



<https://doi.org/10.15407/cryo35.03.138>

УДК 633. 11:581.19:631.5

А.В. Ярош*, Н.І. Рябчун, В.К. Рябчун, Н.В. Кузьмишина, О.В. Солонечна

Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН, Національний центр генетичних ресурсів рослин України,
м. Харків, Україна

*jarosh_andrij@ukr.net

ВПЛИВ СТІЙКОСТІ ДО НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ПОКАЗНИКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ ОЗИМОЇ В КОНТЕКСТІ ЗМІН КЛІМАТУ

У роботі досліджено вплив стійкості до низьких температур на показники екологічної пластичності пшениці м'якої озимої як одного із лімітуючих факторів гомеостазу сільськогосподарських культур, що зумовлено викликами сьогодення в умовах глобального потепління. Визначено, що серед диференційованих сортів пшениці м'якої озимої за стійкістю до гіпотермії частка генотипів з найвищою екологічною пластичністю за врожайністю становила 19,0 %. При цьому генотипи з найвищим генетичним потенціалом адаптивності за найменшою сумою рангів (сума рангів 2) генотипового ефекту та коефіцієнтом регресії (Октава одеська, Понтійка, Zatołxe та NE 10507) формували врожайність 128—148 % відносно стандартних значень. Встановлено, що у сортів пшениці м'якої озимої існують помірна негативна кореляція між стійкістю до підмерзання листя у ранньовесняний період та сумою рангів генотипового ефекту і ступенем пластичності врожайності ($r = -0,42$, $P < 0,05$) та помірна позитивна кореляція між стійкістю до критичних температур вимерзання та сумою рангів генотипового ефекту і ступенем пластичності врожайності ($r = 0,41$, $P < 0,05$). Виділені генотипи пшениці м'якої озимої з високим генетичним потенціалом екологічної пластичності є цінним вихідним матеріалом для створення нових сортів, адаптованих до кліматичних змін сьогодення.

Ключові слова: морозостійкість, генотиповий ефект, адаптивний потенціал, стресостійкість, пшениця м'яка озима.

Низькотемпературна толерантність озимих зернових культур, яка є однією з основних властивостей для збереження генетичного потенціалу та стабільності врожайності, набуває все більшої актуальності, оскільки нові високоврожайні сорти часто характеризуються низьким адаптивним потенціалом.

Пшениця м'яка (*Triticum aestivum* L.) озима, завдяки цінності біохімічного складу зерна та можливості виробництва численних продуктів харчування, має важливе продовольче та стратегічне значення світового масштабу та займає значні посівні площі [5, 15].

Попри чітку тенденцію до глобального потепління, для багатьох європейських країн проблема вразливості озимих зернових культур до низьких температур та посилення негативного впливу на гомеостаз сортів рослин не зникає, а набуває все більшого поширення та значимості, оскільки вона зумовлює істотні недобори врожаю та збитки аграріям [14, 30].

Глобальне потепління все частіше супроводжується контрастністю температурних перепадів зі значними коливаннями кількості опадів, посиленням екстремальних погодних проявів [10], частими відлигами та зменшенням

Цитування: Ярош АВ, Рябчун НІ, Рябчун ВК, Кузьмишина НВ, Солонечна ОВ. Вплив стійкості до низьких температур на показники екологічної пластичності пшениці м'якої озимої в контексті змін клімату. *Проблеми кріобіології і кріомедицини*. 2025; 35(3): 144–55. <https://doi.org/10.15407/cryo35.03.138>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

снігового покриву в зимовий період, більш раннім настанням метеорологічної весни. При цьому знижуються рівень загартування та поріг стресостійкості озимих зернових культур щодо впливу критичних температур вимерзання [13, 14]. Так, у зв'язку з несприятливим впливом на сільськогосподарські культури комплексу погодно-кліматичних факторів, підвищенням середньорічної температури повітря, реалізація потенційної врожайності, її стабільність та ефективність агропромислового виробництва знижуються. Yu. Kernasyuk зазначає [22], що за період 2015—2020 рр. варіабельність врожайності зернових культур в окремих регіонах степової зони була у межах 18,0—25,1 %, лісостепової — 19,8—21,7 %, Полісся — 17,2—20,8 %.

Завдяки сукупності пристосувальних реакцій рослин, що визначаються комплексом фізіолого-біохімічних та молекулярно-генетичних змін, озимі зернові культури після проходження загартування здатні (в межах норми реакції генотипу) витримувати вплив низьких температур під час зимівлі [18]. Період загартування рослин охоплює дві фази. В.В. Моргун та співавт. [7] зазначають, що на першій фазі, яка відбувається за денної температури повітря 8—10 °С у вузлах кушення накопичуються цукри, які за нічної температури 0—4 °С майже не витрачаються рослинами на ріст та процеси дихання. Вміст водорозчинних цукрів (сахароза, фруктоза, рафіноза, глюкоза та ін.) у вузлах кушення коливається в залежності від фізіологічних особливостей генотипу, в середньому він складає близько 30 % [7]. На другій фазі загартування простежуються зневоднення клітин, підвищення концентрації розчинних цукрів, зменшення вмісту вільної води, здатної до швидкого замерзання, і збільшення вмісту зв'язаної води, яка важко замерзає при критично низьких температурах [6]. М. Hosseinifard та співавт. [21] доповнюють результати досліджень попередників, наголошуючи, що під час загартування у вузлах кушення озимих культур збільшуються запаси різних осмотично-активних речовин, зокрема, цукрів та амінокислот, проліну. У зв'язку з цим рослини набувають високого рівня морозостійкості. Відомо, що цукри та пролін проявляють антиоксидантні ефекти, які нерозривно пов'язані з адаптацією генотипу до негативного впливу низьких температур [17]. Цукри є поліфункціональними захис-

ними сполуками в рослинах, що стабілізують мембранні, білкові та ліпідні структури. Проте високий вміст цукрів та проліну в листках та пагонах озимих зернових культур не завжди свідчить про стійкість генотипу до гіпотермії [24, 29].

У роботі Т.В. Юрченко та співавт. [11] зазначено, що за поступового зниження температури повітря загартовування рослин пшениці м'якої озимої відбувається значно ефективніше у порівнянні з контрастними її коливаннями. Основою адаптивних реакцій генотипу до негативного впливу низьких температур на гомеостаз є складні фізіологічні та біохімічні реакції за участі різноманітних фітогормонів та гормоноподібних сполук, зокрема, брасиностероїдів, поліамінів, мелатоніну тощо [20, 31, 35].

