

УДК 633.11+633.14:631.527

В.С. Мельник, С.В. Чернобай\*, В.К. Рябчун

## Виділення джерел високої твердості зерна тритикале

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

*E-mail: chernobai257@gmail.com*

UDC 633.11+633.14:631.527

V.S. Melnyk, S.V. Chernobai\*, V.K. Riabchun

## Selection of Triticale Sources of High Kernel Hardness

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

*E-mail: chernobai257@gmail.com*

**Реферат:** Мета роботи — встановити диференціацію комплексно-цінних зразків тритикале за рівнем твердозерності серед селекційного матеріалу Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва; оцінити рівень мінливості за роками досліджень та вирівняності зразків тритикале за ознакою твердозерності; виділити генотипи з підвищеною твердістю зерна як вихідного матеріалу для продовольчого напрямку селекції тритикале. Дослідження проводили у східній частині Лісостепу України. Визначали твердість зерна 46 комплексно цінних ліній тритикале ярого у 2021 та 2023 рр., а також 330 ліній тритикале ярого та 220 ліній тритикале озимого у 2023 р. Рівень твердості зерна визначали на твердомірі прямої дії YPD-300D. Визначення суттєвості та вірогідності різниць, а також впливу факторів проводили з використанням багатофакторного та однофакторного дисперсійного аналізу. Роки досліджень значно різнилися за погодними умовами, що дозволило об'єктивно оцінити вплив умов на прояв твердозерності. У середньому за два роки досліджень рівень твердозерності у 46 зразків ярого тритикале варіював від 110 до 183 Н, що відповідає групам м'якозерні, середньом'якозерні та напівтвердозерні. Більшість зразків тритикале ярого за рівнем твердості зерна належало до групи м'якозерні та середньом'якозерні, Але в окремі роки виділялись дуже м'якозерні та твердозерні зразки. Найбільшу частку внеску у загальну мінливість ознаки мав фактор генотип та умови середовища – 29,9 та 18,6 % відповідно. Значно менший, але вірогідно істотний вплив мала взаємодія факторів генотип-середовище – 8,1 %. Виявлено значну диференціацію зразків за вирівняністю величин твердозерності в межах зразка. Коефіцієнт варіації в межах одного зразка становив 3–50 %. Виділено зразки з високим ( $V \leq 10\%$ ), середнім ( $V = 10\text{--}20\%$ ) та низьким ( $V \geq 20\%$ ) ступенем однорідності за ознакою твердості зерна. Найбільшу цінність як джерела певного рівня твердості зерна становлять зразки, стабільні за роками та однорідні за цією ознакою. Виявлено більш стабільні зразки за трьома групами твердості зерна: м'якозерні – ЯТХ 102-23 ( $V = 4\%$ ), ЯТХ 18-23 ( $V = 6\%$ ), ЯТХ 40-23 ( $V = 7\%$ ), середньом'якозерні – ЯТХ 132-23 ( $V = 3\%$ ), ЯТХ 11-23 ( $V = 7\%$ ), ЯТХ 15-23 ( $V = 10\%$ ) та напівтвердозерні – ЯТХ 108-23 ( $V = 10\%$ ), ЯТХ 99-23 ( $V = 13\%$ ). Виділено зразки з підвищеним рівнем твердості зерна та більш стабільним рівнями її прояву, які можуть бути використані в селекції як джерела цієї ознаки. Також зразки зі стабільним проявом твердозерності можуть використовуватись як еталони в межах різних груп твердості. Для пошуку нових генотипів з високим потенціалом твердого зерна у 2023 р. було додатково досліджено рівень твердості зерна на значно ширшому наборі генотипів: 330 ярих та 220 зразків озимих тритикале. Розподіл зразків за групами твердості був подібним серед ярих та озимих форм. Більшу частку складають м'якозерні та середньом'якозерні генотипи (78–80 %). Частка твердозерних зразків становила 3 %, як у ярих так і у озимих форм. У 2023 р., сприятливого для формування високої твердості, найвищу твердозерність серед ярих зразків мали ЯТХ 456-23 (247 Н), ЯТХ 139-23 (208 Н), ЯТХ 437-23 (207 Н) та ЯТХ 565-23 (206 Н) та ЯТХ 382-23 (201 Н), а серед озимих – ТХЗ 883-23 (247 Н), ТХЗ 487-23 (212 Н), ТХЗ 406-23 (207 Н), ТХЗ 736-23 (205 Н) та ТХЗ 178-23 (202 Н), що відповідає рівню еталонів пшениці твердої або перевищує їх. Усі зразки групи твердозерні показали високу або середню однорідність в межах генотипу (коефіцієнт варіації  $V = 5\text{--}20\%$ ). Виділені зразки, зважаючи на досить високі рівні твердості зерна та вирівняність за цією ознакою, становлять значну селекційну цінність, але потребують подальших досліджень щодо стабільності прояву ознаки за різних умов середовища.

**Ключові слова:** тритикале, твердозерність, джерело, генотип, стабільність

**Abstract:** Goal of the work - to differentiate comprehensively valuable triticale accessions by kernel hardness in the breeding material of the Yuriev Plant Production Institute; to evaluate the year-to-year variability and uniformity of triticale accessions by the hardness trait; to select genotypes with increased kernel hardness as starting materials for food triticale breeding. The study was conducted in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine. The kernel hardness of 46 comprehensively valuable spring triticale lines was determined in 2021 and 2023; in addition, the kernel hardness of 330 spring triticale lines and 220 winter triticale lines was determined in 2023. The kernel hardness was measured on a YPD-300D direct-acting hardness tester. The significance of differences and contributions of factors were assessed by one-way and multi-way ANOVA. The weather in the study years differed significantly, allowing for objective assessments of the condition effects on hardness. On average for two study years, the hardness of 46 spring triticale accessions varied from 110 N to 183 N, meaning that there were soft, medium-soft, and semi-hard accessions in the sample. Most spring triticale accessions had soft or medium-soft kernels; however, very soft- and hard-kernelled accessions were detected in some years. The genotype and environmental conditions were the factors that made the greatest contributions to the total variability of the trait - 29.9 and 18.6%, respectively. The genotype-environment interaction exerted a much weaker but statistically significant effect of 8.1%. The accessions differed significantly in intra-accession hardness uniformity. The coefficient of intra-accession variation was 3–50%. Accessions with a high ( $CV \leq 10\%$ ), medium ( $CV = 10\text{--}20\%$ ), and low ( $CV \geq 20\%$ ) uniformity of kernel hardness were selected. The most stable and uniform across the years accessions are most valuable as sources of certain levels of kernel hardness. The most stable accessions were identified in three groups of kernel hardness: soft - YaTKh 102-23 ( $CV = 4\%$ ), YaTKh 18-23 ( $CV = 6\%$ ), and YaTKh 40-23 ( $CV = 7\%$ ); medium-soft – YaTKh 132-23 ( $CV = 3\%$ ), YaTKh 11-23 ( $CV = 7\%$ ), and YaTKh 15-23 ( $V = 10\%$ ); semi-hard – YaTKh 108-23 ( $CV = 10\%$ ) and YaTKh 99- 23 ( $CV = 13\%$ ). Accessions with increased and more stable hardness of kernels were selected; they can be used in breeding as sources of this trait. In addition, accessions with stable hardness can be used as references within different hardness groups. To find new genotypes with high potentials of kernel hardness, kernel hardness was additionally evaluated in a much bigger sample of genotypes in 2023: 330 spring and 220 winter triticale accessions. The distribution of the accessions by hardness groups was similar for spring and winter forms. Soft- and medium-soft-kernelled genotypes accounted for a larger share (78–80%). The share of hard-kernelled accessions was 3%, both among the spring and winter forms. In 2023, which was a favorable year for high hardness, the highest kernel hardness was recorded for the following spring accessions: YaTKh 456-23 (247 N), YaTKh 139-23 (208 N), YaTKh 437-23 (207 N), YaTKh 565-23 (206 N), and YaTKh 382-23 (201 N). As to winter triticale, the highest kernel hardness was recorded for TKhZ 883-23 (247 N), TKhZ 487-23 (212 N), TKhZ 406-23 (207 N), TKhZ 736-23 (205 N), and TKhZ 178-23 (202 N). These values correspond to durum wheat standards or exceed them. All accessions of the hard group showed high or medium intra-accession uniformity (coefficient of variation  $CV = 5\text{--}20\%$ ). The selected accessions, considering rather high and uniform hardness of kernels, are of considerable breeding value but require further evaluations of the stability of this characteristic under different environmental conditions.

