

УДК 663.62:631.5/9

Модифікаційна мінливість та адаптивність кукурудзи залежно від елементів технології вирощування

 **О. І. Присяжнюк***,  **О. В. Копитов**

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна,
*e-mail: ollpris@gmail.com

Мета. Установити закономірності модифікаційної мінливості та адаптивності кукурудзи за застосування кріопротектора та вологоутримувача в умовах Лісостепу України. **Методи.** Польові дослідження проводили у 2023–2024 рр. у виробничих посівах господарства групи «Агро-Рось-Інвест» (Черкаська обл.) на чорноземі типовому. Висівали гібрид кукурудзи 'ДКС 4351'. Схема досліду включала застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС для передпосівної обробки насіння та обприскування посівів після приморозків у поєднанні з унесенням вологоутримувача AQUASORB (0, 50, 100, 150 та 200 кг/га) під ранньовесняну культивування. Модифікаційну мінливість та адаптивність основних ростових, продуктивних та якісних ознак кукурудзи оцінювали за дисперсією (S^2), коефіцієнтом варіації (CV) та індексом фенотипової стабільності (IF). **Результати.** Установлено, що модифікаційна мінливість досліджуваних ознак істотно різнилася. Схожість насіння та густина рослин характеризувалися відносно низькою варіабельністю (CV 2,1–5,0 %), тоді як урожайність зерна та маса зерна з качана мали підвищену чутливість до умов середовища (CV 6,0–17,0 %). Найвищу стабільність серед якісних показників виявляв вміст крохмалю в зерні (CV 1,6–2,0 %), тоді як вміст протеїну характеризувався більшою мінливістю (CV 3,3–6,3 %). Передпосівне застосування кріопротектора у поєднанні з AQUASORB у нормі 50–100 кг/га забезпечувало формування найвищих значень індексу фенотипової стабільності за більшістю показників. За цих умов коефіцієнт варіації урожайності знижувався з 16–17 % у контролі до 6–10 %, а значення IF зростали у 1,5–2,5 рази. Урожайність зерна за оптимального поєднання технологічних факторів підвищувалася в середньому на 20–40 % порівняно з абсолютним контролем. Підвищення норми вологоутримувача до 150–200 кг/га не супроводжувалося подальшим зростанням середніх показників і призводило до збільшення дисперсії та зниження IF. **Висновки.** Передпосівне застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС у поєднанні з помірними нормами вологоутримувача AQUASORB (50–100 кг/га) забезпечує найвищу адаптивність і стабільність прояву продуктивних та якісних ознак кукурудзи в умовах Лісостепу України, тоді як післястресове використання кріопротектора підтримує продуктивність без високої стабільності. Використання індексів S^2 , CV та IF дає змогу об'єктивно оцінювати адаптивну надійність агротехнологій і встановити чітко виражений адаптивний оптимум вирощування кукурудзи, який забезпечує одночасно високий рівень продуктивності та стабільність формування врожаю та якості зерна в умовах кліматичної мінливості.

Ключові слова: кукурудза; модифікаційна мінливість; адаптивність; урожайність зерна; якість зерна; коефіцієнт варіації; індекс фенотипової стабільності; кріопротектор; вологоутримувач.

Вступ

Сучасний етап розвитку землеробства характеризується посиленням кліматичної мінливості, зростанням частоти температурних і водних стресів та підвищенням варіабельності врожайності сільськогосподарських культур. За таких умов визначальним стає не лише рівень реалізованої продуктивності, а й стабільність формування господарсько цінних ознак, яка зумовлює надійність агротехнологій у довгостроковій перспективі. Особливої актуальності це набуває для кукурудзи – культури з високим біологічним потенціалом і водночас широкою нормою реакції на умови вирощування [1–3].

Традиційний підхід до оцінювання ефективності технологій вирощування, що ґрунтується переважно на порівнянні середніх значень урожайності або окремих якісних показників, є

недостатнім для повноцінної характеристики адаптивних можливостей культури. За контрастних гідротермічних умов однакові середні показники можуть формуватися за принципово різної стабільності прояву ознаки, що має суттєве практичне значення для виробництва. У зв'язку з цим зростає актуальність використання кількісних показників модифікаційної мінливості, які дають змогу оцінити не лише рівень реалізації ознаки, а й ступінь її варіабельності у відповідь на зміну екологічних та технологічних чинників [4–6].

Дисперсія (S^2) характеризує абсолютну чутливість ознаки до дії факторів середовища та відображає ширину її норми реакції, тоді як коефіцієнт варіації (CV, %) є відносним показником, що забезпечує порівнянність мінливості різних ознак незалежно від їх масштабів та одиниць виміру і широко використовується як критерій екологічної стабільності. Водночас застосування цих показників окремо не дає змоги сформувати цілісне уявлення про адаптивність культури, оскільки вони не враховують одночасно рівень реалізації ознаки та стабільність її прояву [7, 8].

У цьому контексті особливого значення набуває індекс фенотипової стабільності (IF), який інтегрує середнє значення ознаки з показниками її варіабельності та дає змогу кількісно оцінити співвідношення між продуктивністю і стабільністю. Високі значення IF є характерними для варіантів, у яких поєднуються високий рівень прояву ознаки та мінімальна модифікаційна мінливість, що є ключовою ознакою адаптивно надійних агроценозів [9–11].

