

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-a9703
<https://nvlvet.com.ua/index.php/agriculture>

UDC 631.82/1/7:633.162

Yield of winter barley with different systems of mineral fertilizer and use of urease inhibitor

V. H. Shestak[✉], P. S. Hnativ

Lviv National Environmental University, Dublyany, Ukraine

Article info

Received 08.07.2022

Received in revised form
11.08.2022

Accepted 12.08.2022

Lviv National Environmental
University, V. Velykiho str., 1,
Dublyany, 80381, Ukraine.
Tel.: +38-066-749-14-96
E-mail: volodyash25@gmail.com

Shestak, V. H., & Hnativ, P. S. (2022). Yield of winter barley with different systems of mineral fertilizer and use of urease inhibitor. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural sciences, 24(97), 21–30. doi: 10.32718/nvlvet-a9703

The use of urease inhibitors with nitrogen fertilizers is gaining relevance. There was a need to substantiate the expediency of combining these technology elements when growing winter barley. We conducted field experiments at the Lviv National Environmental University in the Banded Forest of the Western Forest Steppe conditions in 2020–2022. Our research goal is to describe the interaction of mineral fertilizers with the N-Lok™ brand inhibitor, which restrains the formation of nitrates but improves the agrochemical parameters of the soil. This had a positive effect on the yield of winter barley. The soil is a dark gray forest gilded light loam with low humus. We used traditional methods of field research and standardized methods of laboratory analyses. The nitrogen fertilization system $N_{97}(\text{NH}_4\text{NO}_3)$ during vegetation restoration + N-Lok™ (before sowing or during vegetation restoration) on the background of $N_{23}P_{60}K_{60}$ ensured the initial content of easily hydrolyzable nitrogen in the arable layer of 132–136 mg/kg of soil. Applying $N_{97}(\text{NH}_4\text{NO}_3)$ + N-Lok™ to winter barley during the restoration of vegetation on the background of $N_{23}P_{60}K_{60}$ under plowing provided the highest yield in the experiment of 7.69 t/ha on average for 2020–2022. The average grain increase relative to the $N_{97}(\text{NH}_4\text{NO}_3)$ control (vegetation restoration) on the $N_{23}P_{60}K_{60}$ background was 1.08 t/ha. On the other hand, applying $N_{97}(\text{NH}_4\text{NO}_3)$ during the restoration of vegetation + N-Lok™ in autumn before sowing on the same background contributed to a more significant yield increase – by 1.26 t/ha only in 2021. The absence of a phosphorus-potassium background in the winter barley fertilization system reduced the crop yield by 0.11–0.44 t/ha. The significant importance of mineral fertilizers for obtaining high grain harvests, especially in less good years, is proven by the established high correlation coefficients of the parameters of available compounds of nitrogen, phosphorus, and potassium at the start of the growing season with the harvest in 2020–2021. The regression 3D model of winter barley grain yield under the influence of the synergistic effect of nitrogen fertilization rates and the resulting enrichment of the soil with easily hydrolyzable nitrogen illustrates the importance of fertilizers for increasing the fertility of the dark-gray podzolized light loam soil in Pasmovy Pobuzhzhia of the Western Forest Steppe.

Key words: easily hydrolyzable nitrogen, mobile phosphorus, exchangeable potassium, Nitrapyrin, grain yield.

Урожайність ячменю озимого за різних систем мінерального удобрення та застосування інгібітора уреаз

В. Г. Шестак[✉], П. С. Гнатів

Львівський національний університет природокористування, м. Дубляни, Україна

Використання інгібітора уреаз з азотними добривами зумовлює необхідність з'ясування доцільності поєднання цих елементів технології при вирощуванні ячменю озимого. Проведено польові експерименти у Львівському національному університеті природокористування в умовах Пасмового Побужжя Західного Лісостепу. Мета досліджень – з'ясувати взаємодію мінеральних добрив з інгібітором марки N-Lok™, який стримує утворення нітратів, але покращує агрохімічні показники ґрунту, щодо їхнього впливу на

врожайність ячменю озимого. Грунт – темно-сірий лісовий опідзолений легкосуглинковий слабогумусований. Використані традиційні методи польових досліджень та стандартизовані методики лабораторних аналізів. Система азотного удобрення N_{97} при відновленні вегетації + $N\text{-Lok}^{\text{TM}}$ (перед сівою або при відновленні вегетації) на фоні $N_{23}P_{60}K_{60}$ забезпечувала стартовий вміст легкогідролізного азоту в орному шарі 132–136 мг/кг ґрунту. Найвищий середній за 2020–2022 роки врожай забезпечило удобрення $N_{23}P_{60}K_{60}$ (перед сівою) + N_{67} і $N\text{-Lok}^{\text{TM}}$ (у відновлення вегетації) + N_{30} (на початку колосіння) за сумарної норми N_{120} – 7,65 т/га зерна. Середньорічна прибавка врожаю відносно контролю $N_{23}P_{60}K_{60}$ (перед сівою) + N_{37} (відновлення вегетації) становила 0,73 т/га. Внесення карбаміду $N_{97}(\text{CH}_4\text{N}_2\text{O})$ при застосуванні нітропірину з осені по фоні $N_{23}P_{60}K_{60}$ підвищило ефективність цієї форми азотних добрив і прибавка врожаю зерна становила 0,47 т/га. Відсутність фосфорно-калійних добрив при внесенні $N_{23}(\text{NH}_4\text{NO}_3)$ (перед сівою) + N_{67} (у відновлення вегетації) + N_{30} (на початку колосіння) не зменшувала врожайність культури. За використання $N\text{-Lok}^{\text{TM}}$ на цьому суто азотному удобренні N_{120} аміачною селітрою була отримана середня істотна прибавка врожаю 0,44 т/га. Вагоме значення мінерального удобрення для отримання високих зборів зерна, особливо у менше стріятливі роки, доведено встановленими високими коефіцієнтами кореляції параметрів доступних сполук азоту, фосфору і калію на старті вегетації з урожаєм упродовж 2020–2021 років. 3D-модель регресії урожаю зерна озимого ячменю під впливом синергічного ефекту норм азотного удобрення та спричиненого ним збагачення ґрунту легкогідролізним азотом ілюструє важливість добрив для підвищення родючості темно-сірого опідзоленого легкосуглинкового ґрунту у Пасмовому Побужжі Західного Лісостепу.

Ключові слова: азот легкогідролізний, фосфор рухомий, калій обмінний, нітропірин, урожай зерна.

Вступ

Збереження природної родючості ґрунтів України постало гостро актуальною проблемою 30 років тому, яка в умовах несприятливої трансформації клімату стала ще більше складною (Baliuk et al., 2012; Polovyy et al., 2021; Nitrogen..., 2022). Прагнення отримати швидкий прибуток у максимальному обсязі на тлі стрімких змін клімату в Україні призвело до нещадної, ірраціональної експлуатації ґрунтових ресурсів та проблем довкілля (Barczak, 2008; Chambers & Dampney, 2009). Тому в недалекому майбутньому аграрному сектору економіки загрожують неконтрольовані наслідки.

