ISSN 3083-7448 (PRINT)
ISSN 3083-7464 ONLINE)

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

УДК 633.11«324»:631.559:631.524.84(477.4)
DOI https://doi.org/10.32782/3083-7464-2026-2-111-120



В. В. Остапчук
доктор філософії,
викладач кафедри загального землеробства,
Уманський національний університет (м. Умань, Україна)
E-mail: vasyl0304@icloud.com
orcid.org/0009-0003-0522-533X



С. В. Рогальський
кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри рослинництва імені О. І. Зінченка,
Уманський національний університет (м. Умань, Україна)
E-mail: serhii.rohalskyi@unu.edu.ua
orcid.org/0009-0007-5739-8717



Л. М. Кононенко
кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри рослинництва імені О. І. Зінченка,
Уманський національний університет (м. Умань, Україна)
E-mail: lidiyakononenko@ukr.net
orcid.org/0000-0001-7037-2692



О. В. Усатюк
доктор філософії,
викладач кафедри агрохімії та ґрунтознавства,
Уманський національний університет (м. Умань, Україна)
E-mail: ukragroselo@gmail.com
orcid.org/0009-0005-6140-7036



С. В. Усик
кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри загального землеробства,
Уманський національний університет (м. Умань, Україна)
E-mail: sewooborot@gmail.com
orcid.org/0000-0002-6027-8691



А. С. Лозінська
кандидат сільськогосподарських наук,
старший викладач кафедри загального землеробства,
Уманський національний університет (м. Умань, Україна)
E-mail: anna.lozinska@unu.edu.ua
orcid.org/0000-0002-3421-3042



В. В. Борисенко
кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри загального землеробства,
Уманський національний університет (м. Умань, Україна)
E-mail: Pathetic@i.ua
orcid.org/0000-0001-8947-1180

ОЦІНКА ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ АЗОТНОГО СТАНУ РОСЛИН І ПРОГНОЗОВАНОЇ ТА ФАКТИЧНОЇ ВРОЖАЙНОСТІ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ СОРТУ АРТІСТ В УМОВАХ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

У статті наведено результати порівняльної оцінки потенційної та фактичної врожайності пшениці озимої (Triticum aestivum L.) сорту Артіст в умовах Лісостепу України залежно від рівня мінерального живлення та фізіологічного азотного стану рослин, визначеного за допомогою портативного приладу Yara N-Tester™. Дослідження проведено у 2024–2026 рр. у польових умовах за попередника соняшник. Метою роботи було встановлення закономірностей формування продуктивності пшениці озимої, оцінювання її потенційної та фактичної врожайності, а також визначення взаємозв'язку між азотним статусом рослин, рівнем мінерального живлення та реалізацією врожайного потенціалу сорту. У ході досліджень встановлено, що застосування мінеральних добрив сприяло активізації ростових процесів та покращенню фізіологічного стану рослин. У фазі ВВСН 47 висота рослин на контрольному варіанті становила 65 см, тоді як за застосування добрив досягала 80 см. Показники Yara N-Tester™ закономірно зростали зі збільшенням рівня удобрення та залежали від виду добрива. Найвище значення 792 одиниці отримано за внесення діамофоски в нормі 100 кг/га, що на 49,2% перевищувало контрольний рівень. Відповідно до показників N-Tester™ прогнозована врожайність за цього варіанта становила 8,0 т/га, тоді як на контролі 5,3 т/га. Фактична врожайність зерна характеризувалася більшою варіабельністю. На контрольному варіанті вона становила 4,5–5,0 т/га, за внесення карбаміду до 6,0 т/га, суперфосфату до 9,1 т/га, діамофоски до 9,1 т/га. Кореляційно-регресійним аналізом встановлено прямий статистично значущий зв'язок між показником Yara N-Tester™ та фактичною врожайністю: $r = 0,7775$, $p = 0,0029$, $R^2 = 0,6045$. Отримані результати підтверджують інформативність Yara N-Tester™ для оперативної діагностики азотного стану рослин та оцінювання продуктивного потенціалу посіву. Водночас реалізація фактичної врожайності залежала не лише від азотного забезпечення, а й від комплексу погодних, ґрунтових та технологічних чинників. Практичне значення результатів полягає у можливості використання інструментальної діагностики азотного статусу для оптимізації мінерального живлення та підвищення ефективності технології вирощування пшениці озимої.
Ключові слова: *пшениця озима, прогнозована врожайність, фактична врожайність, висота рослин,Yara N-Tester.*

V. V. Ostapchuk
PhD in Agricultural Sciences,
Lecturer at the Department of General Agriculture,
Uman National University (Uman, Ukraine)
E-mail: vasyl0304@icloud.com
orcid.org/0009-0003-0522-533X
S. V. Rohalskyi
PhD in Agricultural Sciences,
Associate Professor at the Department of Crop Production,
Uman National University (Uman, Ukraine)
E-mail: serhii.rohalskyi@unu.edu.ua
orcid.org/0009-0007-5739-8717
L. M. Kononenko
PhD in Agricultural Sciences,
Associate Professor at the Department of Crop Production,
Uman National University (Uman, Ukraine)
E-mail: lidiyakononenko@ukr.net
orcid.org/0000-0001-7037-2692
O. V. Usatiuk
Doctor of Philosophy,
Lecturer at the Department of Agrochemistry and Soil Science,
Uman National University (Uman, Ukraine)
E-mail: ukragroselo@gmail.com
orcid.org/0009-0005-6140-7036
S. V. Usyk
Candidate of Agricultural Sciences,
Associate Professor at the Department of General Agriculture,
Uman National University (Uman, Ukraine)
E-mail: sewooborot@gmail.com
orcid.org/0000-0002-6027-8691
A. S. Lozinska
Candidate of Agricultural Sciences,
Senior Lecturer at the Department of General Agriculture,
Uman National University (Uman, Ukraine)
E-mail: anna.lozinska@unu.edu.ua
orcid.org/0000-0002-3421-3042
V. V. Borysenko
Candidate of Agricultural Sciences,
Associate Professor at the Department of General Agriculture,
Uman National University (Uman, Ukraine)
E-mail: Pathetic@i.ua
orcid.org/0000-0001-7037-2692

