УДК 633.15:631.84[1+2]:631.95:771.735
DOI https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.151.23

СПОСОБИ ОБМЕЖЕННЯ ВТРАТ ПОЖИВНИХ ФОРМ АЗОТУ У ТЕМНО-СІРОМУ ОПІДЗОЛЕНОМУ ҐРУНТІ ЗА УДОБРЕННЯ ЗЕРНОВОЇ КУКУРУДЗИ У ЗАХІДНОМУ ЛІСОСТЕПУ

Піцик Ю.В. *– аспірант кафедри агрохімії і ґрунтознавства,*
Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С.З. Ґжицького
orcid.org/0009-0005-3633-9369
Гнатів П.С. *– д.б.н., професор,*
професор кафедри агрохімії і ґрунтознавства,
Львівський національний університет ветеринарної медицини
і біотехнологій імені С.З. Ґжицького,
головний науковий співробітник,
Інститут сільського господарства Карпатського регіону
Національної академії аграрних наук України
orcid.org/0000-0003-2519-3235

Виробництво і внесення дорогих синтетичних азотних добрив не дає агровиробникам очікуваної віддачі урожаєм і вони схильні збільшувати норми внесення азоту в грунт. Проте це не забезпечує планованої прибавки врожаю, але додає в атмосферу і грунтові води велику кількість небезпечних для довкілля сполуг азоту, який випадає з малого біоциклу в польових агроекосистемах, переходячи у агроландшафти, водні екосистеми й атмосферу. Ми експериментально з'ясовуємо оптимальний рівень азотного удобрення зернової кукурудзи в поєднанні із застосуванням інгібіторів уреази та нітратів, як стабілізаторів азотних сполук у темно-сірому опідзоленому крупнопилуватого легкосуглинковому ґрунті Лісостепу Західного. У межах дослідного поля відділення «Вирів» ТОВ "СІЕФДЖІ ТРЕЙДИНГ" провели відповідні дослідження. Дані опрацьовані за допомогою методу дисперсійного аналізу ANOVA та STATISTICA-12. Дослідження показали, використання інгібіторів N-STAB та N-Lock™ Макс як самостійно, так і поєднанні на нормах азоту від $N_{90\text{-}120\text{-}150}$ вагомо зменшували концентрацію нітратів в орному шарі ґрунту упродовж усієї вегетації кукурудзи. Нітрапірин найбільше знижував концентрацію нітратів у фазі першого листка за використання звичайного карбаміду. Збільшення норми азоту від N_{90} до N_{120} і N_{150} збагачує орний шар ґрунту амонійною формою елемента, а інгібітор уреази N-STAB у складі карбаміду стримує уролітичну дію мікробіоти і підвищує його вміст як за мінімальної, так і за максимальної норми удобрення. Сумісне застосування нітрапірину посилює цей ефект. Розрахунок втрат азоту від звітрювання закису елемента залежно від запасу нітратів у ґрунті свідчать, що стабілізатори азотистих сполук зменшують його емісії від 1,77–1,85 кг/га на високих нормах $N_{120\text{-}150}$ до 1,63–1,67 кг/га. Розрахунок потенційного звітрювання аміаку від його запасу в ґрунті свідчить, що застосування карбаміду, збагаченого інгібітором N-STAB практично втричі зменшує газоподібні втрати цієї форми поживної речовини в атмосферу. Найкращий результат за різних систем удобрення отриманий за внесення N_{150} у формі карбаміду PULREA®+INu з обприскування ґрунту нітрапірином перед сівбою. Врожай зерна був на рівні 16,6 т/га 2024 року, та 16,3 т/га 2025 року, що на 10,8 та 10,7 т/га більше, ніж на неудобреному контролі. Інгібітори окремо та у поєднанні дієвіше впливали на рівень врожаю за підвищеної (N_{120}) та високої (N_{150}) норми азоту.

Ключові слова: *карбамід, n-бутилтіофосфортриамід, 2-хлор-6-(трихлорметил) піридин, азот, врожай кукурудзи.*

© Піцик Ю.В., Гнатів П.С., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Pitsyk Yu.V., Hnativ P.S. Methods of limiting the loss of nutrient forms of nitrogen in dark-gray pozolenized soil during grain corn fertilization in the Western Forest-Steppe

The production and application of costly synthetic nitrogen fertilisers often fail to provide agricultural producers with the expected yield response, prompting them to increase nitrogen application rates. However, this practice does not result in the anticipated yield increase but instead contributes substantial amounts of environmentally hazardous nitrogen compounds to the atmosphere and groundwater. Consequently, nitrogen is removed from the short biogeochemical cycle within field agroecosystems and transferred to agricultural landscapes, aquatic ecosystems, and the atmosphere. The present study experimentally determined the optimum nitrogen fertilisation rate for grain maize in combination with urease and nitrification inhibitors acting as nitrogen stabilisers in dark grey podzolised coarse-silty light loam soil of the Western Forest-Steppe of Ukraine. Field experiments were conducted at the Vyriv Block, CFG Trading LLC. Experimental data were analysed using analysis of variance (ANOVA) and STATISTICA 12 software. The results demonstrated that the use of the inhibitors N-STAB and N-Lock™ Max, applied either individually or in combination at nitrogen rates of N_{90}, N_{120} and N_{150}, significantly reduced nitrate concentrations in the plough layer throughout the maize growing season. Nitrapyrin was particularly effective in reducing nitrate concentrations at the first-leaf growth stage when conventional urea was applied. Increasing the nitrogen application rate from N_{90} to N_{120} and N_{150} enhanced the ammonium content of the plough layer. Furthermore, the urease inhibitor N-STAB incorporated into urea suppressed the ureolytic activity of the soil microbiota, thereby increasing ammonium retention under both the lowest and the highest nitrogen application rates. The combined application of nitrapyrin further enhanced this effect. Estimates of nitrogen losses through nitrous oxide (N_2O) emissions, calculated according to soil nitrate reserves, indicated that nitrogen stabilisers reduced N_2O emissions from 1.77–1.85 kg·ha^{-1} at the higher nitrogen rates (N120–N150) to 1.63–1.67 kg·ha^{-1}. Likewise, calculations of the potential ammonia (NH_4^+) volatilisation based on soil ammonium reserves showed that the application of urea enriched with the N-STAB inhibitor reduced gaseous ammonia losses to the atmosphere by almost threefold. The highest grain yield under the different fertilisation systems was obtained with the application of N_{150} as PULREA®+INu urea combined with pre-sowing soil application of nitrapyrin. Grain yield reached 16.6 t·ha^{-1} in 2024 and 16.3 t·ha^{-1} in 2025, exceeding the unfertilised control by 10.8 and 10.7 t ha^{1}, respectively. Both individual and combined applications of the inhibitors exerted a greater positive effect on grain yield at the elevated (N_{120}) and high (N_{150}) nitrogen application rates.

Key words: *urea, N-(n-butyl)thiophosphoric triamide, 2-chloro-6-(trichloromethyl)pyridine, nitrogen, maize grain yield.*

Постановка проблеми. За узагальненням вчених [1] аграрне виробництво і тваринництво вносять майже 60% від загального обсягу антропогенних викидів азоту у формі закису N_2O. Вироблені азотумісні добрива (особливо карбамід) є основними джерелами емісії закису азоту.

Запаси азоту у ґрунтах охоплюють вміст органічного азоту, азоту мікробів та неорганічного азоту. Доступні безпосередньо для поглинання рослинами нітрати та амоній. Найвагоміша частина ґрунтового азоту знаходиться в органічній речовині, але мікробна біомаса азоту легко переходить у доступні форми азоту для рослин. Співвідношення цих запасів значною мірою залежить від ґрунтових умов, вологості і погоди [2; 3; 11; 5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Коли аміак потрапляє в грунт, він може або перетворитися на нітрит (NO_2^-), а потім на нітрат (NO_3^- через процес нітрифікації (*Nitrosomonas spp*. та *Nitrosococcus spp*.) [6], або бути поглиненим та асимільованим рослинами чи мікроорганізмами [7; 8]. Процес нітрифікації здійснюється вузьким колом родів, тоді як практично усі бактерії та археї можуть виконувати асиміляцію аміаку [9]. Оригінальні досліди Z. M. Chen et al. [10] та L. Cheng et al. [12] моделювали високий вміст 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 NH_4^+ у ґрунті, який зменшує активність мікроорганізмів, що окиснюють аміак, тим самим пригнічуючи нітрифікацію.

Аналіз вирощування як пшениці, так і кукурудзи показав, що високородючі ґрунти мали дуже високі значення частки вимивання азоту добрив з нітратами – від 21% під пшеницею до 25% під кукурудзою. Проте високотехнологічні прийоми внесення добрив забезпечували середні значення втрат нітратів – лише 7% та 13% для пшениці та кукурудзи відповідно [1].

Узагальнення R. Thapa et al., [13] подають висновки, що досліджені інгібітори нітрифікації, включаючи диціандиамід (DCD), 3,4-диметилепіразолфосфат (DMPP) та 2-хлор-6-(трихлорметил)піридин (нітрапірин), збільшили врожайність зерна на 7%, за даними C. Qiao et al. [14] – на 9%, за даними J. Feng et al. [15] – на 4,4% зерна або біомаси. Застосування інгібіторів уреази та нітрифікації є ефективною стратегією зменшення втрат азоту без негативного впливу на врожайність. Але довгостроковий вплив інгібіторів та внесення азоту на його динаміку залишається незрозумілим [16].