Як показують розрахунки (Baliuk et al., 2012), застосування добрив упродовж 2015–2019 років в Україні зростає. Сільськогосподарські виробники 2019 року внесли 76 кг N, по 17 кг P і K на один гектар сільськогосподарських земель. Показник сумарної кількості N, P і K значно вищий у країнах Європи і коливається в межах 200–300 кг/га. Виробники не вносили необхідні норми добрив і співвідношення між елементами живлення при удобренні культур. Перевага була надана азотним добривам.

Виробники аграрної продукції в Україні мають бути зобов'язані урядом вносити на поля усі види добрив, що містять не менше $N_{150}P_{41}K_{35}$ (Lykhochvor & Matkovska, 2017). Для цього вони мають відмовитися від отримання максимального прибутку на природно родючих ґрунтах завдяки економії витрат на їх удобрення та меліорації, особливо стосовно озимих зернових, які займають більшу частину ріллі.

Ефективність добрив коливається залежно від клімату зон і погодних умов вегетації (Lykhochvor & Petrychenko, 2010). За регулярного застосування високих норм мінеральних добрив, окрім високих врожаїв, у ґрунтах створюється запас поживних речовин (N, P, K, Ca, Mg та інші) (Baliuk et al., 2012; Vaha, 2015; Zaiets, 2018; Lopushniak & Vaha, 2015; Babulicová & Dylgerova, 2018).

Вирощування ячменю озимого вигідне, але має свої технологічні особливості, визначені біологією сортів (Moisiienko & Podolskyi, 2019). Внаслідок швидкого проходження фаз розвитку і швидкого росту навесні він вирізняється підвищеними вимогами до рівня живлення (Zaiets, 2018). На формування однієї

тони зерна культура використовує приблизно N – 15–20 кг; P_2O_5 – 6–10 кг; K_2O – 4–8 кг; CaO – 0,6–2,0 кг; MgO – 1–3 кг (Lykhochvor & Matkovska, 2017). Тому дуже важливим є збалансоване мінеральне живлення, особливо в початковому періоді росту та розвитку. На початок цвітіння ячмінь засвоює 80–85 % потреби в елементах живлення.

Невивченим залишається питання стабілізації азоту в ґрунті інгібіторами нітрифікації при вирощуванні ячменю озимого в зонах промивного і напівпромивного режиму зволоження (Linzmeier et al., 2001; Hege & Offenberger, 2011). Високі норми азотного удобрення зазвичай або діють надто активно, провокуючи ріст рослин у висоту, або за дощової погоди спричиняють втрати нітратних форм із ґрунту. Внесення нітропірину в різних препаратних формах запобігає втраті ґрунтового азоту через вилуговування або змив нітратів (NO_3), або газоподібних викидів азоту (N_2) та закису азоту (N_2O) (Pahlmann, 2008). Уже 40 років нітропірин використовують у США як інгібітор уреазі з метою підвищення ефективності азотних добрив, збільшення врожайності культур і зменшення впливу на довкілля аграрних технологій (IUSS..., 2015).

Мета дослідження

Метою наших досліджень було вивчення впливу систем мінерального удобрення та застосування інгібітора нітрифікації $N\text{-Lok}^{\text{TM}}$ на врожайність зерна ячменю озимого.

Матеріал і методи досліджень

Досліди провели у Львівському національному університеті природокористування (ЛНУП) упродовж 2019–2022 років. Польові експерименти здійснили за традиційною методикою в агрономії. На дослідній ділянці ми описали ґрунт – темно-сірий лісовий опідзолений легкосуглинковий слабогумусований – Greyic Luvic Phaeozem (WRB, 2015) (Charles et al., 2012).

Вміст легкогідролізного азоту за методом Корнфілда у товщі 0–20 см є 65–70 мг/кг ґрунту. Визначення азоту лужногідролізного (Nh) проводили за методом Корнфілда згідно з ДСТУ 7863:2015. Вміст нітратного азоту (Nn) визначали потенціометрично за допомогою

іонселективного нітратного електрода у сольовій витяжці 1 % розчину алюмокалієвого галуноу при співвідношенні ґрунту до розчину 1:2,5. За показниками йономіра і калібрувального графіка визначали вміст нітратного азоту. Вміст нітратів у ґрунті, в мг/кг, знаходили за величиною pNO_3 . Вміст фосфору у верхньому 20 см шарі перед закладкою досліду становить 49–50 мг/кг ґрунту. Рухомі сполуки фосфору визначали за Чириковим (ДСТУ 4115-2002). Вміст обмінного калію за Чириковим (ДСТУ 4115-2002) у перерахунку на K_2O перед закладкою досліду становить 34–36 мг/кг ґрунту у пласті 0–20 см.

За програмою досліджень перед закладанням досліду до сівби, по відновленні вегетації, перед початком колосіння і перед збиранням було взято зразки ґрунту з глибини 0–20, 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.

Для експериментування з нормами і формами азотних добрив і внесенням нітропірину розробили схему дослідження, яка показана на рисунках. Технологія вирощування ячменю озимого була використана традиційна: оранка на 20–22 см, внесення добрив – діамофоски $(NH_4)_2HPO_4 + NH_4NO_3 + KCl$ – $N_{10}P_{26}K_{26}$ передпосівну культивуацію в нормі згідно схеми досліду, сівба сортом Хайлайт (Moisiienko & Podolskyi, 2019) в оптимальні терміни з рекомендованою нормою висіву насіння 3,8 млн зерен на га. Карбамід $(CH_4N_2O - N_{46})$ вносили під передпосівну культивуацію в нормі згідно зі схемою досліду. Частина азотних добрив у формі аміачної селітри $(NH_4NO_3 - N_{34})$ була внесена весною при відновленні вегетації, частина – перед початком колосіння (в нормах згідно зі схемою досліду). Інгібітор нітрифікації N-Lock™, вносили за схемою досліду у нормі 1,2 л/га.

Статистичний аналіз даних проводили за допомогою пакетів Microsoft Excel, Statistica 10, а також за допомогою власної розробленої програми Dispersion.exe., розміщеної в Інтернеті (<https://github.com/dimbaida/variance-anlysis>).

Результати дослідження

У наших дослідженнях за відсутності удобрення ґрунту спостерігали малий (природний) вміст легкогідролізного азоту в товщі 0–40 см, і він ще зменшився до збирання врожаю до 44–67 мг/кг сухої маси (рис. 1 і 2).

Внесення в ґрунт $N_{120}P_{60}K_{60}$ (N_{23} перед сівбою та N_{97} при відновленні вегетації у формі карбаміду – вар. 5) спричинило збільшення концентрації легкогідролізного азоту на 31–37 мг/кг в пласті 0–20 см в обидва роки досліджень. Внесення нітропірину на такому фоні удобрення (вар. 6) сприяло додатковому збільшенню запасу легкогідролізного азоту на 7–10 і 7–9 мг/кг кожного року в орному та підорному пластах.

Інгібітор активності уреазы (ензима, що відіграє ключову роль в утворенні нітратів) – нітропірин у 2020 і 2022 роках діяв ефективніше при внесенні препарату у період відновлення вегетації озимого ячменю (вар. 7), порівняно з його внесенням під передпосівну культивуацію, як наприклад 2021 року.