Відомо, що для високої стресостійкості рослин пшениці м'якої озимої до впливу низьких температур важливою є як морозостійкість, так і польова зимостійкість у поєднанні з оптимальним відновленням вегетації у весняний період. У роботі В.Ye. Макаова і V.M. Tyshchenko [27] встановлено кореляцію між польовою зимостійкістю та інтенсивністю росту в осінній період ($r = 0,653$), а також із здатністю рослин до регенерації у весняний період ($r = 0,835$). Польова зимостійкість визначається комплексом ознак, які забезпечують перезимівлю рослин, зокрема, морозостійкістю, тривалістю яровизації та фотоперіодичною чутливістю [28]. Особливого значення при цьому набуває генотипова стійкість сортів пшениці м'якої озимої до збудника снігової плісняви (*Microdochium nivale* (Fr.) Samuels & I.C. Hallett), яка на значущому негативному рівні корелює із сумою рангів генотипового ефекту і ступенем пластичності врожайності ($r = -0,69$, $P < 0,01$) [33].

Екологічна пластичність відіграє вирішальну роль в адаптації сорту до ґрунтового-кліматичних умов, відображаючи здатність генотипу пристосовуватися до мінливих умов навколишнього середовища та мінімізувати вплив різних стресових факторів. [26].

Таким чином, виділення толерантних до гіпотермії сортів пшениці м'якої озимої з високою екологічною пластичністю є передумовою для ефективної селекції генотипів з підвищеним адаптивним потенціалом.

Метою роботи було визначення стійкості до підмерзання листя у ранньовесняний період,

морозостійкості та їх впливу на екологічну пластичність пшениці м'якої озимої в контексті змін клімату, а також виділення високоврожайних генотипів, толерантних до низьких температур.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Матеріалом дослідження був 21 сорт короткостеблої пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.), створений в семи країнах, з яких вісім в Україні (Понтійка, Основа одеська, Октава одеська, Пейзаж, Перевага, Порадниця, Зорянка, Подільська нива); чотири в Німеччині (Producent, Futurum, Tobak, Estivus); три в Румунії (Zamolxe, Fajura, FGMUT 293); два в Австрії (Amandus, Palmus); два у Сполучених Штатах Америки (NE 12443, NE 10507); по одному у Франції (Altigo) та Китаю (Tianmin 366).

Дослідження проводили в період 2020—2023 рр. у лабораторії генетичних ресурсів зернових культур Національного центру генетичних ресурсів рослин України (НЦГРРУ) Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України. Досліди було проведено за методикою кваліфікаційної експертизи [9]. Посів проводили по пару в оптимальні строки з нормою висіву 4,5 млн зерен на 1 га у триразовому повторенні. Облікова площа ділянки становила 5 м². Навесні проводили підживлення посіву аміачною селітрою (N₄₀). За стандарт приймали пшеницю сорту Бунчук.

Оцінку рівнів стійкості до підмерзання листя після відновлення вегетації навесні проводили за 9-бальною шкалою, згідно з якою 1 бал — дуже низька стійкість (дуже сильне підмерзання, пошкодження вегетативної маси становить >70 % від усіх рослин в цілому), 3 бали — низька стійкість (сильне підмерзання, 51—70 %), 5 балів — середня стійкість (середнє підмерзання, 31—50 %), 7 балів — висока стійкість (слабке підмерзання, 10—30 %), 9 балів — дуже висока стійкість (незначне підмерзання, <10 %). Морозостійкість визначали за контрольованих умов відповідно до Державного стандарту України «Пшениця озима. Метод визначення морозостійкості сортів» (ДСТУ 4749:2007) [3]. При цьому рослини вирощували у вегетаційних ящиках в природних умовах розвитку та загартування. Сорти проморожували в низькотемпературних камерах «Danfoss Optyma» (Danfoss, Нідерланди), вирощували в теплиці за 16-годинного світлового дня та температури

вночі 15—17 °С, вдень 22—23 °С та визначали відсоток рослин, які вижили. Експозиція проморожування тривала 24 години. Критичною для вимерзання була температура, за якої гинуло щонайменше 50 % рослин. Морозостійкість оцінювали за 9-бальною шкалою: 9 балів — найвищий рівень ознаки, а 1 бал — найнижчий порівняно з сортом-еталоном. Екологічну пластичність визначали за методикою Б.П. Гур'єва та співавт. [2]. Згідно з даною методикою генотиповий ефект ϵ_i є критерієм загальної адаптивної здатності досліджуваного генотипу, а коефіцієнт регресії R_i — показником ступеня пластичності. При цьому найвищим рангом (ранг 1) характеризуються сорти з високим генотиповим ефектом та низьким коефіцієнтом регресії, найнижчим рангом (ранг 3) — генотипи з низьким генотиповим ефектом та високим коефіцієнтом регресії. У випадку проміжних варіантів досліджуваний матеріал відноситься до середнього рангу (ранг 2) [2].

У роботі використовували наступні методи аналізу: дисперсійний — для визначення рівнів прояву екологічної пластичності за ознакою врожайності, а також для оцінки значущості експериментальних даних; кореляційний — для визначення зв'язків між досліджуваними ознаками; регресійний — для визначення закономірностей впливу низьких температур на показники екологічної пластичності озимої пшениці.

Для якісної оцінки коефіцієнтів кореляції, сили зв'язку між досліджуваними ознаками використовували шкалу Чеддока [12]. Значущість взаємозв'язків між досліджуваними ознаками перевіряли за критеріями Стьюдента (t) та Фішера (F). Значущими вважалися результати при $P < 0,05$. Статистичну обробку експериментальних даних виконували з використанням комп'ютерних програм «MS Excel 2007» (Microsoft, США) та «Statistica 6.0» (StatSoft, США)

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На основі результатів аналізу погодних умов вегетаційних періодів 2020—2023 рр. можна стверджувати, що контрастність температурного режиму та вологозабезпечення значно вплинули на варіабельність стійкості сортів пшениці м'якої озимої до підмерзання листя у весняний період, а також на врожайність та екологічну пластичність. За гідротермічним коефіцієнтом визначено, що осінній період був

дуже посушливим у 2021 р. (ГТК = 0,36), посушливим — у 2020 р. (ГТК = 0,46) та надмірно зволеними — у 2022 р. (ГТК = 2,84). Слід зазначити, що особливості погодних умов у роки досліджень не сприяли оптимальному загартуванню рослин пшениці м'якої озимої перед входом у зиму. Так, гострий дефіцит вологи, підвищена температура осінніх періодів 2020 р. та 2021 р. затримували ріст і розвиток сортів, переважна більшість яких не накопичувала достатню кількість вуглеводів, необхідних для успішної перезимівлі.

У 2022 р. належному загартуванню рослин перешкоджала тривала посуха в осінній період, яка зумовила затримку сходів. Зазначимо, що припинення вегетації в 2021 р. та 2022 р. відбулося у першій декаді листопада за фенологічних фаз розвитку — двох та трьох листків відповідно. У 2020 р. вегетація припинилася у другій декаді листопада під час проходження рослинами фенологічної фази двох листків.