Через екологічні та суспільні проблеми, пов'язані з випаровуванням аміаку, було встановлено міжнародні нормативи щодо обмеження викидів антропогенного аміаку. Ще від 1999 року багато країн світу узгодили Гетеборзький протокол (ЄЕК ООН, 1999), який мав на меті обмежити викиди кількох забруднюючих речовин, включаючи аміак, до 2010 року. Цей протокол став основою для Директиви 2001/81/ЄС Європейського Союзу про національні граничні значення викидів [17]. Щоби обмежити непродуктивні втрати азоту з добрив вчені активно продовжують експерименти зі стабілізації нітрифікації покриттям цими активними речовинами – інгібіторами, гранули фабричної сечовини, з'ясовують, чи на впливає інтенсивність звітрювання аміаку та обсяг утримання азоту залежно від глибини внесення карбаміду в ґрунт.

Добрива, внесені в ґрунт – це дотація біофільних елементів цілісній екосистемі загалом, де на дефіцитний у природі азот, як і фосфор та багато інших біогенних речовин, «претендують» численні мікроорганізми – природні компоненти цих екосистем. З-поміж них, археї, бактерії, гриби і навіть водорості**.**

Уникнути перехоплення як поживи, чи деструкції стабілізованих ґрунтовим вбирним комплексом азотних сполук мікробіотою до летких форм (аміак NH_3, закис азоту N_2O, інертний азот N_2), або до легкорозчинної нітратної форми – актуальне завдання аграріїв за тенденції постійного дорожчання синтетичних хімічних добрив.

З іншого боку інтеграція України у світову економічну та політичну спільноту передбачає прийняття аграріями жорстких вимог щодо забруднення довкілля парниковими газами та охорони поверхневих вод. У гумідній зоні Лісостепу Західного обсяги внесення азотних добрив і їх ефективність є високими, проте тенденція до збільшення норм удобрення зумовлює потребу науково обґрунтованого запровадження заходів щодо стабілізації азотних сполук у ґрунті та підвищення рівня їх ефективної асиміляції культурами для забезпечення максимальної віддачі з урожаєм [18; 19].

Метою нашої роботи було встановити оптимальний рівень азотного удобрення зернової кукурудзи в поєднанні із застосуванням стабілізаторів азоту – інгібіторів уреази та нітратів, за вирощування на темно-сірому опідзоленому ґрунті Лісостепу Західного.

Матеріали і методи. Основним об'єктом дослідження була система азотного мінерального удобрення зернової кукурудзи в умовах Лісостепу Західного з використанням інгібіторів уреази та нітрифікації.



Рис. 1. Локалізація дослідного поля для трирічних досліджень – скріншот супутникової світлини (Sentinel-2 L2A – платформа Copernicus browser)

Досліди організовані при кафедрі агрохімії та ґрунтознавства у Львівському національному університеті природокористування (нині ЛНУВМБТ ім. С. З. Гжицького) впродовж 2023–2026 року. Дослідне поле, на якому на підставі угоди про філію кафедри велися трирічні дослідження, розташоване у с. Вирів в опорному пункті «Вирів» ТОВ «СІЕФДЖІ ТРЕЙДИНГ» у Буго-Стирській алювіально-зандрово-денудаційній рівнині природно-кліматичної зони Західного Лісостепу: N 49°99′41″; E 24°33′88″ (рис. 1). (Physical-geographical zoning..., Agro-soil zoning..., https://geomap.land.kiev.ua/). Ґрунт – темно-сірий лісового слабоеградований легкосуглинковий на карбонатних лесоподібних суглинках.

Польові експерименти виконали за загальноприйнятими методами в агрономії, викладеними В. О. Єщенком та ін. [19]. Розмір посівної ділянки 35 м^2 (2,8×12,5 м), облікової 15 м^2. Повторення варіантів чотириразове, 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_{46}), корн-калі (K_{40}+Mg_6+S_5) і сульфат магнію гранульований (Mg22+S14,6) становили суцільний удобрений фон. Азотні добрива: карбамід звичайний та збагачений інгібітором NBPT (n-бутилтіофосфортриамід, препарат N-STAB) карбамід PULREA®+INu внесені навесні під передпосівну культивацію за допомогою ручного механічного розкидача фірми Solo за схемою досліду (табл. 1). У спеціальних варіантах КАС 32 вносили у підживлення кукурудзи у фазі 6–8 листків (ВВСН 16-17) з міжрядною культивацією (агрегатом КРН-5.6, обладнаним системою внесення рідких добрив Record) на глибину 10–12 см. Інгібітор нітрифікації нітрапірин (2-хлор-6-(трихлорметил) піридин, препарат N-Lock™ Макс) в нормі 1,7 л/га вносили ранцевим обприскувачем під передпосівну культивацію перед внесенням карбаміду. При сівбі восьмирядною сівалкою Challenger CH9200 (обладнаною системою Precision Planting + Keeton) в рядки було внесене стартове добриво у формі РКД 5-20-5 у фізичній вазі 19,7 л/га за виключенням контрольного варіанту без добрив.

При закладанні експерименту та в ході програмних досліджень відбір зразків ґрунту виконували польовим буром БП-25-15 з кожного варіанту на глибину

0–20 см (для аналізу нітратів – пробовідбірником ґрунту L-170 на визначених варіантах – 0–20 см; 20–40 см; 40–60 см) згідно з методикою ДСТУ 4287:2004 (2004).

Таблиця 1

Схема польового експерименту

№ вар.	Норми удобрення	Простий карбамід або карбамід PULREA®+INu та N-Lock™
1	Без добрив (К)	–
2	Фон -($N_{1,25}P_{69,4}K_{81,3}Mg_{34}S_{24,6}$)[1]	–
3	Фон+N_{90}[2]	–
4	Фон+N_{90}	PULREA®+INu
5	Фон+N_{90}	N-Lock™
6	Фон+N_{120}	-
7	Фон+N_{120}	PULREA®+INu
8	Фон+N_{120}	N-Lock™
9	Фон+N_{120}	PULREA®+INu+N-Lock™
10	Фон+N_{150}	–
11	Фон+N_{150}	PULREA®+INu
12	Фон+N_{150}	N-Lock™
13	Фон+N_{150}	PULREA®+INu+N-Lock™
14	Фон+N_{150} (N_{80}+N_{70}[3])	–
15	Фон+N_{150} (N_{80}+N_{70}[3])	PULREA®+INu
16	Фон+N_{150} (N_{80}+N_{70}[3])	N-Lock™
17	Фон+N_{150} (N_{80}+N_{70}[3])	PULREA®+INu+N-Lock™

1 Сумарні норми поживних елементів фонового удобрення;

2 N_{90-150} – під передпосівну культивацію;

3 N_{70} – підживлення у формі КАС вносили у фазі 6–8 листків (ВВСН 16-17) з міжрядною культивацією N, кг/га.

Кількість відборів становила 5–6 уколів по маршруту зигзагом, який охоплював цілу ділянку варіанту. Ґрунт, за виключенням зразків а нітрати, висушували до повітряно-сухого стану, просіювали та подрібнювали згідно з ДСТУ ISO 11464:2007 (2003).

Стартова агрохімічна характеристика дослідного поля визначена наступна. У шарі ґрунту 0-20 см вміст гумусу за ДСТУ 4289:2004 (2005) становить 3,11%, гідролітична кислотність за ДСТУ 7537:2014 (2014) 2,38, кислотність за ДСТУ ISO 10390:2007 (2012) – pH_{KCl} становить 5,8, вміст рухомого фосфору (за Чириковим) за ДСТУ 4405:2005 (2005) 97 мг/кг, обмінного калію 113 мг/кг ґрунту, легкогідролізованого азоту за ДСТУ 7863:2015 (2016) 103 мг/кг ґрунту.

Вміст нітратів за схемою удобрення встановлювали потенціометрично за допомогою йонселективного нітратного електрода у соляній витяжці 1% розчину алюмокалієвого галуну при співвідношенні ґрунту до розчину 1:2,5, а також азот амонійний визначали за ДСТУ 4729:2007 (2006).

Лабораторні дослідження виконали на базі філії кафедри агрохімії та ґрунтознавства ЛНУВМБТ в 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.

Інтенсивність звітрювання газоподібного закису азоту з ґрунту в атмосферу E_{N2O} (кг/га) обчислювали за формулою (1), запропонованою A. F. Bouwman [10]:

$$E_{N2O} = 1 + 0{,}0125 \times З_{N\text{-}NO3.}, \quad (1)$$

де: $З_{N\text{-}NO3.}$ – запаси нітратного азоту в орному пласті ґрунту.

Запаси нітратів $З_{N\text{-}NO3}$ (кг/га) вираховували за формулою (2) обчислення запасів гумусу [20] з використанням перевідних коефіцієнтів мг/кг у відсотки і тонни у кілограми:

$$З_{N\text{-}NO3} = N_{N\text{-}NO3}(мг/кг) \times 0{,}0001(\%) \times 1000(кг) \times 1{,}37(г/см^3) \times 20(см), \quad (2)$$

де: $N_{N\text{-}NO3}$ – вміст $N\text{-}NO_3$ в орному (0–20 см) шарі ґрунту у мг/кг; 0,0001 – коефіцієнт переводу у %; 1000 – коефіцієнт переводу у кг; 1,37 – щільність орного пласті темно-сірого опідзоленого крупнопилуватого легкосуглинкового ґрунту у г/см^3; 20 – товщина орного пласту в сантиметрах.

