

ОЦІНКА ХОЛОДОСТІЙКОСТІ ГІБРИДІВ КУКУРУДЗИ РІЗНИХ ГЕТЕРОЗИСНИХ МОДЕЛЕЙ

К. В. Денисюк, В. Ю. Черчель, Н. А. Боденко, Б. В. Дзюбецький, О. Л. Гайдаш, М. О. Круглова
Державна установа Інститут зернових культур НААН, вул. Володимира Вернадського, 14,
м. Дніпро, 49009, Україна

Актуальність. Селекція холодостійких генотипів кукурудзи є актуальним напрямом сучасних досліджень, адже дозволяє запобігти втратам урожаю, пов'язаним із пошкодженням проростків і нерівномірністю сходів через дію низьких температур на ранніх етапах вегетації. **Мета роботи.** Оцінити холодостійкість гібридів кукурудзи, які належать до різних гетерозисних моделей, дослідити вплив генотипу на прояв ознаки та визначити гетерозисні моделі, для яких характерний високий рівень холодостійкості. **Матеріали і методи.** Як матеріал дослідження використовували одинадцять гібридів кукурудзи. Для оцінки холодостійкості використовували лабораторний метод, що полягав у визначенні схожості насіння і довжини корінця за пониженої температури (+8 °C). **Результати.** Спостерігалася істотна диференціація гібридів кукурудзи відносно рівня схожості насіння за пониженої температури (+8 °C) (14,7–93,3 %) при лабораторній схожості (за +26 °C) 95,0–100,0 %. Довжина корінця, що утворився в умовах холодостресу, знаходилася у діапазоні 1,1–14,6 мм, залежно від генотипу. Вплив генотипу гібрида на лабораторну схожість становив 65,8 %, на схожість за пониженої температури – 90,0 %, на довжину корінця – 96,5 %. **Висновки.** Оцінено холодостійкість одинадцяти гібридів кукурудзи та встановлено вплив генотипу на цей показник. Із загального числа зразків виділено чотири високохолодостійкі, чотири холодостійкі і три нехолодостійкі гібриди. Гібриди (ДК4168М×ДК365СВ3М)×ДКД3074МВ, (ДК1693М×ДК3068)×ДК2323МВ, (ДК9527С×ДК25323С3М)×ДК744СВ3М і ДК32633С3М×ДКД3074МВ визначені як високохолодостійкі, (ДК4441М×ДК4401)×ДКД3074МВ, (ДК365М×ДК7744)×ДКД3074МВ, (ДК7443М×ДК8816)×ДК2323МВ і (ДК7443М× ДК7400)×ДК2180 – як холодостійкі і (ДК7443М×ДК7436)×ДК2323МВ, (ДК7455М×ДК7443СВ3М)×ДК2323МВ і (ДК296С×ДК2980)×ДК9178 – як нехолодостійкі. Найвищі показники холодостійкості частіше спостерігалися у гібридів гетерозисних моделей Айодент×Лакнастер, Мікс×Ланкастер, Мікс×Айодент, Мікс×BSSS.

Ключові слова: *Zea mays* (L.), гібриди, гетерозисні моделі, толерантність до холоду, стійкість до стресових абіотичних факторів, схожість насіння.

Вступ. Кукурудза (*Zea mays* L.) є однією з найважливіших зернових культур світового та вітчизняного аграрного виробництва. Вона характеризується універсальним використанням як цінна продовольча, кормова і технічна культура. Україна належить до про-

відних виробників і експортерів кукурудзи, однак ефективність її вирощування значною мірою визначається кліматичними умовами та адаптивним потенціалом вирощуваних гібридів.

Одним із обмежувальних чинників про-

Інформація про авторів:

Денисюк Катерина Вікторівна, канд. біол. наук, ст. наук. співр., e-mail: kvderkach@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1871-9585>

Надійшла:
06.03.2026

Черчель Владислав Юрійович, доктор с.-г. наук, професор, академік, в.о. директора, <https://orcid.org/0000-0002-0429-4961>

Прийнята:
08.04.2026

Боденко Наталя Анатоліївна, канд. с.-г. наук, ст. наук. співр., учений секретар, <https://orcid.org/0000-0002-5881-4440>

Дзюбецький Борис Володимирович, доктор с.-г. наук, професор, академік, зав. відділу селекції зернових культур, <https://orcid.org/0000-0003-2955-232X>

Опублікована:
26.05.2026

Гайдаш Олександр Леонідович, канд. с.-г. наук, ст. дослідник, завідувач лабораторії методів селекції та первинного насінництва, <https://orcid.org/0000-0001-6736-0367>

Круглова Маргарита Олегівна, завідувачка лабораторії селекції кукурудзи скоростиглих гібридів, <https://orcid.org/0009-0007-3989-6624>



дуктивності кукурудзи є вплив низьких температур на ранніх етапах росту й розвитку рослин. Кукурудза є теплолюбною рослиною, ріст проростків якої істотно сповільнюється за температури нижче 10 °C і практично припиняється за 6–8 °C [1, 2]. За таких умов клітини й тканини проростків можуть зазнавати незворотних ушкоджень. Низькі температури в період проростання зумовлюють зміни мембранної стабільності і фотосинтетичної активності, накопичення активних форм кисню, порушення гормонального гомеостазу, пригнічують розвиток кореневої системи через пошкодження меристеми зародкового кореня, викликають затримку проростання, зменшують енергію проростання, висоту рослин, довжину кореня, поглинальну здатність кореневої системи щодо мінеральних елементів, вміст хлорофілу в листках. У результаті прояву вказаних явищ спостерігаються хлороз, в'янення, некроз або, навіть, загибель проростків [2–5]. Проростання насіння в холодному ґрунті часто супроводжується ураженням грибковими інфекціями, інтенсивність і тяжкість яких у таких умовах зростають [2, 6].