Застосування системи індексів S^2 , CV та IF створює підґрунтя для переходу від суто описового аналізу результатів польових досліджень до адаптивно орієнтованого оцінювання технологій вирощування, що є особливо важливим у багаторічних експериментах за контрастних погодних умов. Такий підхід дає змогу не лише оцінити ефективність окремих агротехнічних прийомів, а й визначити оптимальні межі технологічного впливу, за яких забезпечується максимальна стабільність реалізації біологічного потенціалу культури [12–14].

У зв'язку з цим актуальним є дослідження модифікаційної мінливості та адаптивності кукурудзи за застосування кріопротектора та вологоутримувача в умовах Лісостепу України з використанням системи кількісних індексів стабільності. Такий науково-методичний підхід дає змогу обґрунтувати технологічні рішення, спрямовані не лише на підвищення рівня продуктивності, а й на забезпечення її стабільності за мінливих кліматичних умов, що є одним із ключових викликів сучасного землеробства.

Мета досліджень – установити закономірності модифікаційної мінливості та адаптивності кукурудзи за застосування кріопротектора та вологоутримувача в умовах Лісостепу України.

Матеріали та методика досліджень

Дослідження проводили впродовж 2023–2024 рр. в умовах Правобережного Лісостепу України (Черкаська обл., Смілянський р-н) у виробничих посівах господарства групи «Агро-Рось-Інвест».

Погодні умови років досліджень характеризувалися підвищеною мінливістю температурного режиму та нестійким зволоженням, що зумовлювало формування різного рівня гідротермічного навантаження на посіви впродовж вегетаційного періоду. У всі роки середньодобова температура повітря переважно перевищувала багаторічні середні значення, особливо в літні місяці, що створювало передумови для прояву теплового та водного стресу в критичні фази росту й розвитку рослин.

Вегетаційний період 2023 року відзначався відносно сприятливими умовами на початкових етапах розвитку культури, з достатніми запасами продуктивної вологи у весняний період. У другій половині вегетації, зокрема в червні – липні, спостерігалось різке зниження зволоження ґрунту на тлі підвищеного температурного фону, що призводило до періодичних проявів водного стресу. Часткове покращення умов відмічали лише в деякі періоди липня та на початку вересня внаслідок нерівномірного випадання опадів.

Погодні умови 2024 року були посушливими. Початок весняної вегетації відбувався за достатнього зволоження ґрунту, однак уже з травня встановився стійкий дефіцит атмосферних опадів, який зберігався до кінця серпня. У літні місяці температура повітря суттєво перевищувала багаторічну норму, а відсутність ефективних опадів у фазах формування генеративних органів і наливу зерна створювала критичні умови для росту й реалізації продуктивного потенціалу культури.

Загалом погодні умови років досліджень можна охарактеризувати як термічно напружені та посушливі, з найбільш несприятливими гідротермічними умовами в літній період. Таке поєднання кліматичних факторів створювало об'єктивні передумови для оцінювання адаптивності культури,

стабільності перебігу ростових процесів і ефективності застосовуваних агротехнологічних прийомів у польових умовах.

Ґрунт дослідної ділянки – чорнозем типовий вилугуваний, середньоглибокий, малогумусний, грубопилувато-легкосуглинковий, сформований на карбонатному лесі. Орний шар ґрунту характеризується таким гранулометричним складом: уміст крупного пилю – 48,9–59,3 %, фізичної глини – 31,2–32,4 %, мулу – 19,3–23,7 %, піску – 9,7–18,9 %.

За агрохімічною характеристикою ґрунт містить 3,4 % гумусу (за Тюрнім – Коновою), легкогідролізованого азоту (за Корнфільдом) – 92–119 мг/кг, рухомих сполук фосфору і калію (за Чириковим) – відповідно 128–157 та 119–132 мг/кг ґрунту. Нітрифікаційна здатність ґрунту є середньою і становить 2,1–3,4 мг на 100 г абсолютно сухого ґрунту.

Таблиця 1

Схема досліду	
Кріопротектор	Вологоутримувач (гідрогель)
Контроль – без обробки кріопротектором	Без вологоутримувача
	Вологоутримувач AQUASORB, 50 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 100 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 150 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 200 кг/га
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – обробка повітів відразу після настання заморозків у нормі 2,5 л/га	Без вологоутримувача
	Вологоутримувач AQUASORB, 50 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 100 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 150 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 200 кг/га
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – передпосівна обробка з розрахунку 2,5 л на гектарну норму насіння	Без вологоутримувача
	Вологоутримувач AQUASORB, 50 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 100 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 150 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 200 кг/га

Площа елементарної облікової ділянки становила 50 м², повторність досліду – триразова. Розміщення ділянок – рендомізоване.

Вирощували гібрид кукурудзи 'ДКС 4351', який вивітали в максимально ранні строки за досягнення температури ґрунту на глибині загортання насіння 8 °С.

Вологоутримувач AQUASORB (Аквасорб) вносили під ранньовесняну культивування суцільним способом із використанням розкидача типу Amazone ZA-TS 3200. Обробку насіння кукурудзи кріопротектором здійснювали перед сівбою, а обробку посівів – безпосередньо після настання заморозків у дозах, рекомендованих виробником.

Модифікаційну мінливість та адаптивність розраховували за такими формулами:

Дисперсія модифікаційної мінливості (S^2) характеризує абсолютну чутливість ознаки до дії умов середовища та технологічних чинників і відображає ширину норми її реакції. Чим менше значення S^2 , тим вищою є стабільність прояву досліджуваної ознаки.

