had a statistically significant positive effect on the enrichment of soil with plant-available forms of nitrogen, which were closely correlated with one another (r = 0.84–0.98). Most importantly, these nitrogen application rates had a statistically significant positive effect on grain maize yield, with correlation coefficients ranging from r = 0.79–0.96.

**Keywords:** urea; urease inhibitor; nitrapyrin; easily hydrolysable nitrogen; ammonium; grain yield; correlation models.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons.

**Постановка проблеми.** Упродовж «зеленої революції» [17, 20] норми використання добрив та інтенсивність обробітків ґрунту у світі значно зросли, що підвищило врожайність зернової кукурудзи майже вдвічі. Вплив джерел азоту, форми і способи його внесення позначилися не лише на врожайності зерна кукурудзи [1, 3], а й на зростанні його втрат шляхом вивітрювання аміаку і закису азоту, вимивання нітратів у підґрунтя.

За узагальненням вчених [27], аграрне виробництво і тваринництво вносять майже 60 % від загального обсягу антропогенних викидів азоту у формі закису N<sub>2</sub>O. Вироблені азотовмісні добрива (особливо карбамід) є основними джерелами емісії закису азоту [8].

Процеси азотного циклу у ґрунті зумовлені бактеріями, археями, грибами та рослинами [18]. Мікробіом для різних типів ґрунту відрізняється і залежить від рослинного покриття та інших факторів,

таких як клімат [12, 22]. Нещодавне дослідження метагеномів за різних умов виявило, що певні мікробні угруповання, що визначають специфічні процеси азотного циклу, були значною мірою подібними в різних середовищах існування [14, 19].

Коли аміак потрапляє в ґрунт, він може або перетворитися на нітрит ( $\text{NO}_2^-$ ), а потім на нітрат ( $\text{NO}_3^-$ ) через процес нітрифікації (*Nitrosomonas spp.* та *Nitrosococcus spp.*) [9], або бути поглиненим та асимільованим рослинами чи мікроорганізмами [5]. Процес нітрифікації здійснюється вузьким колом родів, тоді як практично усі бактерії та археї можуть виконувати асиміляцію аміаку [24]. Оригінальні досліді Z. M. Chen et al. [23] та L. Cheng et al. [16] моделювали високий вміст  $\text{NH}_4^+$  у зоні удобрення, щоб з'ясувати біологічний механізм пригнічення нітрифікації за умови внесення у зону коренів високої концентрації карбаміду. Було розкрито механізм тривалої дії високої концентрації карбаміду і встановлено, що така концентрація діє як локальний інгібітор нітрифікації, створюючи високий вміст  $\text{NH}_4^+$  у ґрунті, який зменшує активність мікроорганізмів, що окиснюють аміак, тим самим пригнічуючи нітрифікацію.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дотепер випробувано велику кількість хімічних інгібіторів активності мікробіоти для зменшення викидів аміаку та вилуговування нітратів [6, 7, 13]. Інгібітори уреаз, що запобігають вивітрюванню аміаку, функціонують за принципом порушення здатності уреаз каталізувати гідроліз сечовини до аміаку, тим самим довше утримуючи азот у стабільній та нелеткій формі сечовини. На сьогодні лише кілька препаратів схвалено для використання в рільництві. N-(п-бутил)тіофосфорний триамід (NBPT) є одним з найефективніших відомих інгібіторів уреаз, і наразі він продається як стабілізуюча добавка для синтетичних добрив на основі сечовини [26].

Застосування інгібіторів уреаз та нітрифікації є ефективною стратегією зменшення втрат азоту без негативного впливу на врожайність. Проте довгостроковий вплив інгібіторів та внесення азоту на його динаміку залишається незрозумілим [15].

Причини недовикористання азоту культурами для формування максимальної продуктивності полягають у тому, що дотація азоту у формі поживних сполук відбувається не безпосередньо в рослину, як це відбувається у гідропонній культурі, коли ці поживні сполуки додаються в живильний стерильний розчин. Добрива, які потрапляють у ґрунт, відразу стають об'єктом мікробіологічних перетворень з використанням біофільних елементів у цілісній екосистемі, де на дефіцитний у природі азот, як і на фосфор та багато інших біогенних речовин, «претендують» численні мікроорганізми – природні компоненти цих екосистем.

Уникнення нецільового використання внесених дорогих добрив, деструкції стабілізованих ґрунтовим вбирним комплексом азотних сполук мікробіотою до летких форм (аміак  $\text{NH}_3$ , закис азоту  $\text{N}_2\text{O}$ , інертний азот  $\text{N}_2$ ) або до легкорозчинної нітратної форми – мета виробників за тенденції постійного дорожчання синтетичних хімічних добрив [8].

Інтеграція України у світову економічну та політичну спільноту передбачає імплементацію державою і дотримання аграріями жорстких вимог щодо запобігання забрудненню довкілля парниковими газами та охорони поверхневих вод [10]. У зоні достатнього зволоження Західного Лісостепу обсяги внесення азотних добрив і їх ефективність є високими, проте тенденція до збільшення норм удобрення зумовлює потребу в науково обґрунтованому запровадженні заходів щодо стабілізації азотних сполук у ґрунті та підвищення рівня їх ефективної асиміляції культурами для забезпечення максимальної віддачі з урожаєм [2].

Метою нашої роботи було обґрунтування оптимальних норм внесення

карбаміду на фосфорно-калійному фоні з використанням стабілізаторів азоту в ґрунті під зернову кукурудзу на темно-сірому опідзоленому ґрунті Західного Лісостепу.

**Матеріали і методи.** Основним об'єктом дослідження була система азотного мінерального удобрення зернової кукурудзи в умовах Західного Лісостепу з використанням інгібіторів уреаз та нітрифікації. Досліди організовано при кафедрі агрохімії та ґрунтознавства у Львівському національному університеті природокористування (нині ЛНУВМБТ ім. С. З. Гжицького) впродовж 2023–2026 рр. Дослідне поле, на якому на підставі угоди про філію кафедри велися трирічні дослідження, розташоване у с. Вирів у відділенні «Вирів» ТОВ «СІЕФДЖІ ТРЕЙДИНГ» на Буго-Стирській рівнині природно-кліматичної зони Західного Лісостепу (N 49°59'41"; E 24°33'28"). Ґрунт – темно-сірий лісовий слабодеградований легкосуглинковий на карбонатних лесоподібних суглинках.

Польові експерименти виконували за загальноприйнятими в агрономії методами, викладеними В. О. Єщенком та ін. [4]. Розмір посівної ділянки – 35 м<sup>2</sup>, облікової – 15 м<sup>2</sup>. Повторність варіантів чотириразова, розміщення ділянок – систематичне зі зміщенням.

Восени внесення мінеральних фосфорно-калійних добрив виконували механізовано під основний обробіток ґрунту агрегатом Gaspardo MASCHIO ARTIGLIO 400/9. Добрива: суперфосфат потрійний (P<sub>46</sub>), корн-калі (K<sub>40</sub> + Mg<sub>6</sub> + S<sub>5</sub>) та сульфат магнію гранульований (Mg<sub>22</sub> + S<sub>14,6</sub>) становили суцільний удобрення фон. Азотні добрива – карбамід звичайний та збагачений інгібітором NBPT (п-бутилтіофосфортриамід, препарат N-STAB) карбамід PULREA® + INu – внесли навесні під передпосівну культивування за допомогою ручного механічного розкидача фірми Solo за схемою досліду (табл. 1).

КАС-32 вносили як підживлення для кукурудзи у фазі 6–8 листків (BBCH 16-17) з міжрядною культивування (агрегатом

КРН-5.6, обладнаним системою внесення рідких добрив Record) на глибину 10–12 см. Інгібітор нітрифікації нітрапирин (2-хлор-6-(трихлорметил)піридин, препарат N-Lock™ Макс) у нормі 1,7 л/га вносили ранцевим обприскувачем під передпосівну культивування перед внесенням карбаміду. При сівбі восьмирядною сівалкою Challenger CH9200 (обладнаною системою Precision Planting + Keeton) у рядки було внесене стартове добриво у формі

РКД 5-20-5 у фізичній вазі 19,7 л/га, за винятком контрольного варіанту без добрив.

Перед початком досліджень згідно з програмою робіт відбір зразків ґрунту виконували польовим буром БП-25-15 з кожного варіанта на глибину 0–20 см (для аналізу нітратів – пробовідбірником ґрунту L-170 на визначених варіантах: 0–20, 20–40, 40–60 см) згідно з методикою ДСТУ 4287:2004. Кількість відборів становила 5–6 уколів за маршрутом «зигзаг», що охоплював усю площу варіанта. Ґрунт, за винятком зразків на нітрати, висушували до повітряно-сухого стану, просіювали та подрібнювали згідно з ДСТУ ISO 11464:2007.

Стартова агрохімічна характеристика дослідного поля така: у шарі ґрунту 0–20 см вміст гумусу за ДСТУ 4289:2004 становить 3,11 %, гідролітична кислотність за ДСТУ 7537:2014 – 2,38 ммоль/100 г, актуальна кислотність (pH<sub>KCl</sub>) за ДСТУ ISO 10390:2007 – 5,8, вміст рухомого фосфору (за Чириковим) за ДСТУ 4405:2005 – 97 мг/кг, обмінного калію – 113 мг/кг ґрунту, легкогідролізованого азоту за ДСТУ 7863:2015 – 103 мг/кг ґрунту.