У цілому зимові періоди 2020/2021 рр. та 2021/2022 рр. були сприятливими для перезимівлі озимих зернових культур, але диференціація за стійкістю до підмерзання листя у весняний період простежувалася. Необхідно зазначити, що нестійка погода в лютому 2023 р. характеризувалася налипанням мокрого снігу, хуртовинами та ожеледицями, які негативно вплинули на перезимівлю рослин, зумовлену стійкістю рослин до збудника снігової плісняви (*M. nivale* (Fr.) Samuels & I.C. Hallett). Весна упродовж усіх років досліджень була затяжною та прохолодною. Відновлення вегетації в 2021 р. та 2022 р. відмічено в третій декаді березня, у 2023 р. — у першій декаді квітня.

Результати аналізу ГТК весняно-літніх періодів у роки дослідження показали, що весняний період 2021 р. був достатньо зволеним (ГТК = 1,46), 2022 р. — посушливим (ГТК = 0,59), а 2023 р. — надмірно зволеним (ГТК = 1,61). Достатнім зволоженням характеризувалися літні місяці 2022 р. (ГТК = 1,17) та 2023 р. (ГТК = 1,23), а в 2021 р. вони були середньо посушливими (ГТК = 0,64).

Для формування високих рівнів урожайності в досліджуваних сортах пшениці найбільш сприятливими були погодні умови 2022 р. В умовах інших років урожайність досліджуваних генотипів була меншою.

Необхідно зазначити, що значна амплітуда варіювання температури навколишнього се-

редовища у зимово-весняний період негативно вплинула на гомеостаз рослин, посилюючи диференціацію сортів пшениці м'якої озимої за стійкістю до підмерзання листя у ранньовесняний період. Так, для виділення стійких за цією ознакою генотипів найбільш сприятливими були особливості погодних умов 2021 р., стандартне відхилення (SD) середньомісячної температури (°C) за період з січня по квітень характеризувалося межами найбільших значень, а саме: SD = 12,3—14,9 (табл. 1).

Розраховано авторами на основі даних Харківського регіонального центру з гідрометеорології.

Амплітуда варіювання температурного режиму в 2021 р. була у межах 22,8—31,9 °C. Умови зимово-весняного періоду 2023 р. виявилися найменш сприятливими для диференціації генотипів за стійкістю до підмерзання листя і характеризувалися найменшою контрастністю

Таблиця 1. Результати статистичного аналізу середньомісячної температури зимово-весняних періодів досліджень, 2021—2023 рр.

Температура, °C	Місяць			
	січень	лютий	березень	квітень
2021				
X_{\min}	-21,8	-19,8	-10,2	-3,3
\bar{X}_{\max}	6,6	12,1	12,6	21,3
X	0,1	-4,8	1,4	8,7
A_m	28,4	31,9	22,8	24,6
SD	14,9	15,9	11,4	12,3
2022				
X_{\min}	-4,9	-10,0	-7,0	2,0
\bar{X}_{\max}	-1,2	6,0	9,0	17,0
X	-3,3	0,3	2,0	12,0
A_m	3,7	16,0	16,0	15,0
SD	1,9	8,1	8,0	7,6
2023				
X_{\min}	-3,1	-3,2	2,1	10,1
\bar{X}_{\max}	-1,7	-1,1	7,9	11,6
X	-2,6	-2,0	4,8	10,9
A_m	1,4	2,1	5,8	1,5
SD	0,7	1,1	2,9	0,8
Середня багаторічна	-6,5	-5,8	-0,3	9,6

Примітки: X_{\min} — мінімальне значення; X_{\max} — максимальне значення; \bar{X} — середнє значення; A_m — амплітуда варіювання ($A_m = X_{\max} - X_{\min}$); SD — стандартне відхилення.

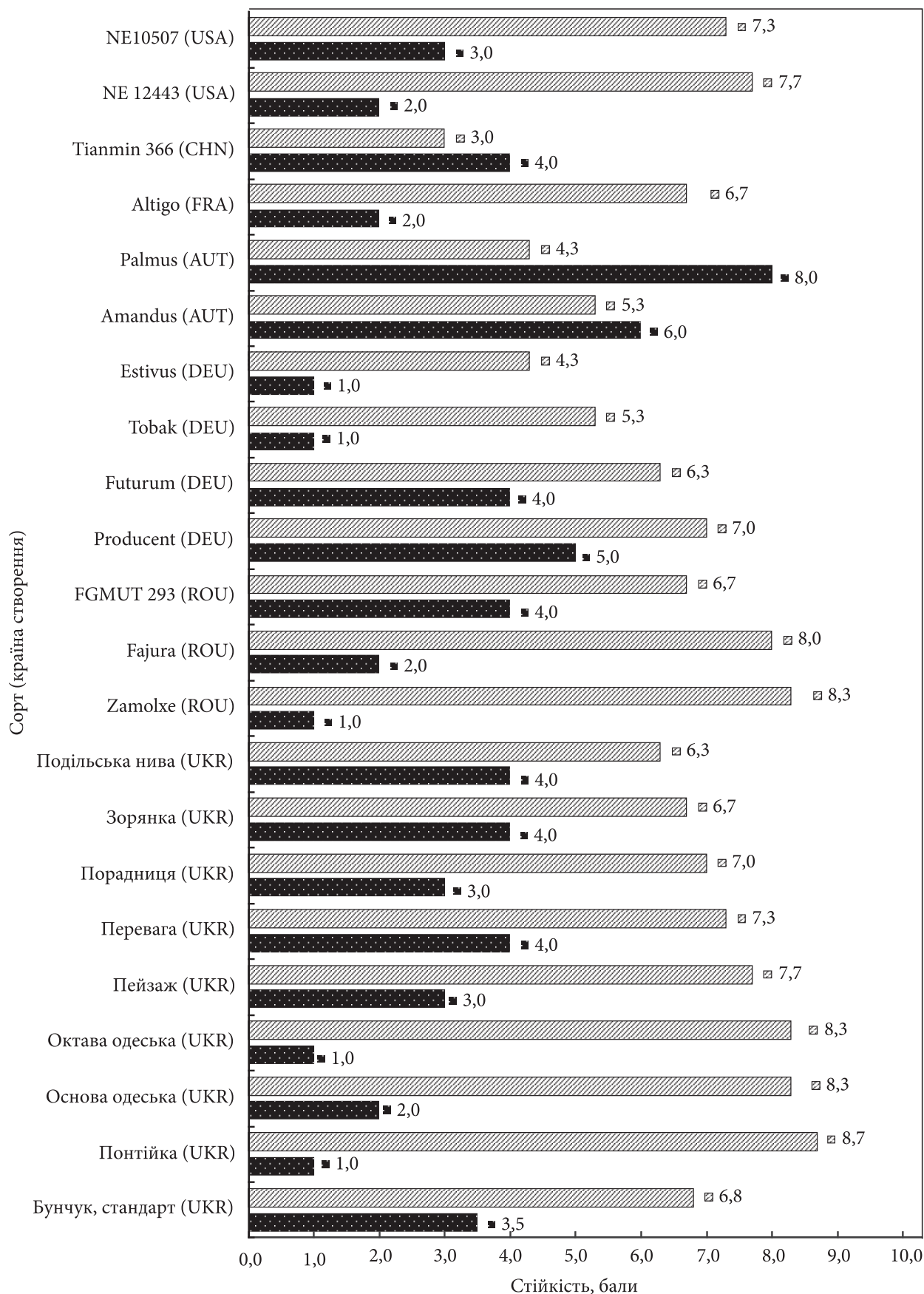


Рис. 1. Стійкість до підмерзання листа пшениці м'якої озимої у ранньовесняний період, 2020—2023 рр. □ — середнє значення в балах (\bar{X}); ■ — амплітуда варіювання в балах (A_m)