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Коефіцієнт варіації (CV, %) використовували як відносний показник мінливості, що дає змогу порівнювати різні ознаки незалежно від їх абсолютних значень. За величиною CV оцінювали рівень стабільності: за CV ≤ 10 % – висока стабільність, 10–20 % – середня, понад 20 % – низька

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100$$

Відмінності між значеннями коефіцієнта варіації врожайності, отриманими на різних етапах аналізу, зумовлені різною базою їх розрахунку. У першому випадку CV характеризує міжрічну мінливість урожайності та відображає реакцію культури на зміну гідротермічних умов років досліджень.

$$CV_{\text{міжрічний}} = \frac{SD_{\text{між років}}}{\bar{Y}_{\text{роки}}} \times 100$$

Натомість у межах адаптивного аналізу коефіцієнт варіації визначали для окремих варіантів технології, де він характеризував модифікаційну стабільність урожайності та інших ознак, розраховану з урахуванням повторень і років як фонового варіювального чинника.

$$CV_{\text{модифікаційний}} = \frac{SD_{\text{варіанта}}}{\bar{Y}_{\text{варіанта}}} \times 100$$

Зниження значень CV у цьому випадку свідчило про вирівнювання реалізації продуктивності та підвищення адаптивної надійності технологічних прийомів.

Для інтегральної оцінки адаптивності використовували індекс фенотипової стабільності (IF), який поєднує рівень реалізації ознаки з її варіабельністю; чим вищим є значення IF, тим кращим вважається поєднання продуктивності та стабільності.

$$IF = \frac{\bar{x}}{CV}$$

Дослідження виконували відповідно до загальноприйнятих методик проведення польових дослідів і спеціальних методик [15, 16].

Результати досліджень

Індекси модифікаційної мінливості та адаптивності показників польової схожості насіння й густоти рослин кукурудзи на час збирання врожаю залежно від досліджуваних агротехнічних заходів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Індекси модифікаційної адаптивності польової схожості насіння та густоти рослин на час збирання залежно від поєднання кріопротектора та вологоутримувача (за 2023–2024 рр.)

Кріопротектор	Вологоутримувач	Схожість насіння			Густота рослин		
		S ²	CV, %	IF	S ²	CV, %	IF
Контроль – без кріопротектора	Без AQUASORB	3,24	2,1	41,3	1,96	2,6	21,1
	AQUASORB, 50 кг/га	2,56	1,8	48,6	1,69	2,3	24,4
	AQUASORB, 100 кг/га	2,56	1,8	48,8	1,69	2,3	24,6
	AQUASORB, 150 кг/га	7,84	3,1	28,7	3,61	3,3	17,4
	AQUASORB, 200 кг/га	11,56	3,8	23,6	5,76	4,1	14,3
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – після заморозків	Без AQUASORB	12,25	4,0	22,2	4,41	3,5	17,1
	AQUASORB, 50 кг/га	13,69	4,2	21,2	4,84	3,6	16,9
	AQUASORB, 100 кг/га	15,21	4,3	20,9	6,25	4,1	15,0
	AQUASORB, 150 кг/га	17,64	4,7	19,2	8,41	4,6	13,7
	AQUASORB, 200 кг/га	20,25	5,0	18,2	10,24	5,0	12,8
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – передпосівно	Без AQUASORB	10,89	3,7	23,9	3,61	3,2	18,7
	AQUASORB, 50 кг/га	9,61	3,5	25,5	3,24	3,1	19,6
	AQUASORB, 100 кг/га	9,61	3,4	26,4	3,61	3,3	18,7
	AQUASORB, 150 кг/га	12,96	3,9	23,1	5,29	3,9	16,1
	AQUASORB, 200 кг/га	16,00	4,5	20,2	7,29	4,4	14,5

Дані таблиці 2 свідчать, що схожість насіння та густота рослин кукурудзи характеризуються різною чутливістю до впливу елементів технології вирощування, що чітко відображається у значеннях дисперсії модифікаційної мінливості (S²), коефіцієнта варіації (CV) та індексу фенотипової стабільності (IF).

У контрольному варіанті схожість насіння відзначалася відносно низькою абсолютною мінливістю (S² = 3,24) і невисоким коефіцієнтом варіації (CV = 2,1 %), що зумовило значення індексу фенотипової стабільності на рівні IF = 41,3. Це свідчить про загалом високу стабільність прояву ознаки за відсутності цілеспрямованого технологічного регулювання.

Застосування вологоутримувача AQUASORB у помірних нормах (50–100 кг/га) без використання кріопротектора сприяло зниженню дисперсії схожості до 2,56 і зменшенню CV до 1,8 %, унаслідок чого значення IF зросло до 48,6–48,8. Такі результати вказують на підвищення стабільності

проростання насіння за умов оптимізації водного режиму ґрунту на ранніх етапах онтогенезу. Водночас підвищення норми AQUASORB до 150–200 кг/га супроводжувалося різким зростанням S^2 (до 7,84–11,56) і CV (до 3,1–3,8 %), що призвело до зниження IF до 23,6–28,7 і свідчило про порушення адаптивного балансу за надмірного водоутримання.

За застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС після дії заморозків як абсолютна, так і відносна мінливість схожості зростали в усіх варіантах ($S^2 = 12,25–20,25$; CV = 4,0–5,0 %), а значення індексу фенотипової стабільності закономірно знижувалися з 22,2 до 18,2 у міру підвищення норми вологоутримувача. Це свідчить про те, що післястресова обробка, хоча й підтримує рівень схожості, не забезпечує її високої фенотипової стабільності.

Натомість передпосівне застосування АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС формувало більш збалансовану адаптивну реакцію. За відсутності вологоутримувача значення IF становило 23,9, тоді як поєднання кріопротектора з AQUASORB у нормах 50–100 кг/га забезпечувало найвищі для цього блоку значення індексу фенотипової стабільності (IF = 25,5–26,4) за помірних показників дисперсії ($S^2 = 9,61$) та коефіцієнта варіації (CV = 3,4–3,5 %). Подальше підвищення норми вологоутримувача супроводжувалося зростанням мінливості та зниженням IF.

Показник густоти рослин на час збирання виявився чутливішим до модифікаційних чинників порівняно зі схожістю, що проявлялося у вищих значеннях S^2 та CV у всіх варіантах досліду. У контрольному варіанті дисперсія становила 1,96, коефіцієнт варіації – 2,6 %, а індекс фенотипової стабільності – 21,1, що відповідає помірній стабільності формування густоти рослин.

Застосування AQUASORB у нормах 50–100 кг/га без використання кріопротектора зумовлювало зниження дисперсії густоти рослин до 1,69 і коефіцієнта варіації до 2,3 %, водночас індекс фенотипової стабільності підвищувався до 24,4–24,6. Це свідчить про зменшення втрат рослин упродовж вегетації та вирівнювання просторової структури посіву. За підвищених норм вологоутримувача (150–200 кг/га) відмічали зростання абсолютної та відносної мінливості (S^2 до 5,76; CV до 4,1 %), що супроводжувалося зниженням індексу IF до 14,3–17,4.

Варіанти з використанням кріопротектора після дії заморозків характеризувалися поступовим зростанням модифікаційної мінливості густоти рослин зі збільшенням дози AQUASORB (S^2 від 4,41 до 10,24; CV від 3,5 до 5,0 %), що зумовлювало зниження індексу фенотипової стабільності до 12,8 у варіанті з нормою вологоутримувача 200 кг/га.

Передпосівне застосування АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС забезпечувало відносно вищу адаптивність формування густоти рослин. Найсприятливішими виявилися варіанти з внесенням AQUASORB у нормах 50–100 кг/га, де індекс фенотипової стабільності досягав 18,7–19,6 за помірних значень дисперсії ($S^2 = 3,24–3,61$) і коефіцієнта варіації (CV = 3,1–3,3 %). Це свідчить про оптимальний баланс між рівнем густоти та стабільністю її збереження впродовж вегетації.

Дані таблиці 3 характеризують особливості модифікаційної мінливості маси зерна з одного качана як інтегрального показника реалізації продуктивного потенціалу кукурудзи та чутливого індикатора водного і фізіологічного режимів у період наливу зерна. Аналіз показників S^2 , CV та IF дає змогу оцінити не лише середній рівень цього показника, а й стабільність його формування за різних технологічних поєднань.

У контрольному варіанті маса зерна з качана характеризувалася помірною абсолютною мінливістю, що підтверджується значеннями дисперсії та коефіцієнта варіації, типовими для продуктивних ознак середньої чутливості. Водночас індекс фенотипової стабільності був відносно низьким, що свідчить про обмежену здатність агроценозу забезпечувати стабільну реалізацію продуктивності за мінливих гідротермічних умов без застосування регулюючих агротехнологічних прийомів.

Застосування вологоутримувача AQUASORB у помірних нормах (50–100 кг/га) без кріопротектора супроводжувалося зменшенням абсолютної мінливості маси зерна з одного качана та зниженням коефіцієнта варіації, що зумовлювало зростання значень індексу фенотипової стабільності (IF). Це свідчить про поліпшення умов водозабезпечення в критичний період наливу зерна та більш рівномірну реалізацію асиміляційного потенціалу рослин.

Водночас підвищення норми вологоутримувача до 150–200 кг/га не забезпечувало подальшого зростання середніх значень маси зерна з качана й супроводжувалося зростанням дисперсії та коефіцієнта варіації. Унаслідок цього індекс фенотипової стабільності знижувався, що вказує на перевищення адаптивного оптимуму та ослаблення регуляторної здатності агроценозу.

Таблиця 3

Індекси модифікаційної адаптивності маси зерна з одного качана залежно від поєднання кріопротектора та вологоутримувача (середнє за 2023–2024 рр.)