Збільшення ресурсу легкогідролізного азоту на початку вегетації ми спостерігали при внесенні $N_{23}P_{60}K_{60}$ восени + N_{37} у відновлення вегетації (вар. 10). Внесення нітропірину і збільшення норми на N_{37} (вар. 11) та на N_{67} (вар. 12) у період 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 $N_{23}P_{60}K_{60}$ восени + N_{97} у відновлення вегетації без нітропірину (вар. 15) та з нітропірином 111–135 і 116–135 мг/кг (вар. 16) у 2020 та 2021 рр. дослідження (рис. 2).

Інгібітор уреазы сприяв підвищенню вмісту легкогідролізного азоту в ґрунті як при внесенні до сівби (восени – на 3 мг/кг), так і у відновлення вегетації (весною – на 6 мг/кг) в обидва роки дослідження. У всіх варіантах поєднання дози азоту з внесенням нітропірину спричиняло відносно підвищення ресурсу легкогідролізного азоту в орному (0–20 см) та підорному (20–40 см) пластах ґрунту.

До збирання врожаю рівень концентрації легкогідролізного азоту знижувався до природного для ґрунту вмісту, але стрімкіше у тих ефективних варіантах, які забезпечили вищий врожай ячменю озимого. Отже, винос фітомасою ячменю там був інтенсивніший, ніж на менше врожайних варіантах досліду.

Дієвість певних доз і концентрацій поживних речовин в ґрунті визначається впливом на кінцевий результат росту і розвитку ячменю озимого – врожай зерна. Без мінеральних добрив у Пасмовому Побужжі Західного Лісостепу є можливість отримувати на темно-сірому лісовому опідзоленому легкосуглинковому середньогумусованому ґрунті 4,37–4,77 т/га зерна, залежно від умов року за умови виконання усіх інших прийомів агротехніки (рис. 3, 4 і 5).

На неудобреному фоні внесення нітрапірину у час відновлення вегетації проявляє тенденцію до зниження врожаю зерна на 0,04–0,44 т/га. Це свідчить, що інгібітор реально пригнічує ефективність «роботи» ензиму уреазы, яка зумовлює утворенню нітратів. Дефіцит нітратів на фоні без добрив негативно позначається на живленні рослин ячменю озимого. Внесення перед сівбою $N_{23}P_{60}K_{60}$ $(NH_4)_2HPO_4 + NH_4NO_3 + KCl$ + N_{37} при відновленні вегетації ми прийняли за виробничий контроль – варіант 10. За такої системи удобрення ячменю озимого упродовж 2020-2022 років зібрано 6,82 (рис. 3), 6,72 (рис. 4) та 7,22 т/га зерна (рис. 5). Найсприятливіший для раніше рекомендованої норми добрив був 2022 рік вирощування. За середньої врожайності на контролі (рис. 6) 6,92 т/га підвищення врожаю, спричинене рекомендованою нормою добрив, порівняно з неудобреним фоном, становило в середньому за три роки 2,35 т/га. (рис. 7).

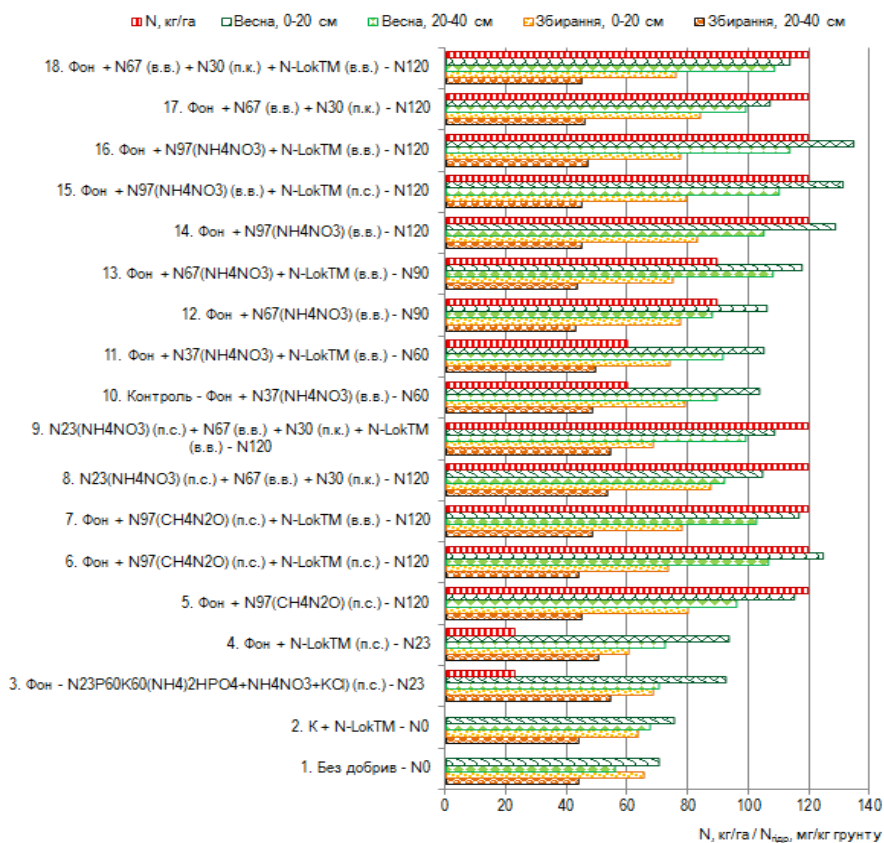


Рис. 1. Залежність вмісту легкогідролізованого азоту у ґрунті від азотного удобрення та впливу нітропірину упродовж вегетації 2020 року. (P < 0,05); п. с. – перед сівбою; в. в. – відновлення вегетації; п. к. – початок колосіння