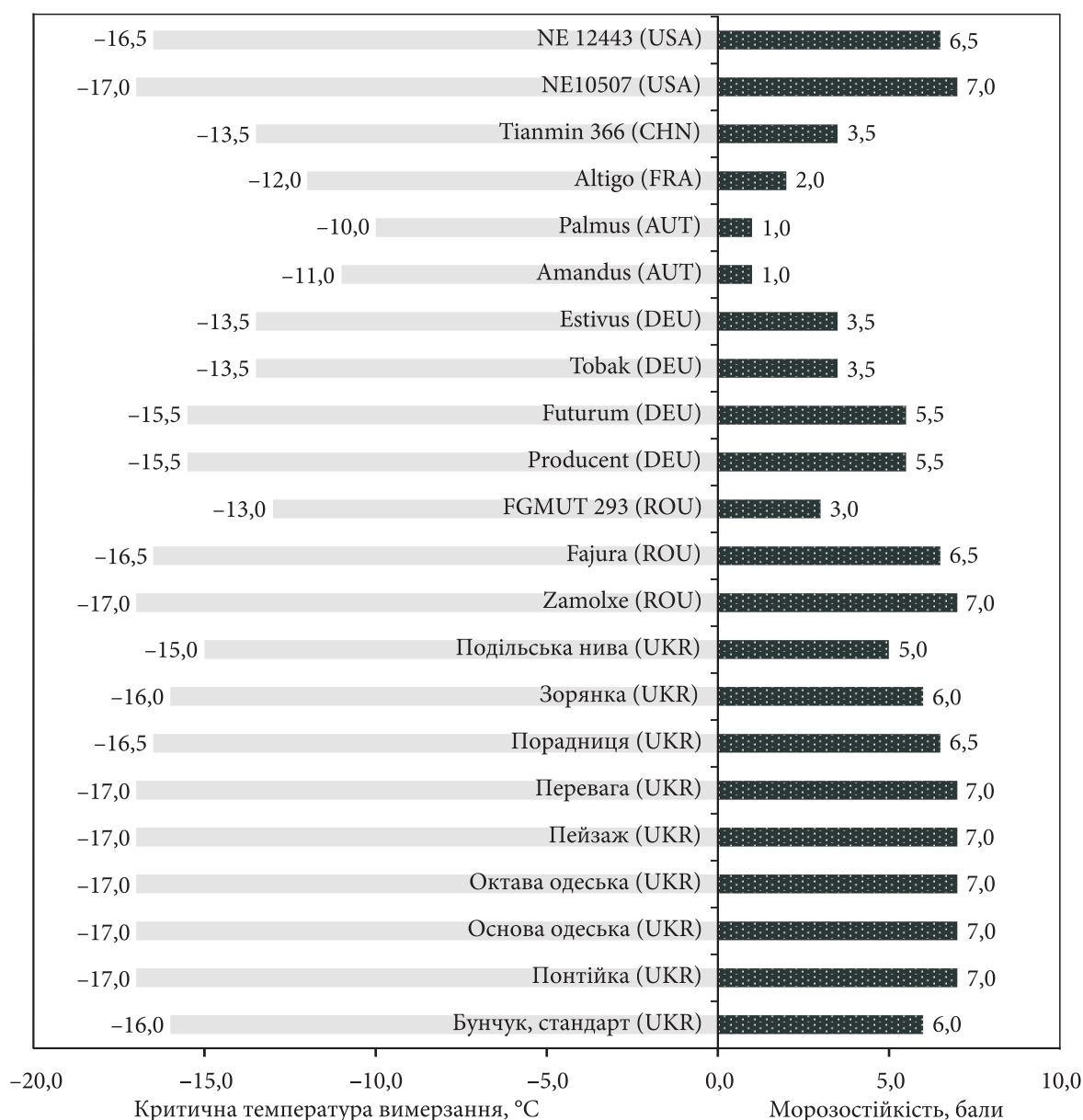


Рис. 2. Морозостійкість сортів пшениці м'якої озимої, диференційованих за стійкістю до підмерзання листя у ранньовесняний період 2020–2023 рр: ■ — температура; ■ — морозостійкість

температурного режиму ($SD = 0,7\text{--}2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) із розмахом варіювання температури навколишнього середовища $1,4\text{--}5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, контрастність погодних умов зимово-весняних періодів 2020—2023 рр. сприяла диференціації сортів за стійкістю до підмерзання листя у ранньовесняні періоди та виділенню високоврожайних генотипів, адаптованих до ґрунтово-кліматичних умов східної частини лісостепу України.

За період 2020—2023 рр. стійкість досліджуваних сортів пшениці м'якої озимої до підмерзання листя у ранньовесняний період варіюва-

ла від 1 до 9 балів. За результатами проведених оцінок було виділено 11 генотипів (52,4 %) пшениці м'якої озимої з високим рівнем стійкості за даною ознакою (7,0—8,7 балів) — Понтійка, Основа одеська, Октава одеська, Пейзаж, Перевага, Порадниця, Zamolxe, Fajura, Producent, NE 12443, NE 10507, 6,8 балів — стандартний сорт пшениці Бунчук.

Середньою стійкістю до підмерзання листя у ранньовесняний період на рівні 4,3—6,7 балів характеризувався ряд генотипів, зокрема, Зорянка, Подільська нива, FGMUT 293 та ін., частка яких складала 42,9 %.

вень стійкості мав сорт Tianmin 366—3,0 бали (4,8 %).

Слід зазначити, що амплітуда варіювання A_m ознаки «стійкість до підмерзання листя у ранньовесняний період» у короткостеблих генотипів пшениці м'якої озимої знаходилася в межах від 1 до 8 балів. Сорти Понтійка, Октава одеська та Zamolxe є найбільш цінними генотипами, які відзначаються високою стійкістю за цією ознакою за низької варіабельності та найменшою амплітудою ($A_m = 1$). Найвища амплітуда була характерна для сортів Palmus ($A_m = 8$), Amandus ($A_m = 6$) та Producent ($A_m = 5$) (рис. 1).