Потенційні втрати аміаку від внесення звичайного карбаміду обчислювали за формулою (https://theyieldgrid.com/urea-volatilization-calculator/) з використанням додаткового коефіцієнта 0,7 для карбаміду PULREA®+INu з інгібітором уреази (інгібітор знижує звітрювання аміаку на 30%):

$$E_N = Q_{карб.} \times C/100 \times K_{втрат.} \quad (3)$$

де: Q – загальна маса внесеного азоту з карбамідом (кг);
C – частка азоту, що виділяється у вигляді аміаку (15%);
$К_{втрат}$ – за глибокого заробляння під передпосівну культивації становить 0,35.

Для сівби використовували гібрид Pioneer P8834 з нормою висіву – 78 тис/га.

Математично-статистичну обробку і графічне моделювання отриманих результатів досліджень та врожайних даних здійснювали класичними методами [21] з використанням програм Microsoft Excel і Statistica 12.0.

Результати та обговорення. Погода вегетаційного періоду 2024 року для зернової кукурудзи за даними найближчого метеопоста (002093F9. Велике Колодно. iMetos 3.3) відрізнялися від наступного 2025 року. Сівбу 2024 року провели 30 квітня, 2025 року – на 8 діб раніше. Перший рік досліджень відрізнявся вагомо вищими середньомісячними температурами, за виключенням січня, листопада та грудня (рис. 2). Середня температура 2024 року – 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 кліматичної норми. Середня температура 2025 року – 10,5°С, вегетаційного періоду (квітень-жовтень) – 15,4°С.

Хід зростання середніх температур вегетаційного періоду 2024 року практично повторював хід менших середньобагаторічних, чим створювався додатковий стабільний тепловий ресурс для росту і розвитку кукурудзи.

Проте, перший рік вирощування культури відрізнявся вкрай нерівномірними опадами (рис. 3), відносно сухим травнем (16 мм) перезволоженим червнем (96 мм) та критично посушливим липнем (3 мм).

За 2024 рік випало 415 мм, за вегетаційний період – 347 мм за норми 487 мм. Упродовж 2025 року випало 505 мм, за квітень-жовтень 340 мм. Але нерегулярні опади не позначилися критично на формуванні врожаю.

Дія стабілізаторів мікробної активності дуже залежить від тепла й вологи в ґрунті, як і ефективність внесених мінеральних добрив. Задовільний обсяг опадів, істотно вища температура повітря і 10-тисантиметрового пласту ґрунту

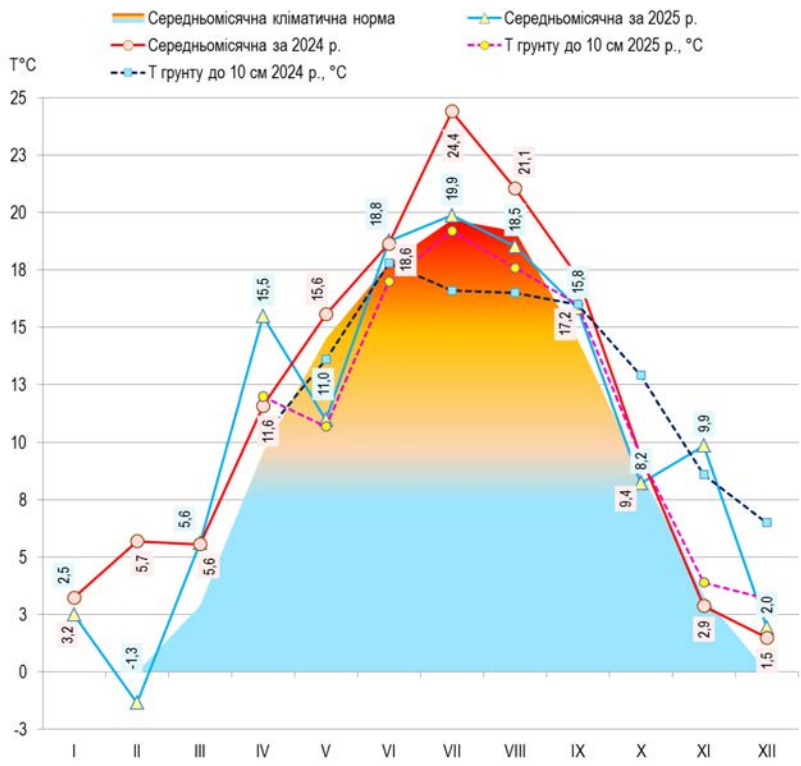


Рис. 2. Середньомісячна динаміка температури 2024–2025 рр. (метеопост 002093F9. Велике Колодно. iMetos 3.3)

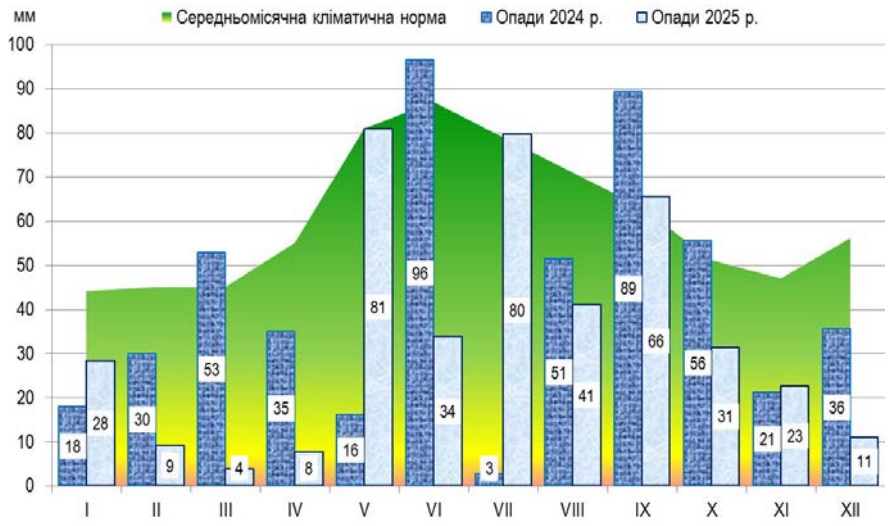


Рис. 3. Середньомісячні опади 2024–2025 років (метеопост 002093F9. Велике Колодно. iMetos 3.3)

сприяли стабілізаційній дії інгібіторів мікробних перетворень азотних сполук триваліший період.

Кукурудза потребує на утворення однієї тонни зерна 25–30 кг азоту з ґрунту. Тому ми досліджували діапазон норми азотного удобрення $N_{90\text{-}120\text{-}150}$ з урахування високої природної родючості ґрунту та гіпотетичної дії стабілізаторів перетворення азотистих сполук мікробіотою, що можуть запобігти звітрюванню та вимиванню продуктів її азотного метаболізму.

Співвідношення форм азоту у темно-сірому опідзоленому ґрунті мінливе. Легкогідролізний азот (лужногідролізний) охоплює мінеральну частку ґрунтового азоту і коливається 112 до 133 мг/кг ґрунту в межах одного поля [22]. Мінеральний азот – амонійний та нітратний, сукупно становить не більше третини від легкогідролізного, а нітратний – менше половини від амонійного [23]. Для чорноземів О. Чайка і С. Левченко [24] повідомляють такі кількості: легкогідролізного 60–150 мг/кг ґрунту, амонійного 10–30 і нітратного 5–15 мг/кг.

Нітратне живлення кукурудзи є активнішим за інші шляхи асиміляції азоту. Достатня кількість нітратів у період активного росту й розвитку культури є бажана. Проте, надмірне нітратоутворення під впливом *Nitrosomonas* spp. та *Nitrosococcus spp.* спричиняє надлишок нітратів, які не можуть бути швидко поглинуті рослинами, тому опускаються з вертикальним водотоком у підорні, а інколи і в водоносні горизонти. На рисунку 4 показано, що підвищення норми азоту від нуля до $N_{90\text{-}120\text{-}150}$ збільшує концентрацію нітратів в орному пласті від 8,2 мг/кг ґрунту більше, як утри рази (до 24,8 мг/кг – вар. 10) у фазі першого листка, у фазі викиду волоті від 5,2 до 18,9 мг/кг.

Підживлення КАС у міжряддя в дозі N_{70} за передпосівного внесення N_{80} сприяє найбільшому нагромадженню нітратів у фазі викиду волоті і навіть у фазі достигання зерна (вар. 14 і 15). Поєднання як невисоких, так і високих норм азотного удобрення з інгібітором нітрифікації нітрапірином та добривом карбамід PULREA®+INu з інгібітором уреази вагомо обмежувало накопичення нітратів на старті вегетації кукурудзи. Водночас, у фазі викиду волоті таке поєднання факторів (вар. 9–15) підтримувало такий високий вміст нітратів у ґрунті, як за мінімальної норми внесення N_{90} (вар. 3) на старті вегетації.

Обчислені за формулою (2) запаси нітратного азоту дозволили нам визначити потенційний викид закису азоту в атмосферу і його втрату з екосистеми поля (рис. 5).

Збільшення норми удобрення азотом кукурудзи від 90 до 120 і 150 кг га закономірно створювало більші запаси нітратів в орному пласті, але цим самим зумовлювало підвищення незворотних втрат азоту у формі N_2O. Інгібітор нітрифікації нітрапірин найвагоміше стримував утворення нітратів і таким чином зменшував емісії парникового газу. Інгібітор уреази у складі карбаміду, а також поєднання стабілізаторів азоту мало сильний, але менший стримувальний ефект стосовно звітрювання закису азоту.