Отже, весняні зниження температури після сівби можуть спричинити пошкодження проростків і нерівномірність сходів, що зумовлює особливу роль холодостійкості як селекційної ознаки, яка визначає стабільність урожайності та ефективність реалізації потенціалу культури в різних ґрунтово-кліматичних умовах.

Разом з тим, ранні строки сівби, які потребують холодостійкості рослин, є агрономічно доцільними для кукурудзи, оскільки сприяють більш ранньому початку цвітіння суцвіть, до настання періоду спеки у літні місяці, а також сприяють зниженню вологості зерна під час збирання врожаю [6]. Високі температури під час цвітіння негативно впливають на фертильність пилку та здатність приймання його приймочками, через що спостерігається череззерниця качанів і знижується урожайність гібридів кукурудзи. Низька вологість зерна під час збирання, насамперед, сприяє скороченню витрат на сушіння зерна та якість його зберігання. Тому ранній посів холодостійких гібридів розглядається як ефективна стратегія сталого виробництва зерна кукурудзи в умовах гло-

бального потепління, що дає змогу зменшити негативний вплив стресових факторів у період генеративного розвитку рослин.

Рослини кукурудзи, залежно від генотипових особливостей, мають в більшій чи меншій мірі виражені захисні механізми протидії низьким короткочасним температурам. Зазвичай це складні багатофакторні взаємодії регуляторних білків, фітогормонів і неорганічних речовин. У рослин спостерігаються накопичення розчинних цукрів, синтез захисних і антифризних білків та зміни ліпідного складу мембран, направлені на підтримку цілісності клітинних мембран і функціональності біологічно активних білків, що забезпечує збереження базових фізіологічних процесів [2, 4].

Експериментальні дослідження засвідчили, що стрес від холоду (4 °C протягом 4 діб) у фазі трьох листків значно пригнічував ріст як холодостійких, так і холодочутливих генотипів кукурудзи. Водночас холодостійкі генотипи характеризувалися вищою антиоксидантною здатністю, інтенсивнішим накопиченням осмотичних регуляторів і нижчим рівнем перекисного окислення ліпідів мембран. Ідентифіковано 108 диференційно експресованих білків, синтезованих у відповідь на дію стресу від холоду [4].

Виявлено низку генів, пов'язаних із формуванням холодостійкості, зокрема *ZmCBF*, *ZmCDPK1*, *ZmMAPKKK*, *ZmRR1* [7], *ZmPLD15* [8], *Zm00001d04319*, *Zm00001d039219* [9], *ZmMYB53* [10], *ZmTH1* [11] та інші. Поряд із генетичними підходами для зменшення негативного впливу низьких температур на проростки кукурудзи застосовують різні способи передпосівної обробки насіння. Зокрема, використання композитного покриття на основі оксиду графену ефективно послаблює низькотемпературний стрес, стимулює проростання і ріст, а також знижує рівень оксидативного стресу шляхом регуляції активності антиоксидантних ферментів і вмісту антиоксидантів. Таке покриття підвищує активність пероксидази в коренях та обмежує накопичення супероксидних аніонів та перекису водню в зародку [12].

Водночас використання в селекції кукурудзи холодостійких генотипів є економічно ефективним підходом для досягнення стабільної урожайності в умовах низько температурного

стресу. Оцінка гібридів кукурудзи за ознакою холодостійкості дозволяє відбирати генотипи, здатні забезпечувати стабільну урожайність за дії низьких температур, та може бути ефективно використана в селекційних програмах зі створення нових адаптивних генотипів кукурудзи [8].

Метою роботи була оцінка холодостійкості одинадцяти гібридів кукурудзи селекції ДУ ІЗК НААН, які належать до різних гетерозисних моделей. Завданнями досліджень були аналіз лабораторної схожості насіння гібридів кукурудзи, довжини корінця при холодному пророщенні, визначення холодостійкості зразків, впливу генотипу на прояв ознак, пов'язаних з холодостійкістю, виявлення гетерозисних моделей, які забезпечують високий рівень холодостійкості.

Матеріали та методи. Як матеріал для дослідження використали одинадцять гібридів кукурудзи селекції ДУ ІЗК НААН, представлених різними гетерозисними моделями: (ДК4168М×ДК365СВ3М)×ДКД3074МВ (Айодент×Ланкастер), (ДК1693М×ДК3068)×ДК2323МВ (Айодент×BSSS), (ДК9527С×ДК25323С3М)×ДК744СВ3М (Мікс×Айодент), ДК32633С3М×ДКД3074МВ (Мікс×Ланкастер), (ДК4441М×ДК4401)×ДКД3074МВ (Мікс×Ланкастер), (ДК365М×ДК7744)×ДКД3074МВ (Айодент×Ланкастер), (ДК7443М×ДК8816)×ДК2323МВ (Мікс×BSSS), (ДК7443М×ДК7400)×ДК2180 (Айодент×Ланкастер), (ДК7443М×ДК7436)×ДК2323МВ (Айодент×BSSS), ДК7455М×ДК7443СВ3М)×ДК2323МВ (Айодент×BSSS), (ДК296С×ДК2980)×ДК9178 (Ланкастер×Мікс).

Ступінь холодостійкості гібридів кукурудзи визначали за допомогою лабораторного методу пророщування насіння за температури нижче мінімуму проростання [13–14]. Насіння пророщували протягом трьох тижнів рулонним методом в холодильній камері за температури +8 °С.