За коефіцієнтом варіації CV визначено, що мінливість стійкості до підмерзання листя у ранньовесняний період була 6,7—96,1 %. Ана-

лізуючи межі варіювання даної ознаки, визначено, що низький рівень мінливості ($CV \leq 10,0\%$) мали сорти Понтійка, Октава одеська та Zamolxe, частка яких складає 14,3 %. Варіабельність середнього рівня ($CV = 11,0\text{--}20,0\%$) мали сім сортів (33,3 %): Основа одеська, Пейзаж, Fajura, Tobak, Estivus, Altigo та NE 12443. Висока варіабельність ($CV > 20,0\%$) стійкості до підмерзання листя була характерна для 52,4 % досліджуваних сортів: Порадниця, Producent, Amandus та ін. Варіабельність стійкості у стандартного сорту Бунчук була високою ($CV = 27,7\%$).

Досліджуючи стійкість пшениці м'якої озимої до низьких температур, сорти було оцінено та диференційовано за морозостійкістю, кри-

Таблиця 2. Екологічна пластичність сортів пшениці м'якої озимої, диференційованих за морозостійкістю, стійкістю до підмерзання листя у ранньовесняний період та врожайністю, 2020—2023 рр.

Назва сорту	Країна створення	Урожайність, т/га		Генотиповий ефект		Коефіцієнт регресії (ступінь пластичності)		Екологічна пластичність, сума рангів
		\bar{X}	відносно стандарту, %	ϵ_i	ранг	R_i	ранг	
Бунчук *	UKR	4,92	100	-1,03	3	1,31	3	6
Октава одеська#	UKR	6,82	139	0,87	1	0,75	1	2
Понтійка #	UKR	6,48	132	0,53	1	0,59	1	2
Перевага	UKR	6,40	130	0,45	1	1,50	3	4
Пейзаж	UKR	6,23	127	0,28	2	1,34	3	5
Зорянка	UKR	6,17	125	0,22	2	1,36	3	5
Основа одеська	UKR	6,11	124	0,16	2	0,86	2	4
Подільська нива	UKR	5,56	113	-0,39	3	1,11	2	5
Порадниця	UKR	5,82	118	-0,13	2	0,69	1	3
Zamolxe #	ROU	7,26	148	1,31	1	0,55	1	2
Fajura	ROU	6,37	129	0,42	1	1,48	3	4
FGMUT 293	ROU	5,19	105	-0,76	3	1,41	3	6
Producent	DEU	6,32	128	0,37	1	1,67	3	4
Estivus	DEU	5,92	120	-0,03	2	0,14	1	3
Futurum	DEU	5,69	116	-0,26	2	0,44	1	3
Tobak	DEU	4,93	100	-1,02	3	0,72	1	4
Palmus	AUT	6,44	131	0,49	1	1,19	3	4
Amandus	AUT	4,62	94	-1,33	3	1,20	3	6
Altigo	FRA	6,12	124	0,17	2	0,96	2	4
Tianmin 366	CHN	4,85	99	-1,10	3	0,92	2	5
NE 12443	USA	6,40	130	0,45	1	1,17	2	3
NE 10507 #	USA	6,31	128	0,36	1	0,66	1	2
HIP _{0,05}		0,31	—	—	—	—	—	—
min		4,62	94	-1,33	1	0,14	1	1
max		7,26	148	1,31	3	1,67	3	3

Примітка: * стандарт; # генотипи з найвищим генетичним потенціалом адаптивності та здатністю до формування високої врожайності.

тична температура вимерзання при цьому варіювала від низького ($-10,0$ °C) до високого ($-17,0$ °C) рівня відповідно. Високою морозостійкістю (7 балів) відзначилися сім генотипів (33,3 %) Понтійка, Основа одеська, Октава одеська, Пейзаж, Перевага, Zamolxe, NE 10507, критична температура вимерзання яких становила відповідно $-17,0$ °C. Вищим середнього рівня морозостійкості (від 5,5 до 6,5 балів) з критичною температурою вимерзання від $-15,5$ до $-16,5$ °C характеризувалися наступні сорти: Порадниця, Зорянка, Fajura, Futurum, Producent, NE 12443, частка яких складала 28,6 %. Середній рівень морозостійкості (5 балів) за критичної температурою вимерзання — $15,0$ °C мав сорт Подільська нива. Серед досліджуваних генотипів найнижчою морозостійкістю (1,0—3,5 балів) з варіюванням критичної температури вимерзання від $-10,0$ до $-13,5$ °C відповідно характеризувалися сім сортів: Tobak, Estivus, Amandus Palmus, Tianmin 366, Altigo, FGMUT 293. Стандарт Бунчук проявив морозостійкість на рівні 6 балів (рис. 2).

Серед досліджуваних сортів пшениці м'якої озимої виділено генотипи з формуванням високої врожайності (118 до 148 % відносно стандарту): Октава одеська, Понтійка, Перевага, Пейзаж, Зорянка, Основа одеська, Порадниця, Zamolxe, Fajura, Producent, Estivus, Palmus, Altigo, NE 12443, NE10507, стандартний сорт Бунчук — 4,92 т/га (табл. 2). Високим рівнем прояву генотипового ефекту (ранг 1) за врожайністю відзначилися дев'ять сортів (42,9 %): Октава одеська, Понтійка, Перевага, Zamolxe, Fajura, Producent, Palmus, NE 12443, NE 10507.

Середніми значеннями генотипового ефекту (ранг 2) характеризувалися сорти Пейзаж, Зорянка, Основа одеська, Порадниця, Estivus, Futurum та Altigo, які становили серед досліджуваних сортів 33,3 % відповідно. П'ять сортів (23,8 %) мали низький рівень генотипового ефекту (ранг 3), до яких віднесено Подільську ниву, FGMUT 293, Tobak, Amandus та Tianmin 366. Стандарт Бунчук проявив низький рівень генотипового ефекту за врожайністю (ранг 3).

У результаті проведених досліджень встановлено, що генотиповий ефект ϵ_i за врожайністю серед диференційованих сортів за стійкістю до низьких температур був у межах від $-1,33$ до 1,31.

За ступенем пластичності R_i визначено, що кількість гомеостатичних сортів з високою стабільністю реалізації врожайності (ранг 1) налічувала вісім генотипів (38,1 %), а саме: Порадниця, Октава одеська, Понтійка, Zamolxe, Tobak, Estivus, Futurum, NE 10507. Середнім рівнем чутливості до мінливих умов вирощування (ранг 2) за формуванням урожайності характеризувалися п'ять сортів (23,8 %) — Основа одеська, Подільська нива, Altigo, Tianmin 366 та NE 12443. Серед короткостеблих генотипів ідентифіковано вісім сортів з високою чутливістю до лімітуючих факторів довкілля (ранг 3), зокрема: Зорянка, Producent, Amandus тощо. Стандартний сорт Бунчук характеризувався високою чутливістю до умов вирощування (ранг 3).

