

УДК 633.11+633.14:631.527:581.16

Р.С. Щеченко

Адаптивність сортів тритикале озимого до абіотичних факторів середовища в умовах східного лісостепу України

Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України Харків, Україна

*E-mail: rus212rus@gmail.com

UDC 633.11+633.14:631.527:581.16

R. S. Shchechenko

Adaptability of Winter Triticale Cultivars to Abiotic Environmental Factors in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine

Yuriev Plant Production Institute, NAAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

*E-mail: rus212rus@gmail.com

Реферат: Тритикале озиме відіграє значну роль у зерновому виробництві України. Ця культура поєднує високу врожайність та якість зерна з невибагливістю до умов вирощування. Для стабільного формування високих врожаїв тритикале озимого актуальним є використання сортів з високою адаптивністю до різних умов вирощування. Метою досліджень було визначити адаптивні властивості 12 сортів тритикале озимого та виділити сорти з оптимальним поєднанням підвищеної урожайності з її стабільністю залежно від погодних умов та дози азотних добрив. За результатами дисперсійного аналізу встановлено, що на мінливість урожайності істотно впливали усі досліджувані фактори: генотип, умови навколишнього середовища, доза азоту, а також взаємодія цих факторів. Найбільший вплив мали умови середовища (63 %) та генотип (11 %), взаємодія генотип/умови середовища та взаємодія усіх трьох факторів (8 %). Сорти ХАД 650, Златоуст та Тимофій мають високу загальну адаптивну здатність. Вони формували вищу врожайність у середньому у досліджах (відповідно 5,79 т/га, 5,71 т/га та 5,45 т/га). Найбільш стабільними за формуванням урожайності в різних умовах вирощування та азотного живлення за варіансою специфічної адаптивної здатності та відносною стабільністю генотипу були сорти ХАД 45, Трифон, Ратне та Леонтій. Найбільш пластичними за показником коефіцієнта регресії були сорти Златоуст, Адам та Раритет. Ці сорти мають високий потенціал урожайності та здатні максимально реалізувати його у сприятливих умовах. За поєднанням стабільності, пластичності та врожайності найвищі показники селекційної цінності генотипу мали сорти ХАД 45, Златоуст, Трифон та ХАД 650. Ці сорти відрізняються високим потенціалом урожайності, який проявляють за сприятливих умов і мають здатність протистояти несприятливим умовам року, тому можуть забезпечувати високу стабільність формування врожаю за різних умов вирощування.

Ключові слова: тритикале озиме, сорт, врожайність, адаптивність, стабільність, азотні добрива.

Abstract: Winter triticale plays a significant role in grain production in Ukraine, combining high yield and grain quality with high resilience to adverse growing conditions. To ensure stable high yields, it is crucial to grow winter triticale cultivars with high adaptability to various environments. The purpose of this study was to evaluate the adaptability of 12 winter triticale cultivars and to identify genotypes with an optimal combination of high yield and yield stability across different weather conditions and nitrogen fertilizer doses. Analysis of variance revealed that yield variability was significantly influenced by all studied factors: genotype, environmental conditions, nitrogen dose, and their interactions. The greatest contributions were made by environment (63%) and genotype (11%), followed by genotype-environment interaction and genotype-environment-fertilization interaction (8%). 'KhAD 650', 'Zlatoust', and 'Tymofii' exhibited high

general adaptability, producing higher average yields (5.79 t/ha, 5.71 t/ha, and 5.45 t/ha, respectively). Based on the variance of specific adaptability and relative stability, 'KhAD 45', 'Tryfon', 'Ratne', and 'Leontii' were identified as the most stable across different growing environments and nitrogen fertilization levels. According to the regression coefficient, 'Zlatoust', 'Adam', and 'Rarytet' were the most plastic cultivars, demonstrating high yield potential and the ability to maximize it under favorable conditions. Considering the combination of stability, plasticity, and yield, the highest breeding value was recorded for 'KhAD 45', 'Zlatoust', 'Tryfon', and 'KhAD 650'. These cultivars are noticeable for high yield potential, which is manifested under favorable conditions, and the ability to withstand adverse environmental factors, ensuring stable crop performance across diverse growing systems.

Key words: winter triticale, cultivar, yield, adaptability, stability, nitrogen fertilizers.

Вступ

Тритикале озиме відіграє значну роль у зерновому виробництві України. Ця культура поєднує високу врожайність та якість зерна з невибагливістю до умов вирощування. Зокрема, вирізняється високою зимостійкістю, стійкістю до посухи, хвороб та адаптивністю до бідних, кислих ґрунтів, що дозволяє вирощувати її в різних кліматичних зонах. В Україні та світі тритикале озиме має стратегічне значення як високобілковий кормовий ресурс, а також перспективна харчова та технічна культура, здатна давати стабільні врожаї на бідних ґрунтах.

На даний час Державний реєстр сортів рослин, придатних до поширення в Україні, включає 40 сортів озимого тритикале, з яких 23 % створені в Інституті рослинництва ім. В. Я. Юр'єва, м. Харків (ІР НААН) (<https://me.gov.ua/view/2957b803-f25b-4abf-8f0c-892e8754f3ad>). В Україні впроваджено у сільськогосподарське виробництво спеціалізовані за призначенням кормові та продовольчі сорти тритикале призначення, які істотно різняться за господарсько-цінними ознаками. Кормові сорти тритикале АД 256, Гарне, Букет, Шаланда набули поширення в усіх агроєкологічних зонах України. За сприятливих умов вирощування потенціал урожайності цих сортів може досягати понад 10 т/га (Kurychenko et al., 2022). Сучасна селекція спрямована на створення високоврожайних сортів, які відповідають змінам кліматичних умов. У посушливих умовах урожайність сортів Тимофій, Пудік і Єлань досягала 9,94–10,36 т/га (Yakymchuk et al., 2022).

На стабільність врожайності впливає багато факторів, основними з яких є генетичні особливості сорту, погодні умови та технологічні заходи. Але, у більшості випадків, у виробничих умовах сорти тритикале не проявляють в повному обсязі свій потенціал урожайності. Це пов'язано з тим, що більша частина посівів розташована у зонах ризикованого землеробства і часто посіви

Introduction

Winter triticale plays a significant role in grain production in Ukraine. This crop combines high yield and grain quality with high resilience to growing conditions. Notably, it stands out for its high winter hardiness, drought tolerance, resistance to diseases, and adaptability to poor, acidic soils, allowing for its cultivation across various climatic zones. In Ukraine and globally, winter triticale holds strategic importance as a high-protein fodder resource, as well as a promising food-grade and industrial crop capable of providing stable yields on marginal lands.

Currently, the State Register of Plant Varieties Suitable for Dissemination in Ukraine includes 40 winter triticale cultivars, 23% of which were developed at the Yuriev Plant Production Institute of NAAS, Kharkiv (YPPI NAAS) (<https://me.gov.ua/view/2957b803-f25b-4abf-8f0c-892e8754f3ad>). Specialized fodder and food-grade triticale cultivars have been implemented in Ukrainian agricultural production, differing significantly in their economically valuable traits. Fodder cultivars such as 'AD 256', 'Harne', 'Buket', and 'Shalanda' have become widespread across all agro-ecological zones of Ukraine. Under favorable growing conditions, these cultivars can yield over 10 t/ha. Current breeding is focused on creating high-yielding cultivars that can meet changing climatic conditions. In arid environments, 'Tymofii', 'Pudik', and 'Yelan' yielded up to 9.94–10.36 t/ha.

Yield stability is influenced by many factors, with the genetic characteristics of a cultivar, weather conditions, and technological measures being the primary ones. However, in most cases, triticale cultivars do not fulfill their yield potentials. This is attributed to the fact that

знають негативного впливу абіотичних чинників. Крім того, з урахуванням підвищеної стійкості тритикале до несприятливих умов середовища, посіви часто розташовують на менш придатних для вирощування інших зернових культур землях. Для зниження ризиків недобору врожаїв від негативного впливу абіотичних стресів перевага віддається локально-адаптованим сортам (Riabchun et al., 2017).