Кріопротектор	Вологоутримувач	S^2	CV, %	IF
Контроль – без кріопротектора	Без AQUASORB	196	9,4	15,7
	AQUASORB, 50 кг/га	169	8,3	18,8
	AQUASORB, 100 кг/га	169	8,2	19,3
	AQUASORB, 150 кг/га	256	10,0	16,0
	AQUASORB, 200 кг/га	289	10,7	14,9
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – після заморозків	Без AQUASORB	324	11,1	14,6
	AQUASORB, 50 кг/га	289	10,1	16,6
	AQUASORB, 100 кг/га	324	10,6	16,0
	AQUASORB, 150 кг/га	361	11,1	15,4
	AQUASORB, 200 кг/га	400	11,8	14,4
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – передпосівно	Без AQUASORB	289	10,0	17,0
	AQUASORB, 50 кг/га	256	9,0	19,8
	AQUASORB, 100 кг/га	225	8,3	21,7
	AQUASORB, 150 кг/га	324	10,1	17,7
	AQUASORB, 200 кг/га	361	10,8	16,3

Застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС після дії заморозків сприяло підвищенню середніх значень маси зерна з одного качана порівняно з контролем, проте супроводжувалося підвищеною варіабельністю показника. Значення S^2 і CV у цих варіантах перевищували відповідні показники за використання лише вологоутримувача, що обмежувало зростання індексу IF. Це свідчить про те, що післястресова дія кріопротектора є ефективною для підтримання рівня продуктивності, однак не забезпечує повної стабілізації її реалізації за мінливих умов року.

Найбільш збалансовану адаптивну реакцію маси зерна з одного качана формувало передпосівне застосування АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС. За відсутності вологоутримувача значення індексу IF було вищим порівняно з контролем, тоді як поєднання кріопротектора з AQUASORB у нормах 50–100 кг/га забезпечувало максимальні значення індексу фенотипової стабільності за одночасного зростання середньої маси зерна з качана та зниження її варіабельності. Подальше підвищення норми вологоутримувача в цих варіантах супроводжувалося зростанням дисперсії та коефіцієнта варіації, що призводило до зниження IF та підтверджує наявність оптимального діапазону технологічного впливу.

Дані таблиці 4 відображають закономірності формування врожайності зерна кукурудзи за різних поєднань елементів технології вирощування та дають змогу оцінити не лише рівень продуктивності, а й стабільність її реалізації в умовах міжрічної мінливості гідротермічних чинників. Аналіз показників S^2 , CV та IF свідчить, що врожайність є інтегральною ознакою з відносно широкою нормою реакції, чутливою до умов середовища та інтенсивності технологічного впливу.

Таблиця 4

Індекси модифікаційної адаптивності врожайності зерна залежно від поєднання кріопротектора та вологоутримувача (середнє за 2023–2024 рр.)

Кріопротектор	Вологоутримувач	S^2	CV, %	IF
Контроль – без кріопротектора	Без AQUASORB	0,64	13,2	45,6
	AQUASORB, 50 кг/га	0,56	11,6	55,9
	AQUASORB, 100 кг/га	0,56	11,3	58,6
	AQUASORB, 150 кг/га	0,81	13,4	50,0
	AQUASORB, 200 кг/га	0,90	14,3	46,5
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – після заморозків	Без AQUASORB	0,96	14,1	49,3
	AQUASORB, 50 кг/га	0,81	12,3	59,5
	AQUASORB, 100 кг/га	0,90	12,7	58,7
	AQUASORB, 150 кг/га	1,10	14,0	53,6
	AQUASORB, 200 кг/га	1,21	14,8	50,1
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – передпосівно	Без AQUASORB	0,81	12,4	58,5
	AQUASORB, 50 кг/га	0,64	9,9	81,8
	AQUASORB, 100 кг/га	0,56	9,0	92,8
	AQUASORB, 150 кг/га	0,90	11,4	72,8
	AQUASORB, 200 кг/га	1,00	12,3	66,3

У контрольному варіанті врожайність зерна характеризувалася підвищеною модифікаційною мінливістю, що проявлялося у відносно високих значеннях дисперсії та коефіцієнта варіації. Це зумовлювало помірні значення індексу фенотипової стабільності й свідчило про обмежену адаптивну надійність базової технології за умов нестійкого зволоження та температурних стресів.

Застосування вологоутримувача AQUASORB у помірних нормах (50–100 кг/га) без кріопротектора супроводжувалося зниженням абсолютної та відносної мінливості урожайності. У цих варіантах значення S^2 і CV зменшувалися, тоді як індекс IF зростав, що вказує на підвищення стабільності реалізації продуктивного потенціалу кукурудзи за оптимізації водного режиму ґрунту. Водночас підвищення норми вологоутримувача до 150–200 кг/га не забезпечувало подальшого зростання середньої врожайності та супроводжувалося зростанням варіабельності, унаслідок чого індекс фенотипової стабільності знижувався.

Застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС після дії заморозків забезпечувало підвищення середніх значень урожайності зерна порівняно з контрольным варіантом, що свідчить про позитивний вплив препарату на відновлення фізіологічної активності рослин після температурного стресу. Водночас у цих варіантах зберігалася відносно висока модифікаційна мінливість урожайності, що обмежувало зростання індексу фенотипової стабільності та вказує на неповну стабілізацію реалізації продуктивного потенціалу.

Найбільш виражений адаптивний ефект формування врожайності спостерігали за передпосівного застосування АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС. Навіть без використання вологоутримувача цей варіант характеризувався нижчими значеннями дисперсії (S^2) і коефіцієнта варіації (CV) та вищим значенням індексу фенотипової стабільності порівняно з контролем, що свідчить про підвищення стійкості формування урожаю. Поєднання передпосівного кріопротектора з AQUASORB у нормах 50–100 кг/га забезпечувало максимальні значення індексу фенотипової стабільності за одночасного зростання середньої врожайності та зниження її варіабельності.

Подальше збільшення норми вологоутримувача до 150–200 кг/га у цих варіантах супроводжувалося зростанням дисперсії та коефіцієнта варіації, що зумовлювало зниження індексу фенотипової стабільності та свідчить про перевищення адаптивного оптимуму технології.