Гібриди кукурудзи оцінювали на холодостійкість за чотирибальною шкалою залежно від схожості насіння наступним чином: 4 бали – 91–100%, 3 бали – 81–90%, 2 бали – 61–80%, 1 бал – 60% і менше.

Оцінку енергії проростання насіння гібридів кукурудзи також проводили за чотирибальною шкалою за довжиною корінця, що утворився: 4 бали – 5,1 мм і більше, 3 бали –

3,6–5,0 мм, 2 бали – 2,1–3,5 мм, 1 бал – 2,0 мм і менше.

Для підсумкової (інтегральної) оцінки генотипів кукурудзи на холодостійкість додавали одержані бали за схожістю і довжиною корінця. Були визначені наступні рангові підсумкові індекси: високохолодостійкі гібриди – 7–8 балів, холодостійкі – 5–6 балів, слабохолодостійкі – 4 бали, нехолодостійкі – 3 бали і нижче.

Для урахування похибки при оцінці схожості насіння в умовах пониженої температури паралельно визначали лабораторну схожість за загальноприйнятою методикою (за температури 26 °С протягом 5 діб).

Дослідження проводили у триразовій повторності. Кількість зерен на одну повторність – 100 штук.

Статистичний аналіз результатів проводили згідно з S. J. Welham [15]. Дані в таблицях представлені у вигляді $x \pm t_{s(x)}$, де x – середнє арифметичне значення показника, $t_{s(x)}$ – довірчий інтервал, розрахований як добуток похибки середнього арифметичного та критерія Стьюдента за рівня значущості 0,05. Сила впливу фактора в таблицях дисперсійного аналізу представлена у вигляді $\eta^2 \pm \Delta_{\eta^2}$, де η^2 – показник сили впливу фактора, Δ_{η^2} – довірчий інтервал, розрахований як добуток похибки показника сили впливу і коефіцієнта Фішера за рівня значущості 0,05.

Результати та обговорення. Усі гібриди кукурудзи, що досліджувалися мали високу лабораторну схожість насіння, яка змінювалася у межах 95,0–100,0 %, що свідчило про відсутність значних відмінностей між генотипами за оптимальних умов пророщування. Разом з тим, спостерігалася істотна диференціація генотипів за рівнем схожості в умовах пониженої температури (8 °С) – 14,7–93,3 %, та інтенсивністю росту корінця при дії холоду – 1,1–14,6 мм (табл.1).

З досліджених гібридів 36,4 % були високохолодостійкими: (ДК4168М×ДК365СВ3М)×ДКД3074МВ, ДК1693М×ДК3068)×ДК2323МВ, (ДК9527С×ДК25323С3М)×ДК744СВ3М і ДК32633С3М×ДКД3074МВ, і мали інтегральні бали холодостійкості 8 і 7, лабораторну схожість – 98,7–100,0 %, схожість за пониженої температури – 89,0–93,3 % і довжину корінця – 5,8–14,6 мм. Ще 36,4 % гібридів з дослідної вибірки: (ДК4441М×ДК4401)×

Таблиця 1. Холодостійкість гібридів кукурудзи

Гібрид	Лабораторна схожість, %	Схожість за 8 °С		Довжина корінця за 8 °С		Холодостійкість, бал
		%	бал	Мм	бал	
(ДК4168М×ДК365СВЗМ)×ДКД3074МВ	99,3±0,9	93,3±2,9	4	5,8±0,3	4	8
(ДК1693М×ДК3068)×ДК2323МВ	99,3±0,9	91,0±3,3	4	8,4±0,5	4	8
(ДК9527С×ДК25323СЗМ)×ДК744СВЗМ	100,0±0,0	91,0±3,3	4	14,6±0,5	4	8
ДК32633СЗМ×ДКД3074МВ	98,7±1,3	86,0±4,0	3	12,9±0,5	4	7
(ДК4441М×ДК4401)×ДКД3074МВ	95,0±2,5	84,7±4,2	3	5,0±0,3	3	6
(ДК365М×ДК7744)×ДКД3074МВ	98,0±1,6	87,0±3,9	3	4,4±0,2	3	6
(ДК7443М×ДК8816)×ДК2323МВ	99,3±0,9	62,0±5,6	2	6,8±0,6	4	6
(ДК7443М×ДК7400)×ДК2180	98,3±1,5	89,3±3,6	4	2,5±0,1	2	6
(ДК7443М×ДК7436)×ДК2323МВ	98,7±1,3	45,3±5,7	1	2,2±0,2	2	3
(ДК7455М×ДК7443СВЗМ)×ДК2323МВ	99,0±1,1	28,7±5,2	1	1,2±0,1	1	2
(ДК296С×ДК2980)×ДК9178	99,0±1,1	14,7±4,1	1	1,1±0,1	1	2

ДКД3074МВ, (ДК365М×ДК7744)×ДКД3074МВ, (ДК7443М×ДК8816)×ДК2323МВ і (ДК7443М×ДК7400)×ДК2180 були холодостійкими, бал холодостійкості дорівнював 6, лабораторна схожість знаходилась в діапазоні 95,0–99,3 %, схожість за пониженої температури – 62,0–89,3 %, довжина корінця – 2,5–6,8 мм. Решта 27,2 % генотипів: (ДК7443М×ДК7436)×ДК2323МВ, (ДК7455М×ДК7443СВЗМ)×ДК2323МВ і (ДК296С×ДК2980)×ДК9178 були нехолодостійкими, характеризувалися балом холодостійкості – 2–3, лабораторна схожість – 98,7–99,0 %, при холодному пророщенні за 8 °С – 14,7–45,3%, довжина корінця – 1,1–2,2 мм.