Одним з найважливіших агротехнічних заходів, що впливають на врожайність тритикале озимого є внесення мінеральних добрив, особливо азоту (Ostapchuk, Liubych, 2015). З літературних джерел відомо, що оптимальна норма азотного живлення для тритикале озимого зазвичай становить N60-120 кг д.р./га, що забезпечує стабільну врожайність. Найвища ефективність азоту досягається при достатньому зволоженні та поєднанні з фосфорно-калійними добривами. Білітук А. П., Новицька Н. В. (Bilitiuk, Novytska, 2025) повідомляють, що на дерново-підзолистому супіщаному ґрунті західного Полісся оптимальною дозою для сорту тритикале озимого Поліський 7 є N120 у поєднанні з фосфорними та калійними добривами. Дослідження Любича В. В., Остапчука В. В. щодо впливу азотного живлення на врожайність тритикале озимого в умовах правобережного Лісостепу показали, що серед варіантів N30, N60, N90 та N120 на фоні P60K60 оптимальними є дози N60 – N90 (Liubych, Ostapchuk, 2025). Дробітько А. В., Качанова Т. В. зазначають, що в умовах південного Степу України внесення мінеральних добрив у дозі N45P45K45 суттєво збільшувало врожайність сортів тритикале озимого Тимофій, Донець та Пластун волинський (Drobotko, Kachanova, 2023). В дослідженнях Г.В. Щипака показано, що при використанні максимальної дози азоту N240 за сприятливих умов року врожайність сорту Тимофій підвищувалась до 11,74 т/га, коли у варіанті без добрив вона становила 9,40 т/га (Shchupak, 2021). При цьому в Україні відзначається низький обсяг використання мінеральних добрив. Аналіз структури внесених мінеральних елементів живлення дозволив виявити суттєву невідповідність науково обґрунтованим нормам удобрення через зміщення у бік азотовмісних речовин. Така тенденція не відповідає умовам інтенсивного землеробства та не забезпечує повноцінної потреби рослин в елементах живлення (Bereziuk, Zubar, 2019). Тому актуальним є дослідження впливу лише азотного живлення на мінливість урожайності тритикале для наближення прогнозів цього показника у

a large portion of the winter triticale acreage is located in risky farming zones, where crops are frequently exposed to abiotic stressors. Furthermore, given triticale's increased resilience to unfavorable environments, it is often sown on lands less suitable for other cereals. To reduce the risk of yield losses from abiotic stresses, preference is given to locally adapted cultivars.

One of the most critical agrotechnical measures affecting winter triticale yield is the application of mineral fertilizers, particularly nitrogen. Published data indicate that the optimal nitrogen fertilizer dose for winter triticale typically ranges from N60-120 kg a.i./ha, ensuring stable performance. The highest nitrogen efficiency is achieved with sufficient moisture and in combination with phosphorus-potassium fertilizers. Bilitiuk and Novytska (2025) reported that on sod-podzolic sandy loam soil in the Western Polissia (mixed forest zone), the optimal dose for the winter triticale cultivar 'Poliskyi 7' was N120 combined with P and K fertilizers. Liubych and Ostapchuk (2025) studied the effect of nitrogen fertilization (N30, N60, N90, and N120 on P60K60 background) on winter triticale yield in the Right-Bank Forest-Steppe and showed that N60–N90 were the optimal doses. Drobotko and Kachanova (2023) noted that in the Southern Steppe of Ukraine, mineral fertilization at N45P45K45 significantly increased the yields of 'Tymofii', 'Donets', and 'Plastun Volynskiy'. A study by H.V. Shchupak (2021) demonstrated that using a maximum nitrogen dose of N240 in a favorable year increased the yield of 'Tymofii' to 11.74 t/ha, compared to 9.40 t/ha in the unfertilized variant. At the same time, mineral fertilization is little used in Ukraine. An analysis of the mineral fertilization structure revealed a significant discrepancy with scientifically grounded fertilizer doses due to a shift toward nitrogen-containing substances. This trend does not meet the requirements of intensive farming and does not provide plants with necessary nutrients (Bereziuk, Zubar, 2019). Therefore, it is relevant to study the impact of nitrogen fertilization alone on triticale yield variability to align yield forecasts with real production conditions. Organic and ecological production requires limited use of chemicals and fertilizers. In such cases,

реальних умовах виробництва. Органічне та екологічне виробництво потребують обмеженого використання хімічних препаратів та добрив. У цьому випадку перевага надається сортам, здатним формувати підвищену врожайність на низькому агрофоні (Muhova, Kirchev, 2020).

У селекційній практиці відомі сорти з дуже високою адаптивністю, підтвердженою виробництвом у широкому географічному та часовому діапазоні. У 1982 р. у Польщі на генетичній основі Амфідиплоїду 206 було створено озимий сорт тритикале Lasko, який характеризувався дуже високими показниками адаптивності до несприятливих біотичних і абіотичних чинників. Він був зареєстрований у Польщі, Німеччині, Австрії, Швейцарії, США та став найбільш розповсюдженим сортом у світі (Wolski, Tymieniecka, 1983). Сорт тритикале ярого Аїст харківський, який поєднував високі господарсько-біологічні ознаки з відмінною харчовою якістю зерна, вирощувався на всій території України понад 20 років та увійшов до родоводів багатьох сучасних високоадаптивних сортів (Riabchun et al., 2012). Сорт BG Goran, зареєстрований у Хорватії у 2004 р., має відмінні господарсько-біологічні властивості. Цей сорт дотепер залишається у виробництві. Завдяки високій адаптивності він поширився у Словенії та Боснії та Герцеговині (<https://bc-institut.hr/en/tritikale-2/>). У Нідерландах селекційна станція Lantmännen SW Seed BV застосовує ефективну схему селекції тритикале озимого у поєднанні із загальноєвропейською системою екологічних випробувань. Завдяки цій системі більшість нідерландських сортів придатні до вирощування на всій території Європи. Найбільшого поширення у Європі набули сорти Lombardo, Agostino, Barolo та Kaulos (<https://www.lantmannenseed.nl/tritikale-breeding>).

Таким чином, для стабільного формування високих врожаїв тритикале озимого актуальним є підбір сортів з високою адаптивністю до різних умов вирощування.

Метою досліджень було визначити адаптивні властивості сортів тритикале озимого селекції IP НААН в умовах східного Лісостепу України та виділити сорти з оптимальним поєднанням підвищеної урожайності з її стабільністю залежно від погодних умов та норми азотних добрив.

preference is given to cultivars capable of yielding a lot under low-input conditions (Muhova, Kirchev, 2020).

In breeding practice, cultivars with very high adaptability, confirmed by production across a wide geographical and temporal range, are well-known. In 1982, the winter triticale cultivar 'Lasko' was developed from 'Amphidiploid 206' in Poland; it was noticeable for very high adaptability to unfavorable biotic and abiotic factors. It was registered in Poland, Germany, Austria, Switzerland, and the USA, becoming the most widespread cultivar in the world (Wolski, Tymieniecka, 1983). The spring triticale cultivar 'Aist Kharkivskiy', which combined high economic and biological traits with excellent food-grade grain quality, was cultivated throughout Ukraine for over 20 years and has been included in the pedigrees of many modern highly adaptable cultivars (Riabchun et al., 2012). 'BG Goran', registered in Croatia in 2004, possesses excellent economic and biological characteristics. This cultivar remains in production to this day. Due to its high adaptability, it has spread to Slovenia and Bosnia and Herzegovina (<https://bc-institut.hr/en/tritikale-2/>). In the Netherlands, a breeding station of Lantmännen SW Seed BV employs an effective winter triticale breeding scheme in combination with a pan-European system of environmental trials. Owing to this system, most Dutch cultivars are suitable for cultivation throughout Europe. The most widespread cultivars in Europe are 'Lombardo', 'Agostino', 'Barolo', and 'Kaulos' (<https://www.lantmannenseed.nl/tritikale-breeding>).

Thus, to consistently harvest high yields of winter triticale, the selection of cultivars with high adaptability to various growing conditions remains relevant.

The purpose of this study was to evaluate the adaptability of winter triticale cultivars bred at the YPPI NAAS in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine and to identify cultivars with an optimal combination of increased yield and its stability depending on weather conditions and nitrogen fertilizer doses.

Методика

Дослідження проводились у сезонах 2022–2023, 2023–2024 та 2024–2025 рр. на полях селекційної сівозміни експериментальної бази ІР НААН, яка розташована в 15 кілометрах від м. Харків (східна частина Лісостепу України). Ґрунтовий покрив представлений потужним слабо вилуженим чорноземом на пилювато-суглинистому лесі з товщиною гумусового шару 75 см. Клімат у зоні проведення досліджень помірно-континентальний. Нерівномірний розподіл опадів протягом вегетаційного періоду в сукупності з високими температурами повітря часто призводять до весняно-літніх посух. Сівбу тритикале озимого проводили у третій декаді вересня сівалкою ССФК-7 на ділянках площею 25 м² у триразовому повторенні. Норма висіву 5 млн. зерен на гектар. Попередник – пар.