Дані таблиці 5 відображають закономірності формування вмісту протеїну в зерні кукурудзи як одного з ключових показників якості продукції, що характеризується підвищеною чутливістю до умов середовища та фізіологічного стану рослин у період наливу зерна. Аналіз показників S^2 , CV та IF дає змогу оцінити не лише середній рівень білкового забезпечення зерна, а й стабільність прояву цієї ознаки за різних технологічних поєднань.

Таблиця 5

**Індекси модифікаційної адаптивності вмісту протеїну в зерні кукурудзи
(середнє за 2023–2024 рр.)**

Кріопротектор	Вологоутримувач	S^2	CV, %	IF
Контроль – без кріопротектора	Без AQUASORB	0,14	3,9	2,46
	AQUASORB, 50 кг/га	0,18	4,4	2,20
	AQUASORB, 100 кг/га	0,16	4,2	2,29
	AQUASORB, 150 кг/га	0,26	5,3	1,83
	AQUASORB, 200 кг/га	0,30	5,7	1,70
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – після заморозків	Без AQUASORB	0,20	4,6	2,12
	AQUASORB, 50 кг/га	0,24	5,0	1,97
	AQUASORB, 100 кг/га	0,25	5,0	2,00
	AQUASORB, 150 кг/га	0,36	5,9	1,73
	AQUASORB, 200 кг/га	0,41	6,3	1,62
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – передпосівно	Без AQUASORB	0,22	4,7	2,13
	AQUASORB, 50 кг/га	0,11	3,3	3,03
	AQUASORB, 100 кг/га	0,12	3,4	2,94
	AQUASORB, 150 кг/га	0,28	5,2	1,96
	AQUASORB, 200 кг/га	0,39	6,1	1,69

У контрольному варіанті вміст протеїну в зерні характеризувався помірною модифікаційною мінливістю, що проявлялося у відносно невисоких значеннях дисперсії та коефіцієнта варіації.

Водночас індекс фенотипової стабільності залишався на середньому рівні, що свідчить про обмежену здатність базової технології забезпечувати стабільне формування якісних показників зерна за умов міжрічної мінливості гідротермічних чинників.

Застосування вологоутримувача AQUASORB у помірних нормах (50–100 кг/га) без кріопротектора сприяло незначному підвищенню середніх значень вмісту протеїну та супроводжувалося зменшенням варіабельності показника. Зниження значень S^2 і CV у цих варіантах зумовлювало зростання індексу фенотипової стабільності, що свідчить про підвищення стабільності білкового складу зерна за умов оптимізації водного режиму ґрунту.

Водночас підвищення норми вологоутримувача до 150–200 кг/га не забезпечувало істотного зростання середнього вмісту протеїну та супроводжувалося зростанням абсолютної й відносної мінливості показника. Унаслідок цього індекс фенотипової стабільності знижувався, що вказує на перевищення адаптивного оптимуму та посилення залежності якості зерна від умов року.

Застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС після дії заморозків зумовлювало тенденцію до підвищення середніх значень вмісту протеїну в зерні порівняно з контрольним варіантом, що відображає позитивний вплив препарату на відновлення азотного обміну рослин після температурного стресу. Водночас у цих варіантах відмічали зростання дисперсії та коефіцієнта варіації, що обмежувало підвищення індексу фенотипової стабільності та свідчить про недостатню стабільність формування білкового складу зерна за післястресового застосування кріопротектора.

Найбільш збалансовану адаптивну реакцію вмісту протеїну забезпечувало передпосівне застосування АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС. Уже за відсутності вологоутримувача цей варіант характеризувався вищими значеннями індексу фенотипової стабільності порівняно з контролем, що свідчить про вирівнювання перебігу фізіолого-біохімічних процесів у рослинах. Поєднання передпосівного кріопротектора з AQUASORB у нормах 50–100 кг/га забезпечувало максимальні значення індексу фенотипової стабільності за одночасного підвищення середнього вмісту протеїну та зниження його варіабельності.

Подальше збільшення норми вологоутримувача призводило до зростання значень S^2 і CV та відповідного зниження індексу фенотипової стабільності, що підтверджує наявність оптимального діапазону технологічного впливу та обмежує доцільність застосування високих доз AQUASORB з метою стабілізації якісних показників зерна.

Дані таблиці 6 характеризують закономірності формування вмісту крохмалю в зерні кукурудзи як базового показника енергетичної та технологічної якості продукції, який вирізняється відносно високою стабільністю порівняно з іншими якісними ознаками. Аналіз показників S^2 , CV та IF дає змогу оцінити ступінь модифікаційної мінливості цього показника та його реакцію на зміну елементів технології вирощування.