За великих норм азотного удобрення важливим є стримування втрати нітратів у підорні горизонти ґрунту. Для темно-сірого легкосуглинкового добре дренованого ґрунту в гумідній зоні Лісостепу західного це є велика проблема. Рисунок 6 відображає закономірності утворення нітратів під впливом збільшення норм азотного удобрення від нуля до $N_{90\text{-}120\text{-}150}$ у підорному горизонті. На старті вегетації мінімальна норма азотних добрив сприяла накопиченню 10,2 мг/кг нітратного азоту. Підвищення норми азотних добрив до 150 кг/га д.р. додало 4,7 мг/кг нітратів.

Інгібітори уреази та нітрифікації як окремо, так і в поєднанні мали вагомий вплив на стабілізацію нітратоутворення і на старті вегетації, і в фазі викиду волоті

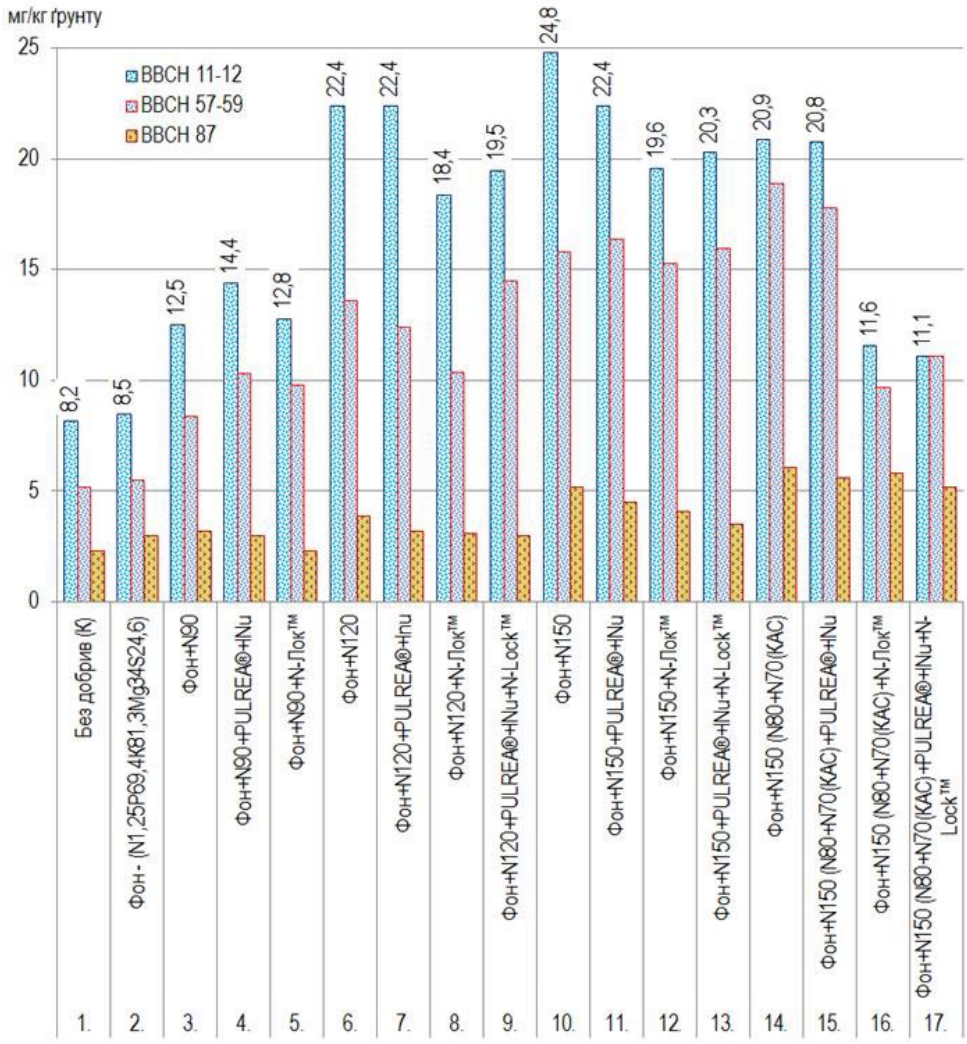


Рис. 4. Вплив норм азотного удобрення та дії інгібіторів уреази й нітрифікації на вміст нітратного азоту в орному (0–20 см) пласті ґрунту, мг/кг ґрунту (BBCH 11-12 – перший справжній листок; BBCH 57-59 – повна поява волоті; BBCH 87 – повна фізіологічна стиглість) ($p < 0,05$)

(рис. 6 А). Без інгібіторів підвищена концентрація нітратів була виявлена у фазі достигання кукурудзи (вар. 6, 10 і 14). Найвищий рівень нітратів у підорному горизонті у фазі викиду волоті виявлений у варіантів з дробленням норми удобрення та внесенням КАС 32 у міжряддя N_{70} без інгібіторів.

Ще менші ресурси нітратного азоту виявлені у горизонті 40–60 см (рис. 6 Б). Найвищий рівень на старті вегетації встановлений на варіанті разового внесення N_{150} – 8,2 мг/кг. Вплив двох інгібіторів, а також їх сумісного застосування є дуже виразним. Інгібітор уреази на малій нормі азоту N_{90} сприяв збільшенню кількості

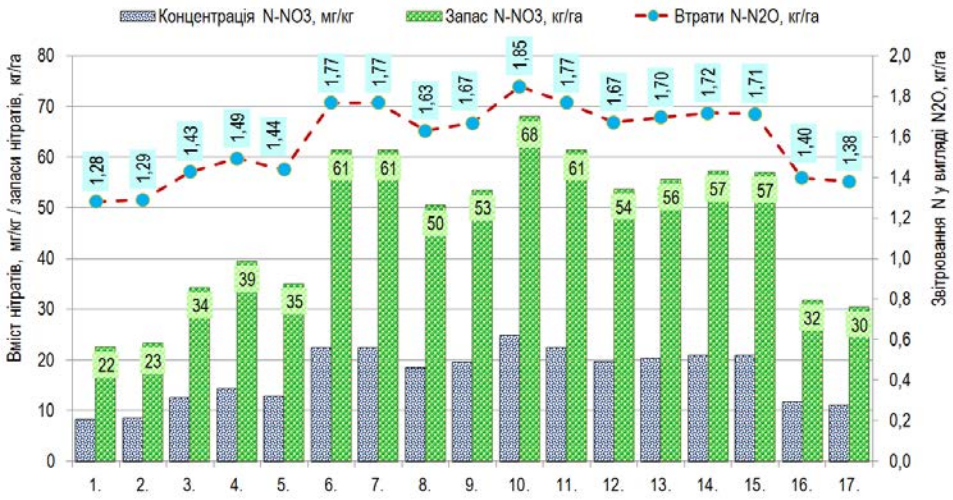


Рис. 5. Вплив запасів нітратного азоту та дії інгібіторів уреази й нітрифікації в орному (0–20 см) пласті ґрунту у фазі першого справжнього листочка (ВВСН 11-12) (p < 0,05) на потенційний річний обсяг звітрювання закису азоту (варіанти відповідають нумерації, показаній в табл. 1 і на рис. 4)

нітратів завдяки обмеженню звітрювання аміаку. Проте, поєднання добрива карбамід PULREA®+INu з нітрапірином – інгібітором нітрифікації, зменшило їх кількість до найнижчого з-поміж удобрених варіантів рівня 3,8 мг/кг ґрунту у фазі викиду волоті.

Підвищені і високі фони азотного удобрення ($N_{120-150}$) сприяли проникненню нітратів у глибинний горизонт. Отже, впевнюємося, що дія інгібіторів перетворення азоту позитивно впливає на обмеження проникнення нітратів у глибинний горизонт ґрунту.

Звітрювання аміаку від мікробного розкладання сечовини – вкрай небажаний процес, який не лише небезпечних для довкілля, а й збитковий при застосуванні азотних добрив. Інгібітор уреази, що присутній у карбаміді PULREA®+INu (вар. 4, 7, 11 і 15) зменшував звітрювання аміаку на старті вегетації на 12%, 7, 6 і 10% (рис. 7). Поєднання його з нітрапірином ще додатково заощаджувало аміак карбаміду в орному шарі. У фазі викиду волоті дія інгібіторів тривала і сприяла його найвищому у умісту 6,9 мг/кг ґрунту, зокрема, на варіантів 13 – фон+N_{150} PULREA®+INu+N-Lock™.

Розраховані за формулою (3) запаси амонійного азоту в ґрунті дозволили визначити потенційне звітрювання азоту у вигляді аміаку в атмосферу і його втрату для кукурудзи (рис. 8).

Збільшення норми удобрення азотом від 90 до 120 і 150 кг га поступово створювало більші запас УМОВИ и амонію в орному пласті, але цим самим спричиняло більші незворотні втрат азоту у формі NH_3. Інгібітор уреази в карбаміді PULREA®+INu стримував звітрювання аміаку на усіх трьох рівнях удобрення кукурудзи. Інгібітор уреази у складі карбаміду у поєднання зі стабілізатором нітратів сильний, але не більший стримувальний ефект стосовно звітрювання аміаку.