Вивчали шість фонів живлення азотом: без добрив (контроль), N₆₀, N₉₀, N₁₂₀ – як оптимальні за методичними рекомендаціями Інституту землеробства НААН для тритикале озимого (Kostenko et al., 2012), N₁₈₀ та N₂₄₀ – для визначення можливого впливу на потенціал урожайності. Добрива вносили шляхом підживлення рослин у стадії кущення аміачною селітрою (N₃₄). Матеріал досліджень – 12 сортів озимого тритикале, створених в ІР НААН: короткостеблові – Тимофій, ХАД 45, ХАД 650; середньостеблові – Адам, Златоуст, Раритет, Ратне, Трифон; високостеблові – Букет, Леонтій; альтернативні – Олександр, Єлань. За кожним варіантом досліду визначали урожайність ваговим методом. Для визначення суттєвості та достовірності різниць урожайності, а також ефектів впливу факторів та їх взаємодії на формування врожайності використовували багатофакторний дисперсійний аналіз за факторами генотип, умови року, доза азоту (Rozhkov et al., 2016).

Визначали загальну адаптивну здатність (ЗАЗ), як середню реакцію генотипу на зміну умов року та доз добрив. ЗАЗ сорту, розраховується як відхилення середнього значення ознаки конкретного генотипу в певних умовах середовища від загального середнього показника по всій групі досліджуваних зразків за формулою:

$$ЗАЗ_i = \bar{X}_i - \mu,$$

де: \bar{X}_i – середня врожайність i -го сорту за всіма роками та варіантами,

μ – загальна середня врожайність усіх досліджуваних сортів у даному досліді.

Methods

The study was conducted in the breeding crop rotation experimental fields of the YPPI NAAS, which are located 15 kilometers from Kharkiv (Eastern Forest-Steppe of Ukraine), in 2021–2022, 2022–2023, and 2023–2024 seasons. The soil is deep, slightly leached chernozem on silty-clay loess with a humus layer of 75 cm thick. The climate in the study location is moderate continental. Uneven precipitation during the growing season combined with high air temperatures often leads to spring-summer droughts. Winter triticale was sown between September 21 and September 30 using an SSFK-7 seeder on 25 m² plots in three replications. The seeding rate was 5 million germinable seeds per hectare. The predecessor was black fallow.

Six nitrogen fertilizer doses were tested: no fertilizers (control), N₆₀, N₉₀, N₁₂₀ — as optimal doses in compliance with the methodological guidelines of the Institute of Agriculture of NAAS for winter triticale (Kostenko et al., 2012), and N₁₈₀ and N₂₄₀ — to assess the possible impact on yield. Fertilizers were applied as top-dressing at the tillering stage using ammonium nitrate (N₃₄). Twelve winter triticale cultivars developed at the YPPI NAAS were investigated: short-stemmed — 'Tymofii', 'KhAD 45', and 'KhAD 650'; medium-stemmed — 'Adam', 'Zlatoust', 'Rarytet', 'Ratne', and 'Tryfon'; tall-stemmed — 'Buket' and 'Leontiy'; with alternate growth habit — 'Oleksandr', 'Yelan'. Yield was determined by weighing in each experiment. To determine the significance of differences in yield and the effects of factors and their interactions on yield, a multi-factor analysis of variance (ANOVA) was used. The evaluated factors were genotype, year conditions, and nitrogen dose (Rozhkov et al., 2016).

General adaptability (GA) was determined as the average response of a genotype to changes in environmental conditions and fertilizer doses. The GA of a cultivar was calculated as the deviation of the mean value of a trait for a specific genotype under certain environmental conditions from the overall mean value for the entire sample of studied accessions using the following formula:

$$GA_i = \bar{X}_i - \mu$$

where: \bar{X}_i – mean yield of the i^{th} cultivar across all years and experiments; μ – overall mean yield of all studied cultivars in the given experiment.

Specific adaptability (SA), which reflects the deviation of the observed value in a specific

Специфічну адаптивну здатність (CAЗ), яка відображає відхилення фактичного значення в конкретному середовищі від теоретично очікуваного (суми загального середнього та ефектів ЗАЗ і середовища), розраховували за формулою:

$$CAZ_{ij} = X_{ij} - (\bar{X} + ZAZ_i + di),$$

де: X_{ij} – фактична врожайність i -го сорту в i -му середовищі,

\bar{X} – загальна середня врожайність по досліді,

ZAZ_i – ефект загальної адаптивної здатності i -го генотипу,

di – ефект j -го середовища (наскільки умови певного року краші або гірші за середні).

Відносну стабільність генотипу (Sgi), як відношення середньої врожайності сорту в окремому варіанті до середньої врожайності всіх сортів у цьому ж варіанті, визначене у відсотках, розраховували за формулою:

$$Sgi = \frac{\delta CAZ_i}{\bar{X}_i} \cdot 100 \%,$$

де: δCAZ_i – середньоквадратичне відхилення специфічної адаптивної здатності i -го генотипу, \bar{X}_i – середня врожайність i -го сорту за всіма роками та варіантами досліджень.

Пластичність сорту (bi) визначали як реакцію генотипу на варіювання умов середовища, шляхом регресійного аналізу.

Селекційну цінність генотипу (СЦГі) – параметр, який характеризує поєднання високої продуктивності та стабільності в одному генотипі, розраховували за формулою:

$$СЦГі = \bar{X}_i - t \cdot \delta CAZ_i,$$

де t – табличне значення критерію Стьюдента для 95 % ймовірності (Bazalii et al., 2007).

Для математичних розрахунків використовували програмне забезпечення MS Excel.

Результати та обговорення

Погодні умови значно різнилися за роками досліджень, що дозволило оцінити їх вплив на формування врожайності сортів озимого тритикале. Умови 2023 р. характеризувалися надмірним зволоженням у квітні у період відновлення вегетації та кушіння (ГТК 2,15), дуже сильною посухою у травні, на яку припали фази виходу в трубку – колосіння (ГТК 0,11), сильною посухою у червні під час цвітіння, зав'язування насіння та наливу зерна (ГТК 0,62) та вологою погодою у липні під час достигання

environment from the theoretically expected one (the sum of the overall mean value, GA and environment effects), was calculated using the following formula:

$$SA_{ij} = X_{ij} - (\bar{X} + GA_i + di)$$

where: X_{ij} – harvested yield of the i^{th} cultivar in the j^{th} environment;

\bar{X} – overall mean yield across all experiments;

GA_i – general adaptability effect in the i^{th} genotype;

di – effect of the j^{th} environment (how much the conditions of a particular year are better or worse than the average conditions).

The relative stability of a genotype (Sgi), as the ratio of the mean yield of a cultivar in an experiment to the mean yield of all cultivars in the same experiment, was calculated using the following formula and expressed as a percentage:

$$Sgi = \frac{\delta SA_i}{\bar{X}_i} \cdot 100 \%,$$

where: δSA_i – standard deviation of the specific adaptability of the i^{th} genotype;

\bar{X}_i – mean yield of the i^{th} cultivar across all years and experiments.

The plasticity of a cultivar (bi) was determined as the response of a genotype to environmental variations using regression analysis.

The breeding value of the genotype (BVG) — a parameter characterizing the combination of high performance and stability in a single genotype — was calculated using the following formula:

$$BVG_i = \bar{X}_i - t \cdot \delta SA_i,$$

where t = tabular Student's t-test value for the 95% significance level (Bazalii et al., 2007).

Mathematical calculations were performed in MS Excel.

Results and Discussion

The weather varied significantly across the study years, allowing for an assessment of its impact on the winter triticale cultivars' yields. 2023 was characterized by excessive wetting in April – during spring regrowth and tillering (HTC = 2.15), a very severe drought in May – during the period from stem elongation to heading (HTC = 0.11), a severe drought in June – during anthesis, seed setting, and grain filling (HTC = 0.62), and wet weather in July – during grain maturation (HTC = 1.81). Overall, 2023 was unfavorable for

зерна (ГТК 1,81). У цілому умови 2023 р. були несприятливими для росту і розвитку рослин, оскільки посушливі умови різного ступеня припали на всі критичні фази розвитку рослин, що призвело до зниження врожайності (рис. 1). У 2024 р. весь період вегетації тритикале супроводжувався посухою, у т.ч. у травні дуже сильною (ГТК 0,31), а у липні екстремальною (ГТК 0,43) та підвищеною температурою повітря. Це вкрай негативно вплинуло на розвиток рослин та формування врожайності, але дозволило оцінити сорти за стійкістю до весняної та літньої посухи та виділити найбільш стійкі за посухо- та жаростійкістю.

plant growth and development, as arid conditions of varying severity occurred during all critical developmental stages, reducing yields (Fig. 1). In 2024, triticale suffered from droughts during the entire vegetation period, including a very severe drought in May (HTC = 0.31) and an extreme drought in July (HTC = 0.43), which were accompanied by elevated air temperatures. This had an extremely negative impact on plant development and yield, but it allowed us to evaluate the cultivars for tolerance to spring and summer drought and to identify the most drought- and heat-tolerant genotypes.