За результатами аналізу впливу низьких температур на показники екологічної пластичності пшениці м'якої озимої, суми рангів генотипового ефекту (ϵ_i) та коефіцієнту регресії (R_i) врожайності, було визначено чотири сорти (19,0 %) з найвищим генетичним потенціалом адаптивності (сума рангів 2) до мінливих умов вирощування та високою стресостійкістю до впливу критичних температур вимерзання: Октава одеська ($\epsilon_i = 0,87$; $R_i = 0,75$), Понтійка ($\epsilon_i = 0,53$; $R_i = 0,59$), Zamolxe ($\epsilon_i = 1,31$; $R_i = 0,55$) та NE 10507 ($\epsilon_i = 0,36$; $R_i = 0,66$). Деяко нижчим рівнем екологічної пластичності (сума рангів 3) характеризувалися Порадниця ($\epsilon_i = -0,13$; $R = 0,69$), Futurum ($\epsilon_i = -0,26$; $R_i = 0,44$), Estivus ($\epsilon_i = -0,03$; $R_i = 0,14$) та NE 12443 ($\epsilon_i = 0,45$; $R_i = 1,17$). Суму рангів 4 набрали 33,3 % сортів:

Таблиця 3. Кореляція екологічної пластичності (суми рангів генотипового ефекту та ступеня пластичності) за врожайністю зі стійкістю до низьких температур у сортів пшениці м'якої озимої, 2020—2023 рр.

Ознака	Екологічна пластичність за врожайністю, т/га
Стійкість до підмерзання листя у ранньовесняний період, бал	$-0,42^*$
Амплітуда стійкості до підмерзання листя у ранньовесняний період, A_m	$0,55^*$
Морозостійкість (стійкість до критичних температур вимерзання, °C)	$0,41^*$

Примітка: * $P < 0,05$.

Перевага ($\epsilon_i = 0,45$; $R_i = 1,50$), Основа одеська ($\epsilon_i = 0,16$; $R_i = 0,86$), Fajura ($\epsilon_i = 0,42$; $R_i = 1,48$); Producent ($\epsilon_i = 0,37$; $R_i = 1,67$), Tobak ($\epsilon_i = -1,02$; $R_i = 0,72$), Palmus ($\epsilon_i = 0,49$; $R_i = 1,19$) та Altigo ($\epsilon_i = 0,17$; $R_i = 0,96$). Суму рангів 5 склали сорти Пейзаж ($\epsilon_i = 0,28$; $R_i = 1,34$), Зорянка ($\epsilon_i = 0,22$; $R_i = 1,36$), Подільська нива ($\epsilon_i = -0,39$; $R_i = 1,11$) та Tianmin 366 ($\epsilon_i = -1,10$; $R_i = 0,92$). Найменш адаптованими до впливу стресових факторів навколишнього середовища (сума рангів 6) були сорти FGMUT 293 ($\epsilon_i = -0,76$; $R_i = 1,41$) та Amandus ($\epsilon_i = -1,33$; $R_i = 1,20$), частка яких серед досліджуваного набору генотипів становила 9,5 %. Стандартний сорт Бунчук ($\epsilon_i = -1,03$; $R_i = 1,31$) за екологічною пластичністю характеризувався сумою рангів 6.

За результатами аналізу взаємозв'язків між досліджуваними ознаками встановлено, що у сортів пшениці м'якої озимої амплітуда стійкості до підмерзання листя у ранньовесняний період на значному позитивному рівні корелює із сумою рангів генотипового ефекту і ступеня пластичності врожайності — $r = 0,55$ (табл. 3).

Стійкість до підмерзання листя у ранньовесняний період та стійкість до критичних температур вимерзання корелювали із сумою рангів генотипового ефекту і ступеня пластичності врожайності на помірному негативному та позитивному рівнях — $r = -0,42$ та $r = 0,41$ відповідно. Значущість зв'язків становила 95 % ($P < 0,05$).

Отже, серед стійкості до абіотичних чинників, як лімітуючих факторів навколишнього середовища, стійкість до підмерзання листя у ранньовесняний період та стійкість до критичних температур вимерзання помірно впливають на негативному та позитивному рівнях відповідно на формування потенціалу та стабільності врожайності.

У зв'язку з глобальним потеплінням температура повітря, як один з основних екологічних факторів, що впливає на функціональну здатність систем та життєздатність живих організмів, привертає до себе все більше уваги дослідників та створює передумови для глибоких досліджень, пов'язаних із адаптацією пшениці м'якої озимої до мінливих умов довкілля.

Чимало досліджень проведено стосовно визначення факторів впливу на екологічну пластичність пшениці м'якої озимої. Отримані авторами даної роботи результати свідчать, що стійкість до низьких температур сортів *T. aestivum*,

у контексті глобального потепління помірно впливає на екологічну пластичність. Встановлені в роботі закономірності кореляцій між стійкістю до підмерзання листя у ранньовесняний період та стійкістю до критичних температур вимерзання із екологічною пластичністю за врожайністю мають значну практичну цінність, оскільки вони є підґрунтям для визначення пріоритетних напрямів у селекції на адаптивність. На відміну від отриманих нами результатів, науковцями з Китаю Y. Wu та співавт. [32] у роботі, присвяченій прогнозуванню втратам врожаю пшениці озимої у зв'язку з пошкодженнями, спричиненими впливом критичних температур вимерзання в центральній частині рівнини Хуан-Хуай, зазначено, що недостатня стійкість до гіпотермії призводить до зниження врожайності ($P < 0,05$) та екологічної пластичності. Проте українські вчені С.П. Лифенко та співавт. [5] стверджують, що для підвищення адаптивного потенціалу у нових сортів варто приділяти увагу не лише рівням морозо- та зимо-, але і посухостійкості у вихідному матеріалі, не акцентуючи увагу лише на стійкості до гіпотермії як на основному лімітуючому факторі адаптивності.

У цілому, при створенні генотипів з високою адаптивністю та врожайністю часто виникали значні труднощі. Так, А. Ferrante та співавт. [16], досліджуючи формування врожайності 12 сортів пшениці, створених за період 1973—2015 рр., дійшли висновку, що селекція на підвищення рівня врожайності не покращила морозостійкість. Науковці визначили, що коли для запобігання весняним заморозкам використовують пересувні, обігрівальні камери простежується збільшення врожайності на 47,5 % порівняно з контролем, тобто без захисту від впливу низьких температур. Варіювання врожайності при цьому було в межах від ($179 \pm 20,1$) до ($264 \pm 13,3$) г/м² [16]. Проте наші результати досліджень доводять, що серед генотипу пшениці м'якої озимої існують генотипи з толерантністю до гіпотермії, високим генетичним потенціалом адаптивності (сума рангів 2) та здатністю до формування високої врожайності (понад 128 % відповідно до стандарту). На формування генотипом стійкості до гіпотермії значно впливають особливості періоду загартування. Так, між морозостійкістю і температурою в період загартування встанов-

лено сильний зворотний кореляційний зв'язок ($r = -0,77$) [11].