Вміст амонійного азоту визначали за ДСТУ 4729:2007. Лабораторні дослідження виконали на базі філії кафедри агрохімії та ґрунтознавства ЛНУВМБТ при Інституті сільського господарства Карпатського регіону НААН, окремі аналізи – у Сервісно-аналітичному центрі (атестат акредитації № 202141 від 25.11.2022) ТОВ «УКРАВІТ САЙЕНС ПАРК» (ВСП «Інститут здоров'я рослин») стандартними методами.

Агротехніка вирощування кукурудзи – традиційна. Для сівби використовували гібрид Pioneer P8834 з нормою висіву 78 тис./га. Попередник – озима пшениця. Математико-статистичну обробку та графічне моделювання результатів досліджень і даних урожайності здійснювали класичними методами з використанням програм Microsoft Excel та Statistica 12.0.

**Результати та обговорення.** Умови вегетаційного періоду 2024 р. для зернової кукурудзи за даними найближчого метеопоста (002093F9, Велике Колодно, iMetos 3.3) відрізнялися від показників

наступного, 2025 р. Сівбу 2024 р. провели 30 квітня, 2025 р. – на 8 діб раніше. Перший рік досліджень відрізнявся вагомо вищими середньомісячними температурами, за винятком січня, листопада та грудня. Середня температура 2024 р. – 11,04 °С, вегетаційного періоду (квітень-жовтень) – 16,8 °С. 2025 рік відрізнявся істотно холоднішими квітнем і, особливо, травнем, коли середня температура місяця становила 10,1 °С, що на 4,4 °С менше за кліматичну норму. Середня температура 2025 р. – 10,5 °С, вегетаційного періоду (квітень-жовтень) – 15,4 °С.

### 1. Схема польового експерименту

| № вар. | Норми удобрення                                                                                                | Простий карбамід або карбамід PULREA® + INu та N-Lock™ |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1      | Без добрив (К)                                                                                                 | –                                                      |
| 2      | Фон – (N <sub>1,25</sub> P <sub>69,4</sub> K <sub>81,3</sub> Mg <sub>34</sub> S <sub>24,6</sub> ) <sup>1</sup> | –                                                      |
| 3      | Фон + N <sub>90</sub> <sup>2</sup>                                                                             | –                                                      |
| 4      | Фон + N <sub>90</sub>                                                                                          | PULREA® + INu                                          |
| 5      | Фон + N <sub>90</sub>                                                                                          | N-Lock™                                                |
| 6      | Фон + N <sub>120</sub>                                                                                         | –                                                      |
| 7      | Фон + N <sub>120</sub>                                                                                         | PULREA® + INu                                          |
| 8      | Фон + N <sub>120</sub>                                                                                         | N-Lock™                                                |
| 9      | Фон + N <sub>120</sub>                                                                                         | PULREA®+INu + N-Lock™                                  |
| 10     | Фон + N <sub>150</sub>                                                                                         | –                                                      |
| 11     | Фон + N <sub>150</sub>                                                                                         | PULREA® + INu                                          |
| 12     | Фон + N <sub>150</sub>                                                                                         | N-Lock™                                                |
| 13     | Фон + N <sub>150</sub>                                                                                         | PULREA® + INu + N-Lock™                                |
| 14     | Фон + N <sub>150</sub> (N <sub>80</sub> + N <sub>70</sub> ) <sup>3</sup>                                       | –                                                      |
| 15     | Фон + N <sub>150</sub> (N <sub>80</sub> + N <sub>70</sub> ) <sup>3</sup>                                       | PULREA® + INu                                          |
| 16     | Фон + N <sub>150</sub> (N <sub>80</sub> + N <sub>70</sub> ) <sup>3</sup>                                       | N-Lock™                                                |
| 17     | Фон + N <sub>150</sub> (N <sub>80</sub> + N <sub>70</sub> ) <sup>3</sup>                                       | PULREA® + INu + N-Lock™                                |

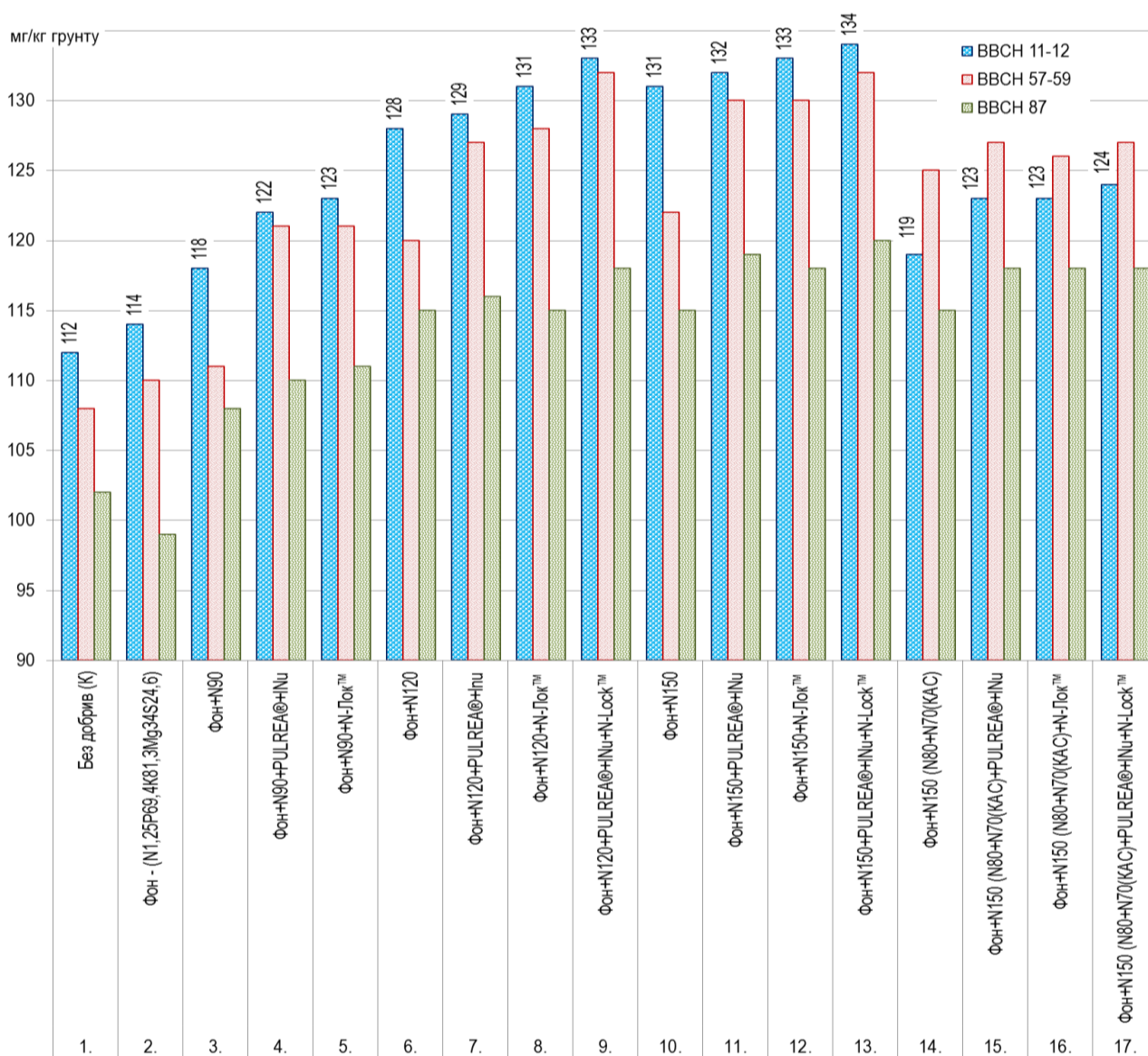
Примітка. <sup>1</sup>Сумарні норми поживних елементів фонового удобрення; <sup>2</sup>N<sub>90-150</sub> – під передпосівну культивуацію; <sup>3</sup>N<sub>70</sub> – у підживлення у формі КАС вносили у фазі 6–8 листків (BBCH 16-17) з міжрядною культивуацією N, кг/га.

Динаміка зростання середніх температур вегетаційного періоду 2024 р. практично повторювала хід багаторічних показників, створюючи додатковий стабільний тепловий ресурс для росту і розвитку кукурудзи. Проте цей рік вирощування культури відзначався вкрай нерівномірними опадами: відносно сухим травнем (16 мм), перезволоженим червнем (96 мм) та критично посушливим липнем

(3 мм). За 2024 рік випало 415 мм опадів, зокрема за вегетаційний період – 347 мм при нормі 487 мм. Упродовж 2025 р. випало 505 мм, із них за квітень-жовтень – 340 мм. Попри це, для кукурудзи, що не є чутливою до короткочасного дефіциту вологи, пріоритетним виявився більший ресурс літнього тепла 2024 р. Дія стабілізаторів мікробної активності, як і ефективність внесених мінеральних добрив, значною

мірою залежить від теплового та вологого режиму ґрунту. Кукурудза потребує для утворення однієї тонни зерна 25–30 кг азоту з ґрунту. Тому ми досліджували діапазон норм азотного удобрення  $N_{90-120-150}$  з урахуванням високої природної родючості ґрунту та гіпотетичної дії стабілізаторів перетворення азотистих сполук мікробіотою, які можуть запобігти втратам продуктів її азотного метаболізму через випаровування та вимивання.

Відштовхуючись від природного вмісту легкогідролізного азоту, вже мінімальне внесення мінеральних добрив сприяло підвищенню його запасів в орному пласті ґрунту у фазі перших листків і у фазі появи волоті. На першому рівні азотного удобрення  $N_{90}$  (вар. 3, див. табл. 1) спостерігаємо збільшення концентрації легкогідролізного азоту на 6 мг/кг ґрунту порівняно з неудобреними ділянками (рис. 1).