**Key words:** triticale, hardness, source, genotype, stability

## Вступ

Тритикале – амфідиплоїдний гібрид пшениці та жита, що поєднує адаптивні та господарські властивості обох батьківських видів. Значна цінність тритикале полягає у меншій вибагливості цієї культури до умов вирощування і високій біологічній цінності зерна та зеленої маси. На даний час тритикале виробляється на всіх континентах, придатних до сільськогосподарського виробництва. Світове виробництво тритикале складає 15,3 млн. т. на рік, культура вирощується на площі близько 3,8 млн. га [1]. Основним фактором зростання

## Introduction

Triticale is an amphidiploid hybrid of wheat and rye, which combines the adaptive and economic features of both parental species. Triticale is valued because it is a low-maintenance crop with grain and green mass of high biological value. Currently, triticale is grown on all continents suitable for agricultural production. The annual world production of triticale is 15.3 million tons; the crop is grown on about 3.8 million hectares [1]. The main factors in the triticale production growth are its

обсягів виробництва тритикале є його невибагливість до ґрунтових умов, посухостійкість, високий потенціал урожайності та можливість використання в органічному землеробстві. Це дає змогу вирощувати його в умовах, непридатних для вирощування пшениці [2].

Переважно тритикале використовується як кормова культура – на зернофураж та зелений корм, оскільки має високий вміст білка з оптимально збалансованим амінокислотним складом. Досить перспективним напрямом є продовольче використання тритикале. Завдяки широкому різноманіттю біологічно цінних сполук у зерні тритикале, воно має великий потенціал для виробництва харчових продуктів та напоїв.

Останнім часом розширилось використання тритикале в харчовій промисловості. Хліб з тритикале перевершує пшеничний за поживною цінністю. Завдяки високому вмісту і збалансованості цінних хімічних сполук продукти з тритикале відіграють унікальну роль у дієтичному харчуванні людей з порушенням обміну речовин. Зерно тритикале містить значну кількість фенольних і флавоноїдних сполук, вітамінів, макро- та мікроелементів. Особливу цінність має цілнзернове борошно тритикале [3]. Висівки є багатим джерелом фруктанів, целюлози, геміцелюлози, лігніну,  $\beta$ -глюкану, білка, вітамінів В і Е, мінералів, фенольних сполук та алкілризорцинолів. Ендосперм містить крохмаль, білок, целюлозу, геміцелюлозу, арабіноксилани, вітамін В та залізо. У зародку зосереджені фруктани, лігнін, жири, вітаміни В і Е, мінеральні речовини [4]. Останнім часом було розроблено технології виробництва хліба, печива, макаронних та кондитерських виробів із борошна тритикале [5]. У хлібопекарській промисловості найбільшого поширення здобули технології з використанням сумішей пшеничного та тритикалевого борошна [6, 7].

Текстура зерна головним чином впливає на водопоглинання, вихід борошна і якість помелу, зумовлюючи розмір частинок борошна та частку пошкодженого крохмалю. Відомо, що більшість сортів тритикале мають м'яку текстуру ендосперму, а тісто поступається пшеничному за технологічними та реологічними властивостями. Це обмежує попит на хлібобулочне виробництво із борошна тритикале у чистому вигляді.

Значного підвищення якісних показників

unpretentiousness to soils, drought tolerance, high yield capacity, and suitability for organic farming. Hence, triticale can be grown in locations where wheat growing is impossible [2].

Triticale is mainly used as a fodder crop, for grain fodder and green fodder, as it is rich in protein with an optimally balanced amino acid composition. Food triticale seems quite promising. Due to different biologically valuable compounds in triticale grain, it has a great potential for food and beverage industries.

Recently, the use of triticale in food industry has been expanded. Triticale bread is superior to wheat bread in terms of nutritional value. Due to high and balanced contents of valuable chemical compounds, triticale products play a unique role in diets for people with metabolic disorders. Triticale grain contains significant amounts of phenolic and flavonoid compounds, vitamins, macro- and micronutrients. Whole triticale flour is of particular value [3]. Triticale bran is a rich source of fructans, cellulose, hemicellulose, lignin,  $\beta$ -glucan, protein, vitamins В and Е, minerals, phenolic compounds, and alkyl resorcinols. Triticale endosperm contains starch, protein, cellulose, hemicellulose, arabinoxylans, vitamin В, and iron. Fructans, lignin, fats, vitamins В and Е, and minerals are concentrated in the germ [4]. Recently, technologies for manufacturing bread, cookies, pasta, and confectionery products from triticale flour have been developed [5]. Technologies using wheat - triticale flour mixtures have become the most widespread in baking industry [6, 7].

Grain texture mainly affects water absorption, flour output, and milling quality, determining the size of flour particles and the proportion of damaged starch. It is known that most triticale cultivars have a soft endosperm, and triticale dough is inferior to wheat dough in terms of technological and rheological properties. This limits the demand for bakery products from pure triticale flour.

Triticale quality was significantly improved via creating substituted triticale, in which some chromosomes of the A, B, and R genomes are partially replaced by the corresponding chromosomes of the D genome of bread wheat. This was achieved through direct-

тритикале вдалося досягти шляхом створення заміщених тритикале, у яких хромосоми генів А, В і R частково замінені на хромосоми геному D м'якої пшениці. Це досягається проведенням прямих і зворотних схрещувань між первинними окто- та гексаплоїдами, вторинними тритикале та тритикале з пшеницею. Заміщені тритикале показують значне збільшення показника седиментації, який обумовлює міцність клейковини та покращує якість тіста [8]. Іншою проблемою, яка потребує вирішення, є підвищення твердості зерна.

Відомо, що у пшениці ступінь твердості ендосперму визначається комплексом білків фріабілінів, який складається з білків пуринодолін-а (PINA) та пуринодолін-в (PINB). Наявність цих білків зумовлює м'який ендосперм. Генетичний контроль наявності пуринодолінових білків у м'якої пшениці несуть гени Pina та Pinb, що розташовані в локусі твердості (Ha) на хромосомі 5D. Більшість генотипів м'якої пшениці є м'якозерними, але якщо хоча б один з білків PIN відсутній чи мутований, текстура ендосперму тверда. Подібні гени контролю пуринодоліноподібних білків були ідентифіковані у жита на хромосомі 5R і названі секалоіндоліном (Sina, Sinb). Вважається, що саме вони зумовлюють м'якозерність у більшості генотипів тритикале. [9]. Але інші дослідження показали, що стан генів Sina та Sinb не впливає на зміну твердості зерна тритикале, як це спостерігається у пшениці [10]. Також існує інформація, що наявність у тритикале фріабелінів на гранулах крохмалю не мала істотного зв'язку з твердістю зерна, але впливала на показник седиментації [11].