ISSN 3083-7448 (PRINT)
ISSN 3083-7464 ONLINE)

ASSESSMENT OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE NITROGEN STATUS OF PLANTS AND THE PREDICTED AND ACTUAL YIELD OF WINTER WHEAT OF THE ARTIST VARIETY UNDER THE CONDITIONS OF THE FOREST-STEPPE ZONE OF UKRAINE

The article presents the results of a comparative assessment of the potential and actual yield of winter wheat (Triticum aestivum L.), cv. Artist, under the conditions of the Forest-Steppe zone of Ukraine depending on the level of mineral nutrition and the physiological nitrogen status of plants determined using the portable Yara N-Tester™ device. The study was conducted under field conditions in 2024–2026 following sunflower as the preceding crop. The aim of the research was to establish the patterns of productivity formation in winter wheat, assess its potential and actual yield, and determine the relationship between the nitrogen status of plants, the level of mineral nutrition, and the realization of the yield potential of the cultivar. The study established that the application of mineral fertilizers enhanced plant growth processes and improved their physiological condition. At the BBCH 47 growth stage, plant height in the control treatment was 65 cm, whereas with fertilizer application it reached 80 cm. Yara N-Tester™ readings increased consistently with increasing fertilizer rates and depended on the type of fertilizer applied. The highest value, 792 units, was recorded following the application of diammonium phosphate (diammophoska) at a rate of 100 kg/ha, which was 49.2% higher than the control level. According to the Yara N-Tester™ readings, the predicted yield for this treatment was 8.0 t/ha, compared with 5.3 t/ha in the control treatment. Actual grain yield was characterized by greater variability. In the control treatment, it ranged from 4.5 to 5.0 t/ha, while the application of urea increased yield to 6.0 t/ha, and the application of superphosphate and diammophoska increased it to 9.1 t/ha. Correlation and regression analysis revealed a statistically significant positive relationship between the Yara N-Tester™ reading and actual yield: r = 0.7775, p = 0.0029, R^2 = 0.6045. The results confirm the informative value of the Yara N-Tester™ for rapid diagnosis of the nitrogen status of plants and assessment of the productive potential of the crop. At the same time, the realization of actual yield depended not only on nitrogen supply but also on a complex of weather, soil, and technological factors. The practical significance of the results lies in the possibility of using instrumental diagnostics of plant nitrogen status to optimize mineral nutrition and improve the efficiency of winter wheat cultivation technology.

Key words: *winter wheat, predicted yield, actual yield, plant height, Yara N-Tester.*

Постановка проблеми. Одним із ключових факторів для високих врожаїв є засвоєння азотних добрив. Азот є одним із основних елементів мінерального живлення, який визначає інтенсивність формування вегетативної маси, розвиток кореневої системи, кущіння, площу асиміляційної поверхні та подальше формування елементів продуктивності.

Водночас недостатнє азотне забезпечення обмежує реалізацію потенціалу сорту, тоді як надмірне внесення азотних добрив може спричиняти непропорційний розвиток вегетативної маси, зниження ефективності використання азоту та підвищення ризику негативного впливу посухи на продукційний процес. За умов одночасної дії високих температур і дефіциту вологи характер взаємодії азотного живлення з продуктивністю пшениці стає особливо важливим, оскільки оптимізація азотного забезпечення може впливати на фотосинтетичну активність, перерозподіл азоту та налив зерна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Встановлено, що засвоюваність азоту в озимих зернових культурах має значний вплив на вміст білка та класність самої культури [1, 4]. Завдяки застосуванню приладу N-Tester™ який легко вимірює рівень поглинання азоту культурою, для визначення точної потреби азоту, для подальших корегувань за потреби [2].

Багаторічні дослідження закордоном зокрема у Франції показали, що застосування приладу для вимірювання поглинання азоту сприяло збільшенню вмісту білка на 0,3% та збільшення врожайності на 120 кг/га при цьому вона впливає на збільшення валового прибутку на 18 євро (вартість внесення добрив вирахувана) [3]. Оптичні методи визначення дозволяють непрямо оцінювати вміст азоту в рослині, оскільки ці технології не можуть вимірювати його безпосередньо. Вимірювання проходять швидко, недорого і їх можна проводити інтенсивно у просторі та часі, що забезпечує потрібну роздільну здатність для управління добривами з азотом [5]. Встановлено в дослідженні [6], що застосування Yara N-Tester™ дає змогу диференційовано оцінювати азотний стан озимої пшениці після внесення гною. За показників сенсорів 60–65% від референтного рівня оптимальна норма мінерального азоту становила від 118 до 128 кг N/га**,** тоді як за 85–90% від 100 до 110 кг N/га.

Дослідження [7] показало, що за норм внесення азоту 0–400 кг N/га індекс NDRE стабільніше оцінював азотний стан рослин, ніж NDVI, RVI та RERVI, і тісніше був пов'язаний із площею листків та накопиченням азоту (R^2 вище). Модель на основі NDRE мала $R^2 > 0,90$, RMSE < 5%**,** а між SV і врожайністю встановлено $R^2 > 0,70$; підвищення SV на 0,1 забезпечувало приріст урожайності на 3608,1 кг/га**.** У досліді в посівах озимої пшениці встановлено [8] за норм N 0–200 кг/га підвищення азотного живлення збільшувало врожайність зерна з 2,11 до 6,78 т/га**,** а вміст білка з 8,96 до 17,19%. Роздільне внесення азоту у лютому–березні було ефективнішим за передпосівне внесення за врожайністю, білковістю та ефективністю використання азоту.

