

Науковий вісник Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.
Серія: Сільськогосподарські науки

Scientific Messenger of Lviv National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies.
Series: Agricultural sciences

ISSN 2519–2698 print

ISSN 2707-5834 online

doi: 10.32718/nvlvet-a9828

<https://nvlvet.com.ua/index.php/agriculture>

UDC 631.82/1/7:633.162: 631.416:631.95

Optimization of nitrogen fertilizer of the dark-gray soldized soil of the western forest steppe for using nitrification inhibitor

P. S. Hnativ[✉], V. Ya. Ivanuk, M. M. Polukhovych, V. H. Shestak, Yu. M. Olifir, B. I. Kotsuba,
D. V. Baransky

Lviv National Environmental University, Dublyany-Lviv, Ukraine

Article info

Received 10.04.2023

Received in revised form

15.05.2023

Accepted 16.05.2023

Hnativ, P. S., Ivanuk, V. Ya., Polukhovych, M. M., Shestak, V. H., Olifir, Yu. M., Kotsuba, B. I., & Baransky, D. V. (2023). Optimization of nitrogen fertilizer of the dark-gray soldized soil of the western forest steppe for using nitrification inhibitor. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural sciences, 25(98), 167–176. doi: 10.32718/nvlvet-a9828

Lviv National Environmental
University, Great Vladimir Str., 1,
Dublyany-Lviv, 80381, Ukraine
Tel.: +38-096-585-15-51
E-mail: pshnativ@ukr.net

Nitrogen is a key element for the growth and yield of all crops. Increased doses of nitrogen do not give the expected return, create a danger of leaching of nitrates, activate the emission of nitrous oxide. These problems make it necessary to solve the urgent issue of optimizing nitrogen nutrition using the nitrogen stabilizer nitrapyrin. The purpose of our research under conditions of sufficient moisture in the Western Forest Steppe was to find out the effect of the urease inhibitor on the agrochemical parameters of the dark gray forest podzolized light loam soil, as well as the effect on the yield of winter barley. We conducted field experiments at the Lviv National University of Nature Management. We used traditional methods of field research and standardized methods of laboratory analysis. A positive effect of the use of the nitrogen stabilizer nitrapyrin on the funds of nitrogen, phosphorus and potassium available for nutrition, as well as on the reduction of soil acidity, was established. The highest content of easily hydrolyzable nitrogen was achieved when applying $N_{23}P_{60}K_{60}$ in autumn + N_{97} in the phase of vegetation recovery with nitrapyrin – 132 mg/kg of soil. This was 28 mg/kg more than the traditional fertilization system without nitrapyrin ($N_{60}P_{60}K_{60}$). Application of 120 kg/ha of nitrogen in the form of urea created a reserve 3.3 times higher, and ammonium nitrate created a reserve 3.6 times higher than the unfertilized version. Nitrapyrin, a stabilizer of nitrates, made it possible to limit their formation with the introduction of urea by 3.5%, ammonium nitrate by 10%. The nitrogen application rate of N_{120} kg/ha per year led to the annual emission of nitrous oxide in the amount of 121.5 kg/ha. Nitrapyrin limited the amount of nitrous oxide emission by 3.3–7.2 kg/ha, depending on the amount of nitrogen application rate. The use of ammonium nitrate at the rate of N_{120} when applied in the spring caused the highest level of nitrogen oxide emissions (29.5 kg/ha of soil). However, the application of this fertilizer and inhibitor reduced gaseous nitrogen losses to 25.9 kg/ha when applied to restore vegetation. The introduction of N_{97} (ammonium nitrate) + N-Lok Max under winter barley during the restoration of vegetation on the background of $N_{23}P_{60}K_{60}$ under plowing gave the highest average yield in the experiment for 2020–2022 – 7.65 t/ha, for 2022 – 7.90 t/ha. The 3D regression model of winter barley grain yield under the influence of the synergistic effect of both forms of nitrogen illustrates the importance of balancing the funds of forms of this nutrient element in the soil.

Key words: nitrogen, nitrates, nitrous oxide, nitrapyrin, mineral fertilizers, winter barley.

Оптимізація азотного удобрення темно-сірого опідзоленого ґрунту Західного Лісостепу за використання інгібітора нітрифікації

П. С. Гнатів[✉], В. Я. Іванук, М. М. Полухович, В. Г. Шестак, Ю. М. Оліфір, Б. І. Коцуба,
Д. В. Баранський

Львівський національний університет природокористування, м. Дубляни, Україна

Азот є ключовим елементом для росту та врожайності всіх культур. Підвищені дози азоту не дають очікуваної віддачі, створюють небезпеку змиву нітратів, активізують емісію закису азоту. Ці проблеми зумовлюють необхідність вирішувати актуальне питання оптимізації азотного живлення шляхом використання стабілізатора азоту нітрапірину. Метою досліджень в умовах достатнього зволоження у Західному Лісостепу було з'ясування дії інгібітора ензимів аміномоноксигенази і нітритоксидоредуктази на агрохімічні показники темно-сірого лісового опідзоленого легкосуглинкового ґрунту, а також на врожайність ячменю озимого. Проведено польові експерименти у Львівському національному університеті природокористування. Використані традиційні методи польових досліджень та стандартизовані методики лабораторних аналізів. Встановлений позитивний вплив застосування стабілізатора азоту нітрапірину на фонди доступних для живлення азоту, фосфору і калію, а також на зменшення кислотності ґрунту. Найвищою вмісту легкогідролізного азоту досягнуто від внесення $N_{23}P_{60}K_{60}$ восени + N_{97} у відновлення вегетації з нітрапірином – 132 мг/кг ґрунту. Це на 28 мг/кг більше, ніж за традиційної системи удобрення без нітрапірину ($N_{60}P_{60}K_{60}$). Внесення 120 кг/га азоту у формі карбаміду створювало запас у 3,3 раза, а амонійної селітри – у 3,6 раза вищий від удобреного варіанту. Стабілізатор нітратів – нітрапірин, дозволив обмежити їх утворення за внесення карбаміду на 35 %, амонійної селітри – 10 %. Норма внесення азоту N_{120} кг/га д. р. зумовлює річну емісію закису азоту в обсязі 121,5 кг/га. Нітрапірин обмежував обсяг емісії закису азоту на 3,3–7,2 кг/га, залежно від величини норми внесення азоту. Використання амонійної селітри в нормі N_{120} при внесенні навесні спричиняло найвищий рівень викиду закису азоту (29,5 кг/га ґрунту). Проте внесення цього добрива та інгібітора знизило газоподібні втрати азоту до 25,9 кг/га при внесенні у відновлення вегетації. Внесення під озимий ячмінь N_{97} (амонійна селітра) + N-Lok Макс при відновленні вегетації на фоні $N_{23}P_{60}K_{60}$ під оранку забезпечило найвищу в досліді середню за 2020–2022 рр. врожайність – 7,65 т/га, за 2022 р. – 7,90 т/га. 3D-модель регресії урожаю зерна озимого ячменю під впливом синергічного ефекту обох форм азоту ілюструє важливість збалансованості фондів форм цього поживного елемента в ґрунті.