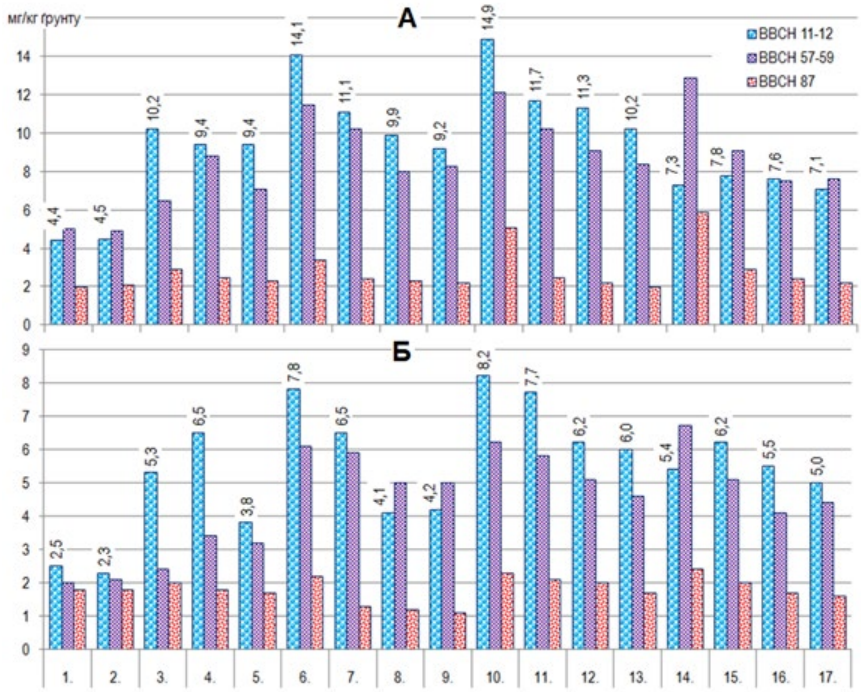


Рис. 6. Вплив норм азотного удобрення та дії інгібіторів уреази й нітрифікації на вміст нітратного азоту під орним (А – 20–40 см) та глибоким (Б – 40–60 см) пластом ґрунту, мг/кг ґрунту (BBCH 11-12 – перший справжній листок; BBCH 57-59 – повна поява волоті; BBCH 87 – повна фізіологічна стиглість) ($p < 0,05$) (варіанти відповідають нумерації, показаній в табл. 1 і на рис. 4)

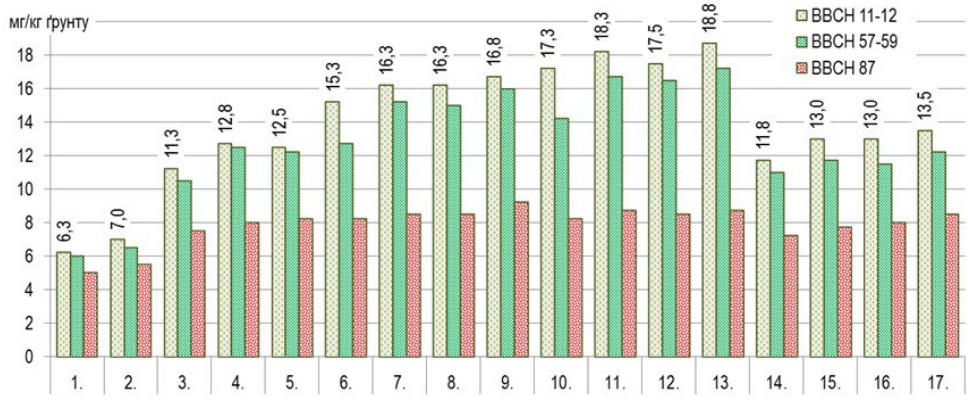


Рис. 7. Вплив норм азотного удобрення та дії інгібіторів уреази й нітрифікації на вміст амонійного азоту в орному (0–20 см) пласті ґрунту, мг/кг ґрунту (BBCH 11-12 – перший листок; BBCH 57-59 – повна поява волоті; BBCH 87 – фізіологічна стиглість) ($p < 0,05$) (варіанти відповідають нумерації, показаній в табл. 1 і на рис. 4)

Ґрунтові процеси амоніфікації та нітрифікації – інтегральна екологічна функція агроекосистем удобреного поля. Тому важливим є з'ясування зв'язків між перебігом закономірностей перетворення азотних сполук, привнесених з добривами у природних умовах погоди і властивостей ґрунту. Матриця кореляцій усіх досліджених змінних представлена у таблиці 2. Оскільки вибірка була достатньо великою (n = 17), мінімальний достовірний ($p < 0,05$) коефіцієнт кореляції був r = 0,50. Зауважимо, що достовірних обернених зв'язків у досліді не було. Отже, усі зміни показників мали позитивний прямий характер.

За застосування двох різних інгібіторів вони функціонують у поетапному регуляторному механізмі для регулювання запасів азоту. Спочатку інгібування уреази запобігає швидкому гідролізу сечовини на аміак, стримуючи швидкі зміни pH та запобігаючи втратам леткого аміаку.

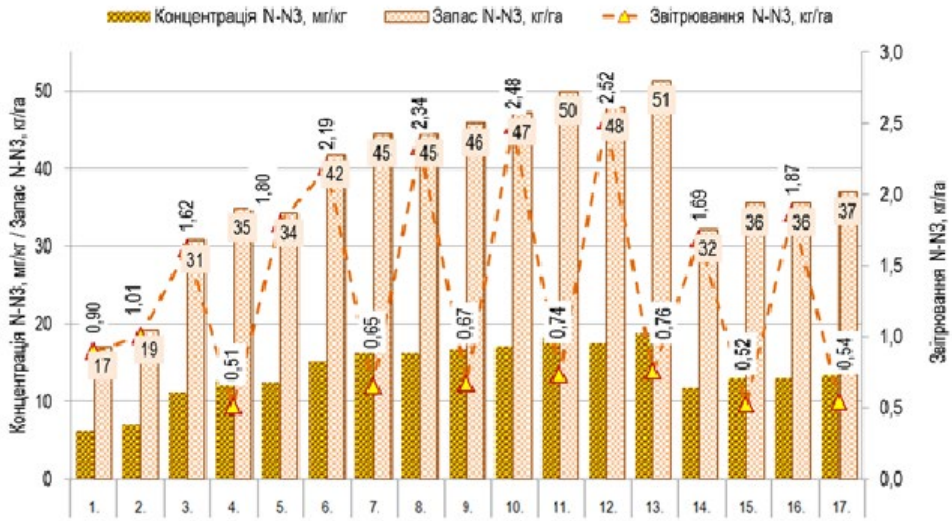


Рис. 8. Вплив запасів амонійного азоту та дії інгібіторів уреази й нітрифікації в орному (0–20 см) пласті ґрунту у фазі першого справжнього листочка (BBCH 11-12) ($p < 0,05$) на потенційний річний обсяг звітрювання аміаку (варіанти відповідають нумерації, показаній в табл. 1 і на рис. 4)

Інгібування нітрифікації тимчасово пригнічує біотичне окиснення амонію (NH^{4+}) до нітратів (NO^{3-}). Синергія у тому, що одночасно утримується азоту у різних формах, уповільнюється початкове перетворення сечовини, стабілізується загальний запас доступного азоту, гальмується його перетворенню на нітрати, які схильні до вимивання в ґрунтові води та звітрювання газоподібних форм у вигляді газів (N_2O, NH_3, N_2).

Поєднання двох інгібіторів може зменшувати загальне вимивання азоту на 20–45% та обмежити емісію газоподібного закису азоту більш, ніж на 50% порівняно з використанням простої сечовини або застосування одного інгібітора нітратів [25; 26].

Вміст доступних форм азоту залежить від мікробної активності ґрунту у сприятливих умовах і є визначальним для накопичення нітратів та збереження амонію у ризосфері упродовж усієї вегетації. Нітрати та амоній у ґрунті циркулюють

практично паралельно. Нітрати в орному шарі фактично визначають їх концентрації у підорному (20–40 см) та глибинному (40–60 см) горизонтах упродовж всієї вегетації. Встановлена лінійна регресія (рис. 9) вмісту нітратів на глибині 40–60 см (r = 0,70) під впливом запасу амонійного азоту в орному шарі ґрунту у фазі викиду волоті (ВВСН 57-59).

Збільшення доступних форм азоту в орному шарі спричинене внесенням азотних добрив (рис. 10) і описується цей зв'язок лінійною регресією, де коефіцієнти кореляції є високими (у фазі першого листка r = 0,72 на глибині 0–20 см – рис 10 А; у фазі викиду волоті r = 0,81 – рис. 10 Б). Підвищення ресурсів азоту в ґрунті завдяки збільшенню норм внесення азотних добрив $N_{0\text{-}1,2\text{-}90\text{-}120\text{-}150}$ дуже позитивно відображається на врожайності зерна кукурудзи (рис. 11).