У дослідженні [9, 13, 14], проведеному в Норвегії, вміст хлорофілу в листках озимої пшениці визначали за допомогою приладу Yara N-Tester™ у середині фази BBCH 55**.** Результати вимірювань виражали у вигляді значень N-Tester. Для кожного варіанта досліду вимірювання проводили на 30 випадково відібраних рослинах у кожній повторності**,** використовуючи спектральний діапазон 650–940 нм**.** Застосування азотних добрив сприяло підвищенню показника Yara N-Tester™ з 597 до 708–731**,** при цьому максимальний вміст азоту в рослинах **(**3,15%) встановлено за N + S-технології, а найвище його поглинання (112,90 мг/рослину) та фактичну врожайність (8,18 т/га) за N + S + IN-технології. Співвідношення врожайності до показників N-Tester

становило 0,01049–0,01131 т/га на одиницю приладу, причому максимальну продуктивність отримано за N-Tester 723**,** що вказує на відсутність прямолінійної залежності між інтенсивністю азотного живлення та врожайністю і підтверджує визначальну роль ефективності використання азоту [10, 12].

В роботі [11, 14] встановлено, що зв'язок між показниками Yara N-Tester™ та врожайністю зерна пшениці посилювався упродовж вегетації. Середній коефіцієнт кореляції зростав від 0,70 у фазі кущіння до 0,84 на початку виходу в трубку і 0,87 у фазі колосіння**,** тоді як коефіцієнт варіації знижувався відповідно з 14,36 до 9,18 та 6,14%. Це свідчить, що N-Tester™ найточніше характеризує азотний стан посіву та потенційну врожайність на середніх і пізніх етапах розвитку пшениці.

Мета статті полягала в оцінюванні взаємозв'язку між азотним станом рослин, прогнозованою та фактичною врожайністю пшениці озимої сорту Артіст в умовах Лісостепу України залежно від варіанта мінерального живлення, з визначенням інформативності показника Yara N-Tester™ для оцінювання очікуваної продуктивності посіву.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводили в умовах Лісостепу України на посівах пшениці озимої сорту Артіст. Експериментальні дослідження виконували протягом 2024–2026 рр. у польових умовах за типової для регіону технології вирощування культури, попередником був соняшник. Схема досліду включала 10 варіантів, розміщених рендомізовано у триразовій повторності: контроль без внесення добрив та три види мінеральних добрив карбамід, суперфосфат і діамофоска у фізичних нормах 60, 90 та 100 кг/га.

Для оцінювання азотного стану рослин використовували портативний прилад Yara N-Tester™**,** за допомогою якого визначали відносний вміст хлорофілу в листковому апараті. Вимірювання проводили упродовж основних фаз розвитку пшениці озимої відповідно до шкали ВВСН. Для кожного варіанта здійснювали серію вимірювань на типових, добре розвинених листках із подальшим визначенням середнього значення показника.

Азотний стан рослин пшениці озимої визначали за допомогою портативного приладу Yara N-Tester™, принцип роботи якого ґрунтується на вимірюванні інтенсивності зеленого забарвлення листків, що пов'язане з умістом хлорофілу та рівнем азотного живлення рослин. Вимірювання проводили у визначені фази розвитку пшениці озимої відповідно до шкали ВВСН. На кожному варіанті досліду виконували 30 вимірювань для одного повторення (90 на варіант) на різних рослинах, рівномірно розподілених по ділянці. Датчик приладу розміщували в середній частині пластинки наймолодшого повністю розвиненого листка, уникаючи центральної жилки та пошкоджених ділянок. За результатами вимірювань визначали середнє значення показника N-Tester™ для кожного варіанту досліду. Отримані дані використовували для оцінки забезпеченості рослин азотом та порівняння ефективності різних варіантів удобрення.

Визначення фактичного азотного статусу та індексу азотного живлення [17]

Для кількісної характеристики забезпеченості рослин азотом за можливості додатково визначали концентрацію загального азоту (Na) у надземній масі рослин. Відбір рослинних зразків здійснювали одночасно з вимірюваннями N-Tester, що забезпечувало синхронізацію інструментальної та лабораторної оцінки азотного статусу.

Індекс азотного живлення (NNI, Nitrogen Nutrition Index) розраховували як відношення фактичної концентрації азоту в надземній біомасі (Na) до критичної концентрації азоту (Nc):

$$NNI = \frac{N_a}{N_c}$$

де Na – фактична концентрація азоту в надземній біомасі, % сухої речовини; Nc – критична концентрація азоту, % сухої речовини.

Критичну концентрацію азоту визначали відповідно до концепції кривої розбавлення азоту, за якою критичний вміст N зменшується зі збільшенням накопичення сухої біомаси. Для озимої пшениці використовували залежність:

$$N_c = 5{,}35 \times DM^{-0{,}442}$$

де DM – кількість сухої речовини надземної біомаси, т/га; Nc – критична концентрація азоту, % сухої речовини.

Значення NNI ≈ 1 характеризує наближений до оптимального азотний статус рослин, тоді як значення NNI < 1 свідчить про недостатній рівень азотного забезпечення, а NNI > 1 – про концентрацію азоту, вищу за критичний рівень для сформованої біомаси.

Фактичну врожайність пшениці озимої визначали шляхом зважування зерна, отриманого з облікової площі (50 м²) кожної дослідної ділянки [16], з подальшим перерахунком на 1 га, прогнозовану врожайність визначали за показниками Yara N-Tester™ [15].