Ключові слова: азот, нітрати, закис азоту, нітрапірин, мінеральні добрива, ячмінь озимий.

Вступ

Впровадження у виробництво сучасних сортів і гібридів інтенсивного типу, питання оптимізації їх мінерального і зокрема підвищеного азотного удобрення з дотриманням сучасних принципів захисту природного довкілля в умовах змін клімату зумовлюють необхідність вирішувати актуальну проблему раціоналізації азотного живлення у поєднанні з використанням стабілізатора азоту нітрапірину на ґрунтах Західного Лісостепу.

Сільське господарство постало в сучасному вигляді здебільшого за рахунок експлуатації ґрунтів і чинить негативний тиск на природу (Lykhochvor et al., 2022b). Проте без хімізації та розумного керування ґрунтовими ресурсами сьогодні неможливо забезпечити людство продовольством (Lykhochvor et al., 2022a; Polovyy et al., 2021).

Азот є вирішальним поживним елементом для оптимального росту та врожайності всіх культур (Chambers & Dampney, 2009). Винахід процесу Габера-Буша для виробництва синтетичного азотного добрива та його роль у “зеленій революції” в шістдесятих роках важко переоцінити. Він призвів до стрімкого росту врожайності культур в усьому світі (Abalos et al., 2014). Щорічний глобальний попит на синтетичні азотні добрива постійно зростає, що зумовлено збільшенням популяції та глобальним переходом на багатшу білкову їжу (Chambers & Dampney, 2009). Розрахункове глобальне внесення добрив, що містять азот, у 2020 році становило 110 Мт (IFA, 2019). Проте енерговитратний процес Хабера-Буша для виробництва азотних синтетичних добрив споживає 2 % світового запасу енергії вичопного палива. Це робить синтетичні азотні добрива дорогими у виробництві та є відповідною статтею витрат для виробників зерна (Hege & Offenberger, 2011).

Тому, попри актуальність високих врожаїв культур, залишаються проблемними великі норми азотного удобрення, зокрема на тлі низьких фосфорно-калійних фонів (Horash & Klymyshena, 2020; Shestak, 2022). Підвищені дози внесення азоту створюють небезпеку змиву нітратів вертикальними і латераль-

ними потоками води (Zaman et al., 2008; Yu et al., 2019), активізують емісію закису азоту (Fan et al., 2019) як парникового газу. Ретарданти не забезпечують повністю посіви колосових від вилягання (Lohinova et al., 2010) у період формування врожаю.

В умовах Західного Лісостепу використання інгібіторів малопоширене, а імпорту промислових препаратів є нестабільним. Проте проблема вирощування високих врожаїв культур на максимальних фонах азотного живлення без втрат азоту тут існує (Polovyy et al., 2021; Shestak, 2022).

Азотні добрива відіграють важливу роль у підтриманні потреби культур у поживних речовинах і є основним джерелом живлення для утворення білків та перетворення енергії (Ti & Yan, 2020). Статистика показує, що зростання внесення азотних добрив призвело до збільшення врожайності сільськогосподарських культур у світі більше ніж на 40 % (Li et al., 2009; Fowler et al., 2013; Zhang, 2015; Systemy..., 2016).

У деяких країнах від 1980 до 2010 року обсяги асиміляції азоту сільськогосподарськими культурами в рослинництві зросли вдвічі, але внесення азотних добрив було збільшено втричі (Li et al., 2009; Ti & Yan, 2020). Втрати азоту з азотних добрив, внесених у ґрунт, на першому етапі оцінюють у 35–40 % у вигляді NH_3 , на другому етапі 10 % втрачається від випаровування N_2O і наступний етап – вимивання 15–25 % NO_3^- на достатньо зволених ґрунтах.

Тому вивчення інгібіторів нітрифікації для запобігання втрат азоту актуальне давно (Nelson & Huber, 1992) і давно вважається економічно ефективним. Як стверджують Б. Фукс і Н. Баумгартнер (Fuks & Baumhartner, 2020), завдяки вповільненню утворення нітрату з амонію добрив рослини отримують необхідне забезпечення азотом відповідно до потреб триваліший на 10–15 діб період, оскільки дія інгібітора ензимів аміномоноксигенази і нітритоксидоредуктази також залежить від температури. Водночас рослина налаштовується на частково амонійне живлення. Інгібітори нітрифікації підходить для застосування на більшості типів ґрунтів, тому їх використання доцільне для ефективного зниження втрат азоту різними шляхами (Ding et al., 2021).

За узагальненнями В. Павленко (Pavlenko, 2018), 239 дослідів в 25 країнах світу підтверджують позитивний вплив інгібіторів нітрифікації на перетворення азоту в ґрунті і ефективність використання азотних добрив, зниження втрат шляхом денітрифікації і вимивання нітратів, поліпшення азотного живлення культур, підвищення їх врожайності і якості продукції. В Україні останніми роками опубліковані поодинокі результати дослідження (Lohinova et al., 2010) стабілізаторів азоту, зокрема на кукурудзі.

Нітрапирин виробляють у формі препарату N-Lock™. Діюча речовина – це органічна сполука з формулою $\text{C}_5\text{H}_3\text{NCCl}_3$. N-Lock™ широко використовується як інгібітор нітрифікації у сільському господарстві. Він діє як ґрунтовий бактерицид і використовується від 1974 року. Нітрапирин був винесений на розгляд EPA і визнаний безпечним для використання в 2005 році (Nitrogen..., 2022).

Україна активно долучилася до активізації впровадження Директиви Ради Європи 91/676/ЄЕС від 12 грудня 1991 р. про захист вод від забруднення, спричиненого нітратами з сільськогосподарських джерел. Директивою обумовлена низка документів, які повинні бути керівними в секторах економіки. Зокрема, це “Методика визначення зон, вразливих до забруднення нітратними сполуками” і “Кодекс кращих сільськогосподарських практик”.

В умовах Західного Лісостепу немає досвіду застосування систем мінерального удобрення культур з використанням стабілізатора азоту в ґрунті, тому проблема оптимізації азотного живлення рослин та запобігання втратам азотних сполук з агроєкосистем актуальна.

Мета дослідження

Мета наших досліджень в умовах Західного Лісостепу на фоні різних систем мінерального удобрення з'ясувати дію нітропірину – стабілізатора нітрифікації азоту – на агрохімічні показники ґрунту, ріст, розвиток і продуктивність культур, зокрема ячменю озимого.

Матеріал і методи досліджень

Досліди здійснили у Львівському національному університеті природокористування (ЛНУП) на дослідному полі у м. Дубляни, що в районі Пасмового Побужжя природо-кліматичної зони Лісостепу Західного. Координати – N 49°53'53.3"; E 24°05'15.7". Висота над р. м. 263 м. Польові експерименти виконали за традиційною методикою в агрономії.