Таблиця 2

Кореляції показників вмісту нітратної та амонійної форм азоту в ґрунті у фази першого листочка, викиду волоті, дозрівання зерна та рівня врожаю кукурудзи зернової, ±r (n = 17; r = 0,48 – найменший достовірний коефіцієнт кореляції)

Показники / Показник		$N_{нітр.}$ – 0-20 см			$N_{нітр.}$ – 20-40 см			$N_{нітр.}$ – 40-60 см			$N_{ам.}$ – 0-20 см		
		ВВСН 11-12	**ВВСН 57-59**	**ВВСН 87**	**ВВСН 11-12**	**ВВСН 57-59**	**ВВСН 87**	**ВВСН 11-12**	**ВВСН 57-59**	**ВВСН 87**	**ВВСН 11-12**	**ВВСН 57-59**	**ВВСН 87**
$N_{нітр.}$ – 0-20 см	ВВСН 57-59	**0,86**	X	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	ВВСН 87	0,26	**0,59**	X	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$N_{нітр.}$ – 20-40 см	ВВСН 11-12	**0,77**	**0,50**	0,02	X	–	–	–	–	–	–	–	–
	ВВСН 57-59	**0,87**	**0,83**	0,41	**0,67**	X	–	–	–	–	–	–	–
	ВВСН 87	0,47	**0,52**	0,31	0,30	**0,75**	X	–	–	–	–	–	–
$N_{нітр.}$ – 40-60 см	ВВСН 11-12	**0,77**	**0,68**	0,40	**0,83**	**0,80**	0,42	X	–	–	–	–	–
	ВВСН 57-59	**0,90**	**0,86**	**0,48**	**0,62**	**0,93**	**0,56**	**0,71**	X	–	–	–	–
	ВВСН 87	**0,59**	0,40	-0,05	**0,53**	**0,72**	**0,69**	**0,51**	**0,53**	X	–	–	–
$N_{ам.}$ – 0-20 см	ВВСН 11-12	**0,79**	**0,69**	0,28	**0,78**	**0,59**	0,05	**0,69**	**0,72**	0,17	X	–	–
	ВВСН 57-59	**0,74**	**0,66**	0,24	**0,70**	**0,52**	-0,04	**0,60**	**0,65**	0,14	**0,98**	X	–
	ВВСН 87	0,62	0,60	0,40	**0,68**	**0,50**	-0,02	**0,59**	**0,62**	0,08	**0,91**	**0,92**	X
Урожай 2024 р.		**0,70**	**0,80**	**0,70**	**0,57**	**0,67**	0,24	0,68	0,77	0,17	0,86	0,84	0,90

Лінійна кореляція з коефіцієнтом r = 0,97 підтверджує дуже сильну залежність продуктивності культури від підвищення норм внесення карбаміду, які своєю чергою, збагачуючи ґрунт як загалом азотом, так і його поживними формами – нітратною та амонійною у ті ж фази (рис. 12 А – r = 0,70 рис. 12 Б – r = 0,80).

Створення графічних 3В-моделей регресії за допомогою Statistica 12.0 на підставі тісних парних зв'язків та реалізація математичних поліноміальних рівнянь

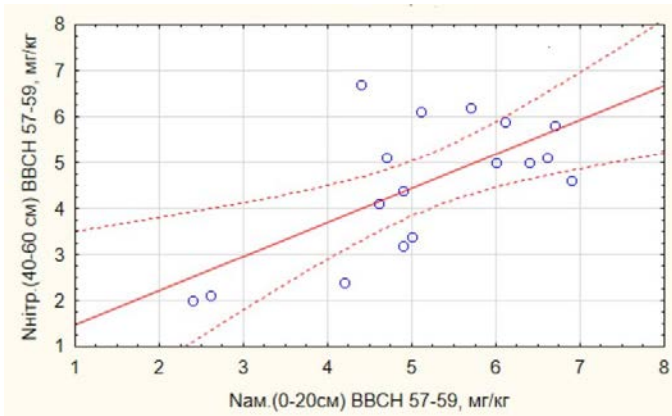
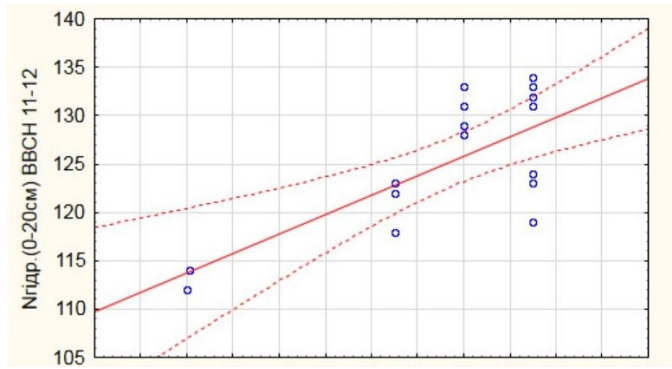
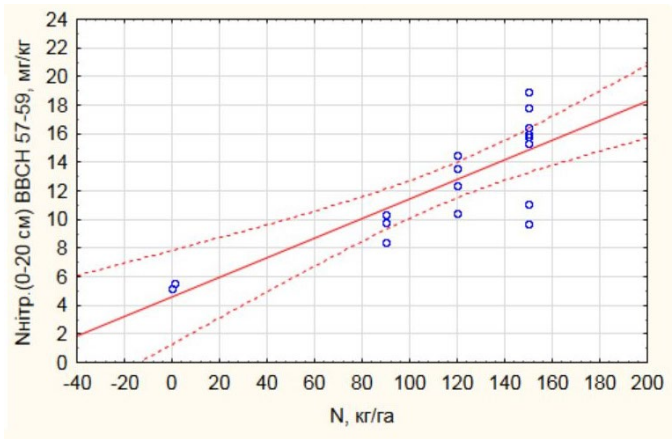


Рис. 9. Регресія вмісту нітратів на глибині 40–60 см (r = 0,70) під впливом запасу амонійного азоту в орному шарі ґрунту у фазі викиду волоті (BBCH 57-59)



А



Б

Рис. 10. Регресія вмісту легкогідролізного азоту в орному шарі ґрунту у фазі першого листочка (А: r = 0,72, BBCH 11-12) та нітратного у фазі викиду волоті у кукурудзи (Б: r = 0,81, BBCH 57-59) під впливом збільшення норми азотних добрив $N_{0\text{-}1,2\text{-}90\text{-}120\text{-}150}$

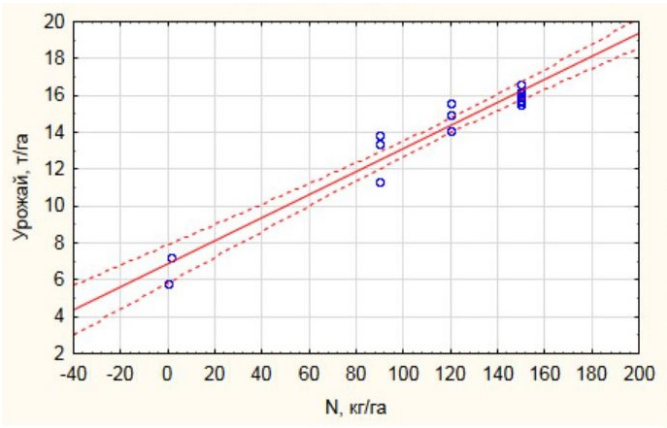


Рис. 11. Регресія урожайності зерна кукурудзи 2024 року залежно від збільшення норми внесеного з добривами азоту $N_{0\text{-}1,2\text{-}90\text{-}120\text{-}150}$

дає уяву про синергію впливів двох важливих факторів врожаю. На рисунку 13 представлена лінійна (А) та нелінійна (Б) теоретичні площини підвищення врожаю під впливом ресурсів нітратного азоту та амонійного азоту у фазі викиду волоті. Що підказують коефіцієнти лінійної математичної моделі (рис. 13 А):

$$\text{Урожай, т/га} = 3{,}068+0{,}330\times x+1{,}341\times y, \quad (4)$$

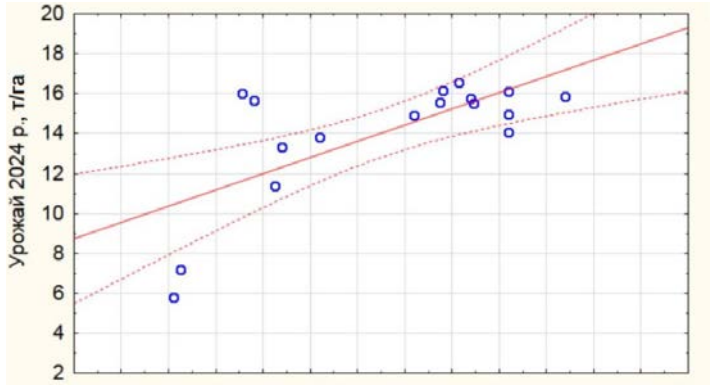
де: x – вміст нітратного азоту, мг/кг ґрунту;
y – вміст амонійного азоту, мг/кг ґрунту.

Коефіцієнт регресії при нітратному азоті (0,330) свідчить, що зі збільшенням його вмісту на 1 мг/кг урожай зростає в середньому на 0,33 т/га за незмінного рівня іншого фактора. Коефіцієнт при амонійному азоті (1,341) є майже у 4 рази більшим, ніж для нітратного азоту. Це означає, що збільшення вмісту цієї форми азоту на 1 мг/кг супроводжується підвищенням урожайності приблизно на 1,34 т/га, тобто цей показник має значно сильніший вплив на формування врожаю. Проте, взаємодія форм азоту у впливі на врожайність кукурудзи має складний – нелінійний характер, який точніше показаний на рисунку 13 Б.

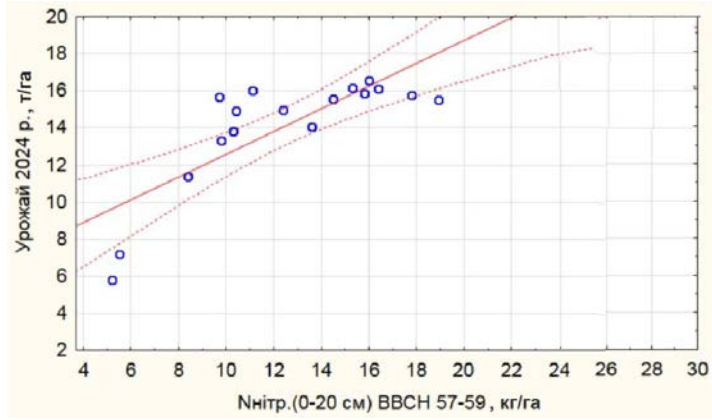
Урожай зерна гібриду Pioneer P8834 2024 року був вищим, ніж 2025 року, оскільки погода більше сприяла росту й розвитку рослин (табл. 3). На контролі він становив 5,8 і 5,6 т/га, що підтверджує високу родючість ґрунту дослідному полі та потужний потенціал гібрида. Фосфорно-калійний фон і рядкове удобрення під час сівби $N_{1,25}P_{69,4}K_{81,3}Mg_{34}S_{24,6}$ позитивно вплинули на врожай: 2024 та 2025 року прибавка становила 1,4 т.