Отже, встановлено, що всі гібриди кукурудзи в досліді істотно відрізнялися за реакцією на понижену температуру, що проявилось у значній варіабельності схожості та інтенсивності росту корінця. Виділено групи високохолодостійких, холодостійких і нехолодостійких гібридів, що вказує на провідну

роль генотипу у формуванні адаптивних реакцій кукурудзи на холод на ранніх етапах розвитку. Високохолодостійкі гібриди поєднували стабільну схожість за 8 °С з інтенсивним розвитком кореневої системи, що свідчить про їхній підвищений адаптивний потенціал і робить доцільним їхнє використання як перспективного вихідного матеріалу для вирощування в умовах ранніх строків сівби.

Отримані результати засвідчили значну генотипову мінливість досліджених гібридів кукурудзи за реакцією на холодний стрес на ранніх етапах проростання. На наступному етапі досліджень було визначено силу впливу генотипу на схожість насіння гібридів кукурудзи та довжину корінця за впливу пониженої температури.

Однофакторний дисперсійний аналіз показав істотний вплив ($P=0,002267$) генотипу на рівень лабораторної схожості насіння кукурудзи. Сила впливу генотипу становила $65,8\pm 5,8$ % (табл. 2).

Таблиця 2. Дисперсійний аналіз гібридів кукурудзи за показником лабораторної схожості

Джерело варіювання	<i>df</i>	Сума квадратів	Середній квадрат	F	<i>P</i>	$F_{0,05}$	$\eta^2x \pm \Delta\eta^2x_{0,05}$
Між генотипами	10	51,394	5,139	4,24	0,002267	2,3	$65,8\pm 5,8$
У межах генотипів	22	26,667	1,212				
Разом	32	78,061					

Однофакторний дисперсійний аналіз засвідчив істотний вплив генотипу на схожість насіння при пониженої температурі за високого ступеня статистичної достовірності відмінностей між генотипами ($P=8,9 \cdot 10^{-09}$). Сила впливу генотипу сягала $90,0\pm 1,7$ %, це

вказує на домінуючу роль генетичних факторів у формуванні схожості насіння кукурудзи за стресових температурних умов. Внутрішньогенотипова варіація була порівняно низькою, що підкреслює стабільність прояву ознаки в межах окремих генотипів (табл. 3).

Таблиця 3. Дисперсійний аналіз гібридів кукурудзи за показником схожості за пониженої температури (8 °C)

Джерело варіювання	<i>df</i>	Сума квадратів	Середній квадрат	F	<i>P</i>	$F_{0,05}$	$\eta^2x \pm \Delta\eta^2x_{0,05}$
Між генотипами	10	24006,55	2400,655	19,88	$8,9 \cdot 10^{-09}$	2,3	$90,0 \pm 1,7$
В межах генотипів	22	2656	120,727				
Разом	32	26662,55					

Дисперсійний однофакторний аналіз засвідчив про істотний вплив генотипу на довжину корінця за умов стресу від холоду і високодостовірні відмінності між генотипами ($P=1,06 \cdot 10^{-13}$). Сила впливу генотипу була

вирішальною і становила $96,5 \pm 0,6$ %. Низькі значення суми та середнього квадрата внутрішньогенотипової варіації засвідчили стабільність прояву ознаки у межах окремих генотипів кукурудзи.

Таблиця 4. Дисперсійний аналіз гібридів кукурудзи за показником довжини корінця при пониженій температурі (8 °C)

Джерело варіювання	<i>df</i>	Сума квадратів	Середній квадрат	F	<i>P</i>	$F_{0,05}$	$\eta^2x \pm \Delta\eta^2x_{0,05}$
Між генотипами	10	617,219	61,722	61,2	$1,06 \cdot 10^{-13}$	2,3	$96,5 \pm 0,6$
В межах генотипів	22	22,200	1,009				
Разом	32						

Отже, результати дисперсійного аналізу (табл. 2–4) свідчать про істотну та статистично достовірну диференціацію гібридів кукурудзи за всіма оціненими показниками. Для лабораторної схожості встановлено значущий вплив генотипу, частка якого у загальній дисперсії становила 65,8 %, що вказує на помірно високий рівень генетичної зумовленості цієї ознаки. За показником схожості насіння при пониженій температурі вплив генотипу був значно сильнішим і становив 90,0 % загальної мінливості, що підкреслює вирішальну роль генетичних факторів у формуванні холодостійкості на ранніх етапах онтогенезу. Найвищу генетичну детермінованість виявлено для довжини корінця за пониженої температури, де частка генотипової дисперсії досягала 96,5 %, а внутрішньогенотипова мінливість була мінімальною.

схожості та росту проростків кукурудзи за низьких позитивних температур можуть ефективно використовуватися як критерії для оцінки та добору холодостійких генотипів кукурудзи.

Таким чином, розглянуті показники

Результати двофакторного дисперсійного аналізу схожості зразків кукурудзи залежно від генотипу та температури пророщування показали, що обидва фактори окремо та їхнє поєднання мали статистично достовірний вплив на показник схожості ($P < 0,001$) (табл. 5). Сила впливу температури пророщування була найвищою і пояснювала $33,1 \pm 3,1$ % загальної мінливості ознаки, хоча достовірно не відрізнялася від рівня сили впливу генотипу ($29,7 \pm 13,9$ %) і поєднання обидвох факторів ($30,5 \pm 14,2$ %). Частка випадкових відхилень була порівняно незначною (6,7 %), що підтвердило надійність отриманих результатів і адекватність

Таблиця 5. Двофакторний дисперсійний аналіз схожості гібридів кукурудзи (генотип × температура пророщування)

Джерело варіювання	<i>df</i>	Сума квадратів	Середній квадрат	$F_{\text{факт.}}$	<i>P</i>	$F_{0,05}$	$\eta^2x \pm \Delta$
Генотип	10	11875,09	1187,509	19,48	$4,75 \cdot 10^{-13}$	2,05	$29,7 \pm 13,9$
Температура пророщування	1	13245,83	13245,83	217,31	$1,24 \cdot 10^{-18}$	4,06	$33,1 \pm 3,1$
Генотип × температура пророщування	10	12183,33	1218,333	19,99	$3,05 \cdot 10^{-13}$	2,05	$30,5 \pm 14,2$
Випадкові відхилення	44	2682	60,955	-	-	-	6,7
Разом	65	39986,26	15712,63	-	-	-	-

експериментальної моделі. Таким чином, доведено наявність генетично детермінованих відмінностей між досліджуваними гібридами і їхньої специфічної реакції на зміну температурних умов пророщування.