На дослідному полі темно-сірий опідзолений легкосуглинковий слабогумусований ґрунт – Greyic Luvisc Phaeozem (WRB, 2015). До закладання дослідів вміст легкогідролізного азоту за методом Корнфілда у товщі 0–20 см становив 65–70 мг/кг ґрунту. Він знижувався у пласті 20–40 см до 50–53 мг/кг ґрунту. Визначення азоту легкогідролізного (Nh) проводили згідно з ДСТУ 7863:2015. Вміст нітратного азоту (Nn) визначали потенціометрично за допомогою іонселективного нітратного електрода у сольовій витяжці 1 % розчину алюмокалієвого галуна при співвідношенні

ґрунту до розчину 1:2,5. За показниками йономіра і калібрувального графіка визначали вміст нітратного азоту. Стандартні розчини для калібрування приладу і калібрувальний графік готували з використанням $1 \cdot 10^{-1}$ М KNO_3 шляхом поступового десятиразового розбавлення його дистильованою водою до концентрації $1 \cdot 10^{-2}$ М, $1 \cdot 10^{-3}$ М, $1 \cdot 10^{-4}$ М. Вміст нітратів у ґрунті, в мг/кг, знаходили за величиною рNO₃. До закладання дослідів вміст нітратного азоту змінювався від 20–28 мг/кг ґрунту у пласті 0–20 см до 16–18 мг/кг у пласті 20–40 см.

Інтенсивність річних потоків емісії закису азоту з ґрунту $E_{\text{N}_2\text{O}}$ (кг/га) розраховували за формулою, запропонованою А. Ф. Bouwman (Bouwman, 1996).

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = 1 + 0,0125 \times N_{\text{др.}}, \quad (1)$$

де: $N_{\text{др.}}$ – запаси нітратів у орному шарі ґрунту.

Запаси нітратів $Z_{\text{N-NO}_3}$ (кг/га) вираховували за формулою обчислення запасів гумусу (Metodyka..., 2013) з використанням перевідних коефіцієнтів мг/кг у відсотки і тонни у кілограми:

$$Z_{\text{N-NO}_3} = V_{\text{N-NO}_3}(\text{мг/кг}) \times 0,0001(\%) \times 1000(\text{кг}) \times 1,47(\text{г/см}^3) \times 20(\text{см}), \quad (2)$$

де: $V_{\text{N-NO}_3}$ – вміст N-NO₃ в орному (0–20 см) шарі ґрунту у мг/кг; 0,0001 – коефіцієнт переводу у %; 100 – коефіцієнт переводу у кг; 1,47 – щільність орного шару модельного ґрунту у г/см³; 20 – товщина орного шару у см.

Вміст фосфору (P₂O₅) у верхньому 20 см шарі становить 49–50 мг/кг ґрунту. Рухомі сполуки фосфору визначали за Чириковим (ДСТУ 4115-2002). Вміст фосфору поступово знижується до 43–45 мг/кг чистою до глибини. Вміст обмінного калію за Чириковим (ДСТУ 4115-2002) у перерахунок на K₂O становить 34–36 мг/кг ґрунту у пласті 0–20 см. Його кількість зменшується до 25–28 мг/кг ґрунту у пласті 20–40 см.

За програмою експерименту перед закладанням дослідів до сівби, по відновленню вегетації (перед початком колосіння) і перед збиранням було взято зразки ґрунту з глибини 0–20 та 20–40 см. Аналізи виконали на базі філіалу кафедри агрохімії та ґрунтознавства ЛНУП в Інституті сільського господарства Карпатського регіону НААН. Проби ґрунту відбирали і готували до аналізів згідно з ДСТУ ISO 11464 2001.

Технологія вирощування ячменю озимого була традиційна: оранка на 20–22 см, внесення добрив – діамфоски ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{KCl} - \text{N}_{10}\text{P}_{26}\text{K}_{26}$) під передпосівну культивуацію. Сівба сортом Хайлайт в оптимальні терміни з рекомендованою нормою висіву насіння 3,8 млн зерен на га. Карбамід ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O} - \text{N}_{46}$) вносили під передпосівну культивуацію в нормі згідно зі схемою дослідів. Частина азотних добрив у формі амонійної селітри ($\text{NH}_4\text{NO}_3 - \text{N}_{34}$) була внесена весною при відновленні вегетації, частина – перед початком колосіння (в нормах згідно зі схемою дослідів (табл. 1)). Інгібітор нітрифікації N-Lock™, вносили за схемою дослідів у нормі 1,7 л/га. Препарат N-Lock™ – промисловий стабілізатор азоту, що має діючу речовину 2-Хлор-6-(трихлорметил)-піридин – хімічна формула $\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_4\text{N}$. Діюча речовина є ґрунтовим бактерицидом, функціонує як інгібітор утворення ензимів аміномоноксигенази і нітритоксидоредуктази, чим запобігає гідролізу азотистих сполук до нітратів і нітритів. Його дія на

бактеріоценоз ґрунту і пригнічення нітрифікації триває 8–10 тижнів. Нітрапірин повністю розкладається як у ґрунті, так і в (Nitrogen..., 2022).

Статистичний аналіз даних виконано за допомогою пакетів Microsoft Excel, Statistica 12 та також за допомогою розробленої програми Dispersion.exe. (<https://github.com/dimbaida/variance-anlysis>).

Результати

На сьогодні не було даних щодо впливу підвищених і високих норм азотного удобрення ячменю озимого у Пасмовому Побужжі на фонд легкогідролізних форм основного елемента живлення, який визначає величину максимального врожаю у сортів інтенсивного типу колосових культур.

Таблиця 1

Схема польового експерименту

Зміст системи удобрення	Сумарна норма азоту, кг/га д.р.
Без добрив – контроль	0
Нітрапірин – перед сівбою	0
Фон – N ₂₃ P ₆₀ K ₆₀ (діамофоска) – перед сівбою	23
Фон + Нітрапірин – перед сівбою	23
Фон + N ₉₇ (карбамід) – перед сівбою	120
Фон + N ₉₇ (карбамід) + Нітрапірин – перед сівбою	120
Фон + N ₉₇ (карбамід) + Нітрапірин – відновлення вегетації	120
N ₂₃ (селітра – перед сівбою) + N ₆₇ (відновлення вегетації) + N ₃₀ – початок колосіння	120
N ₂₃ (селітра – перед сівбою) + N ₆₇ + Нітрапірин – відновлення вегетації + N ₃₀ – початок колосіння	120
Фон + N ₃₇ (селітра) – відновлення вегетації	60
Фон + N ₃₇ (селітра) + Нітрапірин – відновлення вегетації	60
Фон + N ₆₇ (селітра) – відновлення вегетації	90
Фон + N ₆₇ (селітра) + Нітрапірин – відновлення вегетації	90
Фон + N ₉₇ (селітра) – відновлення вегетації	120
Фон + N ₉₇ (селітра – відновлення вегетації) + Нітрапірин – перед сівбою	120
Фон + N ₉₇ (селітра) + Нітрапірин – відновлення вегетації	120

У наших дослідженнях за відсутності удобрення ґрунту спостерігали малий (природний) вміст легкогідролізного азоту в орному і підорному пласті, і він ще зменшився до збирання врожаю до 44–67 мг/кг сухої маси (рис. 1).