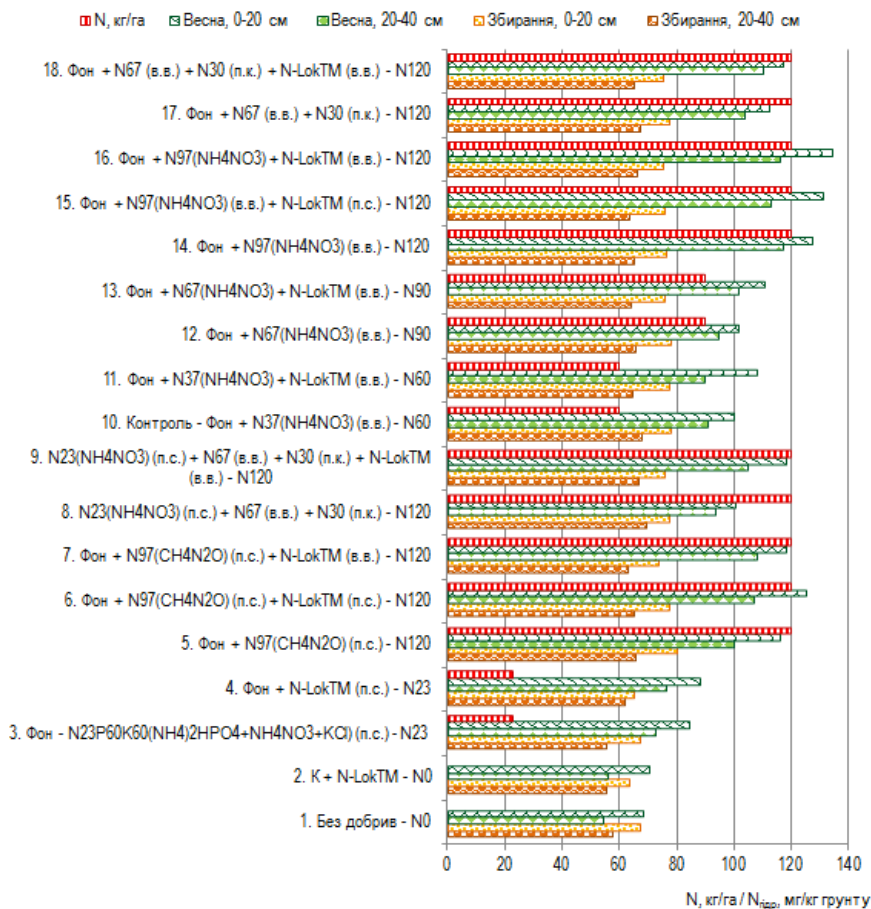


Рис. 2. Залежність вмісту легкогідролізованого азоту у ґрунті від азотного удобрення та впливу нітропірину упродовж вегетації 2021 року. (P < 0,05); п. с. – перед сівбою; в. в. – відновлення вегетації; п. к. – початок колосіння

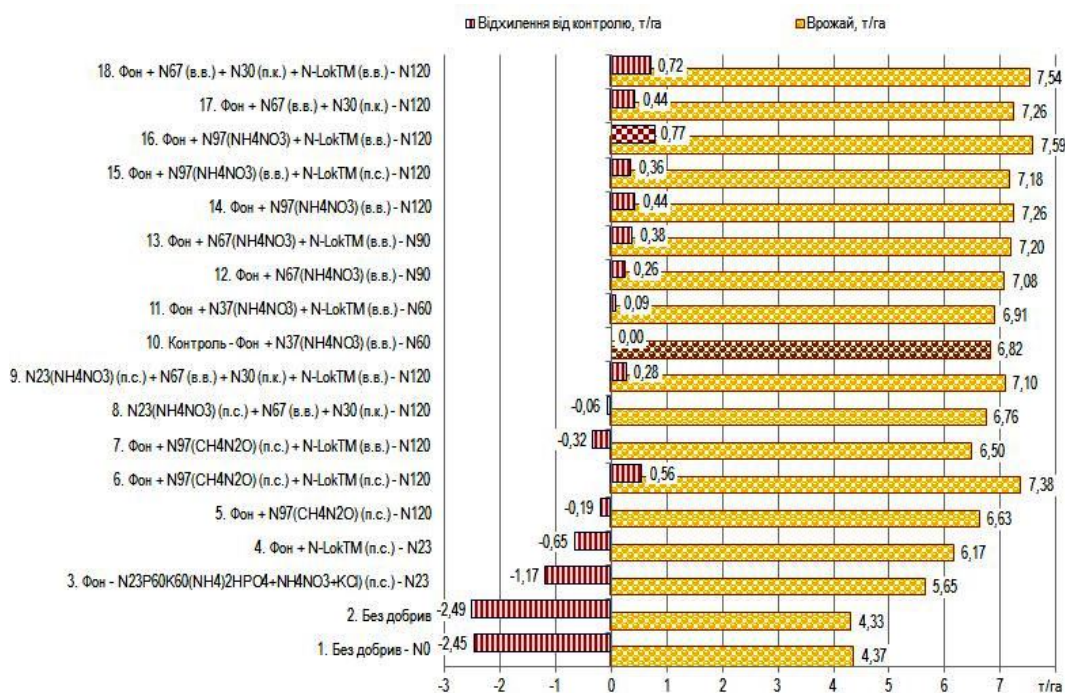


Рис. 3. Врожайність ячменю озимого залежно від норм азотного удобрення та нітрапірину у 2020 р. та відхилення відносно контролю ($P < 0,05$; $НІР_{05} = 0,23$ т/га; коефіцієнт варіації = 2,4 %)

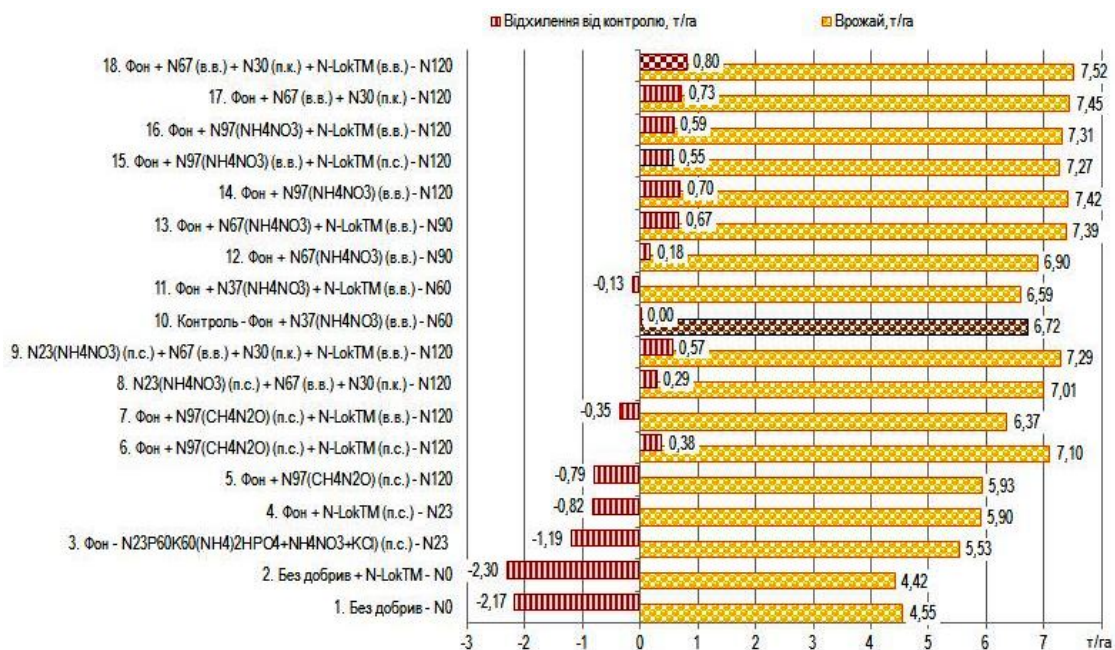


Рис. 4. Врожайність озимого ячменю залежно від норм азотного удобрення та нітрапірину у 2021 р. та відхилення відносно контролю ($P < 0,05$; $НІР_{05} = 0,17$ т/га; коефіцієнт варіації = 3,0 %)

Уже за мінімальної дози азоту 23 кг/га у складі діамофоски з розрахунку по фосфору 60 і калію 60 кг/га перед сівбою за урожайності 5,63 т/га одночасно внесений інгібітор марки N-Lok™ збільшував врожайність зерна в середньому до 6,13 т/га.

Удобрення азотом у нормі N_{90} дало приріст врожаю відносно норми N_{60} , а в поєднанні з одночасним внесенням нітрапірину він був значно вагомий у 2020 та 2021 роках.

Поділ норми азоту N_{120} на дози N_{23} перед сівбою, N_{67} + нітрапірин у відновлення вегетації та N_{30} у пі-

живлення на початку колосіння мав позитивний результат. Проте, у варіанті 18 було досягнуто найвищих врожаїв тільки в 2021 і 2022 роках.