Переважає більшість заміщених тритикале (AABBDR) мають заміщену 2R хромосому на 2D [12], що значно покращує якість клейковини, але не впливає на твердість зерна. Тому досить актуальним є пошук серед генетичного різноманіття та створення тритикале з твердим ендоспермом. Це необхідна умова для покращення помолу, що сприятиме широкому впровадженню тритикале у хлібопекарську промисловість.

Встановлено, що первинні октоплоїдні тритикале мають м'яку текстуру ендосперму, а серед вторинних та заміщених спостерігається ширший діапазон твердості [13]. Існуюча мінливість тритикале за рівнем твердозерності визначається генотипом сорту, чинниками навколишнього середовища та їх взаємодією

and back-crosses between primary octo- and hexaploids, secondary triticale, and triticale with wheat. Substituted triticale has significantly increased sedimentation indices, which determine gluten strength and mean improved dough quality [8]. Another problem to be solved is increased kernel hardness.

It is known that wheat endosperm hardness is determined by the friabilin protein complex, consisting of puroindoline a (PINA) and puroindoline b (PINB). These proteins make the endosperm soft. In bread wheat, puroindolines are encoded by the Pina and Pinb genes located in the hardness locus (Ha) on chromosome 5D. Most bread wheat genotypes are soft, but if at least one of the PIN proteins is missing or mutated, the endosperm becomes hard. Similar genes for puroindoline-like proteins were identified in rye on chromosome 5R and named secaloindoline (Sina, Sinb). It is believed that they are responsible for soft kernels in most triticale genotypes. [9]. Nevertheless, other studies showed that the Sina and Sinb genes did not affect triticale kernel hardness, unlike similar genes in wheat [10]. There is also information that triticale friabilins on starch granules were not associated with kernel hardness, but influenced the sedimentation index [11].

In the vast majority of substituted triticale (AABBDR), chromosome 2R is replaced by 2D [12], which significantly improves gluten quality but does not affect kernel hardness. Therefore, the search among genetic diversity for and the creation of triticale with hard endosperm are quite relevant. This is a prerequisite for improved milling, which will contribute to the widespread introduction of triticale into bakery industry.

Primary octoploid triticales were revealed to have a soft endosperm, and a wider range of hardness was observed among secondary and substituted ones [13]. The existing variability of triticale kernel hardness is determined by the genotype of a cultivar, environmental factors, and their interaction [14]. The kernel hardness issue was studied in small samples of genotypes, so it requires more detailed research.

Our purpose was to differentiate comprehensively valuable triticale accessions by kernel hardness in the breeding material of the Yuriev Plant Production Institute of NAAS of

[14]. Питання твердості зерна досліджене на малому наборі генотипів, тому потребує більш детального вивчення.

Метою нашої роботи було встановлення диференціації комплексно-цінних зразків тритикале за рівнем твердозерності серед селекційного матеріалу Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України. Також оцінювали рівень мінливості за роками досліджень та вирівняність зразків за ознакою твердозерності для виділення генотипів з підвищеною твердістю зерна як вихідного матеріалу для продовольчого напрямку селекції тритикале.

### Матеріал та умови досліджень

Дослідження проводили у 2021 та 2023 рр. на селекційній базі Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН, яка розташована у східній частині Лісостепу України (Харківська обл., Харківський р-н). Клімат у зоні проведення досліджень помірно-континентальний. Середньорічна температура повітря становить 6°C. Літні місяці характеризуються досить високою температурою повітря: середня багаторічна температура в червні становить 19,1°C, липні 21,0°C, серпні 19,7°C. Ґрунтовий покрив представлений потужним слабо вилугуваним чорноземом на пиловато-суглинистому лесі з товщиною гумусового шару 75 см і більше при вмісті гумусу 5,5–7,3 %; характеризується агрономічно цінною грудково-зернистою структурою, великими запасами доступних поживних речовин. Реакція ґрунтового розчину слабкокисла (рН=5,7–6,0).

Для визначення рівня твердозерності та оцінки мінливості цієї ознаки протягом двох років визначали твердість зерна 46 комплексно цінних ліній тритикале ярого у конкурсному сортовипробуванні. Також для пошуку твердозерних генотипів у 2023 р. було додатково проаналізовано твердість зерна 330 ліній тритикале ярого та 220 ліній тритикале озимого попереднього сортовипробування.

Твердість зерна визначали на твердомірі прямої дії YPD-300D за методикою, яка полягає у вимірюванні максимального зусилля, необхідного для руйнування текстури ендосперму шляхом фізичної дії на окрему зернівку, та визначається у Ньютонах (Н) [15]. Ця методика тісно корелює з іншими методами оцінки твердозерності (за індексом розміру часток помелу, затратами енергії на подрібнення 1 г зерна, даними інфрачервоної спектроскопії

Україне. We also evaluated the year-to-year variability and uniformity of kernel hardness in accessions to select genotypes with increased kernel hardness as starting materials for food triticale breeding.

### Materials and Conditions

The study was carried out at the Breeding Center of the Yuriev Plant Production Institute of NAAS, which is located in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine (Kharkivska Oblast, Kharkivskyi District), in 2021 and 2023. The climate in the study location is temperate-continental. The mean annual air temperature is 6°C. The summer months are characterized by rather high air temperature: the mean long-term temperature is 19.1°C in June, 21.0°C in July, and 19.7°C in August. The soil is thick weakly leached chernozem on dusty loamy loess with a humus layer thickness of  $\geq 75$  cm and a humus content of 5.5–7.3%; it has an agronomically valuable lumpy-granular structure and large reserves of available nutrients. The soil solution reaction is weakly acidic (pH=5.7–6.0).

To determine kernel hardness and assess the variability of this characteristic, the kernel hardness of 46 comprehensively valuable spring triticale lines was determined in a two-year competitive variety trial. In addition, to search for genotypes with hard kernels, the kernel hardness of 330 spring triticale lines and 220 winter triticale lines was additionally analyzed in a preliminary variety trial in 2023.

Kernel hardness was measured on a YPD-300D direct-acting hardness tester. In this method, the maximum physical force required to crush the endosperm of an individual kernel is measured in Newtons (N) [15]. This technique is closely correlated with other methods for kernel hardness assessments (by milled particle size, energy consumption for milling 1 g of grain, infrared spectrometry data, etc.) [16, 17, 18]. Ten kernels were evaluated for each accession. The uniformity of the accessions in terms of kernel hardness was assessed by coefficient of variation for replications within an accession. The accessions were categorized into hardness groups using a scale for bread wheat: hard (> 190 N), semi-hard (162–190 N), medium-soft (133–161

та ін.) [16, 17, 18]. За кожним зразком оцінювали 10 зерен. Вирівняність зразків за ознакою твердозерності оцінювали за коефіцієнтом варіації значень за повтореннями в межах зразка. Розподіл зразків за групами твердозерності проведено за шкалою для пшениці м'якої: твердозерні (> 190 Н), напівтвердозерні (162–190 Н), середньом'якозерні (133–161 Н), м'якозерні (104–132 Н), дуже м'якозерні (<104 Н). Еталони – сорти пшениці м'якої ярої Харківська 30 та озимої Богдана, а також пшениці твердої ярої Харківська 39 та озимої Шулиндінка.