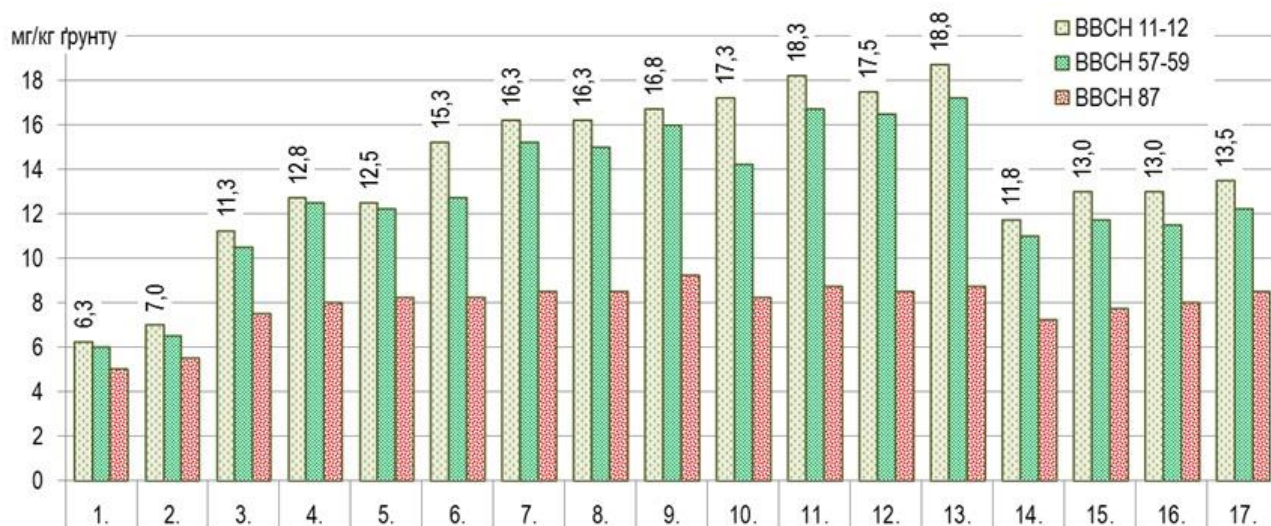


**Рис. 1.** Вплив норм азотних добрив та дії інгібіторів мікробної діяльності на вміст легкогідролізованого азоту в орному (0–20 см) шарі ґрунту, мг/кг ґрунту (BBCH 11-12 – перший справжній листок; BBCH 57-59 – повна поява волоті; BBCH 87 – повна фізіологічна стиглість) ( $p < 0,05$ )

Внесення карбаміду з інгібітором уреазі підвищило ресурс легкогідролізного азоту в орному пласті ще на 4 мг/кг. Особливо важливо зауважити, що інгібітор уреазі (вар. 1), як і інгібітор нітрифікації (вар. 5), дозволив утримувати концентрацію доступного азоту до критичної фази викиду волоті, коли кукурудза найбільше асимілює цей елемент. Позитивний вплив обох інгібіторів після сівби на наступному рівні удобрення  $N_{120}$  дозволив не лише збільшити стартовий пул легкодоступного азоту, а й утримувати його високим до викиду волоті. Але максимуму вдалося досягти за поєднаного застосування інгібіторів уреазі та нітрифікації (вар. 9). Навіть наступний рівень норми азотного удобрення кукурудзи  $N_{150}$  (вар. 10) не забезпечив такої високої концентрації легкогідролізного азоту аж до фази викиду волоті. Незважаючи на дещо менший вплив інгібіторів, їхня позитивна дія, особливо у поєднанні, підтвердилася (вар. 13).

Розділення норми азоту на дві дози (вар. 14–17): припосівне внесення та прикореневе підживлення КАС не дало

вагомого зростання ресурсу легкогідролізного азоту на старті, але істотно підвищило його концентрацію у фазі викиду волоті. Вплив інгібіторів був менш вираженим. Починаючи від мінімальної норми азоту  $N_{90}$ , спостерігаємо підтримання запасів його легкогідролізної форми на вищому, ніж у неудобреному контролі, рівні до фази стиглості зерна, а інгібітори мікробної активності сприяють збереженню родючості ґрунту. Вивітрювання аміаку від мікробного розкладання сечовини – вкрай небажаний процес, який не лише небезпечний для довкілля, а й збитковий при застосуванні азотних добрив. Інгібітор уреазі, що присутній у карбаміді PULREA® + INu (вар. 4, 7, 11 і 15), зменшував вивітрювання аміаку на старті вегетації на 12; 7; 6 і 10 % (рис. 2). Поєднання його з нітрапірином ще додатково заощаджувало аміак карбаміду в орному шарі. У фазі викиду волоті дія інгібіторів тривала і сприяла його найвищому вмісту 6,9 мг/кг ґрунту, зокрема, на варіанті 13 – фон +  $N_{150}$  PULREA® + INu + N-Lock™.



**Рис. 2.** Вплив норм азотного удобрення та дії інгібіторів уреазі й нітрифікації на вміст амонійного азоту в орному (0–20 см) шарі ґрунту, мг/кг ґрунту (BBCH 11-12 – перший листок; BBCH 57-59 – повна поява волоті; BBCH 87 фізіологічна стиглість) ( $p < 0,05$ ) (варіанти відповідають нумерації, показаній у табл. 1 і на рис. 1)

Ґрунтові процеси амоніфікації та нітрифікації – інтегральна екологічна

функція агроєкосистем удобреного поля. Тому важливим є з'ясування зв'язків між

закономірностями перетворення азотних сполук, привнесених із добривами, у природних умовах погоди та властивостей ґрунту. Таблиця кореляцій (табл. 2) досліджених змінних показує, що, оскільки вибірка була достатньо великою ( $n = 17$ ), мінімальний достовірний ( $p < 0,05$ ) коефіцієнт кореляції становить  $r = 0,50$ . Усі

достовірні зв'язки показників мали позитивний прямий характер.

Збільшення кількості доступних форм азоту в орному шарі (рис. 3), спричинене внесенням азотних добрив, описується цим зв'язком у вигляді лінійної регресії, де коефіцієнти кореляції є високими (у фазі першого листка  $r = 0,72$  на глибині 0–20 см).

## 2. Матриця парних кореляцій між показниками вмісту різних форм азоту в ґрунті у фазі першого листочка, викиду волоті, дозрівання зерна та рівнем урожаю кукурудзи зернової, $\pm r$ ( $n = 17$ )

| Показники                         |            | N <sub>легкогідр.</sub> – 0–20 см |            |         | N <sub>ам.</sub> – 0–20 см |            |         |
|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|---------|----------------------------|------------|---------|
|                                   |            | ВВСН 11-12                        | ВВСН 57-59 | ВВСН 87 | ВВСН 11-12                 | ВВСН 57-59 | ВВСН 87 |
| N <sub>легкогідр.</sub> – 0–20 см | ВВСН 57-59 | 0,84                              | X          | –       | –                          | –          | –       |
|                                   | ВВСН 87    | 0,81                              | 0,93       | X       | –                          | –          | –       |
| N <sub>ам.</sub> – 0–20 см        | ВВСН 11-12 | 0,98                              | 0,84       | 0,85    | X                          | –          | –       |
|                                   | ВВСН 57-59 | 0,97                              | 0,87       | 0,83    | 0,98                       | X          | –       |
|                                   | ВВСН 87    | 0,88                              | 0,85       | 0,87    | 0,91                       | 0,92       | X       |
| Урожай 2024 р.                    |            | 0,79                              | 0,91       | 0,96    | 0,86                       | 0,84       | 0,90    |