Оцінювання взаємозв'язку між азотним статусом і врожайністю [18]

Для встановлення характеру та сили взаємозв'язків між показниками N-Tester, NNI, прогнозованою та фактичною врожайністю проводили кореляційний і регресійний аналіз.

Тісноту лінійного взаємозв'язку оцінювали за коефіцієнтом кореляції Пірсона (r). Для визначення частки варіації залежної ознаки, яка пояснюється зміною незалежної змінної, використовували коефіцієнт детермінації (R^2).

Для основних залежностей будували регресійні моделі виду:

$$Y = a + bX$$

де Y – урожайність або інший досліджуваний показник; X – показник азотного стану рослин (N-Tester або NNI); a – вільний член рівняння регресії; b – коефіцієнт регресії.

ISSN 3083-7448 (PRINT)
ISSN 3083-7464 ONLINE)

Окремо оцінювали залежності:

1. N-Tester → фактична врожайність;
2. N-Tester → прогнозована врожайність;
3. NNI → фактична врожайність;
4. NNI → прогнозована врожайність;
5. прогнозована врожайність → фактична врожайність.

Такий підхід давав змогу оцінити не лише рівень азотного забезпечення рослин, а й придатність показника N-Tester як оперативного індикатора потенціалу формування врожайності пшениці озимої. Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали методами дисперсійного, кореляційного та регресійного аналізів із використанням Microsoft Excel та Statistica 12.

Основні результати дослідження. За результатами досліджень 2024–2026 рр. встановлено закономірне збільшення висоти рослин пшениці озимої у фазі ВВСН 47 під впливом застосування мінеральних. На контрольному варіанті, де добрива не застосовували, середня висота рослин становила 65 см**,** тоді як внесення добрив сприяло її збільшенню до 77–80 см, що свідчить про позитивний вплив покращення мінерального живлення на інтенсивність ростових процесів (табл. 1).

Найвищі показники росту пшениці озимої сорту Артіст, 80 см сформувалися за використання карбаміду в нормі 100 кг/га. За зменшення норми карбаміду до 90 та 60 кг/га висота рослин становила відповідно 79 та 78 см. Застосування суперфосфату забезпечувало поступове збільшення показника від 77 см за норми 60 кг/га до 79 см за 100 кг/га**,** тоді як за внесення діамофоски висота рослин змінювалася в аналогічному діапазоні від 77 до 79 см.

Порівняння досліджуваних видів добрив свідчить про дещо вищу ефективність азотного живлення у формуванні надземної маси та лінійного росту рослин. Зокрема, за максимальної норми внесення 100 кг/га карбамід забезпечував висоту рослин на 1 см більшу порівняно із суперфосфатом і діамофоскою.

Товщина стебла в таблиці 2 є важливою морфометричною ознакою пшениці озимої, яка характеризує інтенсивність формування вегетативної маси та механічну стійкість рослин. Її величина значною мірою залежить від рівня мінерального живлення, зокрема забезпеченості рослин основними елементами живлення на початкових етапах органогенезу. У фазі ВВСН 47 цей показник відображає сформований потенціал стебла та його здатність забезпечувати подальше формування продуктивності рослин.

За результатами досліджень в (табл. 2) 2024–2026 рр. встановлено, що товщина стебла пшениці озимої у фазі ВВСН 47 істотно варіювала залежно від виду мінерального добрива та рівня його внесення.

На контрольному варіанті, без застосування добрив, товщина стебла становила 4,5 мм, що характеризує природний рівень розвитку стеблового апарату за ґрунтової забезпеченості елементами живлення. Застосування мінеральних добрив змінювало цей показник, причому характер реакції значною мірою визначався як видом добрива, так і нормою його внесення (див. табл. 2).

Найбільш виражене потовщення стебла спостерігалося за внесення суперфосфату та діамофоски. За норми 60 кг/га товщина стебла становила відповідно 4,0 мм, за 90 кг/га від 4,8 до 4,9 мм, а за 100 кг/га показник досягав 5,0 мм за обох видів добрив. Отже, порівняно з контролем максимальне збільшення товщини стебла становило близько 0,5 мм, або 11,1%. Така закономірність свідчить про позитивний вплив збалансованого фосфорного та комплексного живлення на формування механічно міцного стебла.

За використання карбаміду показник був нижчим і, відповідно до наведених у таблиці даних, становив від 4,0 до 4,2 мм залежно від рівня удобрення. Таким чином, реакція рослин на карбамід була менш вираженою порівняно із суперфосфатом і діамофоскою. Водночас загальна тенденція до формування більш товстого стебла за підвищення рівня мінерального живлення зберігалася.

Отримані дані дають підстави стверджувати, що підвищення забезпеченості рослин елементами мінерального живлення сприяло оптимізації морфогенетичних процесів та формуванню стебла з більшою товщиною. Особливо виразно це проявилося за застосування суперфосфату і діамофоски у нормах 90 та 100 кг/га, що може мати важливе значення для підвищення стійкості рослин до вилягання та забезпечення ефективного

Таблиця 1

Середня висота рослин пшениці озимої за різних норм внесення мінеральних добрив при посіві у фазу ВВСН 47, 2024–2026 р.

Варіант удобрення	Фізична норма внесення мінеральних добрив, кг/га		
	60	90	100
Контроль (без добрив)	65		
Карбамід	78	79	80
Суперфосфат	77	78	79
Діамофоска	77	78	79
$НІР_{05}$	3,71	3,79	3,83

Таблиця 2

Середня товщина стебла рослин пшениці озимої за різних норм внесення мінеральних добрив при посіві у фазу ВВСН 47, мм, 2024–2026

Варіант удобрення	Фізична норма внесення мінеральних добрив, кг/га		
	60	90	100
Контроль (без добрив)	4,5		
Карбамід	2,0	4,0	4,0
Суперфосфат	4,0	4,8	5,0
Діамофоска	4,0	4,9	5,0
$НІР_{05}$	0,18	0,22	0,23

транспорту асимілянтів у період формування і наливу зерна.