Використання карбаміду замість аміачної селітри у максимальній нормі N_{120} і внесення його перед сівбою ячменю озимого мало позитивний результат лише у поєднанні з одночасним внесенням нітрапірину. Приріст врожайності становив у 2020 році 0,56 т/га, у 2021 (рис. 4) – 0,38 т/га порівняно в контролем. Перенесення застосування нітрапірину на весну у фазу відновлення вегетації знівельовало його ефективність.

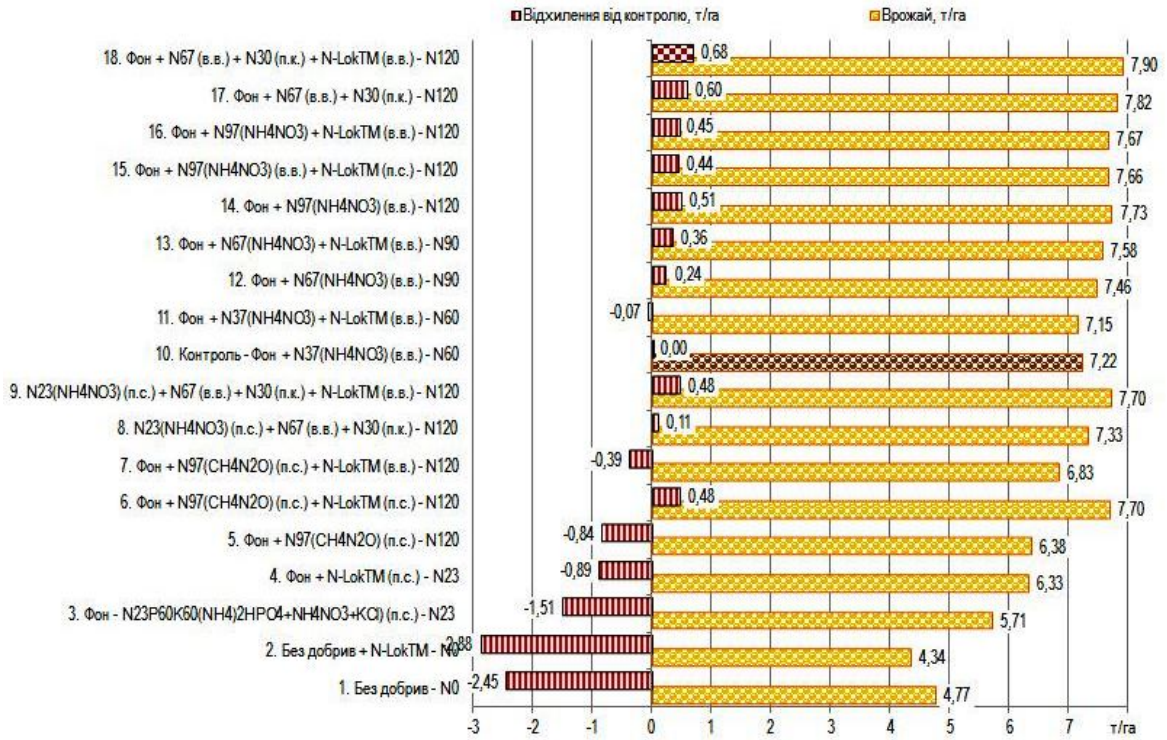


Рис. 5. Врожайність озимого ячменю залежно від норм азотного удобрення та нітрапірину у 2022 р. та відхилення відносно контролю ($P < 0,05$; $НІР_{05} = 0,23$ т/га; коефіцієнт варіації = 2,6 %)

За використання сечовини під озимий ячмінь з осені стабілізатор азоту слід вносити під передпосівну культивуацію.

2021 рік вирощування був дещо менше сприятливим за попередній. Проте, позитивна дія стабілізатора азоту проявилася ще виразніше. Приріст врожаю за внесення $N_{23}P_{60}K_{60}(NH_4)_2HPO_4+NH_4NO_3+KCl) + N_{67}$ (у відновлення вегетації) + N_{30} (у початок колосіння) + N-Lok™ при відновленні вегетації (вар. 18) досяг 0,80 т/га відносно виробничого контролю – $N_{23}P_{60}K_{60}(NH_4)_2HPO_4+NH_4NO_3+KCl)$ (перед сівбою) + $N_{37}(NH_4NO_3)$ (відновлення вегетації).

Найбільша віддача добрив встановлена за застосування системи удобрення (вар. 16 і 18) – фон + $N_{97}(NH_4NO_3) + N-Lok™$ (відновлення вегетації) за сумарної норми азоту 120 кг/га д.р. у 2020 та 2022 роках. Варіант 18 – фон + $N_{67}(NH_4NO_3)$ (відновлення вегетації) + N_{30} (початок колосіння) + N-Lok™ (відновлення вегетації) за норми N_{120} був найефективнішим у середньому за три роки (рис. 7). За середнього перевищення контролю на 0,73 т/га на цьому варіанті удобрення нітрапірин забезпечив у 2022 році рекордний врожай – 7,90 т/га.

Позитивний вплив на азотне удобрення ячменю озимого мав фосфорно-калійний фон P60K60 (рис. 6 і 7). У цьому пересвідчуємося на варіантах 8 і 9, де фосфорно-калійних добрив не вносили. Азотна система удобрення ячменю озимого за максимальної норми N_{120} не забезпечила приріст врожаю до контролю. Лише використання нітрапірину посприяло росту урожаю. Інгібітор забезпечив підвищення врожаю зерна на суто азотному фоні удобрення на 0,28, 0,57 та 0,48 т/га по роках, порівняно з традиційною системою удобрення (вар. 10).

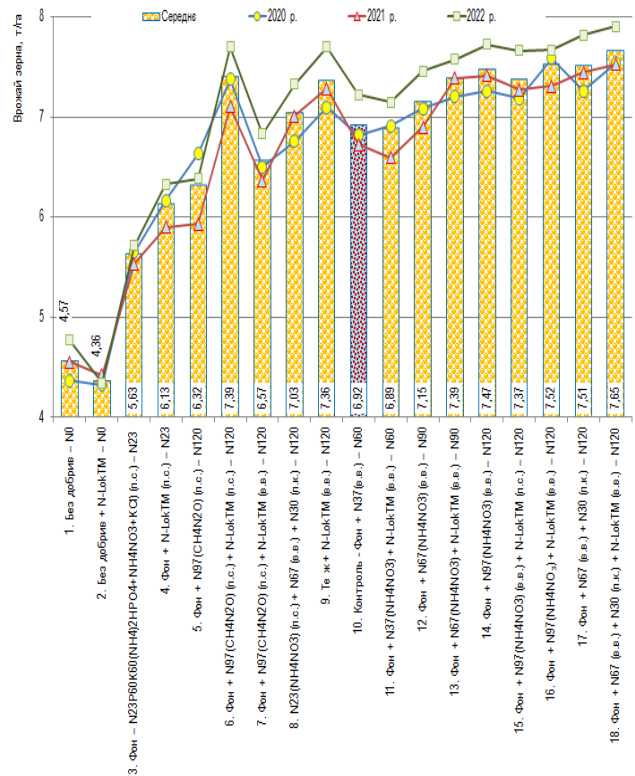


Рис. 6. Врожайність зерна ячменю озимого залежно від системи удобрення та пригнічення нітрифікації азоту нітрапірином упродовж 2020–2022 рр. ($P < 0,05$)

Отже, відсутність фосфорно-калійного удобрення за внесення N_{120} не забезпечило гарантованого рівня врожайності зерна, порівняно зі збалансованим за НРК виробничим контролем. Поєднання фонового удобрення P60K60 з варіантами різних норм азотного

удобрення та внесення нітрапірину максимально підвищувало врожайність ячменю озимого від 7,59 т/га 2020 року до 7,90 т/га 2022 року.