Внесення в ґрунт N₁₂₀P₆₀K₆₀ (N₂₃ перед сівбою та N₉₀ при відновленні вегетації) у формі карбаміду спричинило збільшення концентрації легкогідролізного азоту на 31–37 мг/кг в пласті 0–20 см в обидва роки досліджень. Внесення нітрапірину на такому фоні удобрення сприяло додатковому збільшенню запасу легкогідролізного азоту на 7–10 і 7–9 мг/кг в орному та підорному пластах. Нітрапірин діяв ефективніше при внесенні препарату в період відновлення вегетації озимого ячменю порівняно з його внесенням під передпосівну культивування.

Збільшення ресурсу легкогідролізного азоту на початку вегетації ми спостерігали при внесенні N₂₃P₆₀K₆₀ восени + N₃₇ у відновлення вегетації. Внесення нітрапірину і збільшення норми на N₃₇ та на N₆₀ у відновлення вегетації ще більше підвищувало концентрацію легкогідролізного азоту в орному пласті. Проте його вміст сягнув найвищого діапазону – 110–132 та 113–131 мг/кг від внесення N₂₃P₆₀K₆₀ восени + N₉₇ у відновлення вегетації без нітрапірину та з нітра-

пірином 111–135 і 116–135 мг/кг у 2020 та 2021 рр. дослідження (рис. 1).

Різниця у фондах між весною і збиранням за показником використання легкогідролізного азоту була загалом меншою, порівняно з нітратами (рис. 2). Мінеральна форма поживного азоту вже навесні тим сильніше зникала з ґрунту, чим активніше діяв нітрапірин. Фонд легкогідролізного азоту навесні був тим більшим, чим більшою була норма внесення азотних добрив. Стабілізатор азоту мало впливав на цей фонд ґрунтового азоту. Отже, застосування нітрапірину спричиняло відносно підвищення фонду легкогідролізного азоту в орному та підорному пластах ґрунту.

Запаси нітратів за внесення лише 23 кг/га амонійної селітри збільшувалися удвічі, внесення 120 кг/га азоту у формі карбаміду створювало запас у 3,3 раза, а амонійної селітри – у 3,6 раза вищий від неудобреного варіанту (рис. 3). Стабілізатор нітратів – нітрапірин – дозволив обмежити їх утворення за внесення карбаміду на 35 %, амонійної селітри – 10 %. За менших норм азотного удобрення ці відсотки були дещо меншими, але підтверджували дію інгібітора на активність ензимів аміномонооксигенази і нітритокси-редуктази.

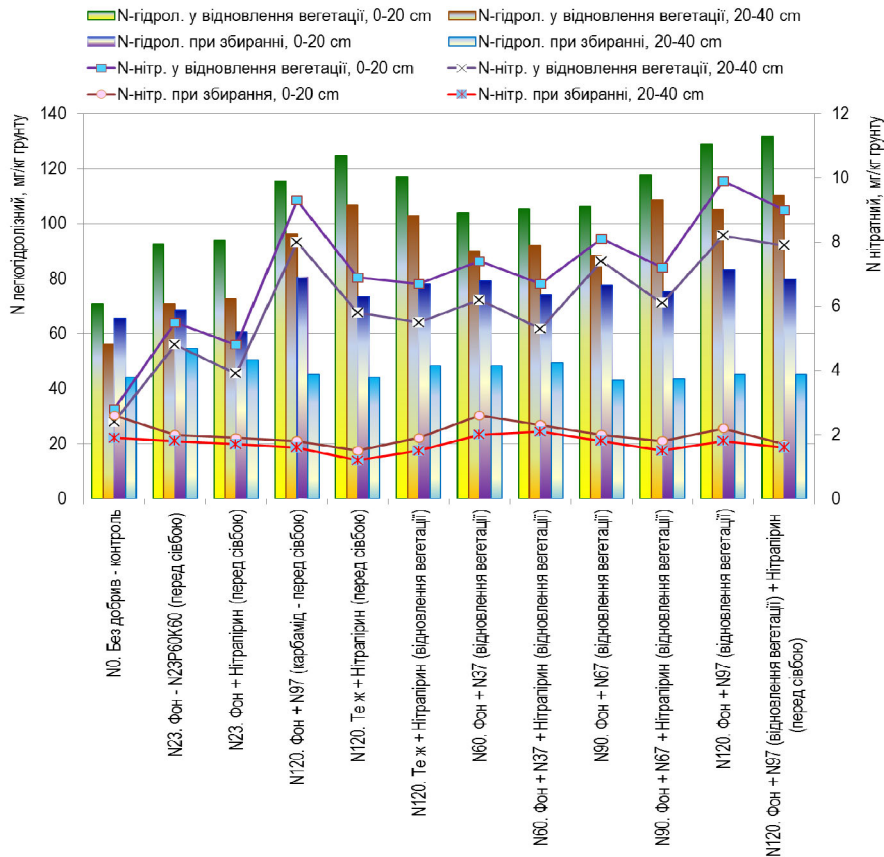


Рис. 1. Залежність динаміки доступних азотних сполук в ґрунті від систем удобрення ячменю озимого і використання стабілізатора азоту нітрапірину

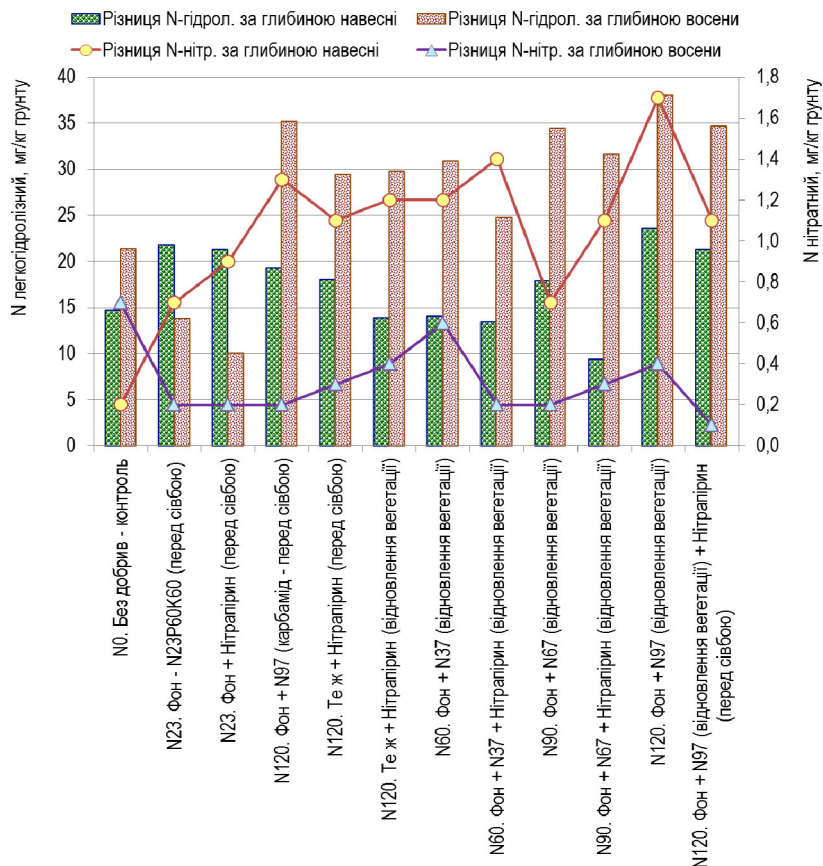


Рис. 2. Залежність різниці доступних фондів азоту в ґрунті на старті та на завершенні вегетації від систем удобрення ячменю озимого і використання стабілізатора азоту нітрапірину