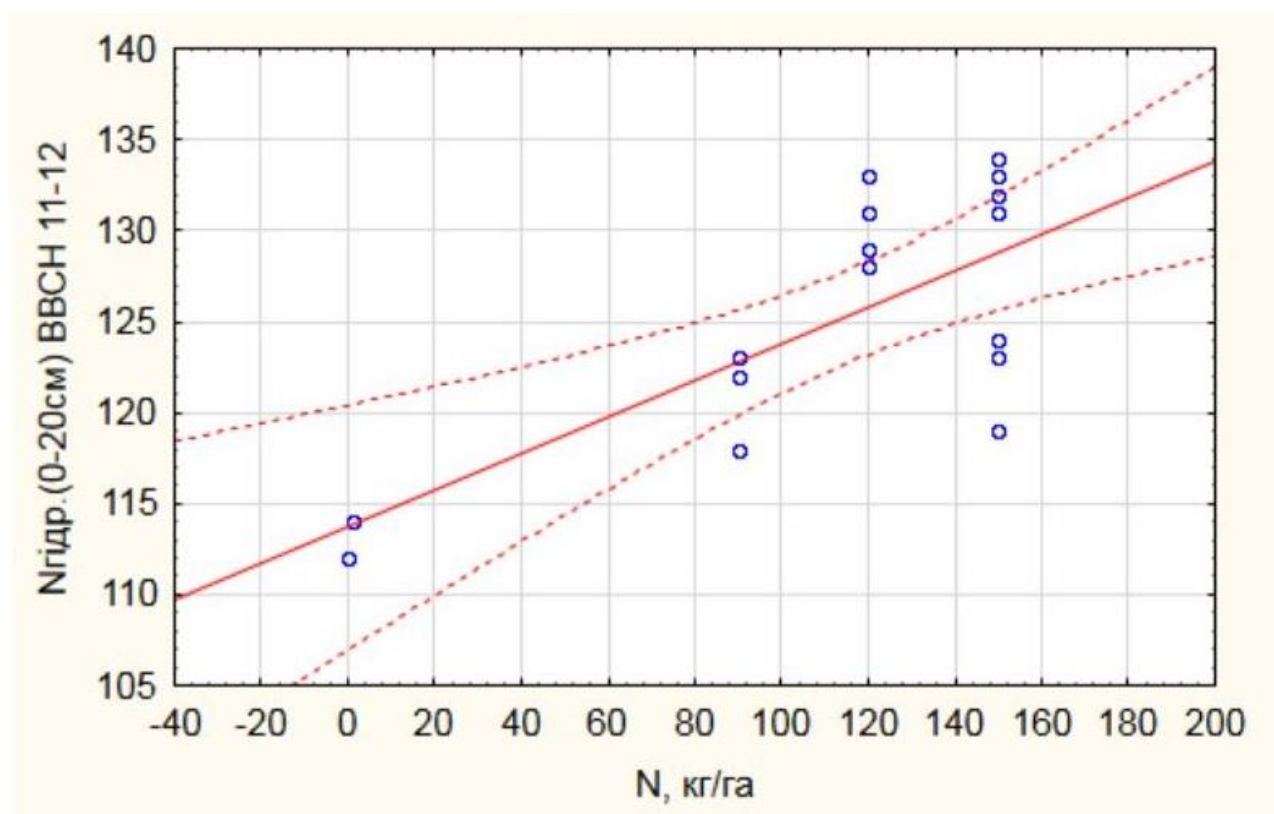
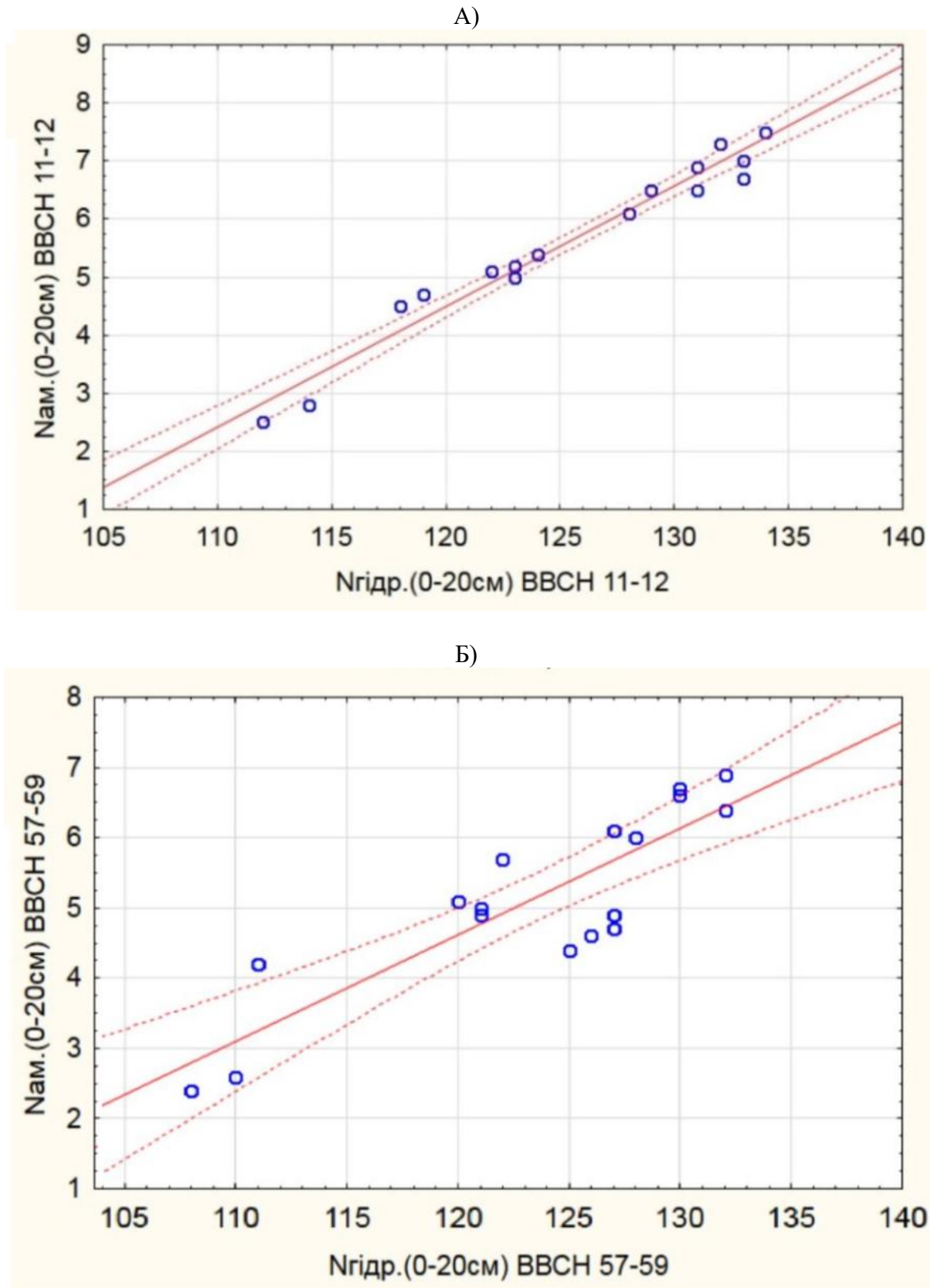


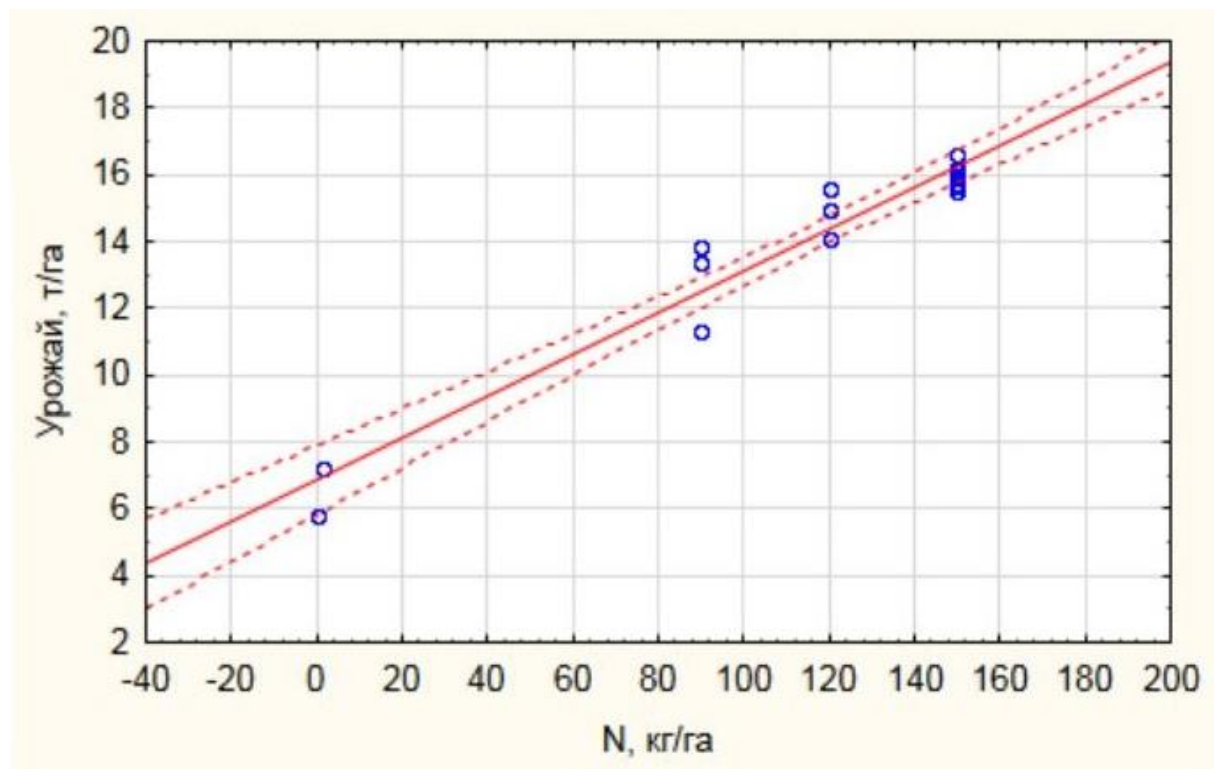
Рис. 3. Регресія вмісту легкогідролізного азоту в орному шарі ґрунту у фазах першого справжнього листка (ВВСН 11-12) та викидання волоті у кукурудзи під впливом збільшення норм азотних добрив  $N_{0-1,2-90-120-150}$



**Рис. 4. Регресія вмісту амонію в орному шарі ґрунту у фазі першого справжнього листка (А:  $r = 0,98$ , BVCH 11-12) та у фазі викидання волоті кукурудзи (Б:  $r = 0,87$ , BVCH 57-59) під впливом запасу легкогідролізного азоту**

Підвищення вмісту легкогідролізного азоту в ґрунті завдяки збільшенню норм внесення азотних добрив  $N_{0-1,2-90-120-150}$  дуже позитивно відображається на концентрації амонійного азоту як на початку вегетації (рис. 4 А), так і у фазі викидання волоті (рис. 4 Б). Лінійна кореляція з коефіцієнтом  $r = 0,98$  підтверджує дуже сильну залежність показників амонійного та легкогідролізного азоту, яка залишається

тісною до фази викидання волоті ( $r = 0,87$ ). Лінійна кореляція з коефіцієнтом  $r = 0,97$  підтверджує дуже сильну залежність продуктивності культури від підвищення норм внесення карбаміду. Урожай, своєю чергою, залежить від запасу легкогідролісної форми азоту як у ранню фазу вегетації (рис. 6 А –  $r = 0,79$ ), так і в критичну (рис. 6 Б –  $r = 0,91$ ).