Формування високих та стабільних рівнів урожайності визначається сукупністю генотипових особливостей і здатністю протистояти впливу абіотичних [23, 25] та біотичних стресових чинників [34]. На думку вчених різних країн, толерантності рослин до абіотичних стресів сприяє антиоксидантна активність, зумовлена функціональністю ферменту каталази, який є дуже ефективним у нейтралізації високих концентрацій пероксиду водню [19]. Серед біотичних чинників все більшого значення для екологічної пластичності генотипів набуває стійкість пшениці м'якої озимої до поширених збудників хвороб. Встановлено, що у сортів *T. aestivum* стійкість до збудників бурої листової іржі та піренофорозу на значному негативному рівні корелюють із сумою рангів генотипового ефекту і ступенем пластичності врожайності ($r = -0,65$, $P < 0,01$ та $r = -0,58$, $P < 0,01$ відповідно) [34].

Попри різноманітність проявів лімітуючих факторів екологічної пластичності, більшість вчених наголошує, що диференціація вихідного матеріалу за врожайністю та адаптивними властивостями в певних агроекологічних умовах вирощування є досить важливою та актуальною [4, 8], особливо з кліматичними змінами [1, 22, 23]. В результаті наполегливої роботи, спрямованої на вдосконалення стресостійкості пшениці м'якої озимої, створено та виділено генотипи з високими адаптивними властивостями зокрема: УК 2621/18 (гомеостатичність (Ном) = 1416,0) і УК 9855/18 (Ном = 1008,0), які відзначаються толерантністю до низьких температур, посухи та груповою стійкістю до поширених збудників хвороб [23].

Отже, серед основних властивостей сорту, які визначають урожайний та адаптивний потенціал, є стійкість до низьких температур, на формування якої в межах фізіологічних відмінностей між сортами впливає сукупність факторів. Незважаючи на значний обсяг проведених попередниками досліджень, визначені авторами даного рукопису закономірності щодо впливу низьких температур на показники екологічної пластичності пшениці м'якої озимої є унікальними та сприяють створенню сортів з підвищеною адаптивністю.

В перспективі подальших досліджень планується поглиблене вивчення геноміки та метаболоміки диференційованих сортів за показниками екологічної пластичності, що надасть можливість систематизувати короткостеблі генотипи за молекулярно-генетичними та біохімічними особливостями, нерозривно пов'язаними з адаптацією пшениці м'якої озимої до низьких температур.

ВИСНОВКИ

Серед диференційованих сортів пшениці м'якої озимої за стійкістю до низьких температур шляхом аналізу суми рангів генотипового ефекту ϵ_i та коефіцієнту регресії R_i врожайності, визначено генотипи, які відзначаються найвищим генетичним потенціалом адаптивності (сума рангів 2), стійкістю до низьких температур та формуванням врожайності понад 127 % до стандарту: Октава одеська ($\epsilon_i = 0,87$; $R_i = 0,75$), Понтійка ($\epsilon_i = 0,53$; $R_i = 0,59$), Zamolxe ($\epsilon_i = 1,31$; $R_i = 0,55$) та NE 10507 ($\epsilon_i = 0,36$; $R_i = 0,66$). Таким чином, вказані сорти є найбільш цінним вихідним матеріалом для ефективності селекції на підвищення адаптивності в контексті змін клімату.

Виділено генотипи пшениці м'якої озимої, що відзначаються високою стійкістю до підмерзання листя у ранньовесняний період та стійкістю до критичних температур вимерзання: Понтійка, Основа одеська, Октава одеська, Пейзаж, Перевага, Zamolxe та NE 10507.

Визначено, що у сортів пшениці м'якої озимої, диференційованих за стійкістю до гіпотермії, генотиповий ефект ϵ_i врожайності був у межах від $-1,33$ до $1,31$, а коефіцієнт регресії R_i — від $0,14$ до $1,67$, що вплинуло на варіювання екологічної пластичності, спектр суми рангів, який при цьому був у межах від 2 до 6.

Встановлено, що у сортів пшениці м'якої озимої стійкість до підмерзання листя у ранньовесняний період корелює із сумою рангів генотипового ефекту і ступенем пластичності врожайності на помірному негативному рівні, а саме: $r = -0,42$, $P < 0,05$, а стійкість до критичних температур вимерзання із сумою рангів генотипового ефекту і ступенем пластичності врожайності корелює на помірному позитивному рівні ($r = 0,41$, $P < 0,05$).

ЛІТЕРАТУРА

1. Бондаренко МК, Назаренко ММ. Пристосування сортів пшениці м'якої озимої французької селекції до умов Північного Степу України. Агрологія. 2020; 3(4): 193—8.
2. Гурьев БП, Литун ПП, Гурьева ИА. Методические рекомендации по экологическому сортоиспытанию кукурузы. Харьков: УНИИРСИГ; 1981. 31 с.
3. ДСТУ 4749:2007 Пшениця озима. Метод визначення морозостійкості сортів. [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України; 2008. 8 с.
4. Кириленко ВВ, Гуменюк ОВ, Дергачов ОЛ, та ін. Методи підвищення морозо-, зимостійкості пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.) в умовах Лісостепу України. Фактори експериментальної еволюції організмів. 2015; 16: 120—4.
5. Лифенко СП, Наконечний МЮ, Нарган ТП. Особливості селекції сортів пшениці м'якої озимої степового еко типу у зв'язку зі змінами клімату в умовах Півдня України. Вісник аграрної науки. 2021; 99(3): 53—62.
6. Майор ПС. Взаємозв'язок між вмістом вільного проліну, розчинних цукрів та обводненістю тканин у рослинах озимої пшениці протягом осінньо-зимового періоду. Физиология и биохимия культурных растений. 2010; 42(4): 298—305.
7. Моргун ВВ, Майор ПС. Зимо- і морозостійкість озимих злакових культур. В: Моргун ВВ, редактор. Проблеми та перспектив розвитку. Київ: Логос; 2009. Т. 2. С. 105—65.
8. Самойлик МО, Устинова ГЛ, Лозінський МВ, та ін. Оцінка врожайних та адаптивних властивостей нових сортів пшениці м'якої озимої. Вісник аграрної науки. 2023; 101(2): 53—62. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202302-05>.
9. Ткачик СО, редактор. Методика проведення експертизи сортів рослин групи зернових, круп'яних та зернобобових на придатність до поширення в Україні. Вінниця: ФОП Корзун ДЮ; 2016. 82 с.
10. Шевченко ОВ. Вплив кліматичних змін на сільськогосподарське землекористування в Україні. Збалансоване природокористування. 2023; (4): 108—14.
11. Юрченко ТВ, Пикало СВ, Харченко МВ. Морозостійкість новостворених сортів пшениці м'якої озимої миронівської селекції за різних умов загартування. Вісник аграрної науки. 2023; 101 (11): 35—43.
12. Chaddock RE. Exercises in statistical methods. Houghton: Houghton Mifflin; 1952. 166 p.
13. Chaudhry S, Sidhu GPS. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. Plant Cell Rep. 2022; 41(1): 1—31.
14. Chervenkov H, Slavov K. Inter-annual variability and trends of the frost-free season characteristics over central and southeast Europe in 1950-2019. J Cent Eur Agric. 2022; 23(1): 154—64.
15. Dong J, Lu H, Wang Y, et al. Evaluation of winter wheat yield based on light use efficiency model and wheat variety data. ISPRS J Photogramm. Remote Sens. 2020; 160: 18—32.
16. Ferrante A, Cossani CM, Able JA, et al. Yield response to frost in a set of historic wheat varieties. Field Crops Res [Internet]. 2024 Apr 15 [cited 2025 Apr 28]; 310: 109336. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429024000893>
17. Gangola MP, Ramadoss BR. Biochemical, physiological and molecular avenues for combating abiotic stress tolerance in plants. In: Wani SH, editor. Sugars play a critical role in abiotic stress tolerance in plants. London: Academic Press; 2018. p. 17—38.
18. Guo X, Liu D, Chong K. Cold signaling in plants: Insights into mechanisms and regulation. J Integr Plant Biol. 2018; 60(9): 745—56.
19. Hasanuzzaman M, Bhuyan MHM, Zulfiqar F, et al. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. Antioxidants [Internet]. 2020 Jul 29 [cited 2025 Apr 28]; 9(8): 681. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3921/9/8/681>
20. Hassan MA, Xiang C, Farooq M, et al. Cold stress in wheat: plant acclimation responses and management strategies. Front Plant Sci [Internet]. 2021 Jul 08 [cited 2025 Apr 28]; 12: 676884. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2021.676884/full>
21. Hosseinifard M, Stefaniak S, Ghorbani Javid M, et al. Contribution of exogenous proline to abiotic stresses tolerance in plants: a review. Int J Mol Sci [Internet]. 2022 May 06 [cited 2025 Apr 28]; 23(9): 5186. Available from: <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/9/5186>
22. Kernasyuk Yu. Global climate crisis and its impact on the development of the agricultural sector of the Ukrainian economy. Ekonomika APK. 2021; 28(9): 91—101.
23. Khomenko L. Creation of winter wheat source material with increased adaptive potential to adverse environmental conditions. EUREKA: Life Sciences. 2021; (6): 25—33.
24. Kolupaev YuE, Horielova EI, Yastreb TO, et al. State of antioxidant system in triticale seedlings at cold hardening of varieties of different frost resistance. Cereal Res. Commun. 2020; 48(2): 165—71.
25. Langridge P, Reynolds M. Breeding for drought and heat tolerance in wheat. Theor Appl Genet. 2021; 134: 175—69.