Визначення вірогідності різниць, впливу факторів «генотип», «середовище» та їх взаємодії на прояв ознаки проводили з використанням багатофакторного та однофакторного дисперсійного аналізу [19].

Погодні умови першої половини 2021 р. були сприятливими для росту і розвитку рослин. Запас вологи в ґрунті та достатнє вологозабезпечення під час проростання насіння сприяли рівномірній та своєчасній появі сходів. Важливі етапи розвитку рослин – кущення та колосіння супроводжувались рівномірними опадами з перевищенням середньобагаторічних рівнів. Але період формування та наливу зерна супроводжувався значною посухою та високими температурами повітря, що негативно вплинуло на крупність, виповненість зерна та показники його якості. Умови 2023 р. були більш сприятливими для росту і розвитку тритикале. Період вегетації рослин супроводжувався періодичними нетривалими посухами, але у середньому кількість опадів та температура повітря були близькими до середньобагаторічних рівнів. Це сприяло формуванню крупного зерна та позитивно вплинуло на його якість. Таким чином, роки досліджень значно різнилися за погодними умовами, що дозволило об'єктивно оцінити вплив умов на прояв твердозерності.

### Результати та обговорення

У середньому за два роки досліджень рівень твердозерності у 46 зразків ярого тритикале варіював від 110 до 183 Н, що відповідає групам м'якозерні, середньом'якозерні та напівтвердозерні. Водночас в окремі роки спостерігався рівень прояву від дуже м'якозерних до твердозерних. В умовах 2021 р., який був несприятливим під час наливу зерна, середній рівень твердості був нижчим (від 84 до 163 Н) порівняно з умовами

N), soft (104–132 N), and very soft (<104 N). Spring bread wheat cv's. 'Kharkivska 30', winter bread cv. 'Bohdana', spring pasta wheat cv. 'Kharkivska 39', and winter pasta wheat 'Shulyndinka' were taken as references.

Significance of differences and contributions of the "genotype", "environment" and "genotype-environment interaction" factors to this characteristic were evaluated by one-way and multi-way ANOVA [19].

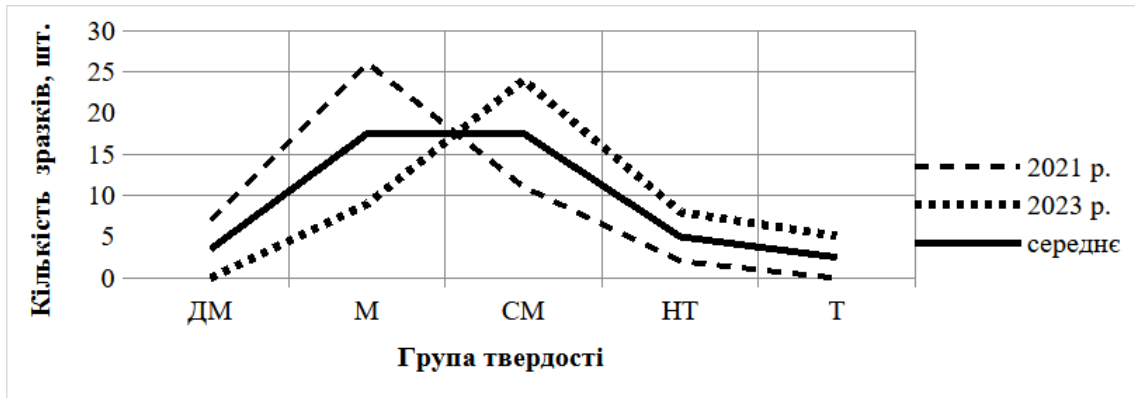
The weather in the first half of 2021 was favorable for plant growth and development. A moisture reserve in the soil and sufficient wetting during seed germination provided uniform and timely emergence of seedlings. The important stages of plant development, tillering and earing, were accompanied by uniform precipitation exceeding the mean long-term values. However, grain setting and filling occurred under a significant drought and at high air temperatures, which negatively affected the grain size, plumpness, and quality. 2023 was more favorable for the growth and development of triticale. The plant vegetation was accompanied by periodic short droughts, but the mean amount of precipitation and air temperature were close to the mean long-term values. This contributed to the formation of large kernels and had a positive effect on grain quality. Thus, the study years differed significantly in terms of weather conditions, which allowed us to objectively assess the impact of conditions on kernel hardness.

### Results and Discussion

On average for the two study years, the kernel hardness in 46 spring triticale accessions varied from 110 N to 183 N, corresponding to the soft, medium-soft, and semi-hard groups. At the same time, in some years, accessions with very soft and hard kernels were detected. In 2021, which had an unfavorable period during grain filling, the mean hardness was lower (from 84 N to 163 N) than in 2023, when the kernel hardness varied from 135 N to 202 N (Fig. 1). In 2023, the highest hardness was recorded for the following accessions: YaTKh 121-23 (214 N), YaTKh 105-23 (203 N), YaTKh 163-23 (202 N), YaTKh 147-23 (201 N), and YaTKh 99-23 (196 N). YaTKh

2023 р., коли твердозерність варіювала від 135 до 202 Н (рис. 1). Найвищий рівень твердості мали зразки ЯТХ 121-23 (214 Н), ЯТХ 105-23 (203 Н), ЯТХ 163-23 (202 Н), ЯТХ 147-23 (201 Н) та ЯТХ 99-23 (196 Н) у 2023 р. Найм'якше зерно мали зразки ЯТХ 121-23 (84 Н), ЯТХ 131-23 (85 Н), ЯТХ 13-23 (94 Н) та ЯТХ 40-23 (100 Н) у 2021 р.

121-23 (84 N), YaTKh 131-23 (85 N), YaTKh 13-23 (94 N), and YaTKh 40-23 (100 N) had the softest kernels in 2021.



**Рис. 1.** Розподіл зразків тритикале ярого за рівнем твердозерності залежно від умов року: дуже м'якозерні (ДМ), м'якозерні (М), середньом'якозерні (СМ), напівтвердозерні (НТ), твердозерні (Т).

**Fig. 1.** Distribution of the spring triticale accessions by kernel hardness depending on the year conditions: very soft (ДМ), soft (М), medium-soft (СМ), semi-hard (НТ), hard (Т). X axis - Hardness group; Y axis - Number of accessions.

Note. Середнє - Mean

Дисперсійний аналіз показав, що найбільший вплив на формування твердозерності мав генотип та умови середовища. Фактор генотип мав найбільшу частку внеску у загальну мінливість ознаки – 29,9 %, умови середовища також мали значний вплив – 18,6 %. Значно менший, але вірогідний вплив мала взаємодія факторів генотип-середовище – 8,1 %. Подібні результати були показані в дослідженнях Kselíková і співавторів на чеських зразках тритикале, де найбільший вплив на мінливість твердості зерна мали умови року та генотип [14].