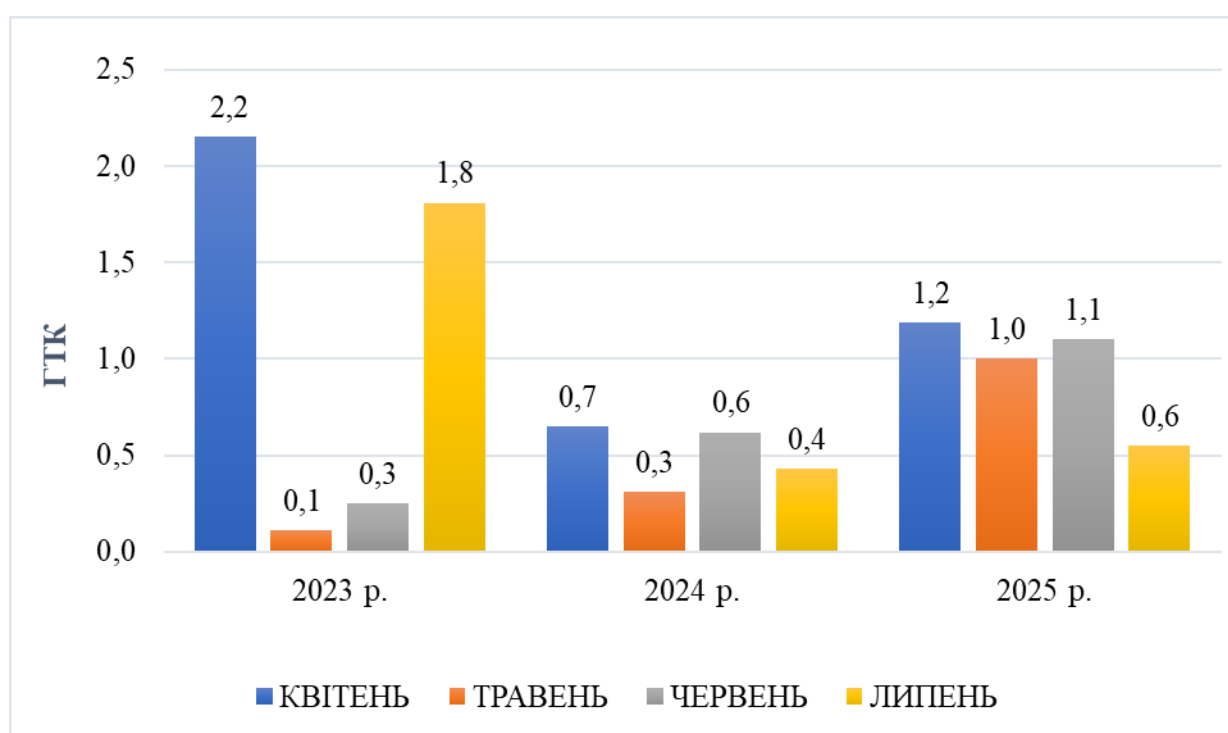


Рис. 1 Гідротермічний коефіцієнт Селянинова (ГТК) у період вегетації тритикале, 2023 – 2025 рр.

Fig. 1. Selyaninov's hydrothermal coefficient (HTC) during the triticale growing season, 2023–2025.

Погодні умови 2025 р. були сприятливими для росту і розвитку тритикале озимого у першій половині вегетації та задовільними у другій половині вегетації, оскільки спостерігались посушливі періоди на початку червня та середині липня.

Урожайність сортів тритикале озимого у середньому за роками та варіантами добрив становила 4,21–5,74 т/га залежно від сорту. Найбільш урожайними були сорти ХАД 650, Златоуст, Тимофій та Слань (табл. 1).

The weather in 2025 was favorable for winter triticale growth and development during the first half of the growing season and satisfactory in the second half, as there were dry periods in early June and mid-July.

The yield of winter triticale cultivars, averaged across the years and fertilization variants, ranged from 4.21 to 5.74 t/ha, depending on the cultivar. The greatest yields were harvested from 'KhAD 650', 'Zlatoust', 'Tymofii', and 'Yelan' (Table 1).

Таблиця 1. Урожайність сортів тритикале озимого залежно від умов року та норм азотних добрив, т/га, 2023 – 2025 рр.
Table 1. Yield of the winter triticale cultivars depending on the year conditions and nitrogen fertilizer doses, t/ha, 2023–2025.

Сорт / Cultivar	Рік / Year	Норма азоту / Nitrogen dose						Середня за роками / Mean across the years	Середня загальна / Overall mean
		Без добрив / No fertilizers	N ₆₀	N ₉₀	N ₁₂₀	N ₁₈₀	N ₂₄₀		
ХАД 45 / KhAD 45	2023	0.26	4.07	4.68	4.74	4.79	4.86	4.59	4.21
	2024	3.45	3.18	3.66	3.70	3.74	3.80	3.59	
	2025	4.60	4.56	4.62	4.59	4.34	4.02	4.46	
Ратне / Ratne	2023	4.79	4.86	5.35	4.92	4.79	5.40	5.02	4.92
	2024	3.74	3.80	4.18	3.84	3.74	4.22	3.92	
	2025	4.24	5.74	5.40	6.20	7.26	6.10	5.82	
Букет / Buket	2023	4.07	5.35	5.48	4.92	5.56	4.99	5.06	5.05
	2024	3.18	4.18	4.28	3.84	4.34	3.90	3.95	
	2025	5.96	3.24	6.80	6.20	7.14	7.42	6.13	
Леонтій / Leontii	2023	4.34	4.22	4.66	4.89	5.20	4.97	4.71	4.82
	2024	3.39	3.30	3.64	3.82	4.06	3.88	3.68	
	2025	6.77	5.86	6.16	6.00	5.82	5.84	6.08	
Раритет / Rarytet	2023	4.25	4.48	4.76	4.61	5.02	4.85	4.66	5.07
	2024	3.32	3.50	3.72	3.60	3.92	3.98	3.67	
	2025	5.96	7.10	7.16	6.92	7.02	7.15	6.89	
ХАД 650 / KhAD 650	2023	5.05	5.73	5.32	6.35	6.02	6.48	5.83	5.79
	2024	3.63	4.48	4.16	4.96	4.70	5.06	4.50	
	2025	6.93	7.42	7.50	6.98	6.64	6.72	7.03	
Адам / Adam	2023	4.13	5.22	4.68	4.45	3.84	3.96	4.38	4.91
	2024	3.23	4.08	3.66	3.48	3.00	3.15	3.43	
	2025	6.88	7.06	6.42	7.10	7.02	7.02	6.92	
Олександр / Oleksandr	2023	4.28	4.99	5.02	4.15	4.71	4.04	4.53	4.66
	2024	3.34	3.90	3.92	3.24	3.68	3.16	3.54	
	2025	6.96	4.60	5.12	5.88	6.56	6.40	5.92	
Слань / Yelan	2023	4.61	5.04	5.56	6.05	6.12	4.66	5.34	5.24
	2024	3.46	3.94	3.56	3.96	4.00	3.64	3.76	
	2025	6.16	6.04	6.10	6.90	6.90	7.54	6.61	
Злагоуст / Zlatoust	2023	5.44	4.94	5.88	6.35	7.14	4.76	5.75	5.71
	2024	3.47	3.86	4.12	4.12	4.16	3.72	3.91	
	2025	7.07	6.72	7.00	8.08	7.40	8.46	7.46	
Трифон / Tryfon	2023	4.68	5.12	5.04	6.35	5.88	4.86	5.32	4.88
	2024	3.34	4.00	3.94	4.18	3.90	3.80	3.86	
	2025	5.25	6.44	4.60	5.40	5.66	5.32	5.45	
Тимофій / Tymofii	2023	5.42	4.79	6.08	6.51	5.85	5.85	5.75	5.45
	2024	3.99	3.74	3.72	4.44	3.90	3.90	3.95	
	2025	6.03	6.26	7.20	6.62	6.90	6.90	6.65	
Середнє / Mean	–	4.72	4.88	5.09	5.23	5.30	5.13	–	
НІР _{0,05} / LSD _{0,05}	загальна / Overall								0.32
	фактор сорт / Cultivar factor								0.08
	фактор рік / Year factor								0.04
	фактор добрива / Fertilizer factor								0.05

Сорт ХАД 650 мав середню за роками та варіантами врожайність 5,79 т/га. За реакцією цього сорту на внесення добрив у всі три роки досліджень спостерігалось підвищення врожайності. У посушливих умовах 2023 р. внесення азотних добрив збільшувало врожайність сорту ХАД 650 на 0,27–1,43 т/га залежно від дози N. У посушливих умовах 2024 р. спостерігалась подібна динаміка. Внесення азотних добрив збільшувало врожайність на 0,53–1,43 т/га. У сприятливих умовах 2025 р. вплив азотних добрив був меншим. Підвищення врожайності було менш значним (на 0,49–0,57 т/га) лише у варіантах N60 та N90. При цьому сорт добре реагував на покращення погодних умов, збільшуючи врожайність до 7,03 т/га. Таким чином, сорт ХАД 650 має підвищену середню врожайність та високий потенціал урожайності, який проявляється за сприятливих умов року. Внесення азотних добрив може стабілізувати прояв урожайності у посушливі роки. В таких умовах доза азоту N180 найбільше підвищувала врожайність, але економічно доцільнішим є внесення азоту у дозі N120, яка також значно підвищувала врожайність і неістотно поступалась варіанту N180.