26. Lenoir A, Slafer GA, Siah A, et al. Plasticity of wheat yield components in response to N fertilization. Eur J Agron [Internet]. 2023 Aug 12 [cited 2025 Apr 28]; 150: 126933. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030123002010>
27. Makaova BYe, Tyshchenko VM. Analysis of physiological mechanisms of adaptation and resistance of winter wheat accessions of different geographical origins. Plant Breeding and Seed Production. 2023; (123): 108—19.
28. Pirysh AV, Yurchenko TV, Hudzenko VM, et al. Features of modern winter wheat varieties in terms of winter hardiness components under conditions of Ukrainian forest-steppe. Regul Mech Biosyst. 2021; 12(1): 153—9.
29. Romanenko KO, Babenko LM, Smirnov OE, et al. Antioxidant protection system and photosynthetic pigment composition in *Secale cereale* subjected to short-term temperature stresses. Open Agric J [Internet]. 2022 Sep 22 [cited 2025 Apr 28]; 16(1): e187433152206273. Available from: <https://openagriculturejournal.com/VOLUME/16/ELOCATOR/e187433152206273/>
30. Rousi E, Kornhuber K, Beobide-Arsuaga G, et al. Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. Nat. Commun [Internet]. 2022 Jul 04 [cited 2025 Apr 28]; 13(1): 3851. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-31432-y>
31. Turk H, Genisel M. Melatonin-related mitochondrial respiration responses are associated with growth promotion and cold tolerance in plants. Cryobiology. 2020; 92: 76–85.
32. Wu Y, Liu B, Gong Z, et al. Predicting yield loss in winter wheat due to frost damage during stem elongation in the central area of Huang-huai plain in China. Field Crops Res [Internet]. 2022 Feb 01 [cited 2025 Apr 28]; 276: 108399. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429021003452>
33. Yarosh A., Kucherenko, Ye, Barylko M, et al. Ecological plasticity of soft winter wheat varieties and resistance to snow mould pathogen (*Microdochium nivale* (Fr.) Samuels & I.C. Hallett). Sci. Horiz. 2024; 27(10): 31–42.
34. Yarosh AV, Kucherenko YeYu, Riabchun VK, et al. Environmental plasticity of short-stemmed winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars and resistance to yellow leaf blotch (*Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechsler) and brown (leaf) rust (*Puccinia recondita* f. sp. *tritici* Rob. et Desm.). The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series “Biology”. 2024; 43: 33—43.
35. Zhang H, Liu L, Wang Z, et al. Induction of low temperature tolerance in wheat by pre-soaking and parental treatment with melatonin. Molecules [Internet]. 2021 Feb 23 [cited 2025 Apr 28]; 26(4): 1192. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/4/1192>

Отримано 28.04.2025

Прийнято до друку 11.09.2025

A.V. Yarosh*, N.I. Riabchun, V.K. Riabchun, N.V. Kuzmyshyna, O.V. Solonechna
Yuriev Plant Production Institute of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine,
National Center for Plant Genetic Resources of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
* jarosh_andrij@ukr.net

THE IMPACT OF LOW-TEMPERATURE TOLERANCE ON THE ENVIRONMENTAL PLASTICITY INDICATORS OF WINTER BREAD WHEAT IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

This study examines how low-temperature tolerance influences environmental plasticity of winter bread wheat — a critical factor for crop homeostasis amid global warming challenges. Among winter wheat genotypes graded by hypothermia tolerance, 19.0 % demonstrated the highest environmental plasticity for yield. Genotypes with superior genetic potential adaptability (identified by the lowest rank sums (rank sum = 2) of genotypic effect and regression coefficient (Oktava Odeska, Pontiyka, Zamolxe, NE 10507) yielded 128—148 % related to the check cultivar. In the winter bread wheat cultivars under investigation, there was a moderate negative correlation between freezing tolerance of winter bread wheat leaves in early spring and rank sum of genotypic effect and yield plasticity ($r = -0.42$; $P < 0.05$) and a moderate positive correlation between tolerance to critical freezing temperatures and rank sum of genotypic effect and yield plasticity ($r = 0.41$; $P < 0.05$). The selected winter bread wheat genotypes with high genetic potentials of environmental plasticity represent high-value starting materials for breeding new wheat cultivars that would be adaptable to current climatic changes.

Key-words: freezing tolerance, genotypic effect, adaptive potential, stress tolerance, winter bread wheat.