Більшість зразків тритикале ярого за рівнем твердості зерна належала до групи м'якозерні та середньом'якозерні. Це спостерігалось як у середньому за два роки, так і окремо за роками. У середньому рівень твердозерності у досліджуваних зразків відповідав чотирьом групам твердості: дуже м'якозерні – 1 зразок (2 %), м'якозерні – 18 зразків (39 %), середньом'якозерні – 21 зразок (46 %) та напівтвердозерні – 6 зразків (13 %). Зважаючи на значний вплив умов середовища на формування твердості зерна, досить цінним є виділення зразків, які мають більш

ANOVA showed that the genotype and environmental conditions had the greatest effects on kernel hardness. The "genotype" factor made the largest contribution to the total variability of the characteristics (29.9%); environmental conditions also had a significant effect (18.6%). The "genotype-environment interaction" factor had a much smaller, but still significant effect (8.1%). Similar results were obtained by Kselíková and her co-authors on Czech triticale accessions: the year conditions and genotype had the greatest influence on the variability of kernel hardness [14].

Most spring triticale accessions were in the soft or medium-soft group. This pattern was traced both for the mean value for the two study years and for separate years. On average, the kernel hardness in the studied accessions corresponded to four groups of hardness: very soft - 1 accession (2%), soft - 18 accessions (39%), medium-soft - 21 accessions (46%), and semi-hard - 6 accessions (13 %). Given the significant influence of environmental conditions on kernel hardness, it is quite

стабільний прояв цієї ознаки за роками. Найбільшу цінність як джерела певного рівня твердості зерна становлять зразки, більш стабільні та однорідні за цією ознакою. Було виділено найбільш стабільні зразки за трьома групами твердості зерна: м'якозерні, середньом'якозерні та напівтвердозерні (табл. 1).

important to select accessions with a more stable manifestation of this characteristic over the years. Accessions that are more stable and uniform in this respect are the most valuable sources of certain levels of kernel hardness. The most stable accessions were selected in three hardness groups: soft, medium-soft, and semi-hard (Table 1).

**Таблиця 1.** Зразки ярого тритикале зі стабільним проявом рівня твердозерності  
**Table 1.** Spring triticale accessions with stable hardness of kernels

Назва зразка (Accession)	Твердість, Н (Hardness, N)			Коефіцієнт варіації, V, % (Coefficient of variation, CV, %)	
	2021 р. (2021)	2023 р. (2023)	середня (Mean)	за роками (Year-to-year)	у межах зразка (Intra-accession)
м'якозерні (Soft)					
ЯТХ (YaTKh) 40-23	100	110	105	16	7
ЯТХ (YaTKh) 21-23	102	126	114	16	15
ЯТХ (YaTKh) 124-23	105	144	124	9	22
ЯТХ (YaTKh) 102-23	129	122	126	16	4
ЯТХ (YaTKh) 18-23	132	122	127	17	6
ЯТХ (YaTKh) 46-23	118	138	128	15	11
ЯТХ (YaTKh) 62-23	147	113	130	19	19
середньом'якозерні (Medium-soft)					
ЯТХ (YaTKh) 132-23	141	135	138	15	3
ЯТХ (YaTKh) 16-23	122	158	140	16	18
ЯТХ (YaTKh) 156-23	122	159	141	10	19
ЯТХ (YaTKh) 15-23	132	151	141	15	10
ЯТХ (YaTKh) 105-23	130	153	142	11	11
ЯТХ (YaTKh) 11-23	151	137	144	18	7
ЯТХ (YaTKh) 43-23	134	177	155	15	20
напівтвердозерні (Semi-hard)					
ЯТХ (YaTKh) 108-23	155	178	167	16	10
ЯТХ (YaTKh) 99-23	160	196	178	14	13
ЯТХ (YaTKh) 147-23	147	201	174	17	22
ЯТХ (YaTKh) 135-23	163	202	183	10	15
НІР <sub>05</sub> загальна (LSD <sub>05</sub> total)	–	–	6	–	–
НІР <sub>05</sub> за фактором генотип (LSD <sub>05</sub> for the "genotype" factor)	–	–	14	–	–
НІР <sub>05</sub> за фактором рік (LSD <sub>05</sub> for the "year" factor)	–	–	15	–	–

У 2021 р. розподіл зразків за групами твердості був таким: дуже м'якозерні – 15 %, м'якозерні – 57 %, середньом'якозерні – 24 %, напівтвердозерні – 4 %, твердозерні – не виявлено. У 2023 р., в умовах якого всі зразки мали вищу твердість зерна, розподіл був

In 2021, the distribution of the accessions by hardness groups was as follows: very soft - 15%, soft - 57%, medium-soft - 24%, semi-hard - 4%, hard - not detected. In 2023, all accessions formed harder kernels and the distribution was as follows: very soft - not



наступним: дуже м'якозерні – не виявлено, м'якозерні – 20 %, середньом'якозерні – 52 %, напівтвердозерні – 17 %, твердозерні – 11 %.

Коефіцієнт варіації за роками досліджень варіював від 2 до 36 %. Крім того, метод вимірювання окремих зернівок дозволив оцінити вирівняність ознаки твердість зерна у межах кожного зразка. Виявлено значну диференціацію зразків за вирівняністю рівня твердозерності в межах зразка. Коефіцієнт варіації в межах одного зразка становив 3–50 %. Були виділені зразки з високим ( $V \leq 10\%$ ), середнім ( $V = 10\text{--}20\%$ ) та низьким ( $V \geq 20\%$ ) ступенем однорідності за ознакою твердість зерна.

Серед групи м'якозерних найбільш вирівняними за рівнем твердості зерна були зразки ЯТХ 102-23 ( $V = 4\%$ ), ЯТХ 18-23 ( $V = 6\%$ ) та ЯТХ 40-23 ( $V = 7\%$ ). Усі вони мали середній рівень мінливості за роками досліджень.

Серед групи середньом'якозерних найбільш вирівняний показник твердості в межах зразка мали ЯТХ 132-23 ( $V = 3\%$ ), ЯТХ 11-23 ( $V = 7\%$ ) та ЯТХ 15-23 ( $V = 10\%$ ). Під впливом факторів навколишнього середовища найбільш стабільними були зразки ЯТХ 156-23 та ЯТХ 105-23.

Серед групи напівтвердозерних найбільш однорідними за твердістю були ЯТХ 108-23 ( $V = 10\%$ ) та ЯТХ 99-23 ( $V = 13\%$ ). Рівень мінливості за роками був середнім. Найбільш стабільним за роками досліджень серед групи напівтвердозерних був зразок ЯТХ 135-23.

Виділені зразки з підвищеним рівнем твердості зерна та більш стабільним її проявом можуть бути використані в селекції як джерела цієї ознаки. Також зразки зі стабільним проявом твердозерності можуть використовуватись як еталони в межах різних груп твердості.

Зразків, які протягом обох років належали до групи твердозерних, виявлено не було. Для пошуку нових генотипів з високим потенціалом твердого зерна у 2023 р. було додатково досліджено рівень твердості зерна на значно ширшому наборі генотипів: 330 ярих та 220 зразків озимих тритикале.

Розподіл зразків за групами твердості був подібним серед ярих та озимих форм. Більшу частку становили м'якозерні та середньом'якозерні генотипи (рис. 2).

detected, soft - 20%, medium-soft - 52%, semi-hard - 17%, hard - 11% .

The coefficient of year-to-year variation ranged from 2 to 36%. In addition, the method for evaluating individual kernels made it possible to assess the kernel hardness uniformity within each accession. The accessions differed significantly in intra-accession variability of kernel hardness. The coefficient of intra-accession variation was 3–50%. Accessions with high ( $CV \leq 10\%$ ), medium ( $CV = 10\text{--}20\%$ ), and low ( $CV \geq 20\%$ ) uniformity of kernel hardness were distinguished.