**Рис. 5. Регресія урожайності зерна кукурудзи 2024 р. залежно від збільшення норми внесення з добривами азоту  $N_{0-1,2-90-120-150}$  ( $r = 0,97$ )**

Створення графічних 3D-моделей регресії за допомогою Statistica 12.0 на підставі тісних парних зв'язків та реалізація математичних поліноміальних рівнянь дають уявлення про синергію впливів двох важливих факторів врожаю.

Теоретична площа динаміки врожаю під впливом удобрення та живлення показує, що навіть за менших норм внесення карбаміду наявність у ґрунті достатнього ресурсу легкогідролізного азоту гарантує 15–16 т зерна за умови дотримання технологічної дисципліни. Такого позитивного ефекту, ймовірно, досягнуто завдяки стабілізаційній дії

інгібіторів уреазної та нітрифікаційної активності мікробіоти.

Лінійне рівняння множинної регресії (1) демонструє прямий вплив обох факторів на врожайність:

$$\text{Урожай, т/га} = -3,7519 + 0,0529x + 0,0936y, \quad (1)$$

де:

$x$  – норма внесення азоту, кг/га;

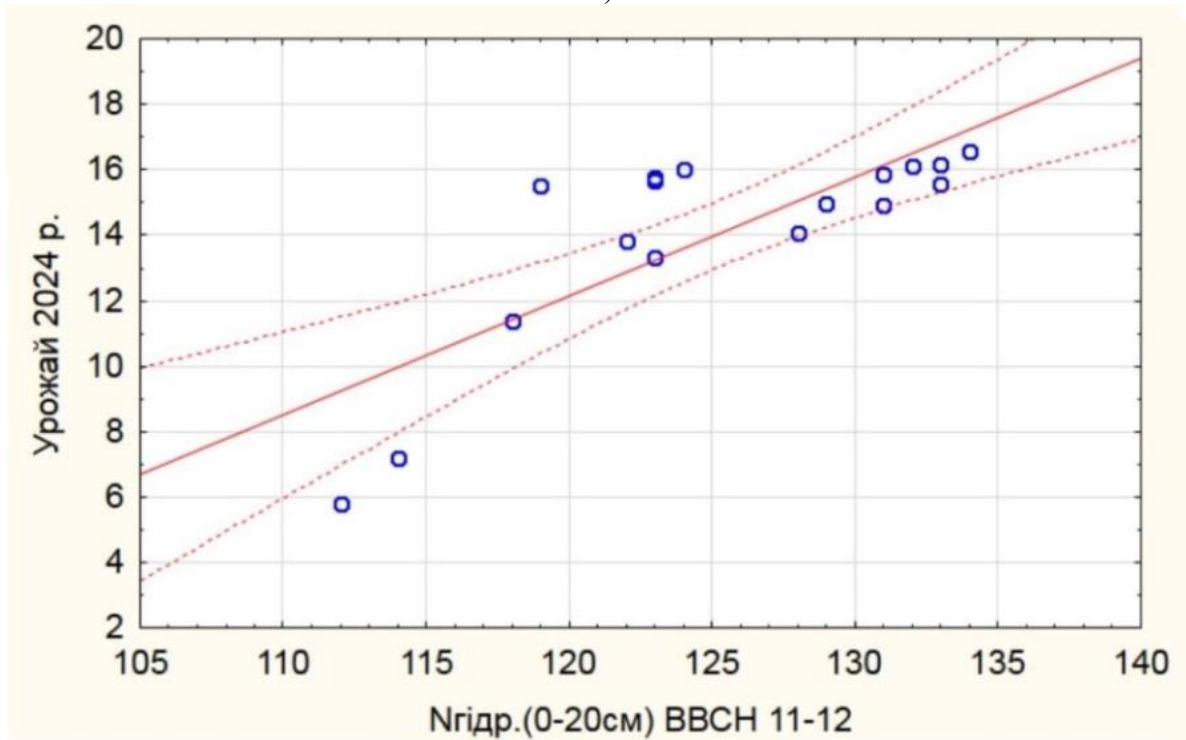
$y$  – вміст легкогідролізного азоту в ґрунті, мг/кг.

Коефіцієнт 0,0529 свідчить про те, що за збільшення норми внесення азоту на 1 кг/га врожайність зростатиме в середньому на 0,0529 т/га. Коефіцієнт 0,0936 означає, що збільшення вмісту

легкогідролізного азоту в ґрунті на 1 мг/кг забезпечує приріст урожайності приблизно на 0,0936 т/га. Поверхня відгуку демонструє сумісний вплив на врожайність

норми внесення азоту (кг/га) та вмісту легкогідролізного азоту в ґрунті (мг/кг) у фазі першого листка.

А)



Б)

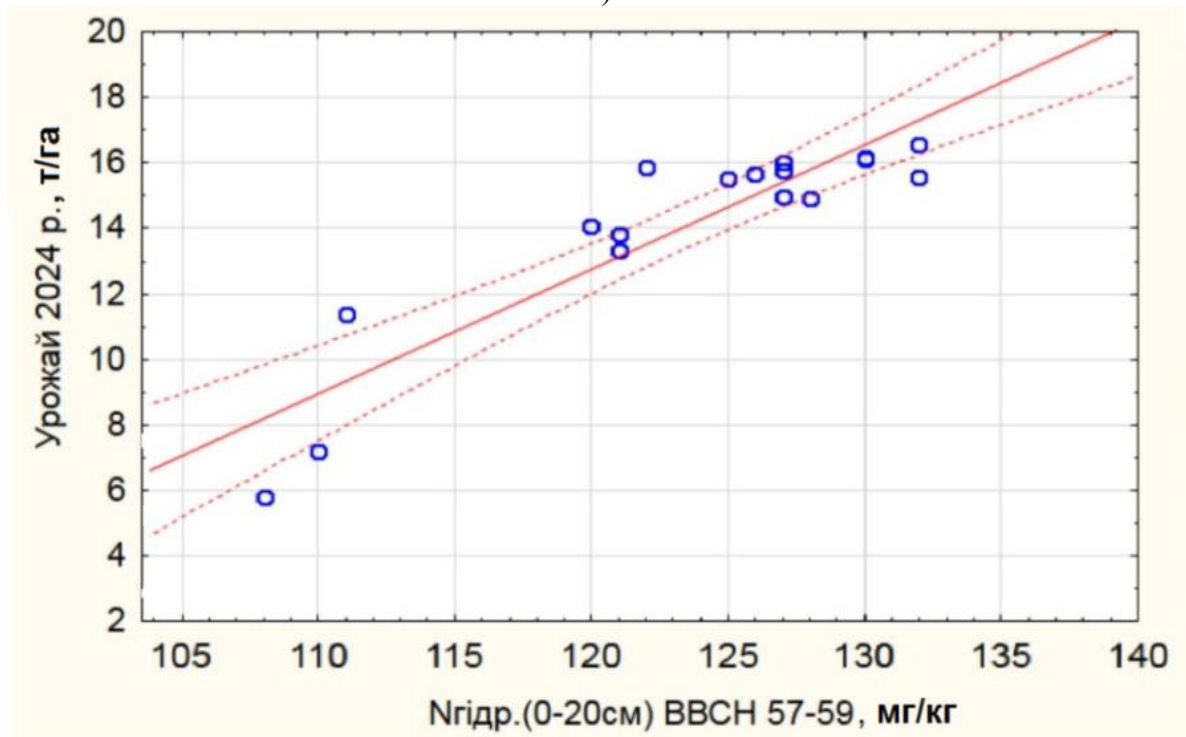


Рис. 6. Залежність урожаю зерна кукурудзи від вмісту легкогідролізного азоту в орному шарі ґрунту у фазі появи першого листка (А:  $r = 0,79$ , BVCH 11–12) та у фазі викидання волоті (Б:  $r = 0,91$ , BVCH 57–59)

Близьке розташування точок реальних даних до регресійної площини свідчить про достатньо високу відповідність моделі експериментальним результатам. Зі збільшенням норми внесення азоту урожайність поступово підвищується. Максимальні значення досягаються за поєднання високих норм азоту (150 кг/га) та вмісту легкогідролізного азоту в ґрунті (130–135 мг/кг). Отже, площина регресії демонструє позитивний лінійний вплив як норми внесення азоту, так і вмісту легкогідролізного азоту в ґрунті у фазі

першого листка на формування врожайності.