Методологія IPCC (1997 р.) для оцінки прямих викидів N_2O від синтетичних добрив, що застосовуються на сільськогосподарських ґрунтах, розроблена А. Ф. Bouwman (Bouwman, 1996) і дала змогу обчислити теоретичний прогнозований обсяг емісії газоподібних оксидів азоту у варіантах наших систем азотного удобрення озимого ячменю. Припускається, що емісія становить фіксований відсоток – $1,25 \pm 1 \%$ застосовуваного для удобрення ґрунту синтетичного азоту. Якщо

взяти в розрахунок лише фонд нітратів в ґрунті на старті вегетації, коли діє інгібітор ензимів аміномоноксигенази і нітритоксидоредуктази, то побачимо, як пригнічення утворення ензимів аміномоноксигенази і нітритоксидоредуктази і зменшує емісію азотистих парникових газів. Фонд нітратів (кг/га) вираховували за формулою, аналогічною для розрахунку запасу гумусу (Metodyka..., 2013), показаний на [рисунок 3](#).

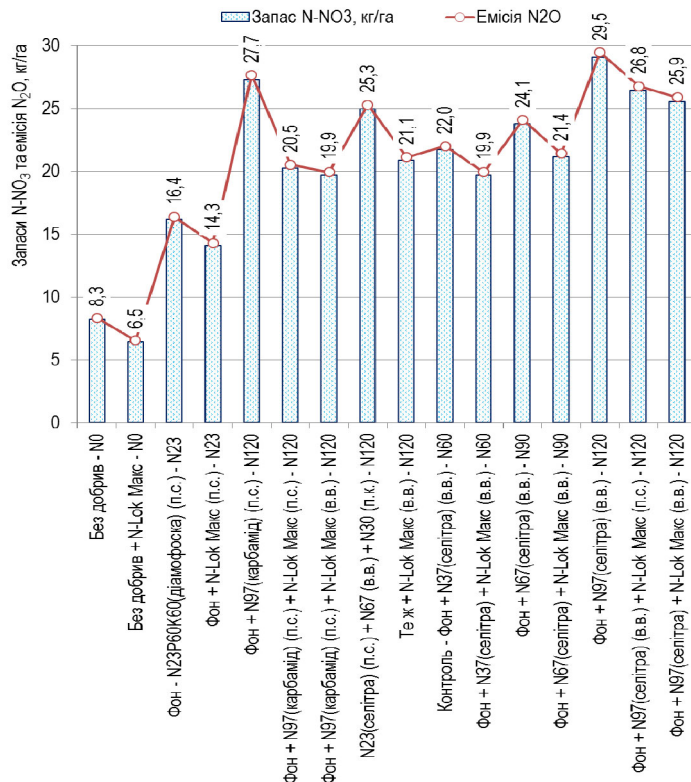


Рис. 3. Показники викидів закису азоту залежно від фонду нітратів у товщі ґрунту 0–40 см на старті весняної вегетації за різних систем азотного удобрення ячменю озимого, кг/га (п.с. – перед сівбою; в.в. – відновлення вегетації; п.к. – початок колосіння)

Пригнічення активності мікробіоти бактерицидом нітрапірином, що цілеспрямовано діє на нітрифікатори, які продукують для цього ензимів аміномоноксигеназу і нітритоксидоредуктазу, дієво стримує утворення нітратів на всіх нормах азотного удобрення. Припускаємо, що менша кількість нітратного азоту супроводжується меншим потенціалом емісії N_2O з ґрунту.

Норма внесення азоту N_{120} кг/га д. р. зумовлює річну емісію закису азоту в обсязі 121,5 кг/га. Менші норми спричиняють відповідно менші обсяги викидів. За А. Ф. Bouwman (Bouwman, 1996) – менша кількість нітратного азоту супроводжується меншим потенціалом емісії N_2O з ґрунту. За нашими розрахунками на основі вмісту нітратів у 0–40 см товщі ґрунту відповідно до методики цих авторів обсяги викидів закису азоту є максимальними на варіантах з найвищими нормами внесення азоту під ячмінь озимий, де не застосований нітрапірин. [Рисунок 3](#) показує ймовірні фактичні обсяги викидів закису азоту. Максимальними вони є на варіантах найбільших норм внесення азоту під ячмінь озимий, де не застосований нітрапі-

рин. Величина викиду досягає 27,7–29,4 кг/га за рік. Нітрапірин обмежує кількість емісії закису азоту на 3,3–7,2 кг/га, залежно від величини норми внесення азоту.

За внесення N_{120} у формі карбаміду перед сівбою одночасно із заробкою препарату інгібітора нітрифікації (1,7 л/га) річний обсяг викиду N_2O з ґрунту в атмосферу зменшувався від 27,7 до 20,5 кг/га. Використання амонійної селітри в аналогічній нормі при внесенні навесні спричиняло найвищий рівень викиду закису азоту (29,5 кг/га ґрунту). Проте внесення амонійної селітри та інгібітора знизило газоподібні втрати азоту до 26,8 кг/га при заробці з осені та до 25,9 кг/га при внесенні у відновлення вегетації.

Важливо вказати, що був помітний вплив азотних, фосфорних та калійних добрив і нітрапірину на кислотність орного і підорного пласту темно-сірого лісового опідзоленого легкосуглинкового слабогумусованого ґрунту. Ми дослідили збільшення кислотності орного і підорного пластів ґрунту під дією мінеральних добрив упродовж вегетації 2020–2021 років. Було встановлено нейтралізаційну дію нітрапірину на ґрун-

товий розчин. Проте нейтралізація ґрунту року нітрапірином послаблювалася за збільшення норми азоту від 23 кг/га до 120 кг/га.

Обговорення

Співвідношення доступних форм поживних речовин, зокрема й азотовмісних, в ґрунті має велике значення для ефективного надходження та асиміляції азоту і, що дуже важливо, для запобігання втрат нітратів у період інтенсивних опадів та емісії газоподібних сполук в атмосферу.

Попередні дослідженнями у Пасмовому Побужжі Західного Лісостепу встановлено, що за впливу різних доз мінеральних добрив значно змінюється вміст легкогідролізних форм азоту в темно-сірому опідзоленому ґрунті при вирощуванні ячменю ярого. Результати Н. І. Веги (Veha, 2015) свідчать про позитивну динаміку вмісту легкогідролізного азоту в ґрунті у варіантах із внесенням $N_{60}P_{45}K_{45}$ і $N_{60}P_{60}K_{60}$. Вміст в орному шарі легкогідролізного азоту був більшим порівняно з неудобrenим варіантом на 42–43 і 50–55 мг/кг ґрунту відповідно.