Мала норма азоту N_{90} сприяла підвищенню врожаю на 5,6–5,5 т/га. Використання збагаченого інгібітором уреази карбаміду в обидва роки забезпечило додаткових 2,4 т/га зерна, а стабілізатор нітрифікації дещо поступався в ефективності. Нітрапірин для максимальної дії потребує більше тепла і вологи, ніж були в квітні в обидва роки. Вагомо додало урожаєм зерна збільшення норми азоту до N_{120} – 2,7–2,8 т/га.

Застосування карбаміду PULREA®+INu, або звичайного карбаміду в комплексі з нітрапірином дало однаково позитивний результат – прибавка зерна становила



А



Б

Рис. 12. Залежність врожаю зерна кукурудзи від нітратного азоту в орному шарі ґрунту у фазі першого листочка (А: r = 0,70, ВВСН 11-12) та у фазі викиду волоті (Б: r = 0,80, ВВСН 57-59)

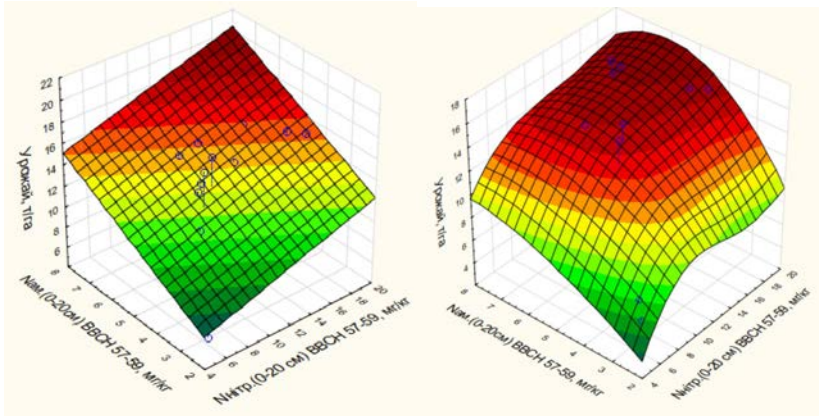


Рис. 13. Теоретичні площини регресії врожаю від основних форм доступного азоту у темно-сірому опідзоленому ґрунті за різних систем удобрення кукурудзи: А – спрощена лінійна регресія; Б – складна поліноміальна регресія

3,5–3,6 т/га порівняно з нормою N_{90}. Проте, поєднання карбаміду з інгібітором уреази та нітрапірином забезпечили 4,1–4,2 т/га прибавки зерна.

Таблиця 3

Вплив систем регулювання азотного живлення кукурудзи мінеральним добривом і стабілізаторами мікробної активності ґрунту на відхилення урожаю зерна відносно норм удобрення N_{90-120} без використання інгібіторів

№ вар.	Зміст варіанту	2024 р.	± до N_{90}	± до N_{120}	2025 р.	± до N_{90}	± до N_{120}
1	Без добрив (К)	5,8	-5,6	-8,3	5,6	-5,5	-8,3
2	Фон - (N1,25P69,4K81,3 Mg34S24,6)	7,2	-4,2	-6,9	7,0	-4,1	-6,9
3	Фон+N90	11,4	0,0	-2,7	11,1	0,0	-2,9
4	Фон+N90+PULREA®+INu	13,8	2,4	-0,3	13,5	2,4	-0,4
5	Фон+N90+ N-Lock™	13,3	1,9	-0,8	12,7	1,6	-1,2
6	Фон+N120	14,1	2,7	0,0	13,9	2,8	0,0
7	Фон+N120+PULREA®+Inu	15,0	3,6	0,9	14,7	3,6	0,8
8	Фон+N120+ N-Lock™	14,9	3,5	0,8	14,7	3,6	0,8
9	Фон+N120+PULREA® +INu+N-Lock™	15,6	4,2	1,5	15,2	4,1	1,3
10	Фон+N150	15,9	4,5	1,8	15,3	4,2	1,4
11	Фон+N150+PULREA®+INu	16,1	4,7	2,0	15,8	4,7	1,9
12	Фон+N150+ N-Lock™	16,2	4,8	2,1	16,0	4,9	2,1
13	Фон+N150+PULREA® +INu+N-Lock™	16,6	5,2	2,5	16,3	5,2	2,4
14	Фон+N150 (N80+N70(КАС)	13,8	2,7	-0,2	15,5	4,1	1,4
15	Фон+N150 (N80+N70(КАС)+PULREA®+INu	14,6	3,5	0,7	15,8	4,4	1,7
16	Фон+N150 (N80+N70(КАС) + N-Lock™	14,5	3,4	0,6	15,7	4,3	1,6
17	Фон+N150 (N80+N70(КАС)+PULREA® +INu+N-Lock™	14,9	3,8	0,9	16,0	4,6	1,9
$НІР_{05}$ абс. (т/га) / відн. (%)		0,43 / 3,05			0,39 / 2,90		

За внесення під кукурудзу N_{150} було зібрано на 1,8 (2024 р.) та 1,4 (2025 р.) т/га зерна більше, ніж за норми N_{90}. За найвищої норми удобрення азотом поєднання інгібіторів N-STAB та N-Lock™ забезпечило найвищий врожай зерна в досліді – 16,6 т/га 2024 року та 16,3 т/га 2025 року. На дерново-карбонатному піщанисто-легкосуглинковому ґрунті Малого Полісся гібрид кукурудзи Pioneer P9071 за внесення $N_{150}P_{40}K_{40}$ забезпечив врожайність зерна 13,3 т/га, але без стабілізаторів азоту [27].

Поділ норми азотного добрива на N_{80} на основне внесення та прикореневе підживлення N_{70} у фазі 6–8 листків у формі КАС 32 поступався в ефективності одноразовому внесенню азоту та дії інгібіторів 2024 року. 2025 рік виявився сприятливішим для міжрядного підживлення, вірогідно, через інтенсивніше зволожений

та холодніший червень і липень порівняно з 2024 роком. Дія інгібіторів 2025 року за підживлення КАС 32 була помітно ефективнішою, порівняно з посушливим упродовж червня 2024 роком. Міжрядне розпушування 2024 року вкрай негативно позначилося на подальшому рості й розвитку кукурудзи.

Збільшення норми азотного удобрення до N_{120} не дало стрімкого підвищення врожаю, але застосування карбаміду з уреазою забезпечило кращого 2024 року його рівень 15,0 т/га, поєднання простого карбаміду з нітрапірином забезпечило практично рівний результат. Проте на нормі N_{120} бачимо синергічну позитивну дію поєднання карбаміду з уреазою та додатковим внесення нітрапірину під передпосівну культивацію. Отримано врожай 15,6 т/га, що приблизно рівний врожаю за подальшого збільшення норми внесення азоту до N_{150} – 15,9 т/га.

Найбільший позитивний ефект від стабілізації амонійної та нітратної форм азоту бачимо на нормі удобрення кукурудзи на рівні N_{150}. Кращого 2024 року інгібітори сприяли максимальній врожайності як кожен окрема, так і в поєднанні, де досягнуто рівня 16,6 т/га зерна. Дроблення норми азоту на дві дози з метою підживлення КАС у міжрядну культивацію не дало значного позитивного ефекту 2024 року, хоча стабілізація азоту відразу обома інгібіторами все ж забезпечило 16,0 т зерна з гектара 2025 року.

За висновками G. Sneha et al. [28] вплив поєднання застосування інгібіторів уреази та інгібіторів нітрифікації значно покращувало запаси азоту в ґрунті. У той час як інгібітори уреази стримують гідроліз сечовини, інгібітори нітрифікації запобігають перетворенню амонію на високомобільні нітрати. Разом вони подовжують доступність азоту, зменшують вимивання та газоподібні викиди його сполук, а також збільшують поглинання ключового поживного елемента рослинами [29].

Висновки. Застосування інгібіторів N-STAB (NBPT – n-бутилтіофосфортриамід) та N-Lock™ Макс (нітрапірин – 2-хлор-6-(трихлорметил) піридин) як самостійно, так і поєднанні на фонах азоту від N_{90}, до N_{120} і N_{150} вагомо зменшували концентрацію нітратів в орному шарі ґрунту у фазах як першого справжнього листка кукурудзи (BBCH 11-12), так і за повної появи волоті (BBCH 57-59). Сам нітрапірин найбільше зменшував концентрацію нітратів у фазі першого листка (на 4,0–5,2 мг/кг ґрунту).

У підорному (20–40 см) пласті максимальні рівні нітратів виявлені за систем удобрення N_{90}, N_{120} та N_{150} без використання стабілізаторів азоту – 10,2, 14,1 і 14,9 мг/кг відповідно. Але нітратів було відповідно на 2,3, 10,3 і 9,9 мг/кг ґрунту менше, ніж в орному (0–20 см). На глибі 40–60 см нітратів виявлено дуже мало, але в цьому пласті найвиразніше видно дію стабілізаторів азоту на усіх фонах азотного удобрення, особливо у фазі стиглості зерна.