Було також визначені закономірності між належністю гібридів кукурудзи до певних гетерозисних моделей, що поєднували різні зародкові плазми, та ступенем їхньої холодостійкості. У нашому дослідженні три гібриди, які належали до гетерозисної моделі Айодент×Ланкастер: (ДК4168М×ДК365СВ3М)×ДКД3074МВ, (ДК365М×ДК7744)×ДКД3074МВ, (ДК7443М×ДК7400)×ДК2180, мали бали холодостійкості – 8 (високохолодостійкий) у першій комбінації та 6 балів (холодостійкі) у двох інших. Два генотипи гетерозиготної моделі Мікс×Ланкастер: ДК32633СЗМ×ДКД3074МВ і (ДК4441М×ДК4401)×ДКД3074МВ віднесли до високохолодостійкого (7 балів) і холодостійкого (6 балів), відповідно. Разом з тим, генотип гетерозисної моделі Ланкастер×Мікс: (ДК296С×ДК2980)×ДК9178 був визначений нами як нехолодостійкий (2 бали). Два гібрида гетерозисних моделей Мікс×Айодент ДК9527С×ДК25323СЗМ)×ДК744СВ3М) і Мікс×BSSS (ДК7443М×ДК8816)×ДК2323МВ виявилися високохолодостійкими (8 балів) і холодостійким (6 балів), відповідно. Гетерозисна модель Айодент×BSSS була представлена у нашому дослідженні одним високохолодостійким генотипом – (ДК1693М×ДК3068)×ДК2323МВ, який отримав 8 балів, та двома нехолодостійкими – (ДК7443М×ДК7436)×ДК2323МВ і (ДК7455М×ДК7443СВ3М)×ДК2323МВ, які мали 3 і 2 бали, відповідно.

Отже, прояв ознаки холодостійкості досліджених гібридів кукурудзи не мав однозначної залежності від комбінації зародкових плазм у гетерозисній моделі. У межах деяких однакових гетерозисних моделей виявлено генотипи з різним рівнем холодостійкості. Водночас найвищі показники холодостійкості частіше спостерігалися у комбінаціях зародкових плазм Айодент×Ланкастер, Мікс×Ланкастер, Мікс×Айодент, Мікс×BSSS, що свідчить про важливу роль конкретних батьківських компонентів і їхніх комбінацій у формуванні адаптивної реакції на стрес, а внутрішньогрупова генетична різноманітність, тому окремі лінії зародкових плазм

відбір холодостійких форм доцільно здійснювати на рівні конкретних генотипів, а не лише гетерозисних груп.

Відзначений у нашому дослідженні вплив генотипу на прояв холодостійкості у кукурудзи підтверджено також у роботах інших авторів. Так, Е. Csepregi-Neilmann зі співавторами показали, що лінії з різним генетичним фоном демонструють різний рівень холодостійкості [6]. J. K. Waititu зі співавторами дослідили вплив генотипу кукурудзи на прояв холодостійкості на стадії проростків на рівні експресії генів, а також факторів транскрипції і метаболічних шляхів, які регулюють стійкість до стресу від холоду [16]. X. Zhao зі спів. описали значні відмінності між генотипами за дії такого стресу на стадії сходів за шістнадцятьма ознаками та проаналізували експресію шістьох генів, які брали участь в активності антиоксидантних ферментів та метаболізмі фосфатаз [17]. F. P. Frey зі співвстановили, що гаплоїдні лінії кукурудзи зародкової плазми Флінт (Європейської кременистої) мали варіабельні транскриптомні реакції на холод [18]. Вплив генотипу на рівень холодостійкості спостерігався у ліній кукурудзи S₃–S₅ генерацій, отриманих на базі кременистого матеріалу [19–20].

Е. Csepregi-Neilmann зі співавторами вивчаючи холодостійкість угорських ліній кукурудзи, встановили, що жодна конкретна зародкова плазма не пов'язана безпосередньо з певним рівнем прояву досліджуваної ознаки, проте деякі окремі лінії демонструють значну холодостійкість [6]. Автори відзначили, що деякі представники зародкових плазм Європейська кремениста та Міндзенпуста зарекомендували себе як найбільш холодостійкі генотипи, тоді як більш чутливими до холоду виявилися лінії плазм Ланкастер і Айодент. У нашому дослідженні гібриди, які представляють гетерозисну модель Айодент×Ланкастер, показали достатньо високий рівень холодостійкості. Такі відмінності можуть пояснюватися кількома чинниками. По-перше, холодостійкість визначається не лише належністю до певної зародкової плазми, а й конкретним генетичним складом гібрида. У середині однієї плазми існує значна Ланкастер або Айодент можуть суттєво відрізнятися за рівнем холодостійкості між со-

бою, особливо якщо вони тривалий час добиралися в різних ґрунтово-кліматичних умовах, як-то Україна і Угорщина. По-друге, у гібридах може проявлятися ефект гетерозису та комплементарної взаємодії генів, коли поєднання навіть відносно холодочутливих ліній дає більш стійке потомство завдяки взаємному доповненню захисних механізмів, пов'язаних зі стабільністю мембран, антиоксидантною системою, інтенсивністю росту коренів, тощо. Також важливу роль відіграє спрямованість селекції вихідного матеріалу. Якщо генотипи проходили відбір за ранніх строків сівби або в умовах прохолодної весни, то це могло сприяти накопиченню адаптивних ознак незалежно від їх плазмової належності. Різниця також може бути пов'язана з різними умовами експерименту та використаними критеріями оцінки холодостійкості.