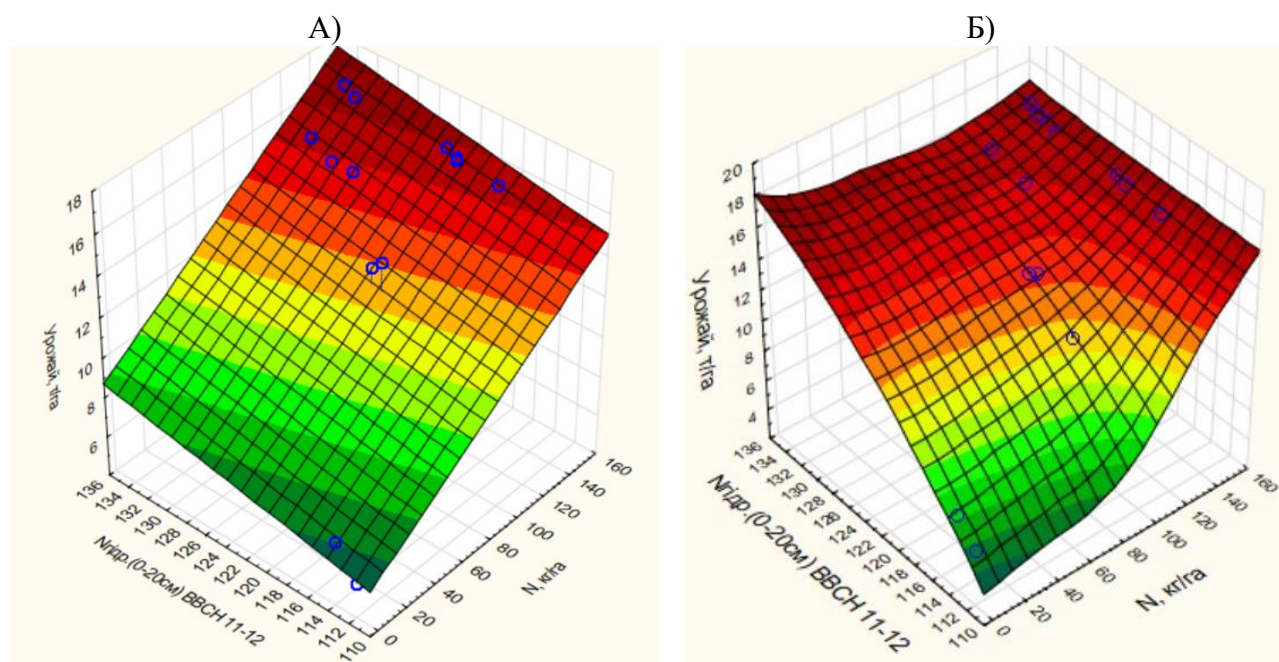
На рисунку 7А наведено тривимірну регресійну модель, яка описує лінійний вплив норми внесення азоту та вмісту легкогідролізного азоту в шарі ґрунту 0–20 см у фазі першого листка. Рівняння регресії (2) має вигляд:

$$\text{Урожай, т/га} = 5,241 + 0,0504x + 0,5886y, (2)$$

де:

$x$  – норма внесення азоту, кг/га;

$y$  – вміст легкогідролізного азоту в шарі ґрунту 0–20 см, мг/кг.



**Рис. 7. Теоретичні площини нелінійної (А) та лінійної (Б) регресії врожаю залежно від норм удобрення та показників вмісту легкогідролізного азоту у фазі першого листка в темно-сірому опідзоленому ґрунті за різних систем удобрення кукурудзи**

Коефіцієнт 0,0504 показує, що збільшення норми внесення азоту на 1 кг/га забезпечує приріст урожайності в середньому на 0,0504 т/га. Коефіцієнт 0,5886 свідчить, що підвищення вмісту нітратного азоту в орному шарі ґрунту на 1 мг/кг супроводжується збільшенням урожайності приблизно на 0,5886 т/га. Значно більша величина цього коефіцієнта порівняно з коефіцієнтом при нормі внесення азоту свідчить про те, що

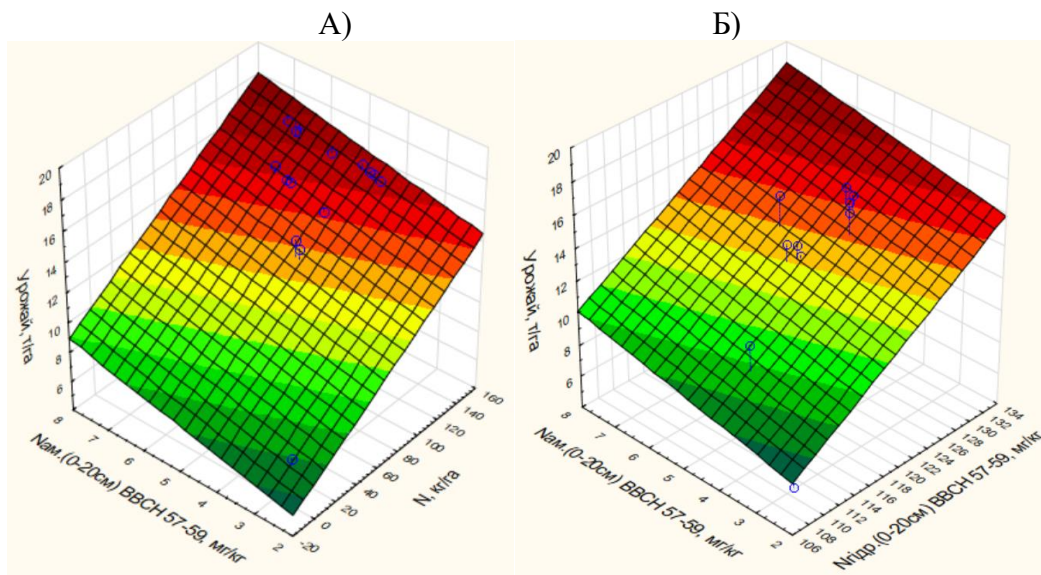
забезпеченість ґрунту амонійним азотом є вагомим фактором формування врожаю.

Нелінійна регресія є точнішою, і рисунок 7Б показує, що залежність врожаю від синергії двох факторів має геометричний характер.

Поверхня регресії на рисунку 8 ілюструє спільний вплив досліджуваних факторів на урожайність по осі Z. Вісь X відображає норму внесення азоту (N, кг/га), вісь Y характеризує вміст амонійного азоту у шарі ґрунту 0–20 см

(мг/кг) у фазі викидання волоті. З графіка видно, що найвищі значення урожайності досягаються за поєднання високої норми внесення азоту (150 кг/га) та високого вмісту амонійного азоту (8–9 мг/кг). На

рисунку регресійна модель описує залежність урожайності від вмісту легкогідролізованого азоту у шарі ґрунту 0–20 см та вмісту амонійного азоту в шарі ґрунту 0–20 см у фазу викидання волоті.



**Рис. 8. Теоретичні площини регресії врожаю залежно від норм удобрення (А) та показників вмісту легкогідролізованого азоту (Б) й амонійного азоту у фазі викиду волоті в темно-сірому опідзоленому ґрунті за різних систем удобрення кукурудзи**

Рівняння регресії (3) має вигляд:

$$\text{Урожай, т/га} = -26,302 + 0,307x + 0,4828y, \quad (3)$$

де:

$x$  – вміст легкогідролізованого азоту в шарі ґрунту 0–20 см у фазі BBCH 57–59, мг/кг;

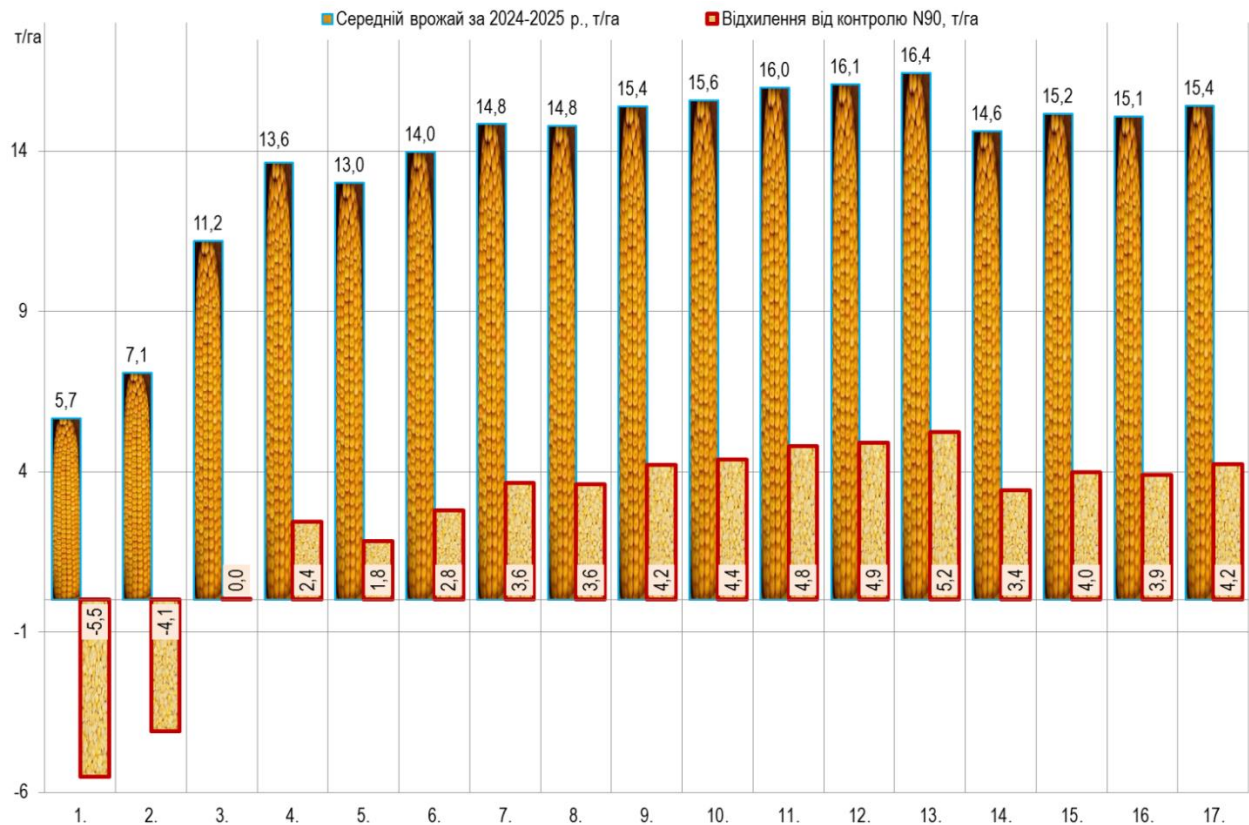
$y$  – вміст амонійного азоту в шарі ґрунту 0–20 см, мг/кг.