На темно-сірому опідзоленому ґрунті Північного Лісостепу України поділ норми мінеральних добрив на два внесення в дозу $N_{50}P_{50}K_{100} + N_{20}P_{20}K_{20}$ за вирощування моркви столової сприяло ефективному мінеральному живленню і вимогам рослин (Lohinova et al., 2010). Порівняно з контролем (без добрив) на період сходів вміст фонду азоту, що легко гідролізуються, підвищувався на 20 %, а нітратів на 66 %. До завершення вегетації підвищення становило відповідно на 20 і 42 %, що свідчить про достатню забезпеченість рослин азотом. Отже, бачимо стрімке збільшення концентрації нітратів у ґрунті, які потенційно могли бути втрачені вертикальним вимиванням.

Про ефективність стабілізаторів нітрифікації для стабілізації фонду мінерального азоту та регулювання азотного живлення є багато досліджень тільки за рубежом (Hege & Offenberger, 2011; Abalos et al., 2014; Fan et al., 2019). Автори (Abalos et al., 2014; Fan et al., 2019; O'Callaghan, 2020) доводять, що інгібітори нітрифікації різних марок виконували важливу регуляторну роль, пригнічуючи мікробіоту, яка синтезує ензими аміномонооксигеназу і нітритоксидоредуктазу для перетворення амонійної форми азоту в нітратну. Результати їхніх численних досліджень підтверджують, що в різних кліматичних умовах на різних ґрунтах використання інгібіторів ензимів аміномонооксигенази і нітритоксидоредуктази значно покращувало ефективність внесених азотних добрив шляхом пригнічення активності азотоперетворювальної мікробіоти в ґрунтах. Інгібітори нітрифікації підходять для застосування на більшості типів ґрунтів у зонах вирощування озимих зернових. Використання інгібіторів нітрифікації в ґрунті необхідне для ефективного зниження втрат азоту в ґрунті різними шляхами (Ding et al., 2021). Проте узагальнення досліджень не дають однозначних ствердних висновків щодо однакового впливу обробки інгібіторами нітрифікації на зменшення непродуктивних втрат азоту з ґрунту.

У дослідженнях, проведених нами у Пасмовому Побужжі Західного Лісостепу (Shestak, 2022; 2023), внесені під ячмінь озимий азотні добрива вагомо збільшували фонд амонійних і нітратних форм доступного для рослин азоту практично пропорційно до норм N_{60} , N_{90} і N_{120} . Це був би цілком позитивний результат використання мінеральних добрив, якби не загрози втрат частини азоту у формі вимитих у глибокі горизонти ґрунту нітратів або випаруваних сполук у газоподібних формах в атмосфері.

Фонди нітратів за внесення лише 23 кг/га амонійної селітри збільшувалися удвічі. Внесення 120 кг/га азоту у формі карбаміду з осені збільшувало фонд нітратів у 3,3 раза, а амонійної селітри – у 3,6 раза більший, ніж на неудобrenому ґрунті. Стабілізатор ензимів аміномонооксигенази і нітритоксидоредуктази – нітрапірин – дозволив обмежити утворення нітратів за внесення карбаміду на 23–28 % в орному пласті та на 19–31 % у підорному. На фоні весняного удобрення амонійною селітрою зниження становило 9–11 % в орному шарі та 4–18 % у підорному. Це підтверджує ефективну дію інгібітора на активність ензимів аміномонооксигенази й нітритоксидоредуктази і зменшення потенційних втрат азоту.

Застосований стабілізатор азоту обмежив утворення нітратів та обсяг емісії закису азоту з товщі ґрунту 0–40 см на 3,3–7,2 кг/га залежно від норми і форми внесених азотних добрив.

В таблиці 2 показано, яка існувала тісна позитивна кореляція двох досліджених форм азоту на старті вегетації 2020 р. ($r = 0,76–0,79$). До збирання встановлюється тісний обернено пропорційний зв'язок вмісту нітратів із вмістом легкогідролізного азоту на старті вегетації.

Проте у жнива вміст обох форм азотних сполук проявляв тісну пряму кореляцію, що свідчить про збіднення ґрунту на доступні форми азоту. Величина врожаю прямо пропорційно тісно залежала від стартових ресурсів легкогідролізного азоту ($r = 0,88–0,91$) та нітратів ($r = 0,81–0,77$) у всій товщі ґрунту.

Розрахунок парних кореляцій дозволив припустити складніші залежності і побудувати 3D-моделі зв'язків показника врожайності з параметрами відразу двох агрохімічних показників. Так, на рисунку 4 бачимо, що за одночасного зростання на старті весняної вегетації фонду нітратів та азоту, що легко гідролізується, врожай пропорційно збільшується. За одностороннього зростання лише однієї форми азоту він менший.

Моделювання подвійного впливу різних форм доступного азоту на зміну кислотності ґрунту показана на рисунку 5. 3D-модель синергії дії форм азоту свідчить як за малого, так і за високого рівня вмісту легкогідролізного азоту зростання концентрації нітратів у ґрунті спричинює його підкислення, негативно позначається на живленні культур.

Проблема оптимального азотного удобрення ґрунтів і запобігання втратам нітратів та закису азоту за межі малого біогеохімічного циклу агроєкосистем зумовили потребу започаткування аналогічної програми експериментів з такими популярними культурами, як соя та соняшник.

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції Пірсона між параметрами змін азотних агрохімічних показників у ґрунті упродовж періоду вегетації під впливом норм удобрення та врожайністю ячменю озимого, $r \pm$

Показники	Урожайність	N _{гидр} , весна, 0–20 см	N _{гидр} , весна, 20–40 см	N _{гидр} , збирання, 0–20 см	N _{гидр} , збирання, 20–40 см
N _{гидр} , весна 0–20 см	0,88	X	-	-	-
N _{гидр} , весна 20–40 см	0,91	0,97	X	-	-
N _{гидр} , збирання, 0–20 см	0,30	0,07	0,09	X	-
N _{гидр} , збирання, 20–40 см	0,41	0,37	0,42	0,96	X
Нітрати, весна 0–20 см	0,81	0,78	0,79	-0,41	0,51
Нітрати, весна 20–40 см	0,77	0,76	0,77	-0,41	0,52
Нітрати, збирання, 0–20 см	-0,43	-0,51	-0,50	0,61	0,41
Нітрати, збирання, 20–40 см	-0,33	-0,42	-0,42	0,64	0,38