In the soft group, YaTKh 102-23 ( $CV = 4\%$ ), YaTKh 18-23 ( $CV = 6\%$ ), and YaTKh 40-23 ( $CV = 7\%$ ) were the most uniform accessions in terms of kernel hardness. All of them showed a moderate year-to-year variability.

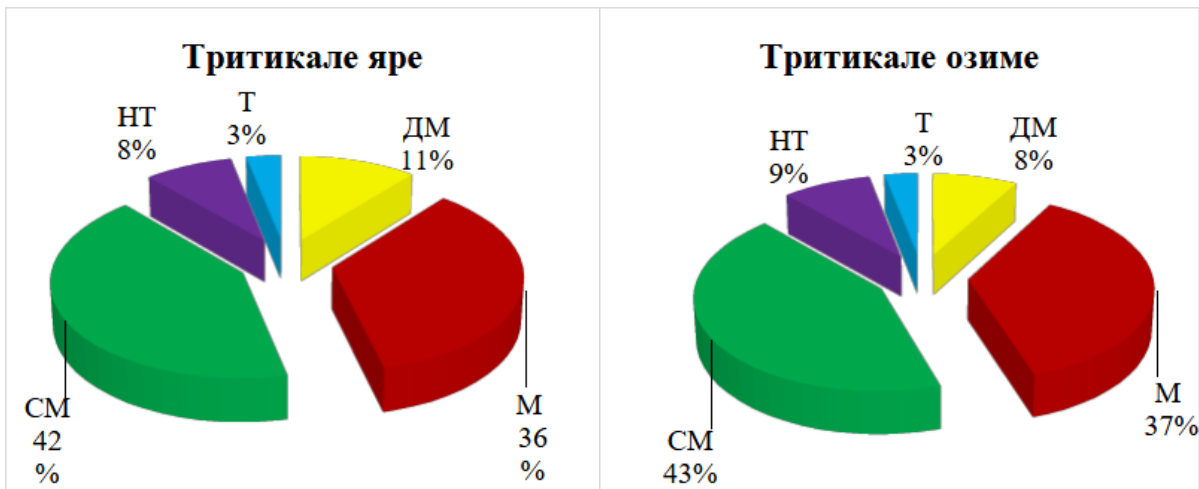
In the medium-soft group, YaTKh 132-23 ( $CV = 3\%$ ), YaTKh 11-23 ( $CV = 7\%$ ), and YaTKh 15-23 ( $CV = 10\%$ ) showed the lowest intra-accession variability. YaTKh 156-23 and YaTKh 105-23 were the most stable accessions under the influence of environmental factors.

In the semi-hard group, YaTKh 108-23 ( $CV = 10\%$ ) and YaTKh 99-23 ( $CV = 13\%$ ) were the most uniform accessions in terms of kernel hardness. The year-to-year variability was moderate. YaTKh 135-23 was the most stable accession over the study years in the semi-hard group.

The selected accessions with increased kernel hardness and a more stable manifestation of this characteristic can be used in breeding as sources of this trait. In addition, accessions with stable hardness can be used as references within different hardness groups.

There were no accessions that would form hard kernels for two years in succession. To identify new genotypes with high potential for kernel hardness, we additionally investigated kernel hardness in a much bigger sample of genotypes in 2023: 330 spring and 220 winter triticale accessions.

The accession distribution by hardness groups was similar among spring and winter forms. Soft- and medium-soft-kernelled genotypes made up larger shares (Fig. 2).



**Рис. 2.** Розподіл зразків тритикале ярого та озимого за рівнем твердості зерна, 2023 р., %: дуже м'якозерні (ДМ), м'якозерні (М), середньом'якозерні (СМ), напівтвердозерні (НТ), твердозерні (Т).

**Fig. 2.** Distribution of the spring and winter triticale accessions by kernel hardness in 2023, %: very soft (ДМ), soft (М), medium-soft (СМ), semi-hard (НТ), hard (Т).

Note. Тритикале яре - Spring triticale; Тритикале озиме - Winter triticale.

У дослідженнях інших авторів також повідомляється, що рівень твердозерності у тритикале репрезентує повний діапазон твердості: від дуже м'якого до дуже твердого, але при цьому переважна більшість генотипів перебуває на рівні від дуже м'якозерних до середньом'якозерних [8, 9]. Серед 11 угорських сортів тритикале, досліджених Вона і співавт., усі зразки мали середній рівень твердості зерна, але виділився один сорт ярого тритикале GK Idus з твердим зерном з характеристиками, близькими до твердої пшениці [20]. Зразки озимого тритикале одеської селекції (Україна), як повідомляють О. Рибалка і співавтори, виявилися дуже м'якозерними. При цьому досліджувані зразки в своїх родоходах містили спадковий матеріал хромосомно заміщеного (5B)5R тритикале та пшениці ваксі [21]. Проте, в дослідженнях Watanabe та ін., рівень твердості зерна восьми досліджуваних бразильських зразків тритикале, який визначався за розміром часточок борошна при помелі, наближався до показників твердої пшениці [22]. Такі відмінності у результатах досліджень ймовірно зумовлені широким різноманіттям зразків тритикале за походженням та методами створення, а також залежать від обсягу досліджуваного матеріалу.

У наших дослідженнях умови 2023 р. сприяли формуванню твердого зерна у генотипів, що мають потенціал до високого рівня прояву цієї ознаки. Були виділені зразки,

Other authors also reported that triticale kernel hardness covered the full hardness range: from very soft to very hard, but most genotypes had very soft to medium-soft kernels [8, 9]. All 11 Hungarian triticale cultivars studied by Bona et al. showed a medium level of kernel hardness; however, one spring triticale cultivar, 'GK Idus' stood out with hard kernels with characteristics close to those of durum wheat [20]. Winter triticale cultivars bred in Odesa (Ukraine), as reported by O. Rybalka et al., turned out to have very soft kernels. At the same time, the studied accessions contained genetic material of chromosomally substituted (5B)5R triticale and waxy wheat in their pedigrees [21]. Nevertheless, in a study by Watanabe et al., the kernel hardness of eight Brazilian triticale accessions, which was determined by milled flour particle size, was close to that of durum wheat [22]. Such discrepancies in research findings are probably caused by wide diversity of origins and breeding methods of triticale accessions and also depend on sizes of tested samples.

In our study, the conditions of 2023 contributed to the formation of hard kernels in genotypes with a potential for strong expression of this trait. We selected accessions

здатні формувати твердість на рівні пшениці твердої та перевищувати її. Серед ярих тритикале виділено 12 твердозерних зразків, серед озимих – сім (табл. 2).

capable of forming hard kernels at the level of durum wheat or better. Twelve spring triticale and seven winter triticale accessions with hard kernels were selected (Table 2).