Коефіцієнт 0,307 свідчить, що зі збільшенням вмісту легкогідролізованого азоту у фазі BBCH 57–59 на 1 мг/кг урожайність підвищується в середньому на 0,307 т/га за незмінного значення другого фактора. Коефіцієнт 0,4828 показує, що збільшення вмісту амонійного азоту в орному шарі ґрунту на 1 мг/кг забезпечує приріст урожайності приблизно на 0,4828 т/га, якщо інший фактор залишається сталим.

Площина регресії відображає спільний вплив двох показників вмісту доступного азоту у фазі викидання волоті на врожайність.

Урожай зерна кукурудзи гібриду Pioneer P8834 2024 р. сформувався в кращих погодних умовах і сягав 5,8 т/га на варіанті без добрив. У 2025 р. неудобрені ділянки забезпечили 5,6 т/га зерна. На контролі без добрив врожай кукурудзи в середньому за два роки (рис. 9) становив 5,7 т/га, що підтверджує високу родючість ґрунту дослідного поля і потужний потенціал гібрида.

Фосфорно-калійний фон і рядкове удобрення під час сівби  $N_{1,25}P_{69,4}K_{81,3}Mg_{34}S_{24,6}$  позитивно вплинули на середній урожай. Прибавка становила 1,4 т/га. Внесення всієї норми  $N_{90}$  під передпосівну культивування додало ще 4,1 т/га зерна, але більшу на 2,4 т/га прибавку забезпечило використання карбаміду PULREA® + INu, що становило в підсумку 13,6 т/га в середньому за два роки. За внесення простого карбаміду з наступним обприскуванням ґрунту нітрапірином (N-Lock™) врожай був на 0,6 т/га меншим.



**Рис. 9.** Вплив систем регулювання азотного живлення кукурудзи мінеральним добривом і стабілізаторами мікробної активності в ґрунті на відхилення урожаю зерна відносно норми удобрення  $N_{90}$  без використання інгібіторів (варіанти відповідають нумерації, показаній в табл. 1) (НІР<sub>0,5</sub> абс. (т/га)/відн. (%) 2024 р. – 0,4/3,05; 2025 р. – 0,3/2,90)

Збільшення норми азотного добрива до  $N_{120}$  (вар. 6) не дало стрімкого підвищення врожаю, але застосування карбаміду з інгібітором уреазі забезпечило його середній рівень 14,8 т/га. Поєднання звичайного карбаміду з нітрапірином забезпечило рівний результат. Проте на нормі  $N_{120}$  спостерігаємо синергійну позитивну дію поєднання карбаміду з інгібітором уреазі та додатковим внесенням нітрапірину під передпосівну культивування (вар. 9). Отримано врожай 15,4 т/га, що лише на 0,2 т/га нижче за врожай при збільшенні норми внесення азоту до  $N_{150}$  (15,6 т/га). На найвищому фоні живлення поєднання інгібіторів уреазі та нітрифікації забезпечило найвищий у середньому за два роки врожай 16,4 т/га з достовірною прибавкою (НІР<sub>0,5</sub> = 0,43–3,05 т/га). У більш сприятливому 2024 р. інгібітори сприяли максимальній врожайності як окремо, так і

в поєднанні, де досягнуто рівня 16,6 т/га зерна. Поділ норми азоту на дві дози з метою підживлення КАС під час міжрядної культивування не дав значного позитивного ефекту. Але у більш сприятливому для внесення КАС 2025 р. стабілізація азоту відразу обома інгібіторами на фоні  $N_{150}$  ( $N_{80}$  навесні +  $N_{70}$  у підживлення у фазі 6–8 листків) із застосуванням КАС + PULREA® + INu + N-Lock™ забезпечила 16,0 т зерна з гектара з прибавкою відносно  $N_{90}$  у 4,6 т/га. Спільне застосування інгібіторів уреазі та інгібіторів нітрифікації (часто званих «подвійними інгібіторами» [11]) значно покращує запаси азоту в ґрунті. У той час як інгібітори уреазі затримують гідроліз сечовини [21], інгібітори нітрифікації запобігають перетворенню амонію на високомобільні нітрати. Разом вони подовжують доступність азоту, зменшують вимивання та газоподібні

викиди, а також збільшують поглинання рослинами. Поєднання обох інгібіторів може зменшити загальне вимивання азоту на 20–45 % та зменшити викиди

**Висновки.** Внесення під зернову кукурудзу гібриду Pioneer P8834 на темно-сірому лісовому слабодegradованому легкосуглинковому ґрунті на карбонатних лесоподібних суглинках Західного Лісостепу азотних добрив у формі карбаміду та карбаміду з інгібітором уреаз у поєднанні зі стабілізатором нітрифікації сприяло істотному підвищенню врожаю зерна як від збільшення норм азоту від  $N_{90}$  до  $N_{150}$  на фоні  $N_{1,25}P_{69,4}K_{81,3}Mg_{34}S_{24,6}$  (осіннє і припосівне внесення), так і під впливом стабілізаторів азоту. Найвищий врожай у середньому за 2024–2025 рр. отримано за внесення  $N_{150}$  під передпосівну культивування на осінньому фосфорно-калійному фоні у формі карбаміду PULREA® + INu та N-Lock™ – 16,4 т/га. Інгібітор уреазы NBPT у складі карбаміду сприяв збільшенню врожаю на 0,4 т/га, а інгібітор нітрифікації нітрапирин – на 0,5 т/га порівняно з удобренням простим карбамідом у розрахунку  $N_{150}$ , що є статистично достовірною прибавкою ( $HP_{0,05}$  за 2024 р. становила 0,4 т/га, 2025 р. – 0,3 т/га).

#### Список використаної літератури

1. Дегодюк Е. Г., Дегодюк С. Е., Гуральчук С. З. Трансформація біосферних функцій педосфери у процесах кругообігу біогенних елементів в антропогенно порушених фітоценозах. *Живлення рослин: теорія і практика*. Київ : Логос, 2005. С. 14–43.
2. Іванюк В., Гнатів П., Оліфір Ю. Вплив азотних добрив на формування врожаю зерна кукурудзи й ефективність використання азоту. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Агрономія*. 2022. № 26. С. 170–176. <https://doi.org/10.31734/agronomy2022.26.170>.
3. Лихочвор В. В., Шинкарук Л. М. Фотосинтетичні показники рослин кукурудзи залежно від елементів удобрення. *Кліматичні зміни та сільське господарство. Виклики для аграрної науки та освіти* : зб. тез IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, квітень 2021 р.). Київ : Науковометодичний центр ВФПО, 2021. С. 95–97.

газоподібного закису азоту ( $N_2O$ ) більш ніж на 50 % порівняно з використанням неінгібованої сечовини або застосуванням одного інгібітора [8].

Норма внесення азоту під кукурудзу  $N_{150}$  є найефективнішою, особливо у поєднанні зі стабілізаторами азоту, а поділ її на передпосівне внесення у формі карбаміду  $N_{80}$  та міжрядне підживлення у фазі 6–8 листків КАС-32 є ризикованим, оскільки 2024 р. була посушлива погода, що призвело до вагомого зниження врожаю зерна.

Стабілізатори азоту N-STAB (NBPT – інгібітор уреазы) та N-Lock™ (нітрапирин – інгібітор нітрифікації) є ефективними засобами підвищення запасів легкогідролізного та амонійного азоту від появи першого листка до викиду волоті у кукурудзи. Особливо дієвими вони були на максимальному фоні азотного живлення.

Статистичні та графічні моделі закономірностей показали, що норми внесення  $N_{0-1,25-90-120-150}$  достовірно позитивно діють на рівень збагачення ґрунту поживними формами азоту, які тісно корелюють між собою ( $r = 0,84-0,98$ ), а найважливіше – достовірно позитивно впливають на рівень врожаю зерна кукурудзи з коефіцієнтом кореляції  $r = 0,79-0,96$ .

#### References

1. Dehodiuk, E. H., Dehodiuk, S. E., Huralchuk, S. Z. Transformation of the biosphere functions of the pedosphere in the processes of biogenic element cycling in anthropogenically disturbed phytocenoses. *In Plant nutrition: Theory and practice* 2005. 14–43.
2. Ivaniuk V., Hnativ P., Olifir Yu. Effect of nitrogen fertilizers on maize grain yield formation and nitrogen use efficiency. *Visnyk of Lviv National Environmental University. Agronomy*. 2022. No. 26. P. 170–176. <https://doi.org/10.31734/agronomy2022.26.170>.
3. Lykhochvor V. V., Shynkaruk L. M. Photosynthetic parameters of maize plants depending on fertilization elements. *Climate change and agriculture: Challenges for agricultural science and education*. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference (Kyiv, April 2021). Kyiv : Naukovometodychnyi tsentr VFPO, 2021. P. 95–97.

4. Основи наукових досліджень в агрономії / В. О. Єщенко та ін. ; за ред. В. О. Єщенка. Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К», 2014. 332 с.

5. A meta-analysis to examine whether nitrification inhibitors work through selectively inhibiting ammonia-oxidizing bacteria / J. Lei et al. *Front Microbiol*, 2022. 13: 962146. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.962146>.

6. Ammonia emissions from urea, stabilized urea and calcium ammonium nitrate: insights into loss abatement in temperate grassland / P. J. Forrester et al. *Soil Use Manag*, 2016. 32: 92–100. <https://doi.org/10.1111/sum.12232>.

7. A re-evaluation of the agronomic effectiveness of the nitrification inhibitors DCD and DMPP and the urease inhibitor NBPT / T. J. Rose et al. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018. Vol. 258, 2018. P. 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.008>.