Висновки. Оцінено холодостійкість одинадцяти гібридів кукурудзи різних гетерозисних моделей, які розподілено на три

групи за рівнем холодостійкості: високохолодостійкі (36,4 %), холодостійкі (36,4 %) та нехолодостійкі (27,2 %). Визначено істотну генотипову диференціацію гібридів за схожістю насіння за пониженої (+8 °C) температури та довжиною корінця, значення яких змінювалися у межах відповідно 14, -93,3 % і 1,1-14,6 мм. Вплив генотипу на прояв досліджуваних ознак зростав за умов стресу від холоду: частка генотипової дисперсії становила 65,8 % для лабораторної схожості, 90,0 % – для схожості за пониженої температури та 96,5 % – для довжини корінця. Визначено, що генотип, температура пророщування та їхня взаємодія мали статистично достовірний вплив на схожість насіння. Найвищі показники холодостійкості частіше спостерігалися у комбінаціях зародкових плазм Айодент×Лакнастер, Мікс×Ланкастер, Мікс×Айодент, Мікс×BSSS. Високохолодостійкі генотипи, рекомендовано вирощувати як перспективний селекційний матеріал в умовах ранніх строків сівби.

Використана література

- Peng Y., Wang Y., Zhao X., Lv Y. Evaluation of chilling tolerance in different maize inbred lines. *Agri. Res.* 2016. Vol. 34. P. 267–280. doi: 10.7606/j.issn.1000-7601.2016.03.42
- Zhou X., Muhammad I., Lan H., Xia C. Recent advances in the analysis of cold tolerance in maize. *Front Plant Sci.* 2022. Vol. 13. P. 866034. doi: 10.3389/fpls.2022.866034.
- Farooq M., Aziz T., Wahid A. et al. Chilling tolerance in maize: agronomic and physiological approaches. *Crop Pasture Sci.* 2009. Vol. 60. P. 501–516. doi: 10.1071/CP08427.
- Yang R., Wang X., Li H. et al. Physiological and proteomic insights into cold tolerance mechanism in two contrasting maize genotypes. *Plant Physiol Biochem.* 2025. Vol. 230. P. 110975. doi: 10.1016/j.plaphy.2025.110975.
- Kostadinović M., Milovanović M., Nikolić A. et al. Early sowing approach for developing climate resilient maize: cold stress impact on germination of adapted inbred lines with high nutritive value. *Plants (Basel).* 2025. Vol. 14 (16). P. 2540. doi: 10.3390/plants14162540.
- Csepregi-Heilmann E., Áldott-Sipos Á., Spitkó T. et al. Cold tolerance of maize inbred lines at the seed germination stage. *Biol. Futur.* 2025. doi: 10.1007/s42977-025-00292-0.
- Cheng Y, Liu J., García-Caparros P. et al. Evaluation of cold tolerance in maize diversity panel and transcriptome analysis of two extreme genotypes under cold stress. *Plant Physiol Biochem.* 2025. Vol. 229. P. 110744. doi: 10.1016/j.plaphy.2025.110744.
- Li S. N., Li Y. L., Sun M. H. et al. Pan-genome-wide identification, evolutionary analysis of maize *ZmPLD* gene family, and functional validation of *ZmPLD15* in cold stress tolerance. *Plants (Basel).* 2025. Vol. 14 (24). P.3858. doi: 10.3390/plants14243858.
- Zhang H., Zhang J., Xu Q. et al. Identification of candidate tolerance genes to low-temperature during maize germination by GWAS and RNA-seq approaches. *BMC Plant Biol.* 2020. Vol. 20 (1) P. 333. doi: 10.1186/s12870-020-02543-9.
- Chen Y., Cao Y., Wang L. et al. Identification of MYB transcription factor genes and their expression during abiotic stresses in maize. *Biol. Plant.* 2018. Vol. 62. P. 222–230. doi: 10.1007/s10535-017-0756-1.
- Zhang T., Zang J., Yang B. et al. *ZmTH1* is vital for healthy plant growth and promotes cold/drought tolerance by regulating thiamin diphosphate-dependent metabolisms in maize. *Plant Biotechnol J.* 2025. doi: 10.1111/pbi.70400.
- Zhang X., Sun H., Huang W., Guo W. Graphene oxide enhances root growth and low-temperature tolerance in maize. *BMC Plant Biol.* 2026. doi: 10.1186/s12870-026-08159-9.
- Дзюбецький Б. В., Черенков А. В., Філіпов Г. Л. та ін. Методичні рекомендації з діагностики та добору селекційного матеріалу кукурудзи на адаптивну стійкість. Дніпро: ІЗГ НААН, 2011. 21 с.
- Кирпа М. Я., Черчель В.Ю., Стюрко М. О. Спосіб визначення схожості насіння кукурудзи. Пат. 86727 Україна : МПК А01С 1/02 (2006.01). № 201308287 ; заявл. 01.07.2013 ; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.
- Welham S. J., Gezan S. A., Clark S. J., Mead A. Statistical methods in biology: design and analysis of