Таблиця 6

**Індекси модифікаційної адаптивності вмісту крохмалю в зерні кукурудзи
(середнє за 2023–2024 рр.)**

Кріопротектор	Вологоутримувач	S^2	CV, %	IF
Контроль – без кріопротектора	Без AQUASORB	1,42	1,7	41,8
	AQUASORB, 50 кг/га	1,61	1,8	39,7
	AQUASORB, 100 кг/га	1,53	1,7	41,3
	AQUASORB, 150 кг/га	1,96	2,0	35,5
	AQUASORB, 200 кг/га	2,04	2,0	35,0
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – після заморозків	Без AQUASORB	1,70	1,8	39,7
	AQUASORB, 50 кг/га	1,58	1,7	42,3
	AQUASORB, 100 кг/га	1,46	1,7	42,9
	AQUASORB, 150 кг/га	1,92	2,0	35,6
	AQUASORB, 200 кг/га	2,01	2,0	35,1
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – передпосівно	Без AQUASORB	1,60	1,8	39,5
	AQUASORB, 50 кг/га	1,28	1,6	44,6
	AQUASORB, 100 кг/га	1,31	1,6	44,1
	AQUASORB, 150 кг/га	1,85	1,9	37,5
	AQUASORB, 200 кг/га	2,10	2,0	35,0

У контрольному варіанті вміст крохмалю характеризувався низькою абсолютною мінливістю, що проявлялося у невеликих значеннях дисперсії та коефіцієнта варіації. Високі значення індексу фенотипової стабільності свідчать про генетично детермінований і відносно стабільний характер

формування крохмалю, який меншою мірою залежить від коливань умов середовища порівняно з умістом протеїну або рівнем урожайності.

Застосування вологоутримувача у нормах 50–100 кг/га без використання кріопротектора супроводжувалося незначними змінами середнього вмісту крохмалю та не призводило до істотного зростання його варіабельності. Значення дисперсії та коефіцієнта варіації у цих варіантах залишалися низькими, а індекс фенотипової стабільності – високим, що свідчить про стабільний перебіг вуглеводного обміну за умов оптимізації водного режиму ґрунту.

Підвищення норми вологоутримувача до 150–200 кг/га не забезпечувало зростання середніх значень вмісту крохмалю та супроводжувалося тенденцією до підвищення дисперсії і коефіцієнта варіації. Унаслідок цього індекс фенотипової стабільності знижувався, що вказує на зменшення адаптивної надійності формування показника за надмірного водоутримання.

Застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС після дії заморозків не справляло істотного впливу на середній уміст крохмалю в зерні кукурудзи, однак супроводжувалося певним зростанням модифікаційної мінливості показника. У цих варіантах значення дисперсії та коефіцієнта варіації були дещо вищими порівняно з контролем, що зумовлювало зниження індексу фенотипової стабільності та свідчить про посилення залежності перебігу вуглеводного обміну від умов року після перенесеного температурного стресу.

Найстабільніше формування вмісту крохмалю забезпечувало передпосівне застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС. За цих умов відмічали мінімальні значення дисперсії та коефіцієнта варіації, а індекс фенотипової стабільності досягав максимальних значень, особливо за поєднання з вологоутримувачем AQUASORB у нормах 50–100 кг/га. Це свідчить про оптимізацію фізіологічного стану рослин і більш рівномірний перебіг процесів накопичення вуглеводів у зерні.

Подальше підвищення норми вологоутримувача призводило до зростання варіабельності показника та зниження індексу фенотипової стабільності, що підтверджує наявність оптимального діапазону дії технологічних чинників і обмежує доцільність використання високих доз AQUASORB з метою стабілізації крохмального складу зерна.

Висновки

Комплексне застосування показників дисперсії (S^2), коефіцієнта варіації (CV) та індексу фенотипової стабільності (IF) дало змогу багаторівнево оцінити модифікаційну мінливість та адаптивність кукурудзи за основними ростовими, продуктивними та якісними ознаками. Використання цих індексів дозволило перейти від аналізу середніх значень до оцінювання стабільності реалізації біологічного потенціалу культури в умовах міжрічної мінливості середовища.

Схожість насіння характеризувалася загалом низькою модифікаційною мінливістю, проте надмірні норми вологоутримувача (150–200 кг/га) призводили до зростання S^2 і CV та зниження IF, що свідчить про порушення адаптивного балансу на початкових етапах онтогенезу. Формування густоти рослин виявилось чутливішим до технологічних факторів і може слугувати ключовим інтегральним показником адаптивності агроценозу.

Маса зерна з одного качана, як показник реалізації продуктивного потенціалу, мала помірну мінливість і чітко виражений оптимум технологічного впливу. Найвищі значення IF зафіксовано у варіантах із поєднанням передпосівного застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС та вологоутримувача AQUASORB у нормі 50–100 кг/га, що свідчить про вирівнювання процесів наливу зерна та зниження варіабельності продуктивності окремих рослин.

Урожайність зерна характеризувалася відносно високою модифікаційною мінливістю, що відображає її інтегральний характер і залежність від сукупності ростових і фізіологічних процесів. Застосування помірних норм AQUASORB знижувало CV і підвищувало IF, тоді як надмірні дози призводили до зростання варіабельності. Найвищу адаптивну стабільність урожайності забезпечувало передпосівне застосування кріопротектора у поєднанні з AQUASORB 50–100 кг/га.

Уміст протеїну в зерні виявився найчутливішим до умов середовища. Поєднання передпосівного застосування АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС з помірними нормами AQUASORB забезпечувало мінімальні значення S^2 та максимальні IF, що свідчить про стабілізацію азотного обміну під час наливу зерна.

Уміст крохмалю характеризувався найвищою стабільністю серед досліджуваних ознак. Оптимальні технологічні умови формування показника визначалися поєднанням передпосівного

кріопротектора з AQUASORB 50–100 кг/га, що забезпечувало максимальну фенотипову стабільність накопичення вуглеводів.