Загалом, найсприятливіші умови для формування потовщеного стебла пшениці озимої у фазі ВВСН 47 створювалися за внесення суперфосфату та діамофоски в нормі від 90 до 100 кг/га, тоді як контрольний варіант характеризувався нижчим рівнем структурного розвитку стебла.

За результатами трирічних досліджень, в (таблиці 3) проведених у 2024–2026 рр., встановлено чітку диференціацію показників Yara N-Tester™ у фазі ВВСН 47 залежно від виду мінерального добрива та його норми внесення. Дослідження проводили за попередника соняшник, який вирощували впродовж двох років**,** що забезпечувало відносно однорідний агрофон для оцінювання реакції рослин на мінеральне живлення.

На контрольному варіанті без внесення добрив середнє значення N-Tester™ становило 531 умовну одиницю. Підвищення рівня мінерального живлення супроводжувалося закономірним збільшенням індексу азотного стану рослин. За внесення добрив у нормі 60 кг/га показник зростав від 559 до 755**,** за 90 кг/га від 575 до 755, а за максимальної норми 100 кг/га досягав 792 одиниць залежно від виду добрива. За застосування карбаміду показник N-Tester™ становив 640, 650 та 661 одиниць відповідно за норм 60, 90 і 100 кг/га. Отже, послідовне підвищення дози добрива забезпечувало поступове зростання індексу на 21 та 32 одиниці порівняно з найнижчою нормою.

За використання суперфосфату значення N-Tester™ були дещо вищими й становили відповідно 645, 653 та 676 одиниць за норм 60, 90 і 100 кг/га. Таким чином, у межах досліджуваного діапазону спостерігалося поступове підвищення показника зі збільшенням норми добрива, що свідчить про посилення фізіологічної активності листкового апарату. Найвищі значення Yara N-Tester™ зафіксовано у варіантах із внесенням діамофоски. Показник становив 745 одиниць за норми 60 кг/га, 755 одиниць за 90 кг/га та досягав максимального значення 792 одиниці за норми 100 кг/га (табл. 3).

Таблиця 3

Середні показники N-тестера пшениці озимої за різних норм внесення мінеральних добрив при посіві у фазу ВВСН 47, 2024–2026

Варіант удобрення	Фізична норма внесення мінеральних добрив, кг/га		
	60	90	100
Контроль (без добрив)	531		
Карбамід	640	650	661
Суперфосфат	645	653	676
Діамофоска	745	755	792
$НІР_{05}$	32,01	32,71	33,8

Порівняно з контролем максимальне значення зросло на 261 одиницю, або приблизно на 49,2%**,** що свідчить про найбільш виражене підвищення індексу азотного стану рослин за цього варіанта удобрення. Порівняльний аналіз показує, що за норми 100 кг/га показник N-Tester™ за діамофоски був на 131 одиницю вищим, ніж за карбаміду, та на 116 одиниць вищим, ніж за суперфосфату.

Прогнозована врожайність є важливим інтегральним показником, що дає змогу оцінити потенціал продуктивності посіву на певному етапі органогенезу та визначити ймовірний рівень реалізації врожайного потенціалу пшениці озимої. Використання показників Yara N-Tester™ у фазі ВВСН 47 дає можливість оперативно охарактеризувати азотний стан рослин і на цій основі спрогнозувати формування майбутньої врожайності. За результатами досліджень в таблиці 4 встановлено чітку залежність прогнозованої врожайності пшениці озимої від виду та норми мінерального удобрення за попередника соняшник, який вирощували впродовж двох років.

На контрольному варіанті без добрив прогнозована врожайність становила 5,3 т/га**,** тоді як застосування мінеральних добрив забезпечувало її послідовне підвищення. За внесення карбаміду в нормі 60, 90 та 100 кг/га прогнозований рівень урожайності становив відповідно 6,4; 6,5 та 6,6 т/га**,** що свідчить про поступове зростання продуктивного потенціалу зі збільшенням норми удобрення. За використання суперфосфату показник зростав від 6,5 до 6,7 т/га**,** відповідно за збільшення норми від 60 до 100 кг/га.

Найвищі значення зафіксовано за внесення діамофоски**,** де прогнозована врожайність становила 7,5 т/га за норми 60 кг/га, 7,6 т/га за 90 кг/га та досягала максимального рівня 8,0 т/га за 100 кг/га.

Порівняно з контролем максимальне підвищення прогнозованої врожайності за цього варіанта становило 2,7 т/га, або 50,9%**,** що свідчить про найбільш сприятливе формування продукційного потенціалу посіву.

За норми 100 кг/га перевага діамофоски порівняно з карбамідом становила 1,4 т/га**,** а порівняно із суперфосфатом 1,3 т/га. Таким чином, характер зміни прогнозованої врожайності узгоджується з установленою раніше

Таблиця 4

Середня прогнозована врожайність пшениці озимої на основі показників N-тестера, т/га, 2024–2026

Варіант удобрення	Фізична норма внесення мінеральних добрив, кг/га		
	60	90	100
Контроль (без добрив)	5,3		
Карбамід	6,4	6,5	6,6
Суперфосфат	6,5	6,6	6,7
Діамофоска	7,5	7,6	8,0
$НІР_{05}$	0,32	0,33	0,34

ISSN 3083-7448 (PRINT)
ISSN 3083-7464 ONLINE)

Таблиця 5

Середня фактична врожайність зерна пшениці озимої, т/га, 2024–2026

Варіант удобрення	Фізична норма внесення мінеральних добрив, кг/га		
	60	90	100
Контроль (без добрив)	4,5		
Карбамід	5,1	5,2	6,0
Суперфосфат	5,5	8,2	9,1
Діамофоска	7,0	8,0	9,1
$НІР_{05}$	0,28	0,33	0,37

диференціацією показників N-Tester™, що вказує на доцільність використання цього інструментального показника для оперативної оцінки стану посіву та прогнозування його продуктивності.