Високу середню врожайність мав сорт Златоуст (5,71 т/га). Цей сорт мав найвищий серед досліджуваних сортів потенціал урожайності, який виявився за сприятливих умов року та внесення високої дози азоту N240 – 8,46 т/га. Внесення азотних добрив у найбільш посушливому 2024 р. підвищувало врожайність на 0,25–0,69 т/га. Більшого підвищення врожайності було досягнуто за доз N90–N180, при цьому різниця між цими варіантами неістотна, тож оптимальною є доза N90. У менш посушливих умовах 2023 р. підвищення врожайності спостерігалось у варіантах N90–N180 при збільшенні врожайності відповідно до збільшення дози азоту на 0,44–1,70 т/га. У сприятливих умовах 2025 р. підвищення врожайності сорту Златоуст спостерігалось лише при високих дозах азоту N120–N240, що може мати значення тільки для інтенсивних технологій для максимальної реалізації сортом свого потенціалу.

Короткостеблій сорт Тимофій мав підвищену середню урожайність за роками та варіантами досліджень (5,45 т/га). Максимальної врожайності було досягнуто у сприятливих умовах 2025 р. при внесенні азотних добрив N90 – 7,02 т/га, що свідчить про можливість більшої реалізації потенціалу врожайності шляхом

'KhAD 650' yielded on average 5.79 t/ha across the years and fertilization variants. Regarding its response to fertilization, an increase in yield was observed in all three study years. Under the dry conditions of 2023, nitrogen application increased the yield of 'KhAD 650' by 0.27–1.43 t/ha, depending on the nitrogen dose. Similar patterns were observed in the dry 2024, where nitrogen application increased the yield by 0.53–1.43 t/ha. In the 2025, the effect of nitrogen fertilizer was weaker, as the yield increase was smaller (by 0.49–0.57 t/ha) and recorded only in the N60 and N90 experiments. At the same time, the cultivar responded well to weather improvement, increasing its yield up to 7.03 t/ha. Thus, 'KhAD 650' showed an increased mean yield and high yield potential, which is fully realized under favorable environmental conditions. Nitrogen application can stabilize yield performance in dry years. Under such conditions, the N180 dose resulted in the maximum yield increase, but N120 is an economically more viable dose, as it also significantly increased the yield and was only slightly inferior to N180.

The mean yield of 'Zlatoust' was high (5.71 t/ha). This cultivar exhibited the highest yield potential among the studied genotypes, amounting to 8.46 t/ha under favorable conditions with a high nitrogen dose of N240. In the most arid year, 2024, nitrogen application increased the yield by 0.25–0.69 t/ha. Greater yield gains were achieved with N90–N180; however, since the difference between these variants was insignificant, N90 is considered the optimal dose. Under the less arid conditions of 2023, the yield increased in the N90–N180 experiments by 0.44–1.70 t/ha; the higher dose of nitrogen fertilizer was applied, the greater gain in the yield was recorded. In the 2025, 'Zlatoust' increased its yield only at high nitrogen doses (N120–N240), which may be relevant only for intensive technologies aimed at maximizing the cultivar's potential.

The short-stemmed cultivar 'Tymofii' produced an increased mean yield across the years and fertilization variants (5.45 t/ha). The maximum yield of 7.02 t/ha was harvested under the favorable conditions in 2025 when N90 was applied, indicating a possibility of greater yield potential realization through agronomic measures. In terms of response to nitrogen fertilization under varying weather conditions,

технологічних заходів. За реакцією на азотне живлення під впливом погодних умов, на відміну від сортів ХАД 650 та Златоуст, сорт Тимофій мав більший відгук на добрива при покращенні умов року. У найбільш посушливих умовах 2024 р. сорт майже не реагував позитивно на внесення азоту. Лише у варіанті N120 спостерігалось підвищення врожайності на 0,45 т/га. У менш посушливих умовах 2023 р. азотні добрива підвищували врожайність у варіантах N90 і вище на 0,33–1,09 т/га. У сприятливих умовах 2025 р. урожайність підвищувалась у всіх варіантах доз азоту на 0,23–1,17 т/га.

Сорт дворучка Єлань у середньому за роками та варіантами мав підвищену врожайність (5,24 т/га). Максимальний прояв потенціалу врожайності спостерігався у сприятливих умовах року за високої дози азоту N240 (7,54 т/га). У цілому сорт Єлань добре реагує на внесення азотних добрив. Підвищення урожайності при внесенні азоту спостерігалось як у посушливі, так і у сприятливі роки, за винятком окремих варіантів. Вищу врожайність забезпечували дози N120 та N180, за яких середня за роками врожайність перевищувала контроль (без добрив) відповідно на 0,90 та 0,93 т/га. З урахуванням незначної різниці між цими значеннями, оптимальною можна вважати дозу N120.

У середньому за всіма сортами та роками досліджень спостерігалось поступове підвищення врожайності із збільшенням дози азоту від 4,72 т/га у варіанті без добрив до 5,30 т/га у варіанті N120, та зниження при N240 – 5,13 т/га. Але така динаміка не є загальною і відрізняється при спостереженні за окремими сортами та роками досліджень, що можна пояснити індивідуальною реакцією генотипу на дози азоту, взаємодією факторів генотип, умови року та дози азоту між собою та впливом інших ознак та чинників (вилягання, ураження збудниками хвороб та ін.), що мають вплив на врожайність. Наприклад, в умовах достатнього зволоження 2025 р. сорти ХАД 45, ХАД 650, Раритет та Тимофій формували вищу врожайність за нижчих доз добрив: N60 та N90, а сорти Олександр та Леонтій – у варіанті без добрив.

Про суттєву різницю за реакцією на внесення добрив у сортів тритикале озимого повідомляється у дослідженнях, проведених в інших агрокліматичних умовах та на сортах різного походження (Lalević et al., 2022; Neykov et al., 2024).

Результати трифакторного дисперсійного аналізу показали, що всі три досліджувані

unlike 'KhAD 650' and 'Zlatoust', 'Tymofii' showed a more pronounced response to fertilizers as year conditions improved. Under the most arid conditions of 2024, the cultivar showed a negligible positive response to nitrogen application, with a yield increase of 0.45 t/ha observed only in the N120 experiment. Under the less arid conditions of 2023, nitrogen fertilizers increased the yield in the experiments N90– N240 by 0.33–1.09 t/ha. In the favorable 2025, the yield was increased by 0.23–1.17 t/ha in all experiments with nitrogen fertilization.

'Yelan' (cultivar with alternate growth habit) had an increased mean yield (5.24 t/ha) across the years and experiments. The maximum realization of yield potential (7.54 t/ha) was observed under favorable conditions with N240. Overall, 'Yelan' responded well to nitrogen application. Nitrogen-attributed gain in the yield was observed in both dry and favorable years, except for some experiments. Higher yields were harvested with N120 and N180, where the mean yield across the years exceeded the control (without fertilizers) by 0.90 and 0.93 t/ha, respectively. Given the negligible difference between these values, N120 can be considered the optimal dose.

On average, across all cultivars and study years, a gradual increase in yield was observed as the nitrogen dose increased—from 4.72 t/ha in the control (without fertilizers) to 5.30 t/ha in the N120 experiment, followed by a decrease at N240 to 5.13 t/ha. However, this pattern is not universal and varies between cultivars and years. This can be explained by the genotype's individual response to nitrogen fertilization, interaction between factors (genotype, year conditions, and nitrogen doses), and the influence of other traits and factors (lodging, diseases, etc.) that affect yield. For example, under the sufficient wetting in 2025, 'KhAD 45', 'KhAD 650', 'Rarytet', and 'Tymofii' gave higher yields at lower fertilizer doses (N60 and N90), while 'Oleksandr' and 'Leontii' performed best in the control.

Significant inter-cultivar differences in response to fertilization were reported for winter triticale in studies conducted under other agro-climatic conditions and on cultivars of different origins (Lalević et al., 2022; Neykov et al., 2024).

The three-factor analysis of variance (ANOVA) showed that all three studied factors,

фактори, а також їх взаємодія мають істотний вплив на мінливість урожайності (табл.2).

as well as their interactions, made significant contributions to yield variability (Table 2).

Таблиця 2. Дисперсійний аналіз урожайності сортів тритикале озимого, 2023–2025 рр.

Table 2. ANOVA of winter triticale cultivars yield, 2023–2025.