- experiments and regression. Boca Raton: CRC Press, 2014. 602 p.
16. Waititu J. K., Cai Q., Sun Y. et al. Transcriptome profiling of maize (*Zea mays* L.) leaves reveals key cold-responsive genes, transcription factors, and metabolic pathways regulating cold stress tolerance at the seedling stage. *Genes (Basel)*. 2021. Vol. 12 (10). P. 1638. doi: 10.3390/genes12101638.
 17. Zhao X., Zhao C., Niu Y. et al. Understanding and comprehensive evaluation of cold resistance in the seedlings of multiple maize genotypes. *Plants (Basel)*. 2022. Vol. 11 (14). P. 1881. doi: 10.3390/plants11141881.
 18. Frey F. P., Pitz M., Schön C. C., Hochholdinger F. Transcriptomic diversity in seedling roots of European flint maize in response to cold. *BMC Genomics*. 2020. Vol. 21 (1). P. 300. doi: 10.1186/s12864-020-6682-1.
 19. Черчель В. Ю., Марочко В. А., Максимова Л. О., Плотка В. В. Оцінка та добір за холодостійкістю ліній кукурудзи S₃ і S₄ генерацій, отриманих на базі ранньостиглого кременистого матеріалу. *Бюлетень Інституту сільського господарства степової зони НААН України*. 2013. №5. С. 23–26.
 20. Черчель В. Ю., Плотка В. В., Рябченко Е. М. Оцінка холодостійкості та тривалості періоду «сходи – цвітіння 50 % качанів» самозапилених ліній різних генерацій інбридингу. *Бюлетень Інституту сільського господарства степової зони НААН України*. 2015. №9. С.15–19.

References

1. Peng, Y., Wang, Y., Zhao, X., Lv, Y. (2016). Evaluation of chilling tolerance in different maize inbred lines. *Agri. Res. Arid Areas*, 34. 267–280. doi: 10.7606/j.issn.1000-7601.2016.03.42.
2. Zhou, X., Muhammad, I., Lan, H., Xia, C. (2022). Recent advances in the analysis of cold tolerance in maize. *Front Plant Sci.*, 13. 866034. doi: 10.3389/fpls.2022.866034.
3. Farooq, M., Aziz, T., Wahid, A., Lee, D.-J., Siddique, K. H. (2009). Chilling tolerance in maize: agronomic and physiological approaches. *Crop Pasture Sci.*, 60. 501–516. doi: 10.1071/CP08427.
4. Yang, R., Wang, X., Li, H., Liu, M., Zhong, M., Ma, H., Guo, Z., Chen, S. (2025). Physiological and proteomic insights into cold tolerance mechanism in two contrasting maize genotypes. *Plant Physiol Biochem*, 230. 110975. doi: 10.1016/j.plaphy.2025.110975.
5. Kostadinović, M., Milovanović, M., Nikolić, A., Marković, K., Vukadinović, J., Vančetović, J., Ignjatović Micić, D. (2025). Early sowing approach for developing climate resilient maize: cold stress impact on germination of adapted inbred lines with high nutritive value. *Plants (Basel)*, 14 (16). 2540. doi: 10.3390/plants14162540.
6. Csepregi-Heilmann, E., Áldott-Sipos, Á., Spitkó, T., Szőke, C., Pintér, J., Széles, A., Berzy, T., Marton, C. L. (2025). Cold tolerance of maize inbred lines at the seed germination stage. *Biol Futur*. doi: 10.1007/s42977-025-00292-0.
7. Cheng, Y., Liu, J., García-Caparros, P., Sun, D., Su, Y., Ruan, Y., Chen, S., Guo, Z. (2025). Evaluation of cold tolerance in maize diversity panel and transcriptome analysis of two extreme genotypes under cold stress. *Plant Physiol Biochem.*, 229. 110744. doi: 10.1016/j.plaphy.2025.110744.
8. Li, S. N., Li, Y. L., Sun, M. H., Sun, Y., Li, X., Cai, Q., Wang, Y., Zhang, J. G. (2025). Pangenome-wide identification, evolutionary analysis of maize ZmPLD gene family, and functional validation of ZmPLD15 in cold stress tolerance. *Plants (Basel)*, 14 (24). 3858. doi: 10.3390/plants14243858.
9. Zhang, H., Zhang, J., Xu, Q., Wang, D., Di, H., Huang, J., Yang, X., Wang, Z., Zhang, L., Dong, L., Wang, Z., Zhou, Y. (2020). Identification of candidate tolerance genes to low-temperature during maize germination by GWAS and RNA-seq approaches. *BMC Plant Biol.*, 20 (1). 333. doi: 10.1186/s12870-020-02543-9.
10. Chen, Y., Cao, Y., Wang, L., Li, L., Yang, J., Zou, M. (2018). Identification of MYB transcription factor genes and their expression during abiotic stresses in maize. *Biol. Plant*, 62. 222–230. doi: 10.1007/s10535-017-0756-1
11. Zhang, T., Zang, J., Yang, B., Wang, Q., Yan, J., Xin, P., Chu, J., Chen, H., Zhang, Z. (2025). ZmTH1 is vital for healthy plant growth and promotes cold/drought tolerance by regulating thiamin diphosphate-dependent metabolisms in maize. *Plant Biotechnol J*. doi: 10.1111/pbi.70400.
12. Zhang, X., Sun, H., Huang, W., Guo, W. (2026). Graphene oxide enhances root growth and low-temperature tolerance in maize. *BMC Plant Biol.*, doi: 10.1186/s12870-026-08159-9.
13. Dzyubetskyy, B. V., Cherenkov, A. V., Filipov, H. L., Cherchel, V. Yu., Vyshnevskyy, M. V., Maksymova, L. O., Antonyuk, S. P., Bodenko, N. A., Hrabovska, T. O., Holubnycha, A. H., Romanenko, S. V. (2011). Metodychni rekomendatsiyi z diahnostryky ta doboru selektsiynoho materialu kukurudzy na adaptyvnu stiykist [Methodological recommendations for diagnostics and selection of maize breeding material for adaptive resistance]. Dnipro: SZG NAAN, 21 p.
14. Kyrpa, M. Ya., Cherchel, V. Yu., Styurko, M. O. (2014). Sposib vyznachennya skhozhosti nasinnya kukurudzy [Method for determining the germination of maize seeds]. Pat. 86727 Ukraine : IPC A01C 1/02 (2006.01). № 201308287 ; declared 01.07.2013 ; published 10.01.2014, Bul. № 1.
15. Welham, S. J., Gezan, S. A., Clark, S. J., Mead, A. Statistical methods in biology: design and analysis of experiments and regression. Boca Raton: CRC Press, 2014. 602 p.
16. Waititu, J. K., Cai, Q., Sun, Y., Sun, Y., Li, C., Zhang, C., Liu, J., Wang, H. (2021). Transcriptome profiling of maize (*Zea mays* L.) leaves reveals key cold-responsive genes, transcription factors, and metabolic pathways regulating cold stress tolerance at the seedling stage. *Genes (Basel)*, 12 (10). 1638. doi: 10.3390/genes12101638.
17. Zhao, X., Zhao, C., Niu, Y., Chao, W., He, W., Wang, Y., Mao, T., Bai, X. (2022). Understanding and