**Таблиця 2.** Твердозерні лінії тритикале ярого та озимого, 2023 р.

**Table 2.** Hard-kernelled spring and winter triticale lines, 2023.

Назва зразка (Accession)	Твердість зерна, Н (Kernel hardness, N)	Коефіцієнт варіації в межах зразка, V, % (Coefficient of intra-accession variability, CV, %)
тритикале яре (Spring triticale)		
ЯТХ (YaTKh) 456-23	214	14
ЯТХ (YaTKh) 139-23	208	5
ЯТХ (YaTKh) 437-23	207	12
ЯТХ (YaTKh) 565-23	206	12
ЯТХ (YaTKh) 382-23	201	6
ЯТХ (YaTKh) 140-23	199	5
ЯТХ (YaTKh) 368-23	199	17
ЯТХ (YaTKh) 227-23	197	9
ЯТХ (YaTKh) 216-23	194	11
ЯТХ (YaTKh) 99-23	190	6
ЯТХ (YaTKh) 782-23	190	12
ЯТХ (YaTKh) 50-23	190	15
еталони (References)		
Харківська 39, пшениця тверда яра (Spring pasta wheat cv. 'Kharivska 39')	192	12
Харківська 30, пшениця м'яка яра (Spring bread wheat cv. 'Kharivska 30')	160	10
НІР <sub>05</sub> (LSD <sub>05</sub> )	11	–
тритикале озиме (Winter triticale)		
ТХЗ (TKhZ) 883-23	247	20
ТХЗ (TKhZ) 487-23	212	20
ТХЗ (TKhZ) 406-23	207	15
ТХЗ (TKhZ) 736-23	205	7
ТХЗ (TKhZ) 178-23	202	9
ТХЗ (TKhZ) 884-23	199	16
ТХЗ (TKhZ) 516-23	194	10
еталони (References)		
Шулиндінка, пшениця тверда озима (Winter pasta wheat cv. 'Shulyndinka')	195	13
Богдана, пшениця м'яка озима (Winter bread wheat cv. 'Bohdana')	142	12
НІР <sub>05</sub> (LSD <sub>05</sub> )	14	–

Найвищу твердозерність серед ярих зразків мали ЯТХ 456-23 (247 Н), ЯТХ 139-23 (208 Н), ЯТХ 437-23 (207 Н) та ЯТХ 565-23 (206 Н) та ЯТХ 382-23 (201 Н). Серед озимих найвищі рівні твердості мали зразки ТХЗ 883-

Among the spring accessions, the highest hardness of kernels was recorded for YaTKh 456-23 (247 N), YaTKh 139-23 (208 N), YaTKh 437-23 (207 N), YaTKh 565-23 (206 N), and YaTKh 382-23 (201 N). Among the

23 (247 N), TX3 487-23 (212 N), TX3 406-23 (207 N), TX3 736-23 (205 N) та TX3 178-23 (202 N). Твердозерні зразки також відрізнялись морфологічно за більш скловидною текстурою ендосперму (рис. 3).

winter cultivars, TKhZ 883-23 (247 N), TKhZ 487-23 (212 N), TKhZ 406-23 (207 N), TKhZ 736-23 (205 N), and TKhZ 178-23 (202 N) had the hardest kernels. The hard-kernelled accessions also differed morphologically: their endosperms looked more vitreous (Fig. 3).



**Рис. 3.** Вигляд ендосперму при поперечному зрізі зерна у твердозерного зразка тритикале ЯТХ 437-23 (ліворуч) та середньом'якозерного зразка ЯТХ 132-23 (праворуч).

**Fig. 3.** Appearance of the endosperm on kernel cross-sections of a hard-kernelled triticale accession (YaTKh 437-23) (left) and a medium-soft-kernelled accession (YaTKh 132-23) (right).

Як відомо, у пшениці твердість зерна тісно корелює з рівнем скловидності, тому твердозерні зразки переважно мають більш скловидну текстуру ендосперму. Подібний зв'язок встановили Warechowska та співавтори і на тритикале [23].

Усі зразки групи твердозерні показали високу або середню однорідність в межах зразка (коефіцієнт варіації  $V = 5-20\%$ ). Виділені зразки, зважаючи на досить високі рівні твердості зерна та вирівняність за цим показником, мають значну селекційну цінність, але потребують подальших досліджень щодо стабільності прояву ознаки за різних умов середовища.

### Висновки

Серед досліджуваного матеріалу визначено значну диференціацію за проявом твердості зерна: від дуже м'якозерних (84 N) до твердозерних (246 N).

Ярі та озимі форми тритикале мали подібний розподіл зразків за групами твердості. Більшу частку становили м'якозерні та середньом'якозерні генотипи (відповідно 36 та 42 % у ярих, 37 та 43 % у озимих).

Установлено, що найбільший вплив на загальну мінливість ознаки твердозерність мали фактори генотип (29,9 %) та середовище (18,6 %), тому зразки проявляли значну мінливість рівня твердозерності за роками

In wheat, kernel hardness is known to be closely correlated with vitreousness; hence, hard-kernelled accessions mostly have a more vitreous endosperm texture. A similar pattern was demonstrated by Warechowska and her co-authors on triticale [23].

All accessions of the hard group showed high or moderate intra-accession uniformity (coefficient of variation  $CV = 5-20\%$ ). Given the rather high levels of kernel hardness and uniformity of this characteristic, the selected accessions are of significant breeding value, but require further research into the expression stability of this trait under different environmental conditions.

### Conclusions

The studied material significantly differed in kernel hardness: from very soft-kernelled accessions (84 N) to hard-kernelled ones (246 N).

Spring and winter triticale forms showed similar distributions by hardness groups. Soft-kernelled and medium-soft-kernelled genotypes made up larger shares (36 and 42% in spring triticale, respectively, and 37 and 43% in winter, respectively).

It was found that the "genotype" (29.9%) and "environment" (18.6%) factors made the greatest contributions to the total variability of the "kernel hardness" trait; hence, the

досліджень. Водночас в межах кожної групи твердості виділено зразки зі стабільним рівнем твердості зерна за роками.

Виділено зразки з високою однорідністю та стабільним за роками проявом показника твердозерності в межах різних груп твердості: напівтвердозерні – ЯТХ 99-23, ЯТХ 108-23, середньом'якозерні – ЯТХ 132-23, ЯТХ 11-23, м'якозерні – ЯТХ 102-23, ЯТХ 18-23, ЯТХ 40-23. Вони можуть бути використані в селекції як джерела цієї ознаки. Також зразки зі стабільним проявом твердозерності можуть використовуватись як еталони в межах різних груп твердості.

Виділено генотипи з високим потенціалом твердості зерна. За сприятливих умов 2023 р. вони формували твердість на рівні пшениці твердої або перевершували її. Серед ярих форм виділено 12 твердозерних зразків, серед озимих – сім. Найвищу твердозерність серед ярих зразків мали ЯТХ 456-23 (247 Н), ЯТХ 139-23 (208 Н), ЯТХ 437-23 (207 Н), ЯТХ 565-23 (206 Н) та ЯТХ 382-23 (201 Н). Серед озимих найвищі рівні твердості мали зразки ТХЗ 883-23 (247 Н), ТХЗ 487-23 (212 Н), ТХЗ 406-23 (207 Н), ТХЗ 736-23 (205 Н) та ТХЗ 178-23 (202 Н). Усі зразки групи твердозерні показали високу або середню однорідність в межах генотипу (коефіцієнт варіації  $V = 5\text{--}20\%$ ).

accessions' kernel hardness was quite variable across the study years. At the same time, accessions with stable year-to-year hardness of kernels were selected in each hardness group.

We selected highly uniform accessions with stable hardness of kernels over the years within different hardness groups: semi-hard - YaTKh 99-23 and YaTKh 108-23; medium-soft - YaTKh 132-23 and YaTKh 11-23; soft - YaTKh 102 -23, YaTKh 18-23, and YaTKh 40-23. They can be used in breeding as sources of this trait. In addition, accessions with stable hardness can be used as references within different hardness groups.