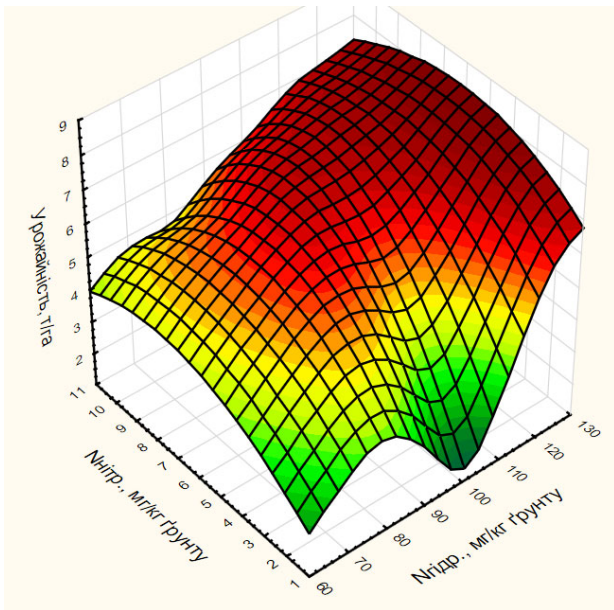


Рис. 4. 3D-модель зв'язків фондів доступного азоту орного (0–20 см) пласту ґрунту на старті весняної вегетації з урожайністю ячменю озимого

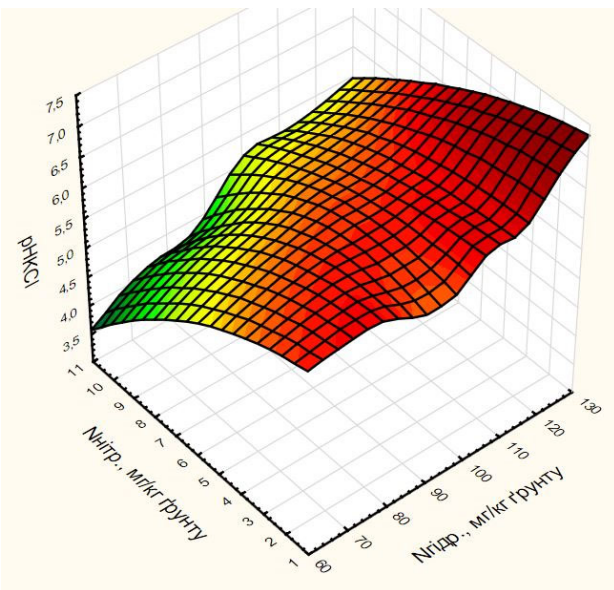


Рис. 5. Площина регресії показника рН_{КCl} у зв'язку зі змінами вмісту доступних форм азоту в орному (0–20 см) пласті ґрунту

Висновки

Підвищені норми внесення азотних добрив (N₉₀₋₁₂₀) під ячмінь озимий з метою підвищення врожаю зерна створюють загрозу втрати азоту у нітратній формі вертикальним вимиванням з вологою та у газоподібній формі з викидом закису азоту в атмосферу. І перше явище, і друге руйнують природне доквілля через забруднення вод та насичення атмосфери парниковими газами.

Застосування стабілізатора азоту N-Lok Макс, який діє як інгібітор ферментів аміномонооксигенази і нітритоксидоредуктази в ґрунті, істотно зменшує концентрацію нітрат-йонів у товщі 0–40 см, чим стримує вилугування розчинних солей азоту за межі ризосфери у підґрунтя. Зменшення концентрації нітрат-йонів обмежує інтенсивність виділення газоподібного азоту у процесі нітрифікаційної активності бактеріоценозу. Нітрапирин як інгібітор продукування ферментів аміномонооксигенази і нітритоксидоредуктази обмежує обсяг емісії закису азоту на 3,3–7,2 кг/га відповідно від зменшення запасів нітратів у товщі 0–40 см.

За норми азоту N₁₂₀ у формі селітри без використання нітрапірину ґрунт зазнав найбільшого підкислення на початку вегетації. До збирання врожаю високі норми азоту N₁₂₀ при використанні нітрапірину не підкислювали ґрунт, а навпаки – була досліджена нейтралізація кислотності до рівня варіанту без удобрень. Час внесення інгібітора не мав вагомого значення для нейтралізації ґрунтового розчину.

З метою отримання врожаю ячменю озимого 7–8 т/га та максимальної віддачі підвищених норм мінеральних добрив рекомендуємо вносити перед сівбою N₂₃P₆₀K₆₀ (у формі діаміофоси) і у фазі відновлення вегетації N₉₇ (у формі амонійної селітри) та застосувати стабілізатор азоту нітрапирин N-Lok Макс в нормі 1,7 л/га при відновленні весняної вегетації.

Якщо за виробничої необхідності під ячмінь озимий з осені є потреба використовувати карбамід, то його доцільно вносити в нормі N₉₇ на фоні N₂₃P₆₀K₆₀ (діаміофоска) і застосовувати під передпосівну культувацію інгібітор нітрифікації N-Lok Макс в нормі 1,7.

Відомості про конфлікт інтересів. Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо викладу та результатів досліджень.