Дисперсія / Variance	Сума квадратів / Sum of squares	Ступінь свободи, n-1 / Degree of freedom n-1	Середній квадрат, s^2 / Mean square s^2	$F_{факт.} / F_{obs.}$	F_{05} / F_{05}	HP ₀₅ т/га / LSD ₀₅ t/ha
Загальна C_y / Total C_y	1039.54	647	–	–	–	–
Повторень C_p / Replications C_p	0.29	2	–	–	–	–
Сорту C_a / Cultivar C_a	115.14	11	10.47	116.31	1.92	0.08
Року C_b / Year C_b	658.22	2	329.11	3656.79	3.09	0.04
Добрив C_c / Fertilization C_c	25.94	5	5.19	57.64	2.30	0.05
Взаємодії C_{ab} / Interaction C_{ab}	85.46	22	3.88	43.16	1.63	0.13
Взаємодії C_{ac} / Interaction C_{ac}	41.17	55	0.75	8.32	1.48	0.19
Взаємодії C_{bc} / Interaction C_{bc}	9.17	10	0.92	10.19	1.92	0.09
Взаємодії C_{abc} / Interaction C_{abc}	86.63	110	0.79	8.75	1.39	0.32
Залишку C_z / Residual C_z	17.51	427	0.04	–	–	–

Найбільший вплив мали умови року (63 %), генотип (11 %). Ефекти впливу взаємодії факторів були більшими ніж взаємодія генотип/умови року та взаємодія усіх трьох факторів (8 %) (рис. 2).

Переважаючий вплив умов середовища на формування врожайності підтверджується і багатьма іншими дослідженнями, проведеними в різних країнах світу. В Інституті генетичних ресурсів рослин «Костянтин Малков» (Садово, Болгарія) при вивченні восьми сортів тритикале озимого вплив фактору середовища становив близько 70%, вплив фактору генотип 10%, а взаємодії цих факторів 18% (Neykov et al., 2024). В посушливих умовах з еродованими ґрунтами високогір'я Південної Ефіопії вплив фактора умов року на мінливість урожайності п'яти сортів тритикале складав 64,6 %, а вплив фактора генотип та взаємодії факторів генотип/середовище відповідно 13,2 % та 11,7 % (Tariku et al., 2024). В п'ятирічних дослідженнях адаптивності 12 сортів тритикале озимого у 58 локаціях, які охоплюють усі природно-кліматичні зони Польщі, вплив факторів середовища на мінливість урожайності становив 73% (Derejko et al., 2020).

The greatest contributions were made by year conditions (63%) and genotype (11%). The contributions of factor interactions were significant, with the genotype-environment interaction and the genotype-environment-fertilization interaction each contributing 8% to the total variance (Fig. 2).

The predominant influence of environmental conditions on yield is confirmed by many other studies conducted worldwide. At the Institute of Plant Genetic Resources "Konstantin Malkov" (Sadovo, Bulgaria), a study of eight winter triticale cultivars showed that the environmental factor accounted for approximately 70%, the genotype factor – for 10%, and the interaction of these factors – for 18% (Neykov et al., 2024). Under the arid conditions and on eroded soils of the Southern Ethiopian highlands, the contribution of the year factor to the yield variability of five triticale cultivars was 64.6%, while the contributions of the genotype and genotype-environment interaction was 13.2% and 11.7%, respectively (Tariku et al., 2024). In a five-year study on the adaptability of 12 winter triticale cultivars across 58 locations covering all agro-climatic zones of Poland, the contribution of the

environment factor to yield variability was 73% (Derejko et al., 2020).

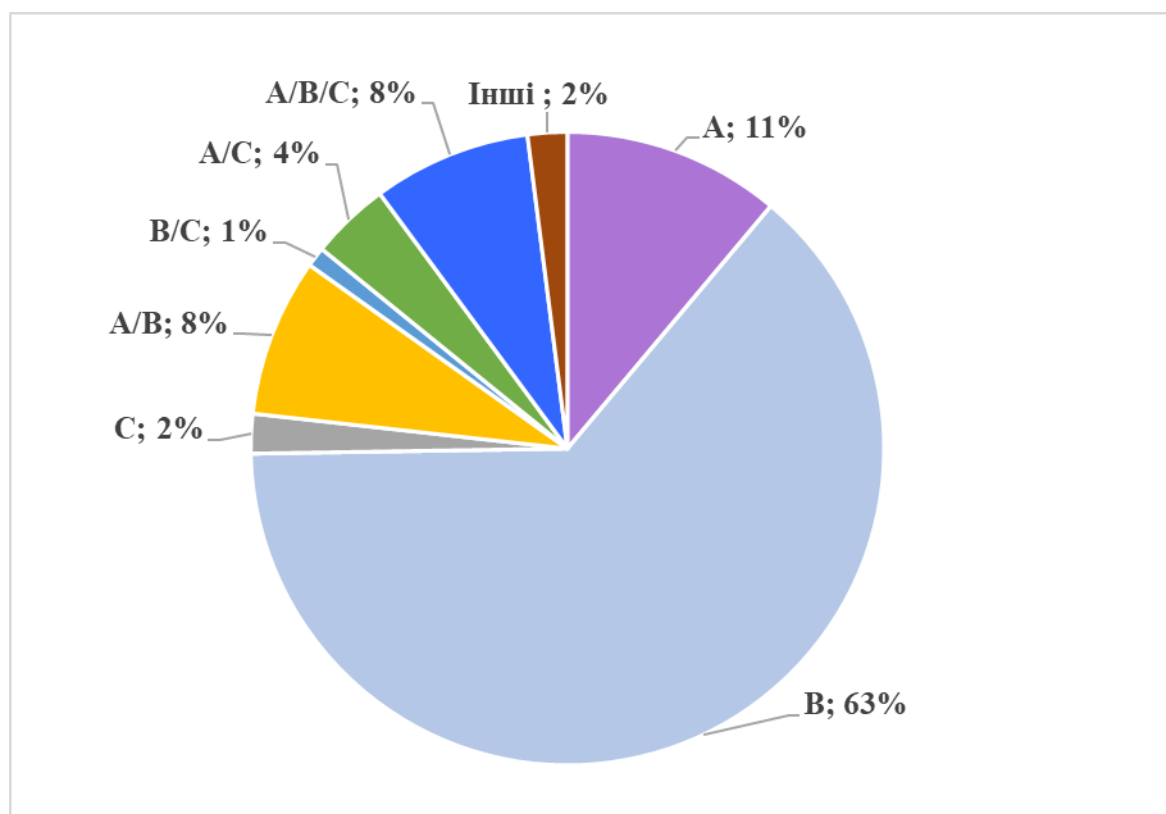


Рис. 2. Частка впливу факторів на мінливість урожайності зерна озимого тритикале, де А – фактор генотип, В – фактор умови року, С – фактор доза азоту, А/В - взаємодія генотип/умови року, В/С - взаємодія умови року/доза азоту, А/С - взаємодія генотип/доза азоту, А/В/С – взаємодія всіх факторів.

Fig. 2. Contributions of the factors to the winter triticale yield variability, where: A – genotype factor; B – year factor; C – fertilization factor; A/B – genotype-year interaction; B/C – year-fertilization interaction; A/C – genotype-fertilization interaction; A/B/C – interaction of all factors.

В умовах Лісостепу України при оцінці впливу факторів генотип та умови року на врожайність 40 селекційних ліній тритикале озимого (МІП ім. Ремесла) високий вплив мала взаємодія факторів генотип/середовище – 39,3 %, а також фактор середовища – 35,4 %. Вплив фактора генотип становив 13,8% (Voloshchuk, Kharchenko, 2017). Враховуючи значний вплив умов вирощування на формування врожайності, вирощування сортів з високою адаптивністю може значно зменшити ризики недобору врожаїв, спричинених несприятливими умовами під час вегетації.

Загальна адаптивна здатність генотипу (ЗАЗ) характеризує середнє значення ознаки в різних умовах середовища. Вищі ефекти ЗАЗ мали сорти ХАД 650 (0,73), Златоуст (0,65) та Тимофій (0,39) (табл. 3).

In the Ukrainian Forest-Steppe, where the impacts of genotype and year conditions on the yield of 40 breeding lines of winter triticale (V.M. Remeslo Myronivka Institute of Wheat) were assessed, a great contribution was made by genotype-environment interaction (39.3%) and environment (35.4%). The contribution of the genotype factor was 13.8% (Voloshchuk, Kharchenko, 2017). Given the significant influence of growing conditions on yield, cultivating highly adaptable cultivars can substantially reduce the risks of yield losses caused by unfavorable conditions during the growing season.

General adaptability (GA) characterizes the mean value of a trait across different environments. Higher GA effects were detected in 'KhAD 650' (0.73), 'Zlatoust' (0.65), and 'Tymofii' (0.39) (Table 3).