Фактична врожайність зерна пшениці озимої сорту Артіст таблиця 5 у 2024–2026 рр. характеризувалася вираженою варіабельністю залежно від виду мінерального добрива та норми його внесення.

На контрольному варіанті без добрив урожайність становила 4,5 т/га**,** тоді як застосування карбаміду забезпечувало її підвищення до 6,0 т/га. Найбільш істотна реакція культури спостерігалася за використання суперфосфату та діамофоски. За суперфосфату фактична врожайність зростала від 5,5 т/га за норми 60 кг/га до 8,2 та 9,1 т/га за 90 і 100 кг/га відповідно. За діамофоски цей показник становив відповідно 7,0; 8,0 та 9,1 т/га.

З урахуванням того, що N-тестер опосередковано характеризує азотний статус рослин через відносний вміст хлорофілу в листках, отримані кореляційно-регресійні залежності доцільно інтерпретувати не як прямий вплив показника N-тестера на врожайність, а як відображення зв'язку між фізіологічним станом посіву, забезпеченістю азотом, фотосинтетичною активністю та формуванням урожайності пшениці озимої.

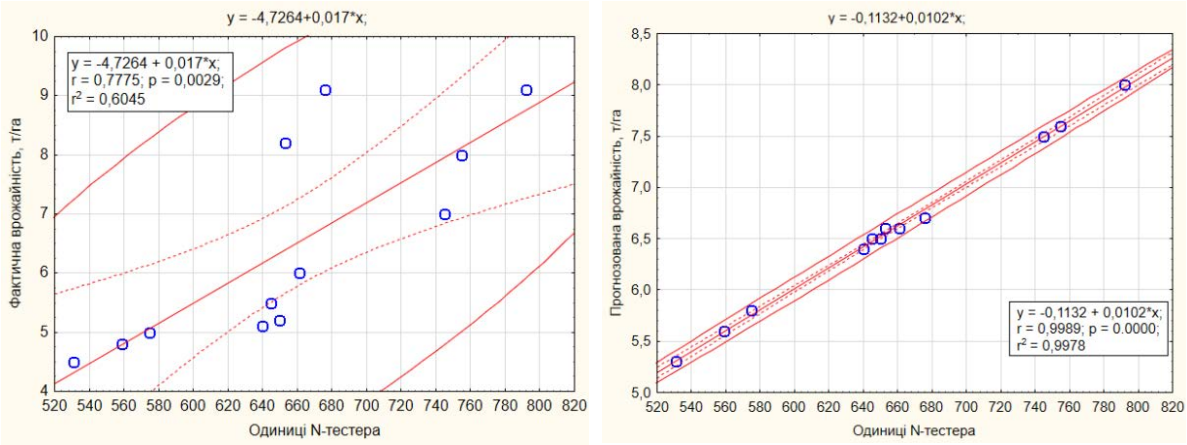
Між показниками N-тестера та фактичною врожайністю пшениці озимої встановлено прямий статистично значущий зв'язок середньої сили ($r = 0,7775$; $p = 0,0029$; $R^2 = 0,6045$), що свідчить про істотну роль азотного статусу рослин у формуванні продуктивності посіву.

Оскільки показник N-тестера (рисунок 1) ґрунтується на оцінюванні відносного вмісту хлорофілу в листковій пластинці, його підвищені значення, як правило, відображають більшу концентрацію хлорофілу та, відповідно, кращий азотний статус рослин. Азот є ключовим елементом формування хлорофілу, ферментативного апарату фотосинтезу та білкового комплексу листка, тому достатня забезпеченість ним сприяє підтриманню високої фотосинтетичної активності та накопиченню асимілятів, необхідних для формування генеративних органів і насіння.

Отримане значення $R^2 = 0,6045$ показує, що варіація показників N-тестера пояснювала близько 60,45 % варіабельності фактичної врожайності. Для польових агрономічних досліджень це досить високий рівень пояснювальної здатності, однак він водночас демонструє, що врожайність пшениці озимої не може розглядатися як функція лише азотного статусу рослин.

Близько 39,55% варіації врожайності зумовлювали інші фактори, серед яких важливе значення мають вологозабезпечення, температурний режим, тривалість та інтенсивність сонячної радіації, сортові особливості, густота посіву, забезпеченість фосфором і калієм, реакція ґрунтового середовища, ефективність симбіотичної азотфіксації, діяльність бульбочкових бактерій, фітосанітарний стан посіву та технологічні прийоми вирощування.

Особливо важливо враховувати специфіку пшениці озимої як зернової культури, продуктивність якої значною мірою визначається рівнем мінерального живлення та ефективністю використання доступного азоту.



фактична прогнозована

Рис. 1. Параметри статистичних зв'язків фактичної та прогнозованої врожайності з показниками N-тестера

Для пшениці озимої показник N-Tester™ характеризує фізіологічний стан листкового апарату, насамперед пов’язаний із вмістом хлорофілу та забезпеченістю рослин азотом. Водночас високі значення N-Tester™ не завжди є прямим еквівалентом високої врожайності, оскільки кінцева продуктивність формується під впливом комплексу взаємопов’язаних чинників. Визначальне значення мають ефективність фотосинтетичного апарату, тривалість його функціонування, перерозподіл асимілятів до генеративних органів, кількість продуктивних стебел, озерненість колоса та маса зерна. Тому однаковий або близький рівень показників N-Tester™ може відповідати різному рівню фактичної врожайності залежно від умов вирощування, забезпеченості вологою, температурного режиму та здатності рослин реалізувати сформований продуктивний потенціал.