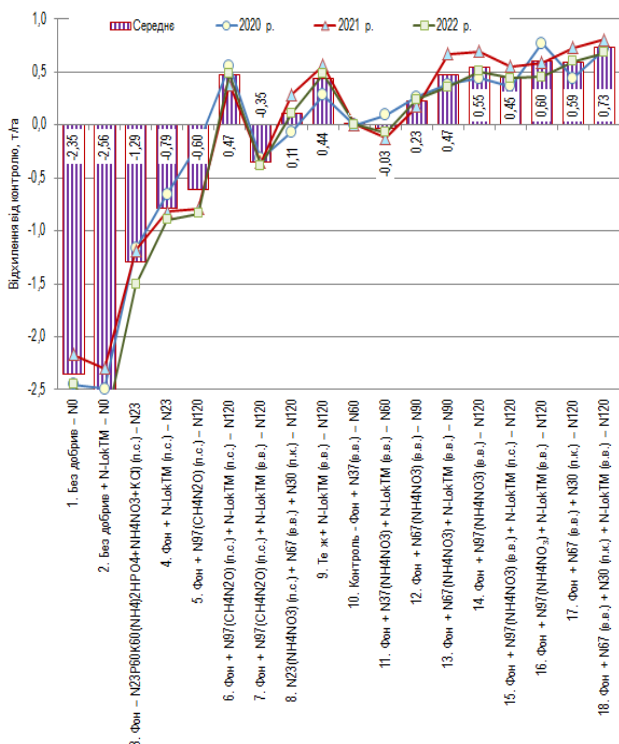


Рис. 7. Відхилення врожайності зерна ячменю озимого залежно від системи удобрення та пригнічення нітрифікації азоту нітропірином упродовж 2020–2022 рр. (P < 0,05)

Урожай ячменю озимого формувався на різних фонах мінерального удобрення. З таблиці 1 бачимо, що рівень врожаю 2020 р. тісніше корелював з азотно-фосфорними фонами живлення, ніж 2021 р. Тісніша кореляція залишків обмінного калію товщі ґрунту 0–20 см виявлена 2021 року, порівняно з попереднім роком, який був дещо сушішим у період вегетації ячменю.

Таблиця 2

Високі і середні коефіцієнти кореляції між параметрами змін азотних агрохімічних показників у ґрунті упродовж періоду вегетації під впливом норм удобрення та врожайністю ячменю озимого 2020 р., r ±

Вміст поживних речовин	Урожайність	N _{гідр} , весна		N _{гідр} , збирання	
		0–20 см	20–40 см	0–20 см	20–40 см
N _{гідр} , весна 0–20 см	0,88	X	-	-	-
N _{гідр} , весна 20–40 см	0,91	0,97	X	-	-
N _{гідр} , збирання, 0–20 см	0,30	-	-	X	-
N _{гідр} , збирання, 20–40 см	0,41	0,37	0,42	0,96	X
Нітрати, весна 0–20 см	0,81	0,78	0,79	-	0,51
Нітрати, весна 20–40 см	0,77	0,76	0,77	-	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

Розрахунок парних кореляцій дозволив припустити складніші залежності і побудувати 3Д-модель зв'язків показника врожайності з параметрами відразу двох агрохімічних показників. Так, на рисунку 8 ба-

Таблиця 1

Високі і середні коефіцієнти кореляції між параметрами агрохімічних змін у ґрунті (0–20 см) упродовж періоду вегетації під впливом норм удобрення та врожайністю ячменю озимого, r ±

Вміст поживних речовин	Урожайність	
	2020 р.	2021 р.
N _{гідр} , весна	0,88	0,90
P ₂ O ₅ , весна	0,81	0,69
P ₂ O ₅ , збирання	0,60	0,67
K ₂ O, весна	0,82	0,68
K ₂ O, збирання	0,69	0,73

Високі коефіцієнти кореляції азоту, фосфору і калію на старті вегетації з урожаєм 2020 р. свідчать про вирішальне значення мінерального удобрення для отримання високих зборів зерна, особливо у менше сприятливі роки.

Співвідношення доступних форм азоту в ґрунті має велике значення для ефективного використання азоту і запобігання втрат нітратів у період інтенсивних опадів. В таблиці 2 бачимо, що існувала тісна позитивна кореляція двох досліджених форм азоту на старті вегетації 2020 р. (r = 0,76–0,79).

До збирання встановлюється тісний оберненопропорційний зв'язок вмісту нітратів з 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 та нітратів у всій товщі ґрунту (r = 0,77–0,91).

Вирощування ячменю озимого 2021 року показало, що умови погоди дещо нівелювали тісноту кореляції між показниками вмісту форм азотних сполук. Проте тіснішою стала залежність величини врожаю 2021 року від ресурсів легкогідролізного азоту у всій товщі ґрунту на старті вегетації (r = 0,90 і 0,94). До жнив однаково зменшувався ресурс легкогідролізного азоту як в орному, так і в підорному пласті (r = 0,77).

чимо, який вигляд має теоретична площина регресії врожаю за збільшення норм азотного удобрення та спричиненого ними зростання в ґрунті ресурсів азоту, який легко гідролізується, на старті весняної вегетації.

Регресія показує синергію впливу агрохімічних параметрів на ріст врожайності зерна.

Обговорення

З раніше проведених досліджень відомо, що поширений у Пасмовому Побужжі темно-сірий опідзолений ґрунт має такі природні агрохімічні показники (Baliuk et al., 2012; Veha, 2015): рН_{KCl} – 5,7–5,9; вміст гумусу – 2,18–2,38 %, легкогідролізних сполук мінерального азоту – 71–91, рухомих сполук фосфору – 94–105 та обмінних сполук калію – 84–96 мг/кг ґрунту.

У наших варіантах експерименту вирощування ячменю озимого опускало вміст легкогідролізного азоту на момент збирання врожаю майже удвічі. Дослідженнями в цих же умовах Західного Лісостепу (Veha, 2015) встановлено, що за впливу різних доз

мінеральних добрив вагомо змінювався вміст легкогідролізних форм азоту в цьому ґрунті при вирощуванні ячменю ярого. Результати досліджень Н. І. Веги (Veha, 2015) В. І. Лопушняка і Н. І. Веги (Lopushniak & Veha, 2015) показали позитивну динаміку вмісту легкогідролізного азоту в темно-сірому опідзоленому ґрунті у варіантах із внесенням N₆₀P₄₅K₄₅ і N₆₀P₆₀K₆₀. Вміст у ґрунті в орному шарі легкогідролізного азоту був більшим порівняно з неудобреним варіантом на 42–43 і 50–55 мг/кг ґрунту відповідно. Проте немає даних впливу підвищених і високих норм азотного удобрення ячменю озимого у Пасмовому Побужжі на ресурси легкогідролізних форм основного елемента живлення, який визначає величину максимального врожаю у сортів інтенсивного типу колосових культур.