Таблиця 3. Адаптивність та селекційна цінність сортів тритикале озимого, 2023–2025 рр.
Table 3. Adaptability and breeding value of the winter triticale cultivars, 2023–2025.

Сорт / Cultivar	Урожайність, т/га / Yield, t/ha	Адаптивна здатність / Adaptability		Відносна стабільність, Sgi, % / Sgi, %	Коефіцієнт регресії, bi	Селекційна цінність генотипу (СЦГ) / BVG
	min-max	загальна (ЗАЗ) / GA	специфічна (САЗ) / SA			
ХАД 45 / KhAD 45	3.18 – 4.86	-0.85	0.47	11.14	0.34	3.81
Ратне / Ratne	3.74 – 7.26	-0.14	3.43	69.81	0.79	2.00
Букет / Buket	3.18 – 7.42	-0.01	4.83	95.74	0.97	0.94
Леонтій / Leontii	3.30 – 6.77	-0.24	3.79	78.51	0.94	1.60
Раритет / Rarytet	3.32 – 7.16	0.01	5.43	106.98	1.27	0.46
ХАД 650 / KhAD 650	3.63 – 7.50	0.73	4.26	73.64	1.00	2.16
Адам / Adam	3.00 – 7.10	-0.15	6.05	123.13	1.34	-0.23
Олександр / Oleksandr	3.16 – 6.96	-0.39	4.24	90.89	0.96	1.06
Єлань / Yelan	3.46 – 7.54	0.18	4.90	93.51	1.19	1.07
Златоуст / Zlatoust	3.47 – 8.46	0.65	6.30	110.45	1.47	2.35
Трифон / Tryfon	3.34 – 6.44	-0.18	2.98	61.10	0.66	2.34
Тимофій / Tymofii	3.72 – 7.20	0.39	4.58	84.10	1.09	1.55

Вказані сорти мали вищу врожайність в середньому у досліді. Вони мають високий потенціал урожайності, добрий відгук на внесення азотних добрив та сприятливі погодні умови. При цьому, наведені сорти мали середні та високі показники специфічної адаптивної здатності, що свідчить про нестабільний прояв високої врожайності в різних варіантах досліді. За показником відносної стабільності генотипу кращими були сорти ХАД 650 (73,64 %) та Тимофій (84,10 %). Більш стабільними за формуванням урожайності в різних умовах вирощування та азотного живлення за показником САЗ були сорти ХАД 45 (0,47), Трифон (2,98), Ратне (3,43) та Леонтій (3,79). Стабільність цих сортів підтверджується також і нижчими значеннями показника відносної стабільності генотипу, який характеризує здатність генотипу в результаті регуляторних механізмів підтримувати певний фенотип в різних умовах середовища.

Коефіцієнт лінійної регресії (bi) вказує на реакцію сортів на зміну умов вирощування, тобто характеризує екологічну пластичність генотипів. Чим вище значення коефіцієнту (bi > 1), тим більшим відгуком на покращення умов характеризується даний сорт. Такі сорти

The aforementioned cultivars gave the highest mean yields in the experiments. They possess high yield potentials and respond well to nitrogen fertilization and favorable weather. At the same time, these cultivars showed medium to high SA values, indicating their high yields were unstable across different experiments. According to the genotype's relative stability, the best cultivars were 'KhAD 650' (73.64%) and 'Tymofii' (84.10%). Based on SA, 'KhAD 45' (0.47), 'Tryfon' (2.98), 'Ratne' (3.43), and 'Leontii' (3.79) were more stable cultivars in terms of yield across different growing conditions and nitrogen fertilization levels. The stability of these cultivars is also confirmed by lower values of relative stability, which characterizes the ability of a genotype to maintain a certain phenotype in different environments through regulatory mechanisms.

The linear regression coefficient (bi) measures the cultivars' responses to changes in growing conditions, thereby characterizing the environmental plasticity of genotypes. The higher the coefficient is (bi > 1), the stronger the response to improved conditions is. Such cultivars are demanding regarding

вибагливі до умов середовища, тільки за наявності таких умов вони максимально реалізують свій потенціал. У випадку ($b_i < 1$) сорт реагує слабше на зміну умов, ніж в середньому весь набір досліджуваних генотипів. Такі сорти краще використовувати на екстенсивному фоні, де вони забезпечать максимум віддачі при мінімумі витрат. Якщо $b_i = 1$ відбувається повна відповідність зміни урожайності сорту до зміни умов середовища. Найбільш пластичними були сорти Златоуст (1,47), Адам (1,34) та Раритет (1,27). Ці сорти мають високий потенціал урожайності та здатні максимально реалізувати його у сприятливих умовах. Доцільним є вирощування цих сортів в умовах інтенсивного землеробства та більш стабільних за агрокліматичними умовами зонах.

Селекційна цінність генотипу (СЦГ) характеризує поєднання стабільності, пластичності та врожайності генотипу. Висока СЦГ свідчить про відносно високі рівні параметрів адаптивності та оптимальне їх поєднання з підвищеною урожайністю. Найвищий рівень СЦГ серед досліджуваних сортів мав ХАД 45 (3,81). Хоча цей сорт проявляв середній рівень урожайності, від був максимально стабільним за роками досліджень та за різних доз внесення азоту. Тому сорт ХАД 45 економічно доцільно вирощувати у несприятливих умовах та низькому агрофоні, наприклад, у зонах, непридатних для вирощування пшениці. Високу СЦГ також мав сорт Златоуст (2,35), що зумовлено високою ЗАЗ, пластичністю та потенціалом урожайності. Сорт Трифон виявив високу СЦГ (2,34), яка зумовлена підвищеною середньою врожайністю за різних умов вирощування та високою її стабільністю. Також за підвищеним показником СЦГ виділено сорт ХАД 650 (2,16), що зумовлюється найвищим у досліді показником ЗАЗ та відносною стабільністю генотипу. Ці сорти мають високий потенціал урожайності, який виявляють за сприятливих умов і мають здатність протистояти несприятливим умовам року.

Висновки.

Визначено рівень урожайності зерна, її стабільність та адаптивність 12 сортів тритикале озимого за різних умов навколишнього середовища та доз азотного живлення.

За результатами дисперсійного аналізу встановлено, що на мінливість урожайності мали істотний вплив усі досліджувані фактори:

environmental conditions; they fully realize their potential only under favorable conditions. In the case of $b_i < 1$, the cultivar responds more weakly to changing conditions than the average of the entire sample of studied genotypes. It is better to grow such cultivars by extensive technologies, where they will provide maximum return with minimum costs. If $b_i = 1$, the change in the cultivar's yield fully corresponds to the change in environmental conditions. The most plastic cultivars were 'Zlatoust' (1.47), 'Adam' (1.34), and 'Rarytet' (1.27). These cultivars have high yield potentials and are capable of maximizing it under favorable conditions. It is advisable to grow these cultivars using intensive farming techniques and in zones with more stable agro-climatic conditions.

The breeding value of the genotype (BVG) characterizes the combination of stability, plasticity, and yield of a genotype. A high BVG indicates relatively high adaptability and its optimal combination with increased yield. The highest BVG among the studied cultivars was recorded for 'KhAD 45' (3.81). Although this cultivar gave a medium level, it was maximally stable across the study years and different nitrogen doses. Therefore, it is economically viable to grow 'KhAD 45' under unfavorable conditions, using low-input agronomic measures—for example, in zones unsuitable for wheat cultivation. 'Zlatoust' also showed a high BVG (2.35) due to its high GA, plasticity, and yield potential. 'Tryfon' exhibited a high BVG (2.34), resulting from a consistently increased mean yield under various growing conditions. Additionally, 'KhAD 650' stood out because of its increased BVG (2.16), which is driven by the highest GA in the experiments and the relative stability. These cultivars have high yield potentials, which they realize under favorable conditions, while also possessing the ability to withstand adverse conditions.

Conclusions.

The grain yields, stability, and adaptability of 12 winter triticale cultivars were determined under varying environmental conditions and nitrogen fertilizer doses.

According to the ANOVA results, all studied factors — genotype, environment, nitrogen fertilization, and their interactions —

генотип, умови навколишнього середовища, доза азоту, а також взаємодія цих факторів. Найбільший вплив мали умови середовища (63 %) та генотип (11 %), взаємодія генотип/середовище та взаємодія усіх трьох факторів (8 %).