Genotypes with a high potential for kernel hardness were identified. Under favorable conditions in 2023, they demonstrated kernel hardness at the level of durum wheat or better. Twelve spring triticale and seven winter triticale accessions with hard kernels were selected. The following spring accessions had the hardest kernels: YaTKh 456-23 (247 N), YaTKh 139-23 (208 N), YaTKh 437-23 (207 N), YaTKh 565-23 (206 N), and YaTKh 382-23 (201 N). As to winter triticale, the following cultivars formed the hardest kernels: TKhZ 883-23 (247 N), TKhZ 487-23 (212 N), TKhZ 406-23 (207 N), TKhZ 736-23 (205 N), and TKhZ 178-23 (202 N). All accessions of the hard group showed high or moderate intra-accession uniformity (coefficient of variation  $CV = 5\text{--}20\%$ ).

## References

1. FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Statistical Databases. 2020. Available from: <http://faostat.fao.org/>
2. Chernobai S.V., Riabchun V.K., Melnyk V.S., Kapustina T.B., Nosenko Yu.M., Shchechenko O.Ye., Sheliakina T.A. Characteristics of spring triticale cultivars bred at the Yuriev Plant Production Institute of NAAS. *Seleksiia i Nasinnytstvo*. 2023. Issue 124. P. 31–44. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2023.293848> [in Ukrainian]
3. Kaszuba J., Kapusta I., Posadzka Z.. Content of Phenolic Acids in the Grain of Selected Polish Triticale Cultivars and Its Products. *Molecules*. 2021. № 26. P. 562–572. <https://doi.org/10.3390/molecules26030562>
4. Kamanova S., Yermekov Y., Shah K., Mulati A., Liu X., Bulashev B., Toimbayeva D., Ospankulova G. Review on nutritional benefits of triticale. *Czech Journal of Food Sciences*. 2023. № 41. P. 248–262. <https://doi.org/10.17221/67/2023-CJFS>
5. Zhu F. Triticale: Nutritional composition and food uses. *Food Chemistry*. 2018. № 241. P. 468–479. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.009>
6. Riabchun V.K., Kapustina T.B., Melnyk V.S., Shchechenko O.Ye. Triticale - new opportunities for stabilization of grain production. Scientific edition. Kharkiv. 2013. 18 p. [in Ukrainian]
7. Rodríguez-Perez G., Cervantes-Ortiz J.F., Gámez-Vázquez A.J., Reynaga-Franco F.J., Torres-Velázquez J.R., Ávila-Perches M.A. Nutritional value in grains of triticale as an alternative in the food industry. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2023. № 14. P. 351–362.

- <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.2870>
8. Li G., He Zh., Peña R.J., Xia X., Lillemo M., Sun Q. Identification of novel secaloindoline-a and secaloindoline-b alleles in CIMMYT hexaploid triticale lines. *Journal of Cereal Science*. 2006. № 43. P. 378–386. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.12.010>
  9. Camerlengo F., Kiszonas A.M. Genetic factors influencing triticale quality for food. *Journal of Cereal Science*. 2023. № 113. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103743>
  10. Gasparis S., Orczyk W., Nadolska-Orczyk A. Sina and Sinb genes in triticale do not determine grain hardness contrary to their orthologs Pina and Pinb in wheat. *Plant Biology*. 2013. № 13. P. 190. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-190>
  11. Ramírez A., Pérez G.T., Ribotta P.D., León A.E. The occurrence of friabilins in triticale and their relationship with grain hardness and baking quality. *J Agric Food Chem*. 2003. № 51 (24). P. 7176–7181. <https://doi.org/10.1021/jf0345853>.
  12. Lukaszewski A. Cytogenetically engineered rye chromosomes 1R to improve bread-making quality of hexaploid triticale. *Crop Science*. 2006. № 46. P. 2183. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.03.0135>
  13. Salmanowicz B. CE determination of secaloindoline allelic forms in hexaploid triticale ( $\times$  *Triticosecale* Wittmack). *J Sep Sci*. 2010. № 33 (4-5). P. 643–650. <https://doi.org/10.1002/jssc.200900601>.
  14. Kselíková V., Vyhnaněk T., Hanáček P., Martinek P. Grain hardness in triticale: a physical and molecular evaluation. *Czech J. Genet. Plant Breed*. 2020. № 56 (3). P. 102–110. <https://doi.org/10.17221/96/2019-CJGPB>
  15. Yarosh A.V., Riabchun V.K., Leonov O.Yu., Didenko S.Yu., Kopytina L.P., Sakhno TV, Sheliakina TA. Method for evaluating grain hardness in winter bread wheat. *Henetychni Resursy Roslyn*. 2014. No 15. P. 120–131. Available from: <http://genres.com.ua/assets/files/15/15.pdf> [in Ukrainian]
  16. Erkinbaev Ch., Derksen K., Paliwal J. Single kernel wheat hardness estimation using near infrared hyperspectral imaging. *Infrared Physics & Technology*. 2019. No 98. P. 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.03.033>
  17. Gaines C., Finney P., Fleege L., Andrews L. Predicting a Hardness Measurement Using the Single-Kernel Characterization System. *Cereal Chem*. 1996. № 73(2). P. 278–283. Available from: [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1996/Documents/73\\_278.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1996/Documents/73_278.pdf)
  18. Laskowski J., Lysiak G.. Use of compression behaviour of legume seeds in view of impact grinding prediction. *Powder Technology*. 1999. № 105. P. 83–88. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00121-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00121-7)
  19. Rozhkov A.O., Puzik V.K., Kalenska S.M., Puzik L.M., Popov S.I., Muzafarov N.M., Bukhalo V.Ya., Kryshchtop Ya.A. Experimentation in agronomy. Book 2. Statistical processing of agronomic research data. Kh.: Maidan, 2016. 342 p. [in Ukrainian]
  20. Bona L, Acs E, Lantos C, Tomoskozi S, Lango B. Human utilization of triticale: technological and nutritional aspects. *Commun Agric Appl Biol Sci*. 2014. № 79(4). P. 139–152. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/278331762\\_Human\\_utilization\\_of\\_triticale\\_technological\\_and\\_nutritional\\_aspects](https://www.researchgate.net/publication/278331762_Human_utilization_of_triticale_technological_and_nutritional_aspects)
  21. Rybalka O.I., Morgun V.V., Morgun B.V., Polyshechuk S.S. Genetic background for breeding of new quality classes of wheat (*Triticum aestivum* L.) and triticale ( $\times$  *Triticosecale* Wittmack). *Fiziol. Rast. Genet*. 2019. Vol. 51, No 3. P 207–240. <https://doi.org/10.15407/frg2019.03.207> [in Ukrainian]
  22. Watanabe E., Arruda K., Kitzberger C., Scholz M., Coelho A. Physico-chemical properties and milling behavior of modern triticale genotypes. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2019. 31(10). P. 752–758. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i10.2015>
  23. Warechowska M., Warechowski J., Wojtkowiak K., Stępień A. Milling quality of spring triticale grain under different nitrogen fertilization. *Pol. J. Natur. Sc.* 2013. № 28 (4). P. 423–435. Available from: [https://www.uwm.edu.pl/polish-journal/sites/default/files/issues/articles/warechowska\\_et\\_al\\_2013.pdf](https://www.uwm.edu.pl/polish-journal/sites/default/files/issues/articles/warechowska_et_al_2013.pdf)

Received 18.02.2024