8. Burton D. A review of the recent scientific literature documenting the impact of 4R management on N<sub>2</sub>O emissions relevant to a Canadian context. Dalhousie University and Land Resource Consulting Services, March, 2018. <https://fertilizercanada.ca/wp-content/uploads/2018/08/NERP-Science-Review-Paper-.pdf>.

9. Comammox Nitrospira play an active role in nitrification of agricultural soils amended with nitrogen fertilizers / C. Li et al. *Soil Biol Biochem*, 2019. 138: 107609. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107609>.

10. Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. *Official Journal L* 375, 31/12/1991. Ch. 15 Vol. 10. P. 0192. <http://data.europa.eu/eli/dir/1991/676/oj>.

11. Deciphering the Interactions in the Root–Soil Nexus Caused by Urease and Nitrification Inhibitors / G. Sneha et al. *Agronomy*, 2023, 13 (6), 1603. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2023Agron..13.1603G/doi:10.3390/agronomy13061603](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023Agron..13.1603G/doi:10.3390/agronomy13061603).

12. Fungal biogeography. Global diversity and geography of soil fungi / L. Tedersoo et al. *Science*, 2014. 346:125. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25430773/>.

13. Kim D. G., Sagga, S. & Roudier P. The effect of nitrification inhibitors on soil ammonia emissions in nitrogen managed soils: a meta-analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012. 93, 51–64. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-012-9498-9>.

14. Kuypers M. M. M., Marchant H. K., Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network. *Nat Rev Microbiol*. 2018. 16: 263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>.

15. Laforge J, Corkal V. & Cosbey A. Farming the Future: *Agriculture and climate change on the Canadian Prairies*, 2021. <https://www.iisd.org/publications/report/farming-future-agriculture-and-climate-change-canadian-prairies>.

16. Long-acting mechanisms of concentrated urea application – High urea concentrations are biological inhibitors / L. Cheng et al. *Applied Soil Ecology*.

4. Fundamentals of scientific research in agronomy / V. O. Yeshchenko et al. ; za red. V. O. Yeshchenka. Vinnytsia : PP «TD «Edelveis i K», 2014. 332 p.

5. A meta-analysis to examine whether nitrification inhibitors work through selectively inhibiting ammonia-oxidizing bacteria / J. Lei et al. *Front Microbiol*, 2022. 13: 962146. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.962146>.

6. Ammonia emissions from urea, stabilized urea and calcium ammonium nitrate: insights into loss abatement in temperate grassland / P. J. Forrester et al. *Soil Use Manag*, 2016. 32: 92–100. <https://doi.org/10.1111/sum.12232>.

7. A re-evaluation of the agronomic effectiveness of the nitrification inhibitors DCD and DMPP and the urease inhibitor NBPT / T. J. Rose et al. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018. Vol. 258, 2018. P. 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.008>.

8. Burton D. A review of the recent scientific literature documenting the impact of 4R management on N<sub>2</sub>O emissions relevant to a Canadian context. Dalhousie University and Land Resource Consulting Services, March, 2018. <https://fertilizercanada.ca/wp-content/uploads/2018/08/NERP-Science-Review-Paper-.pdf>.

9. Comammox Nitrospira play an active role in nitrification of agricultural soils amended with nitrogen fertilizers / C. Li et al. *Soil Biol Biochem*, 2019. 138: 107609. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107609>.

10. Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. *Official Journal L* 375, 31/12/1991. Ch. 15 Vol. 10. P. 0192. <http://data.europa.eu/eli/dir/1991/676/oj>.

11. Deciphering the Interactions in the Root–Soil Nexus Caused by Urease and Nitrification Inhibitors / G. Sneha et al. *Agronomy*, 2023, 13 (6), 1603. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2023Agron..13.1603G/doi:10.3390/agronomy13061603](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023Agron..13.1603G/doi:10.3390/agronomy13061603).

12. Fungal biogeography. Global diversity and geography of soil fungi / L. Tedersoo et al. *Science*, 2014. 346:125. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25430773/>.

13. Kim D. G., Sagga, S. & Roudier P. The effect of nitrification inhibitors on soil ammonia emissions in nitrogen managed soils: a meta-analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012. 93, 51–64. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-012-9498-9>.

14. Kuypers M. M. M., Marchant H. K., Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network. *Nat Rev Microbiol*. 2018. 16: 263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>.

15. Laforge J, Corkal V. & Cosbey A. Farming the Future: *Agriculture and climate change on the Canadian Prairies*, 2021. <https://www.iisd.org/publications/report/farming-future-agriculture-and-climate-change-canadian-prairies>.

2023. V. 182, 104723. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139322003390?via%3Dihub>.
17. Modelling the impacts of inhibitors and fertilizer placement on maize yield and ammonia, nitrous oxide and nitrate leaching losses in southwestern Ontario, Canada / R. Jiang et al. *Journal of Cleaner Production*, 2023. 384, 135511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135511>.
18. Myrold D. D. Soil nitrogen cycle. In: Encyclopedia of environmental microbiology, Wiley. 2003. <https://doi.org/10.1002/0471263397.env149>.
19. Nelson M. B., Martiny A. C. & Martiny J. B. Global biogeography of microbial nitrogen-cycling traits in soil. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016. 113: 8033–8040. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601070113>.
20. Nitrogen source, application time and tillage effects on soil N<sub>2</sub>O emissions and corn grain yields / C. F. Drury et al. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2012. 76: 1268–1279. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0249>.
21. Pitsyk Y. & Hnativ P. Nitrogen stabilization in dark gray soil under high doses of mineral fertilizer in the Western Forest Steppe. *Збірник матеріалів конференцій «Сучасні проблеми ґрунтознавства в Україні і Світі»*. ПДАТУ, 2024. С. 29–32. <http://188.190.43.194:7980/jspui/bitstream/123456789/12940/1/29-32.pdf>.
22. Plant diversity predicts beta but not alpha diversity of soil microbes across grasslands worldwide / S. M. Prober et al. *Ecol Lett*, 2015. 18: 85–95. <https://doi.org/10.1111/ele.12381>.
23. Restricted nitrous oxide emissions by ammonia oxidizers in two agricultural soils following excessive urea fertilization / Z. M. Chen et al. *J. Soil Sediment*, 2020. 20 (5), p. 1502–1512.
24. Sigurdarson J. J., Svane S. & Karring H. The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2018. 17: 241–258. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-018-9466-1>.
25. Singh J. Impact of urease inhibitor on ammonia and nitrous oxide emissions from temperate pasture soil cores receiving urea fertilizer and cattle urine. *Sci Total Environ*, 2013. 465: 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.018>.
26. Structural characteristics of phosphoramidate derivatives as urease inhibitors. Requirements for activity / M. Font et al. *J Agric Food Chem*. 2008. 56: 8451–8460. <https://doi.org/10.1021/jf801786d>.
27. Zhang Y. Y., Wang W. J. & Yao H. Y. Urea-based nitrogen fertilization in agriculture: a key source of N<sub>2</sub>O emissions and recent development in mitigating strategies. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2022. <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2025588>.
16. Long-acting mechanisms of concentrated urea application – High urea concentrations are biological inhibitors / L. Cheng et al. *Applied Soil Ecology*. 2023. V. 182, 104723. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139322003390?via%3Dihub>.
17. Modelling the impacts of inhibitors and fertilizer placement on maize yield and ammonia, nitrous oxide and nitrate leaching losses in southwestern Ontario, Canada / R. Jiang et al. *Journal of Cleaner Production*, 2023. 384, 135511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135511>.
18. Myrold D. D. Soil nitrogen cycle. In: Encyclopedia of environmental microbiology, Wiley. 2003. <https://doi.org/10.1002/0471263397.env149>.
19. Nelson M. B., Martiny A. C. & Martiny J. B. Global biogeography of microbial nitrogen-cycling traits in soil. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016. 113: 8033–8040. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601070113>.
20. Nitrogen source, application time and tillage effects on soil N<sub>2</sub>O emissions and corn grain yields / C. F. Drury et al. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2012. 76: 1268–1279. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0249>.
21. Pitsyk Y. & Hnativ P. Nitrogen stabilization in dark gray soil under high doses of mineral fertilizer in the Western Forest Steppe. *Збірник матеріалів конференцій «Сучасні проблеми ґрунтознавства в Україні і Світі»*. ПДАТУ, 2024. С. 29–32. <http://188.190.43.194:7980/jspui/bitstream/123456789/12940/1/29-32.pdf>.
22. Plant diversity predicts beta but not alpha diversity of soil microbes across grasslands worldwide / S. M. Prober et al. *Ecol Lett*, 2015. 18: 85–95. <https://doi.org/10.1111/ele.12381>.
23. Restricted nitrous oxide emissions by ammonia oxidizers in two agricultural soils following excessive urea fertilization / Z. M. Chen et al. *J. Soil Sediment*, 2020. 20 (5), p. 1502–1512.
24. Sigurdarson J. J., Svane S. & Karring H. The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2018. 17: 241–258. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-018-9466-1>.
25. Singh J. Impact of urease inhibitor on ammonia and nitrous oxide emissions from temperate pasture soil cores receiving urea fertilizer and cattle urine. *Sci Total Environ*, 2013. 465: 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.018>.
26. Structural characteristics of phosphoramidate derivatives as urease inhibitors. Requirements for activity / M. Font et al. *J Agric Food Chem*. 2008. 56: 8451–8460. <https://doi.org/10.1021/jf801786d>.
27. Zhang Y. Y., Wang W. J. & Yao H. Y. Urea-based nitrogen fertilization in agriculture: a key source of N<sub>2</sub>O emissions and recent development in mitigating strategies. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2022. <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2025588>.