Рівняння регресії y = –4,7264+0,017x підтверджує позитивну тенденцію: збільшення показника N-тестера на одну одиницю супроводжувалося середнім підвищенням фактичної врожайності на 0,017 т/га. Проте цей коефіцієнт не слід трактувати як безпосередню причинну дію хлорофілу на врожайність. Коректніше розглядати його як кількісну характеристику асоціації між індикатором азотного статусу листкового апарату та реалізованою продуктивністю посіву.

Надзвичайно високий коефіцієнт кореляції між N-тестером та прогнозованою врожайністю ($r = 0,9989$; $R^2 = 0,9978$) принципово відрізняється від залежності з фактичною врожайністю. Значення $R^2 = 0,9978$ означає, що прогнозована врожайність практично повністю узгоджується з варіацією показника N-тестера. Однак це, найімовірніше, пов'язано з методикою її розрахунку або структурою прогнозної моделі, у якій показник N-тестера є безпосереднім або одним із ключових предикторів.

Тому настільки високий коефіцієнт детермінації не варто інтерпретувати як доказ того, що N-тестер здатний практично зі 100% точністю передбачити реальну врожайність у польових умовах. Він свідчить насамперед про дуже тісну математичну відповідність між N-тестером і тією величиною, яка була визначена як прогнозована врожайність.

Натомість зниження R^2 до 0,6045 при переході від прогнозованої до фактичної врожайності демонструє вплив численних чинників, які реалізуються вже після моменту оцінювання хлорофільного статусу рослин.

Урожайність пшениці озимої формується як сукупний результат взаємодії генетичного потенціалу сорту, погодних і ґрунтових умов та рівня технологічного забезпечення посіву. Показник N-тестера при цьому характеризує передусім фізіологічний стан листкового апарату та рівень азотного забезпечення рослин, тому є лише одним із чинників, що визначають потенціал формування врожаю.

На кожному етапі розвитку рослин можуть проявлятися фактори, які обмежують реалізацію продуктивного потенціалу. Зокрема, підвищений рівень хлорофілу та відповідно високі значення N-тестера характеризують достатній рівень азотного живлення і добре функціонування листкового апарату, однак самі по собі не гарантують високої врожайності.

За недостатнього вологозабезпечення рослини знижують інтенсивність транспірації та газообміну, що супроводжується пригніченням фотосинтетичної активності. У таких умовах навіть достатній рівень азотного забезпечення не завжди забезпечує повну реалізацію потенційної продуктивності посіву.

Важливе значення мають також температурні умови впродовж критичних періодів розвитку. Підвищені температури та дефіцит вологи у фазах виходу в трубку, колосіння, цвітіння й наливу зерна можуть негативно позначатися на формуванні кількості зерен у колосі та його виповненості. Водночас недостатнє забезпечення фосфором і калієм, нерівномірне азотне живлення, пошкодження рослин хворобами та шкідниками, забур'яненість посівів, полягання та несприятливі умови перезимівлі також здатні істотно зменшувати рівень фактичної врожайності.

Встановлені значення $r = 0,7775$ та $R^2 = 0,6045$ характеризують достатньо тісний позитивний зв'язок між показником N-тестера та врожайністю пшениці озимої. Величина коефіцієнта детермінації свідчить, що близько 60,45% варіації врожайності статистично пов'язано зі змінами досліджуваного показника, тоді як решта варіації зумовлена дією інших агроекологічних і технологічних чинників.

Висновки. За результатами досліджень встановлено, що мінеральне живлення істотно впливало на ріст і продуктивність пшениці озимої сорту Артіст. Найвищий показник Yara N-Tester™ 792 од. сформувався за внесення діамофоски в нормі 100 кг/га, що на 49,2% перевищувало контроль.

Прогнозована врожайність за цього варіанта становила 8,0 т/га, а максимальна фактична врожайність зерна 9,1 т/га отримана за внесення суперфосфату та діамофоски в нормі 100 кг/га.

Між показником Yara N-Tester™ та фактичною врожайністю встановлено прямий статистично значущий зв’язок ($r = 0,7775$; $p = 0,0029$; $R^2 = 0,6045$), що підтверджує інформативність N-Tester™ для оцінювання азотного стану та продуктивного потенціалу посіву.

Отже, використання Yara N-Tester™ є доцільним для оперативної діагностики азотного забезпечення пшениці озимої та обґрунтування оптимізації мінерального живлення.

Подяки. Дане дослідження виконувалося у 2024–2026 роках відповідно до загальноуніверситетської наукової тематики Уманського національного університету «Збалансоване використання, прогнозування та управління природно-ресурсним потенціалом агроекосистем України» (0121U112521) та «Природні ресурси України – збереження, раціональне

ISSN 3083-7448 (PRINT)
ISSN 3083-7464 ONLINE)

(збалансоване) використання інноваційних технологій» (0126U000146).

Фінансування дослідження. Автори заявляють, що дослідження виконано без зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Авторський колектив дослідження погодився з вимогами European Association of Science Editors (EASE), щодо розкриття інформації про конфлікт інтересів та заявляють про його відсутність.

Авторський внесок.

Остапчук В. В.: визначення концепції дослідження; підбір методів дослідження; розробка програмного забезпечення; валідація відтворюваності результатів; забезпечення ресурсами та обладнанням; підготовка рукопису – перегляд і редагування; наукове керівництво; адміністрування процесу.

Рогальський С. В.: підбір методів дослідження; підготовка рукопису – первинний текст; підготовка рукопису – перегляд і редагування; графічне представлення результатів.

Кононенко Л. М.: підготовка рукопису – первинний текст; підготовка рукопису – перегляд і редагування; графічне представлення результатів.