Збільшення норми азоту від N_{90} до N_{120} і N_{150} збагачує орний шар ґрунту амонійною формою елемента на 5,0–12,5 мг/кг. Інгібітор уреази N-STAB у складі карбаміду стримує уролітичну дію мікробіоти і підвищує його вміст від 1,5 за мінімальної норми 5,5 мг/кг на максимальній нормі удобрення. Сумісне застосування нітрапірину посилює цей ефект.

Розрахунок втрат азоту від звітрювання закису елемента залежно від запасу нітратів у ґрунті свідчать, що стабілізатори азотистих сполук зменшують його емісії від 1,77–1,85 кг/га на високих нормах $N_{120\text{-}150}$ до 1,63–1,67 кг/га.

Розрахунок потенційного звітрювання аміаку від його запасу в ґрунті свідчить, що застосування карбаміду, збагаченого інгібітором N-STAB практично втричі зменшує газоподібні втрати цієї форми поживної речовини в атмосферу.

Статистичне і графічне моделювання закономірностей впливу мінеральних сполук азоту підтвердило однаково вагомий вплив нітратів та амонійного азоту на рівень врожаю зерна кукурудзи. Лінійна модель регресії показала, що зі збільшенням вмісту нітратів на 1 мг/кг урожай зростає в середньому на 0,33 т/га.

Збільшення вмісту амонійної форми азоту на 1 мг/кг супроводжується підвищенням урожайності приблизно на 1,34 т/га. Проте, взаємодія форм азоту у впливі на врожайність кукурудзи має складний нелінійний характер за позитивної синергії.

Найкращий результат за різних систем удобрення отриманий за внесення N_{150} у формі карбаміду PULREA®+INu з обприскування ґрунту нітрапірином перед сівбою. Врожай зерна був на рівні 16,6 т/га 2024 року, та 16,3 т/га 2025 року, що на 10,8 та 10,7 т/га більше, ніж на неудобреному контролі. Інгібітори окремо та у поєднанні дієвіше впливали на рівень врожаю за підвищеної (N_{120}) та високої (N_{150}) норми азоту.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Авторський внесок: **Ю.В. Піцик** – забезпечення ресурсами та обладнанням; проведення експерименту та збирання даних; аналіз даних; графічне представлення результатів; підготовка рукопису; **П.С. Гнатів –** наукове керівництво; визначення концепції дослідження; підбір методів дослідження; розробка програмного забезпечення; перегляд і редагування рукопису.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Zhou M. & Butterbach-Bahl K. Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scaled basis from maize and wheat cropping systems. *Plant Soil.* 2014. 374: 977–991. doi.org/10.1007/s11104-013-1876-9
2. Anthropogenic Global Shifts in Biospheric N and P Concentrations and Ratios and Their Impacts on Biodiversity, Ecosystem Productivity, Food Security, and Human Health / Peñuelas J. et al., Hoboken, Wiley. 2020. 24 p. doi.org/10.1111/GCB.14981
3. Wolt J. D. A meta-evaluation of nitrapyrin agronomic and environmental effectiveness with emphasis on corn production in the Midwestern USA. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2004. 69: 23-41
4. Господаренко Г. М., Прокопчук І. В. Засвоєння основних елементів живлення з ґрунту й мінеральних добрив кукурудзою. *Збірник наукових праць Уманського НУС.* 2019. Вип. 95, ч. 1. С. 76–89. DOI: 10.31395/2415-8240-2019-95-1-76-89
5. Li C., Hu H., Chen Q., Chen D. & He J. Comammox *Nitrospira* play an active role in nitrification of agricultural soils amended with nitrogen fertilizers. *Soil Biol Biochem*. 2019. 138:107609. doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107609
6. Шестак В. Г., Гнатів П. С., Іванюк В. Я. Азотне удобрення і стабілізація нітрифікації : наукова монографія. Львів, 2006, 2023. 172 с.
7. Lei J., Fan Q., Yu J., Ma Y., Yin J. & Liu R. A meta-analysis to examine whether nitrification inhibitors work through selectively inhibiting ammonia-oxidizing bacteria. *Front Microbiol*. 2022. 13: 962146. doi.org/10.3389/fmicb.2022.962146
8. 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. doi.org/10.1007/s11157-018-9466-1
9. Bouwman A. F., Bouwman L. J. M. & Batjes N. H. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochem Cycles*, 2002. 16(4): 1058. doi: 10.1029/2001GB001811.
10. Chen Z. M., Wang Q., Zhao J., Chen Y. D., Wang H. Y., Ma J. W., Zou P. & Bao L. Restricted nitrous oxide emissions by ammonia oxidizers in two agricultural soils following excessive urea fertilization. J. Soil Sediment, 2020. 20(3): 1502-1512. doi:10.1007/s11368-019-02479-0.
11. Cheng L., Chen X., Lu D. & Wang H. Long-acting mechanisms of concentrated urea application — High urea concentrations are biological inhibitors. *Applied Soil Ecology.* 2023. V. 182, February 2023, 104723. doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104723
12. Thapa R., Chatterjee A., Awale R., McGranahan D. A. & Daigh A. Effect of enhanced efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: a meta-analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2016. 80: 1121-1134. doi.org/10.2136/sssaj2016.06.0179
13. Qiao C., Liu L., Hu S., Compton J. E., Greaver T. L. & Li Q. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input. Glob Change Biol. 2014. 21: 1249–1257. doi.org/10.1111/gcb.12802

14. Feng J., Li F., Deng A., Feng X., Fang F. & Zhang W. Integrated assessment of the impact of enhanced-efficiency nitrogen fertilizer on N_2O emission and crop yield. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2016. 231: 218-228.

15. Farming the Future: Agriculture and climate change on the Canadian Prairies / Laforge J, Corkal V, Cosbey A. Winnipeg, Manitoba, Canada. The International Institute for Sustainable Development. 2021 : веб-сайт. URL: https://www.iisd.org/system/files/2021-11/farming-future-agriculture-climate-change-canadian-prairies.pdf. (дата звернення: 12.07.2026).

16. Nature & Agriculture. 28 May 2026. Commission's Nitrates Directive weakening draws EU watchdog scrutiny in broader maladministration case. : веб-сайт. URL: https://eeb.org/en/commissions-nitrates-directive-weakening-draws-eu-watchdog-scrutiny-in-broader-maladministration-case/ (дата звернення: 05.06.2026).

17. Zhang Y. Y., Wang W. J. & Yao H. Y. Urea-based nitrogen fertilization in agriculture: a key source of N_2O emissions and recent development in mitigating strategies. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2022. Doi:10.1080/03650340.2022.2025588

18. Основи наукових досліджень в агрономії / Єщенко В. О., Копитко П. Г., Костогриз П. В., Опришко В. П. Вінниця, 2014. 332 с.

19. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення : керівний нормативний документ / Яцук І. П., Балюк С. А. Київ, 2019. 108 с.

20. Гнатів П. С., Стасів О. Ф. Системний аналіз та агроекосистеми: наукова монографія. Оброшине: ІСГ КР НААН, 2025. 412 с.

21. Гнатів П. С., Піцик Ю. В., Іванюк В. Я., Качмар О. Й., Щерба М. М. Властивості темно-сірого опідзоленого ґрунту і точне рільництво. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво.* 2025. Вип. 78(2): 7-19. Doi: 10.32636/01308521. 2025-(78)-2-1

22. Короткова І. В., Біднина В. Ю. Вплив азотних добрив та інгібіторів нітрифікації на вміст азоту в ґрунті при вирощуванні кукурудзи. Таврійський науковий вісник. *Землеробство, рослинництво, овочівництво та баштанництво.* 2024. 135(1): 98-105. Doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.1.13

23. Чайка О. В., Левченко С. О. Вплив інгібітора нітрифікації DMPP на процеси розподілу азоту в ґрунті. *Вісник аграрної науки.* 2024, № 4(853): 53-59. Том 102, № 4. Doi.org/10.31073/agrovisnyk202404-08

24. Kemmann B., Brokötter J., Götze H., Kelsch A., Frößl J., Riesch S., Heinemann P., Kukowski S., Pacholski A., & Flessa H. Ammonia emissions from urea fertilization – Multi-annual micrometeorological measurements across Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2025, Vol. 381, 109416. https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109416

25. Pacholski K. N. A. & Kage A. H. 2014. Ammonia volatilization after application of urea to winter wheat over 3 years affected by novel urease and nitrification inhibitors. Agric. Ecosyst. Environ., 197 (2014), pp. 184-194, Doi:10.1016/j.agee.2014.08.007.

26. Іванюк В., Гнатів П., Оліфір Ю. Вплив азотних добрив на формування врожаю зерна кукурудзи й ефективність використання азоту. *Вісник ЛНУП. Агрономія* 2022, 26: 170-176. Doi.org/10.31734/agronomy2022.26.170

27. Sneha G., Sibel Y., Benjamin A., Uta W. & Ute R. Deciphering the Interactions in the Root–Soil Nexus Caused by Urease and Nitrification Inhibitors. *Agronomy*. 2023, 13(6): 1603. doi.org/10.3390/agronomy13061603

28. Jiang R., Yang J. & Drury C. F et al. Modelling the impacts of inhibitors and fertilizer placement on maize yield and ammonia, nitrous oxide and nitrate leaching losses in southwestern Ontario, Canada. *Journal of Cleaner Production*. 2023. 384, 135511. Doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135511

Дата першого надходження статті до видання: 04.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.10.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.11.2026