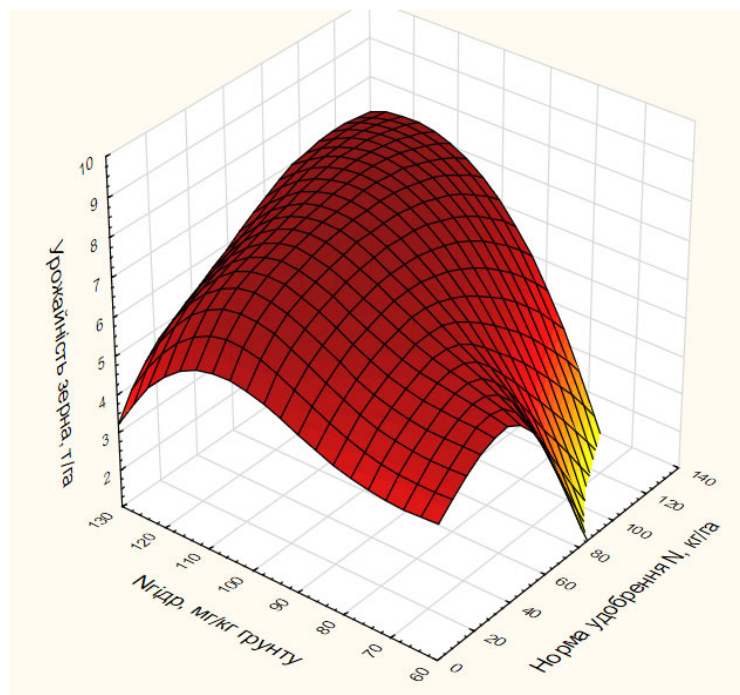


Рис. 9. 3D-модель зв'язків параметрів легкогідролізного азоту орного (0–20 см) пласту темно-сірого лісового опідзоленого легкосуглинкового середньогумусованого ґрунту на старті весняної вегетації з урожайністю зерна ячменю озимого

Тому ми вперше довели, що оптимальна система удобрення озимого ячменю сорту Хайлайт N₂₃P₆₀K₆₀ (перед сівбою) + N₉₇(NH₄NO₃) + N-Lok™ (у відновлення вегетації) зумовлювала збільшення вмісту легкогідролізного азоту до найвищого діапазону – 110–132 та 113–131 мг•кг⁻¹ без нітропірину та з нітропірином 111–135 і 116–135 мг•кг⁻¹ відповідно у 2020 та 2021 роках дослідження.

Упродовж вегетації неудобрений темно-сірий опідзолений ґрунт Північного Лісостепу України (Dotsenko et al., 2015; Lykhochvor & Matkovska, 2017) втрачав за поступового зменшення вмісту P₂O₅ у варіантах без внесення добрив 5–8 % його запасу до кінця вегетації. За систематичного використання добрив слід розраховувати на підвищення вмісту в орному шарі ґрунту рухомих форм фосфору порівняно з контролем (без добрив) до 10% (Moisiienko &

Podolskyi, 2019). Забезпеченість ґрунту рухомих форм фосфором за систематичного внесення добрив досягала високого ступеня.

Застосування мінеральних добрив в нормі N₃₀P₃₀K₃₀ та N₄₅P₃₀K₃₀ під ячмінь ярий в умовах Пасмового Побужжя упродовж 2013–2015 рр. (Lopushniak & Veha, 2015) супроводжувалося підвищення вмісту рухомого фосфору в орному шарі відповідно на 24 та 35 мг/кг ґрунту. З підвищенням норми добрив підвищення варіанту без удобрення сягало вже 32 і 41 мг/кг ґрунту відповідно. Найвищий вміст фосфатів спостерігали на фоні мінерального живлення N₆₀P₄₅K₄₅ – 124 мг/кг ґрунту, що перевищувало контроль на 42 мг/кг ґрунту, або на 51 %.

Наша система удобрення ячменю озимого забезпечувала на старті вегетації весною приблизно 70 мг/кг фосфатів, але відсутність фосфорного удобрен-

ня опускала цей показник приблизно на 30 мг/кг, що негативно позначалося на продуктивності ячменю озимого.

Доведено (Shevchuk, 2014; Dotsenko et al., 2015), що під впливом систематичного використання добрив помітно поліпшувався калійний режим темно-сірого опідзоленого ґрунту. На початку дослідів на неудобрененому фоні забезпеченість вказаної ґрунтової відміни калієм відповідала низькому рівню, тимчасом як у варіантах із внесенням добрив вона досягла середнього рівня (Moisiienko & Podolskyi, 2019).

У наших експериментах відсутність калійного удобрення опускала ресурс обмінного калію в ґрунті до приблизно 40 мг/кг ґрунту, що є критично мало для формування врожаю. Калійне удобрення підтримувало вміст калію в ґрунті у весняний період на рівні 70–73 мг/кг.

Розрахунок парних кореляцій та побудова 3Д-моделі зв'язків показника врожайності з параметрами відразу двох агрохімічних показників показали, що за одностороннього зростання на старті весняної вегетації фону доступних фосфатів та обмінного калію стрімко збільшує врожай зерна озимого ячменю. Проте виразніше позитивним був вплив систем азотного удобрення ячменю озимого на його врожайність. Додатковий позитивний ефект мало внесення у період відновлення вегетації інгібітора уреазі нітропірину у формі препарату N-Lok™. Прибавка врожаю від добрив у середньому за 2020–2022 роки становила 0,98 т/га зерна, а від застосування нітропірину ще додатково отримано 0,10 т/га.

Подібні до наших результати для ячменю озимого отримали В. Barczak (Barczak, 2008) та R. Charles, J. F. Collaud, L. L. Haener et al. (Charles et al., 2012). Про ефективність інгібіторів нітрифікації в регулюванні азотного живлення є багато досліджень за рубежом. Його позитивний вплив на ефективність азотних добрив дослідили U. Hege & K. Offenberger (Hege & Offenberger, 2011) на озимій пшениці у Баварії (Федеративна Республіка Німеччина) та L. Roche та ін. (Roche et al., 2016) на ячмені ярого у Ірландії.

Висновки

Системи азотного удобрення $N_{97}(NH_4NO_3)$ при відновленні вегетації + N-Lok™ (перед сівбою) або $N_{97}(NH_4NO_3)$ + N-Lok™ при відновленні вегетації на фонах $N_{23}P_{60}K_{60}$ (сумарно N_{120}) забезпечували найбільший стартовий вміст легкогідролізного азоту в орному шарі 132–136 мг/кг ґрунту, залежно від умов року.

Найвищий середній за 2020–2022 роки врожай забезпечило удобрення $N_{23}P_{60}K_{60}(NH_4)_2HPO_4 + NH_4NO_3 + KCl$ (перед сівбою) + N_{67} (у відновлення вегетації) + N_{30} (на початку колосіння) + N-Lok™ (у відновлення вегетації) за сумарної норми N_{120} – 7,65 т/га зерна за середньорічної прибавки відносно контролю $N_{23}P_{60}K_{60}(NH_4)_2HPO_4 + NH_4NO_3 + KCl$ (перед сівбою) + $N_{37}(NH_4NO_3)$ (відновлення вегетації) 0,73 т/га.