Сорти ХАД 650, Златоуст та Тимофій мають високу загальну адаптивну здатність. Вони формували вищу врожайність у середньому у досліді (відповідно 5,79 т/га, 5,71 т/га та 5,45 т/га). Найбільш стабільними за формуванням урожайності в різних умовах вирощування та азотного живлення за варіансою специфічної адаптивної здатності та відносною стабільністю генотипу були сорти ХАД 45, Трифон, Ратне та Леонтій. Найбільш пластичними за показником коефіцієнту регресії були сорти Златоуст, Адам та Раритет. Ці сорти мають високий потенціал урожайності та здатні максимально реалізувати його у сприятливих умовах. За поєднанням стабільності, пластичності та врожайності найвищі показники селекційної цінності генотипу мали сорти ХАД 45, Златоуст, Трифон та ХАД 650. Ці сорти мають високий потенціал урожайності, який проявляють за сприятливих умов і мають здатність протистояти несприятливим умовам року, тому здатні забезпечувати високу стабільність формування врожаю за різних умов вирощування.

Заява про доступність даних: Дані включені безпосередньо в статтю.

Використання штучного інтелекту (ШІ): При підготовці і написанні статті штучний інтелект не використовувався.

Конфлікт інтересів: Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування: Робота виконувалася в рамках завдання 13.00.04.01.Ф «Дослідження основи біохімічного та молекулярно-генетичного поліморфізму тритикале при створенні сортів різного типу розвитку з високими адаптивними, урожайними, хлібопекарськими і кормовими властивостями».

significantly influenced yield variability. The most substantial contributions were made by environment (63%) and genotype (11%), followed by genotype-environment interaction and the interaction of all three factors (8% each).

'KhAD 650', 'Zlatoust', and 'Tymofii' exhibited high general adaptability. They produced the highest mean yields across the experiments (5.79 t/ha, 5.71 t/ha, and 5.45 t/ha, respectively). Based on the SA variance and the relative stability, the most stable cultivars in terms of yielding across different environments and various nitrogen doses were 'KhAD 45', 'Tryfon', 'Ratne', and 'Leontii'. According to the regression coefficient, 'Zlatoust', 'Adam', and 'Rarytet' were identified as the most plastic cultivars. These cultivars possess high yield potentials and the ability to maximize it under favorable conditions. Considering the combination of stability, plasticity, and yield, the highest BVG was recorded for 'KhAD 45', 'Zlatoust', 'Tryfon', and 'KhAD 650'. These cultivars are noticeable for high yield potentials, which they maximize under favorable conditions, and the ability to withstand adverse environmental factors, ensuring high yield stability across diverse growing systems.

Data Availability Statement: Data included directly in the article.

Use of Artificial Intelligence (AI): Artificial intelligence was not used in the preparation and writing of this article.

Conflict of Interest: Author declare state that no conflicts exist.

Funding: The work was carried out within the framework of task 13.00.04.01.F "Research into the basis of biochemical and molecular genetic polymorphism of triticale in the creation of varieties of different types of development with high adaptive, yield, baking and fodder properties".

References

- Bazalii, V. V. (2007). Assessment of cultivars' adaptability by GA-SA-RSG. *Visnyk Ahrarnoi Nauky*, 7, 49–52. [in Ukrainian]
- Bereziuk, S. V., & Zubar, I. V. (2019). Current economic and environmental aspects of fertilizer application in crop production. *Ekonomika APK*, (10), 34–43. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.201910034> [in Ukrainian]
- Bilitiuk, A. P., Novytska, N. V., & Maksymiuk, V. P. (2012). Winter triticale yield and grain quality depending on fertilization in the Western Polissia. *Visnyk Poltavskoi Derzhavnoi Ahrarnoi Akademii*, (3), 24–27. [in Ukrainian]

- Derejko, A., Studnicki, M., Wójcik-Gront, E., & Gacek, E. (2020). Adaptive grain yield patterns of triticale (*× Triticosecale* Wittmack) cultivars in six regions of Poland. *Agronomy*, 10(3), Article 415. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030415>
- Drobitko, A. V., & Kachanova, T. V. (2023). Improvement of the elements of resource-saving technology of triticale cultivation for use as grain fodder and green fodder under unstable wetting in the Southern Steppe of Ukraine. In *Food security of Ukraine in the context of war and post-war reconstruction: Global and national dimensions: Proceedings of the international scientific and practical conference* (pp. 51–54). Mykolaiv: MNAU. [in Ukrainian]
- Korniichuk, O. V., & Melnychuk, V. Yu. (2023). Influence of mineral fertilizers and technological factors on the growth and yield of winter triticale varieties. *Kormy i Kormovyrobnytstvo*, 95, 117–127. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202395-10> [in Ukrainian]
- Kostenko, O. I., Voloshyn, V. M., Shapoval, A. V., Lutak, I. A., Mazur, V. O., Bespala, N. O., & Topchii, Yu. V. (2012). *Scientific and practical guidelines on the technology of growing winter rye and triticale seeds with biologization elements in the Forest-Steppe of Ukraine*. TOV «TVORY». [in Ukrainian]
- Kyrychenko, V. V., Shchypak, H. V., Kobyzieva, L. N., & Sviatchenko, S. I. (2022). Modern breeding of high-yielding triticale varieties with improved grain quality. *Visnyk Ahrarnoi Nauky*, 3(828), 52–61. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202203-07> [in Ukrainian]
- Lalević, D., Miladinović, B., Biberdžić, M., Vuković, A., & Milenković, L. (2022). Differences in grain yield and grain quality traits of winter triticale depending on the variety, fertilizer and weather conditions. *Applied Ecology and Environmental Research*, 20(5), 3779–3792. https://doi.org/10.15666/aecer/2005_37793792
- Liubych, V. V., & Ostapchuk, V. V. (2025). Winter triticale performance at different doses of nitrogen fertilizers, foliar feeding, and sonication. *Zbirnyk Naukovykh Prats Umanskooho Natsionalnoho Universytetu Sadivnytstva*, 106(1), 10–18. <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2025-106-1-10-18> [in Ukrainian]
- Muhova, A., & Kirchev, H. (2020). Agronomic performance of triticale varieties (*× Triticosecale* Wittm.) grown under fertilization with organic manure from red Californian worms (*Lumbricus rubellus*). *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 53(1), 428–436.
- Neykov, N. (2024). Evaluation of the stability and adaptability of yield in triticale varieties using non-parametric methods. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 30(2), 301–304.
- Ostapchuk, V. V., & Liubych, V. V. (2025). Winter triticale yield depending on nitrogen fertilization in the Right-Bank Forest-Steppe. *Tavriiskyi Naukovyi Visnyk*, 143(2), 21–25. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.2.3> [in Ukrainian]
- Riabchun, V. K., Kapustina, T. B., & Melnyk, V. S. (2012). Methods of creating source material for spring triticale adapted to unfavorable growing conditions. *Seleksiia i Nasinnytstvo*, 102, 41–50. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2012.59819> [in Ukrainian]
- Riabchun, V. K., Melnyk, V. S., Kapustina, T. B., Chernobai, S. V., & Shchechenko, O. Ye. (2017). Adaptive features of spring triticale varieties in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine. *Ahrobiolohiia*, 1, 56–60. [in Ukrainian]
- Rozhkov, A. O., Puzik, V. K., Kalenska, S. M., Puzik, L. M., Popov, S. I., Muzafarov, N. M., Bukhalo, V. Ya., & Kryshchop, Ye. A. (2016). *Experimentation in agronomy: Guidebook* (Book 2: Statistical processing of data in agronomic research). Maidan. [in Ukrainian]
- Shchypak, H. V. (2021). *Theoretical foundations of selection of hexaploid triticale for adaptability, productivity and quality* (Extended abstract of Doctoral dissertation). Yuriev Institute of Plant Production NAAS. [in Ukrainian]
- Tariku, S. D., Selamawit, M. T., & Melese, L. T. (2024). Stability and adaptability of triticale (*Triticosecale* Wittm. ex *A. Camus*) varieties across environmental conditions in the highlands of Southern Ethiopia. *International Journal of Agronomy*, 2024, Article 9948844. <https://doi.org/10.1155/2024/9948844>
- Vashchenko, V. V., Viniukov, O. O., & Bondareva, O. B. (2025). An improved method of winter bread wheat breeding under insufficient wetting. In *Global perspectives on multidisciplinary research: Theory and practice: Proceedings of the II international scientific and theoretical conference* (pp. 59–64). <https://doi.org/10.36074/scientia-24.10.2025> [in Ukrainian]
- Voloshchuk, S. I., & Kharchenko, M. V. (2017). Environmental assessment of promising winter triticale lines. *Myronivskiy Visnyk*, 5, 126–151. <https://doi.org/10.31073/mvis201705-11> [in Ukrainian]
- Wolski, T., & Tymieniecka, E. (1983). The first Polish triticale variety. *Cereal Research Communications*, 11(2), 139–141. <http://www.jstor.org/stable/23781480>
- Yakymchuk, R. A., Shchipak, G. V., Shchipak, V. G., Matviets, V. G., Matviets, N. M., & Woś, H. (2022). Breeding triticale with high productivity and improved grain quality. *Science and Innovation*, 18(6), 113–126. <https://doi.org/10.15407/scine18.06.113> [in Ukrainian]