Усатюк О. В.: визначення концепції дослідження; підготовка рукопису – первинний текст; підготовка рукопису – перегляд і редагування.

Усик С. В.: визначення концепції дослідження; підготовка рукопису – первинний текст; підготовка рукопису – перегляд і редагування.

Лозінська А. С.: визначення концепції дослідження; підготовка рукопису – первинний текст; підготовка рукопису – перегляд і редагування.

Борисенко В.В.: визначення концепції дослідження; підготовка рукопису – первинний текст; підготовка рукопису – перегляд і редагування.

Борисенко В. В.: визначення концепції дослідження; підготовка рукопису – первинний текст; підготовка рукопису – перегляд і редагування.

Декларація використання генеративного штучного інтелекту: під час підготовки рукопису генеративні інструменти штучного інтелекту / ШІ-асистовані технології не використовувалися.

References

1. Raun, W.R., Johnson, G.V., Stone, M.L., Solie, J.B., Lukina, E.V., Thomason, W.E., Schepers, J.S. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. Agronomy Journal, 93, pp. 131–138. https://doi.org/10.2134/agronj2001.931131x.

2. Hansen, P.M., Jørgensen, J.R., Thomsen, A. (2003). Predicting grain yield and protein content in winter wheat and spring barley using repeated canopy reflectance measurements and partial least squares regression. Journal of Agricultural Science, 139, pp. 307–318. https://doi.org/10.1017/S002185960300318X.

3. Yara. (2026). Yara N-Tester™ – portable device for determining nitrogen uptake by plants. Available at: https://www.yara.ua/crop-nutrition/tools-and-services-landing-page/n-tester/. [Accessed 31 August 2026].

4. Zhao, B., Duan, A., Ata-Ul-Karim, S.T., Liu, Z., Chen, Z., Gong, Z., Zhang, J., Xiao, J., Liu, Z., Qin, A. (2018). Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize. European Journal of Agronomy, 93, pp. 113–125. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.005.

5. Ravier, C., Jeuffroy, M.H., Gate, P., Cohan, J.P., Meynard, J.M. (2018). Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 110, pp. 117–130. https://doi.org/10.1007/s10705-017-9872-2.

6. Aranguren, M., Castellón, A., Aizpurua, A. (2019). Crop sensor-based in-season nitrogen management of wheat with manure application. Remote Sensing, 11, 1094. https://doi.org/10.3390/rs11091094.

7. Zhang, K., Ge, X., Shen, P., Li, W., Liu, X., Cao, Q., Zhu, Y., Cao, W., Tian, Y. (2019). Predicting rice grain yield based on dynamic changes in vegetation indexes during early to mid-growth stages. Remote Sensing, 11, 387. https://doi.org/10.3390/rs11040387.

8. Mohammed, Y.A., Kelly, J., Chim, B.K., Rutto, E., Waldschmidt, K., Mullock, J., Torres, G., Desta, K.G., Raun, W. (2013). Nitrogen fertilizer management for improved grain quality and yield in winter wheat in Oklahoma. Journal of Plant Nutrition, 36, pp. 749–761. https://doi.org/10.1080/01904167.2012.754039.

9. Škarpa, P., Klofáč, D., Krčma, F., Šimečková, J., Kozáková, Z. (2020). Effect of plasma activated water foliar application on selected growth parameters of maize (Zea mays L.). Water, 12, 3545. https://doi.org/10.3390/w12123545.

10. Antošovský, J., Škarpa, P., Ryant, P. (2024). The effect of nitrogen-sulphur fertilizer with nitrification inhibitor on winter wheat (Triticum aestivum L.) nutrition. Heliyon, 10, e33035, pp. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33035.

11. Mishra, A.K., Sharma, S., Angeles, O., Izuddin, M. (2026). Optimizing nitrogen rates in a rice–wheat system of the eastern Indo-Gangetic Plains: Trade-offs between yield, fertilizer N efficiency and modeled greenhouse gas emissions. Journal of Agriculture and Food Research, 24, 103232, pp. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2026.103232.

12. Sapkota, T.B., Singh, B., Takele, R. (2023). Improving nitrogen use efficiency and reducing nitrogen surplus through best fertilizer nitrogen management in cereal production: the case of India and China. Advances in Agronomy, 178, pp. 233–294. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.006.

13. Ludemann, C.I., Gruere, A., Heffer, P., Dobermann, A. (2022). Global data on fertilizer use by crop and by country. Scientific Data, 9, 501. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01592.

14. Sapkota, T.B., Singh, B., Takele, R. (2023). Improving nitrogen use efficiency and reducing nitrogen surplus through best fertilizer nitrogen management in cereal production: the case of India and China. Advances in Agronomy, 178, pp. 233–294. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.006.

15. Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Lukina, E.V., Thomason, W.E., Schepers, J.S. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. Agronomy Journal, 93(1), pp. 131–138. https://doi.org/10.2134/agronj2001.931131.

16. Kong, H., Wang, J., Cai, T., Du, J., Zhao, C., Hu, C., Jiang, H. (2026). Winter wheat yield estimation under different management practices using multi-source data fusion. Agronomy, 16(1), 71, pp. 1–7. https://doi.org/10.3390/agronomy16010071.

17. Yue, S.; Zhao, R.; Zhang, F.; Cui, Z.; Meng, Q.; Li, F.; Chen, X. Critical Nitrogen Dilution Curve for Optimizing Nitrogen Management of Winter Wheat Production in the North China Plain. *Agron. J.* 2012, *104*, 523–529. https://doi.org/10.2134/agronj2011.0258

18. Follett, R.; Follett, R.; Halvorson, A. Use of a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1992, *23*, 687–697. https://doi.org/10.1080/00103629209368619

Дата першого надходження статті до видання: 08.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.10.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 24.11.2026