Внесення карбаміду $N_{97}(CH_4N_2O)$ при застосуванні нітрапірину з осені по фону

$N_{23}P_{60}K_{60}(NH_4)_2HPO_4 + NH_4NO_3 + KCl$ підвищило ефективність цієї форми азотних добрив і прибавка врожаю зерна становила 0,47 т/га відносно виробничого контролю $N_{60}P_{60}K_{60}$.

Відсутність фосфорно-калійних добрив в системі удобрення озимого ячменю при внесенні $N_{23}(NH_4NO_3)$ (перед сівбою) + N_{67} (у відновлення вегетації) + N_{30} (на початку колосіння) не зменшувала врожайність культури відносно виробничого контролю $N_{60}P_{60}K_{60}$. За використання стабілізатора азоту N-Lok™ на цьому суто азотному мінеральному удобренні N_{120} аміачною селітрою була отримана середня істотна прибавка врожаю 0,44 т/га

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

References

- Babulicová, M., & Dyulgerova, B. (2018). Winter barley production in relation to crop rotations, fertilisation and weather conditions. *Agriculture Poľnohospodárstvo*, 64(1), 35–44. DOI: 10.2478/agri-2018-0004.
- Baliuk, S. A., Medvediev, V. V., Miroshnychenko, M. M., Skrylnyk Ye. V., Tymchenko, D. O., Fatieiev, A. I., Khrystenko, A. O., & Tsapko, Yu. L. (2012). *Ekolohichni stan ґruntiv Ukrainy. Ukrainyski heohrafichni zhurnal*, 2, 38–42. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2012-2-38_0.pdf (in Ukrainian).
- Barczak, B. (2008). Contents and ratios of mineral components in winter barley biomass cultivated under conditions of different nitrogen fertilisation. In *Journal of Elementology*, 13(1), 291–300. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/14343>.
- 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.
- Charles, R., Collaud, J. F., Haener, L. L., & Sinaj, S. (2012). Varieties, seeding rate and nitrogen fertilization on winter barley. Nitrogen and water use efficiencies of wheat and barley under a Mediterranean environment in Catalonia. In *Agrarforschung Schweiz*, 3(2), 88. URL: <https://www.agrarforschungschweiz.ch/en/2012/02/varieties-seeding-rate-and-nitrogen-fertilization-on-winter-barley>.
- Dotsenko, O., Miroshnychenko, M., & Hospodarenko, H. (2015). *Systema udobrennia ozymoho yachmeniu. Propozytsiia*. URL: <https://propozitsiya.com/ua/sistema-udobrennya-yachmenyu-ozimogo> (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.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports*. FAO. Rome. (2015). P. 106. URL: <http://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>.

- Linzmeier, W., Gutser, R., & Schmidhalter, U. (2001). The new nitrification inhibitor DMPP (ENTEC®) allows increased N-efficiency with simplified fertilizing strategies. *Plant Nutrition. Developments in Plant and Soil Sciences*, 92. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/0-306-47624-X_369.
- Lopushniak, V. I., & Veba, N. I. (2015). Vplyv rivnia mineralnogo zhyvlennia yachmeniu yaroho na vmist rukhomykh spoluk fosforu v temno-siromu opidzolenomu grunti Zakhidnogo Lisostepu Ukrainy. *Visnyk ahrarnoi nauky Prychor-nomoria*, 2(1:2), 30–37. URL: <http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/1769/1/n85v2r2015t1lopushnyak.pdf> (in Ukrainian).
- Lopushniak, V., Poliukhovych, M., & Lahush, N. (2017). Vplyv system udobrennia na rodiuchist temno-sirykh opidzole-nykh gruntiv ta produktyvnist kultur polovoiv sivozminy Zakhidnogo Lisostepu Ukrainy. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriiia heohrafichna*, 51, 214–223. DOI: 10.30970/vgg.2017.51.8860 (in Ukrainian).
- Lykhochvor, V. V., & Matkovska, M. V. (2017). Urozhainist sortiv ozymoho yachmeniu zalezho vid norm dobryv, mor-forehuliatoriv ta funhitsydiv v umovakh Zakhidnogo Lisostepu. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynystvo*, 62, 91–101. URL: <https://phzt-journal.isgkr.com.ua/wp-content/uploads/zbirnik/62ua/10.pdf> (in Ukrainian).
- Lykhochvor, V. V., & Petrychenko, V. F. (2010). Pro revoliutsiini zminy u tekhnolohiiakh v roslynyystvi. *Zerno*, 7, 42–48. URL: <https://www.zerno-ua.com/journals/2010/iyul-2010-god/v-lihochvor-pro-revoluciyni-zmini-u-tehnologiyah-v-roslinnictvi> (in Ukrainian).
- Moisiienko, V. V., & Podolskyi, O. M. (2019). Produktyvnist yachmeniu ozymoho sortu Khailait zalezho vid ele-mentiv tekhnolohii vyroshchuvannia. *Naukovi horyzonty*, 10(83), 13–19. DOI: 10.33249/2663-2144-2019-83-10-13-19 (in Ukrainian).
- Nitrogen Stabilizer Products that Must Be Registered under FIFRA. (2022). Substances excluded from the definition of a nitrogen stabilizer. U.S. Environmental Protection Agency. Last updated on January 18, 2022. URL: <https://www.epa.gov/pesticide-registration/nitrogen-stabilizer-products-must-be-registered-under-fifra#substances>.
- Polovyy, V., Hnativ, P., Balkovskyy, V., Ivaniuk, V., Lahush, N., Shestak, V., Szulc, W., Rutkowska, B., Lukashchuk, L., Lukyanik, M., & Lopotych, N. (2021). The influence of climate changes on crop yields in Western Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(1), 384–390. DOI: 10.15421/2021_56.
- Roche, L., Forrestal, P., Lanigan, G., Richards, K., Shaw, L., & Wall, D. (2016). Impact of fertiliser nitrogen formulation, and N stabilisers on nitrous oxide emissions in spring barley. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 233, 229–237. DOI: 10.1016/j.agee.2016.08.031.
- Shevchuk, O. V. (2014). Pozhyvnyi rezhym temno-siroho opidzolenoho gruntu ta produktyvnist silskohospodarskykh kultur za alternatyvnykh system udobrennia v Zakhidnomu Lisostepu Ukrainy : dys. ... kand. s.-h. nauk: 06.01.04. Kyiv, 2014. 200 s. (in Ukrainian).
- Veba, N. I. (2015). Zmina vmistu luzhnohidrolizovanoho azotu v temno-siromu opidzolenomu grunti pid vplyvom mineral-noho udobrennia yachmeniu yaroho. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo*, 83, 100–104. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrohimigrn_2015_83_19 (in Ukrainian).
- Zaiets, S. O. (2018). Pidzhyvlennia ozymoho yachmeniu riznyimi vydamy azotnykh dobryv. *Ahronom*, 4, 76–78. URL: <https://www.agronom.com.ua/pidzhyvlennya-ozymogo-yachmenyu-riznyimi-vydamy-azotnyh-dobryv> (in Ukrainian).