References

- Abalos, D., Jeffery, S., Sanz-Cobena, A., Guardia, G., & Vallejo, A. (2014). Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agric Ecosyst Environ*, 189, 136–144. DOI: 10.1016/j.agee.2014.03.036.
- Bouwman, A. F. (1996). Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46, 53–70. DOI: 10.1007/BF00210224.
- Chambers, B. J., & Dampney, P. M. R. (2009). Nitrogen efficiency and ammonia emissions from urea-based and ammonium nitrate fertilisers. *Proc Intl Fert Soc.*, 657, 1–20.
- Ding, Y., Huang, X., Li, Y., Liu, H., Zhang, Q., Liu, X., Xu, J., & Di, H. (2021) Nitrate leaching losses mitigated with intercropping of deep-rooted and shallow-rooted plants. *J. Soils Sediments*, 21, 364–375. DOI: 10.1007/s11368-020-02733-w.
- Fan, X., Yin, C., Chen, H., Ye, M., Zhao, Y., Li, T., Wakelin, S. A., & Liang, Y. (2019). The efficacy of 3,4-dimethylpyrazole phosphate on N₂O emissions is linked to niche differentiation of ammonia oxidizing archaea and bacteria across four arable soils. *Soil Biol. Biochem.*, 130, 82–93. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.11.027.
- Ferhison, R. B., Lark, R. M., & Sleiter, H. P. (2003). Pidkhoty do vyznachennia zony upravlinnia dla vykorystannia inhibitoriv nitryfikatsii. *Zhurnal gruntovnavchoho tovarystva Ameryky*, 67(3), 937–947 (in Ukrainian).
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U. Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., Sheppard, L. J., Jenkins, A., Grizzetti B., Galloway, J. N., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A. F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M., & Voss, M. (2013) The global nitrogen cycle in the twenty first century. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 368(1621), 20130164. DOI: 10.1098/rstb.2013.0164.
- Fuks, B., & Baumhartner, N. (2020). Zastosuvannia stabilizatoriv azotnykh dobryv. *Zhurnal Ahronom*. URL: <https://www.agronom.com.ua/zastosuvannya-stabilizatoriv-azotnyh-dobryv> (in Ukrainian).
- Hege, U., & Offenberger, K. (2011). Effect of N fertilizer with nitrification inhibitors on winter wheat yield in German Bavarian State Research Center for Agriculture.
- Horash, O. S., & Klymyshena, R. I. (2020). Dependence of the malting properties of barley on the effect of foliar fertilization of plants with microfertilizers. *Taurian Scientific Bulletin*, 115, 24–32 (in Ukrainian).
- Li, S., Wang, Z., Hu, T., Gao, Y., Stewart, B., & Sparks, D. (2009). Nitrogen in dryland soils of China and its management. *Adv. Agron.*, 101, 123–181. DOI: 10.1016/s0065-2113(08)00803-1.
- Lohinova, I. V., Horodnii, M. M., & Hrytsak, I. P. (2010). Ahrokhimichna otsinka roli inhibitora nitryfikatsii 3(5)-metylpirazolu v pidvyshchenni efektyvnosti azotnykh dobryv. *Naukovi dopovidi NUBiP*, 2010-6 (22). URL: <https://nd.nubip.edu.ua/2010-6/10livnfe.pdf> (in Ukrainian).
- Lykhochvor, V., Gnativ, P., Andrushko, O., Ivanyuk, V., & Olifir, Yu. (2022a). The role of nutrients in the formation of yield and grain quality of winter wheat. *Bulg. J. Agric. Sci.*, 28(1), 103–109. URL: <https://www.agrojournal.org/28/01-14.pdf>.
- Lykhochvor, V., Hnativ, P., Petrichenko, V., Ivaniuk, V., Szulc, W., Rutkowska, B., Veba, N., & Olifir, Y. (2022b) Threat of degradation of agricultural land in Ukraine through a negative balance of nutritional elements in growing of field cultures. *Journal of Elementology*, 27(3), 695–707. DOI: 10.5601/jelem.2022.27.2.2290.
- Metodyka provedennia ahrokhimichnoi pasportyzatsii zemel silskohospodarskoho pryznachennia (2013). Za red. I. P. Yatsuka, S. A. Baliuka. Kyiv (in Ukrainian).
- Mokhammed, Yu. A., Dzhensen, T., Kheser, Dzh., & Chen, Ch. (2013). Inhibitory, sposib i chas zastosuvannia azotu dla pokrashchennia vyrobnytstva ozymoi pshenytsi v tsentralnii chastyni Montany. In *Proceedings of the Western Nutrient Management Conference*, Reno, NV. (in Ukrainian).
- Nelson, D. W., & Huber, D. (1992). Nitrification inhibitors for corn production. *Nat. Corn Handbook*, 55, 1–6.
- Nitrogen Stabilizer Products that Must Be Registered under FIFRA. Substances excluded from the definition of a nitrogen stabilizer (2022). U.S. Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/pesticide-registration/nitrogen-stabilizer-products-must-be-registered-under-fifra#substances>.
- O’Callaghan, T. F. (2020). Urease and Nitrification Inhibitors – As Mitigation Tools for Greenhouse Gas Emissions in Sustainable Dairy Systems: A Review. *Sustainability*, 12, 6018. DOI: 10.3390/su12156018.
- Pahlmann, I. (2008). Using nitrification inhibitors in fertilization of rapeseed – Developing fertilization strategies under controlled and field conditions in German MSc Dissertation. Bingen University of Applied Science.
- Pavlenko, V. (2018). Vizmit vtraty azotu pid kontrol. *Zeleni storinky*. Diupon Ukraina, №2. URL: https://agromage.com/stat_id.php?id=991 (in Ukrainian).
- Polovyy, V., Snitynsky, V., Hnativ, P., Szulc, W., Lahush, N., Ivaniuk, V., Furmanets, M., Kulyk, S., Balkovskyy, V., Poliukhovych, M., & Rutkowska, B. (2021) Agroecological efficiency of the system of crop fertilization with the use of phytomass residues in the Western Forest Steppe of Ukraine. *Journal of Elementology*, 26(3), 293–306. DOI: 10.5601/jelem.2021.26.1.2120.
- Shestak, V. H. (2022). Znachennia fosforo-kaliinykh dobryv dla dii azotu ta nitrapirynu pry vyroshchuvanni yachmeniu ozymoho u Zakhidnomu Lisostepu. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnytstvo*, 72(1), 105–134. DOI: 10.32636/01308521.2022-(72)-1-8 (in Ukrainian).
- Shestak, V., Hnativ, P., Ivaniuk, V., Olifir, Y., Szulc, W., Rutkowska, B., Sychaj-Fabisiak, E., Vega, N., Parkhuc, B., Kachmar, O., Kocyuba, B., & Bahaj, T. (2023). Dynamics of the forms of nutrient nitrogen in Greyic Luvic Phaeozem when regulating their resources with fertilizers and nitrapyrin applied to winter barley. *Journal of Elementology*, 28(1), 41–58. DOI: 10.5601/jelem.2023.28.1.2352.
- Systemy udobrennia silskohospodarskykh kultur u zemlerobstvi pochatku 21 stolittia (2016). *Monohrafiia; za*

- red. S. A. Baliuka i M. M. Miroshnychenka. Kyiv: Alfa-steviiia (in Ukrainian).
- Ti, C., & Yan, X. (2020). Nitrogen regulation in China's agricultural systems. In: Liu X., Du E. (ed). Atmospheric Reactive Nitrogen in China, Springer, Singapore, 297–309.
- Tian, D., Zhang, Y., Zhou, Y., Mu, Y., Liu, J., Zhang, C., & Liuac, P. (2017). Effect of nitrification inhibitors on mitigating N₂O and NO emissions from an agricultural field under drip fertigation in the North China Plain. *Science of The Total Environment*, 598, 87–96. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.220.
- Veha, N. I. (2015). Zmina vmistu luzhnohidrolizovanoho azotu v temno-siromu opidzolenomu grunti pid vplyvom mineral-noho udobrennia yachmeniu yaroho. *Ahrokhimiiia i gruntoznavstvo*, 83, 100–104. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrohimgn_2015_83_19 (in Ukrainian).
- Yu, C., Huang, X., Chen, H., Godfray, H. C. J., Wright, J. S., Hall, J. W., Gong, P., Ni, S., Qiao, S., Huang, G., Xiao, Y., Zhang, J., Feng, Z., Ju, X., Ciais, P., Stenseth, N. C., Hessen, D. O., Sun, Z., Yu, L., Cai, W., Fu, H., Huang, X., Zhang, C., Liu, H., & Taylor, J. (2019) Managing nitrogen to restore water quality in China. *Nature*, 567, 516–520. DOI: 10.1038/s41586-019-1001-1.
- Zaiets, S. O. (2018). Pidzhyvlennia ozymoho yachmeniu riznymi vydamy azotnykh dobryv. *Ahronom*, 4, 76–78 (in Ukrainian)
- Zaman, M., Nguyen, M. L., Blennerhassett, J. D., & Quin, B. F. (2008). Reducing NH₃, N₂O and NO₃-N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers. *Biol Fertil Soils*, 44, 693–705. DOI: 10.1007/s00374-007-0252-4.
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528, 51–59. URL: <https://www.nature.com/articles/nature15743>.