- comprehensive evaluation of cold resistance in the seedlings of multiple maize genotypes. *Plants (Basel)*, 11 (14). 1881. doi: 10.3390/plants11141881.
18. Frey, F. P., Pitz, M., Schön, C. C., Hochholdinger, F. (2020). Transcriptomic diversity in seedling roots of European flint maize in response to cold. *BMC Genomics*, 21(1). 300. doi: 10.1186/s12864-020-6682-1.
 19. Cherchel, V. Yu., Marochko, V. A., Maksymova, L. O., Plotka, V. V. (2013). Evaluation and selection of maize inbreds of S₃ and S₄ generations, obtained on the basis of early-ripening siliceous material, for cold resistance. *Biuletyn Instytutu silskoho hospodarstva stepovoi zony NAAN Ukrainy* [Bulletin of the Institute of Agriculture of the Steppe Zone of the NAAS of Ukraine], 5. 23–26.
 20. Cherchel, V. Yu., Plotka, V. V., Ryabchenko, E. M. (2015). Assessment of cold resistance and duration of the “emergence – flowering of 50% of ears” period of self-pollinated inbreds of different inbreeding generations. *Biuletyn Instytutu silskoho hospodarstva stepovoi zony NAAN Ukrainy* [Bulletin of the Institute of Agriculture of the Steppe Zone of the NAAS of Ukraine], 9. 15–19.

UDC 633.15:631.53.01:631.52

Denysiuk, K. V., Cherchel, V. Yu., Bodenko, N. A., Dziubetskyi, B. V., Haidash, O. L., Kruhlova, M. O. *Evaluation of cold resistance of maize hybrids of various heterosis models.*

Grain Crops. 2026. 10 (1). 432–51.

State Enterprise Institute of Grain Crops of NAAS, 14 Volodymyr Vernadskyi St., Dnipro, 49009, Ukraine

Topicality. Selection of cold-resistant maize genotypes is a relevant area of modern research, as it allows preventing crop losses associated with damage to seedlings and uneven seedling emergence due to the action of low temperatures in the early stages of vegetation. **Purpose.** To assess the cold tolerance of maize hybrids belonging to different heterosis models, to investigate the effect of genotype on the manifestation of the trait and to identify heterosis models characterized by a high level of cold tolerance. **Materials and Methods.** Eleven maize hybrids were used as the material for the study. The cold tolerance was assessed using a laboratory method involving the determination of seed germination and root length at a low temperature (+8 °C). **Results.** A significant variation was observed among maize hybrids in terms of seed germination at low temperature (+8 °C) (14.7–93.3 %), compared with laboratory germination rates (at +26 °C) of 95.0–100.0 %. The length of the radicle formed under cold stress conditions was in the range of 1.1–14.6 mm, depending on the genotype. The effect of the hybrid genotype on laboratory germination was 65.8 %, on germination at low temperature – 90.0 %, on radicle length – 96.5 %. **Conclusions.** The cold tolerance of eleven maize hybrids was assessed, and the effect of genotype on this indicator was established. Four highly cold-resistant, four cold-resistant and three non-cold-resistant hybrids were identified from the total number of samples. Hybrids (DK4168M × DK365SVZM) × DKD3074MV, (DK1693M × DK3068) × DK2323MV, (DK9527S × DK2532ZSZM) × DK744SVZM and DK3263ZSZM × DKD3074MV are defined as highly cold-resistant, (DK4441M × DK4401) × DKD3074MV, (DK365M × DK7744) × DKD3074MV, (DK7443M × DK8816) × DK2323MV and (DK7443M × DK7400) × DK2180 – as cold-resistant and (DK7443M × DK7436) × DK2323MV, (DK7455M × DK7443SVZM) × DK2323MV and (DK296S × DK2980) × DK9178 – as non-cold-resistant. The highest indicators of cold tolerance were more often observed in hybrids of heterosis models Iodent × Lancaster, Mix × Lancaster, Mix × Iodent, Mix × BSSS.

Key words: *Zea mays L., hybrids, heterosis models, cold tolerance, resistance to stress abiotic factors, seed germination.*