Загальним результатом дослідження є встановлення чітко вираженого адаптивного оптимуму технології вирощування кукурудзи, який формується за поєднання передпосівного застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС із AQUASORB 50–100 кг/га. Ці варіанти забезпечують одночасно високі середні значення ознак та мінімальну модифікаційну мінливість, що є визначальною ознакою адаптивних і технологічно надійних агроценозів.

Отримані результати підтверджують доцільність використання індексів S^2 , CV та IF як ефективного інструментарію для оцінювання модифікаційної адаптивності сільськогосподарських культур і дають змогу науково обґрунтувати вибір технологічних рішень для стабільного формування продуктивності та якості зерна кукурудзи в умовах кліматичної мінливості.

Використана література

1. García-Lara S., Serna-Saldivar S. O. Corn History and Culture. *Corn* (Third Ed.). Oxford : AACC International Press, 2019. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00001-2>
2. Miho A. Comparing technical efficiency of maize smallholder farmers in Tabora and Ruvuma regions of Tanzania: a frontier production approach. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*. 2017. Vol. 7, Iss. 9. P. 180–197. <https://doi.org/10.18488/journal.1005/2017.7.9/1005.9.180.197>
3. Grote U., Fasse A., Nguyen T. T., Erenstein O. Food Security and the Dynamics of Wheat and Maize Value Chains in Africa and Asia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. Vol. 4. Article 617009. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.617009>
4. Erenstein O., Chamberlin J., Sonder K. Estimating the global number and distribution of maize and wheat farms. *Global Food Security*. 2021. Vol. 30. Article 100558. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100558>
5. Olarinde L. O. Analysis of technical efficiency differentials among Maize farmers in Nigeria. *Working Papers*. 2011. URL: <https://aercafrica.org/old-website/wp-content/uploads/2018/07/RP232.pdf>
6. Hellin J., Krishna V. V., Erenstein O. et al. India's Poultry Revolution: The Rapid Growth of the Poultry Industry and Implications for its Sustenance and the Global Poultry Trade. *International Food and Agribusiness Management Review*. 2015. Vol. 18. P. 151–164. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.207008>
7. Falkowski T. B., Chankin A., Diemont S. A. W., Padian R. W. More than just corn and calories: A comprehensive assessment of the yield and nutritional content of a traditional Lacandon Maya milpa. *Food Security*. 2019. Vol. 11. P. 389–404. <https://doi.org/10.1007/s12571-019-00901-6>
8. Boundeth S., Nanseki T., Takeuchi S. Analysis on technical efficiency of maize farmers in the northern province of Laos. *African Journal of Agricultural Research*. 2012. Vol. 7, Iss. 49. P. 6579–6587. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.1814>
9. Jones P. G., Thornton P. K. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*. 2003. Vol. 13, Iss. 1. P. 51–59. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(02\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(02)00090-0)
10. Morris M., Mekuria M., Gerpacio R. Impacts of CIMMYT maize breeding research. *Crop Variety Improvement and its Effect on Productivity: The Impact of International Agricultural Research*. Wallingford : CABI Publishing, 2003. P. 135–158. <https://doi.org/10.1079/9780851995496.0135>
11. García-Lara S., Chuck-Hernandez C., Serna-Saldivar S. O. Development and Structure of the Corn Kernel. *Corn* (Third Ed.). Oxford : AACC International Press, 2019. P. 147–163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00006-1>
12. Wang C., Wu J. X. Production technology efficiency and its influencing factors of China's maize industry – based on the provincial panel data. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*. 2015. Vol. 36, Iss. 4. P. 23–32.
13. Jia L., Xia Y. Scale efficiency of grain production and influencing factors based on survey data from Heilongjiang, Henan and Sichuan. *Resources Science*. 2017. Vol. 39, Iss. 5. P. 924–933. <https://doi.org/10.18402/resci.2017.05.12>
14. Dios-Palomares R., Alcaide D., Diz J. et al. Analysis of the efficiency of farming systems in Latin America and the Caribbean considering environmental issues. *Revista Científica-Facultad de Ciencias Veterinarias*. 2015. Vol. 25, Iss. 1. P. 43–50.
15. Присяжнюк О. І., Климович Н. М., Полуніна О. В. та ін. Методологія і організація наукових досліджень в сільському господарстві та харчових технологіях. Київ : Нілан-ЛТД, 2021. 300 с. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2>
16. Ермантраут Е. Р., Присяжнюк О. І., Шевченко І. Л. Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті Statistica 6.0 : методичні вказівки. Київ : ПоліграфКонсалтинг, 2007. 56 с.

References

1. García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S. O. (2019). Corn history and culture. In *Corn* (3rd ed., pp. 1–18). AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00001-2>
2. Miho, A. (2017). Comparing technical efficiency of maize smallholder farmers in Tabora and Ruvuma regions of Tanzania: A frontier production approach. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 7(9), 180–197. <https://doi.org/10.18488/journal.1005/2017.7.9/1005.9.180.197>
3. Grote, U., Fasse, A., Nguyen, T. T., & Erenstein, O. (2021). Food security and the dynamics of wheat and maize value chains in Africa and Asia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, Article 617009. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.617009>
4. Erenstein, O., Chamberlin, J., & Sonder, K. (2021). Estimating the global number and distribution of maize and wheat farms. *Global Food Security*, 30, Article 100558. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100558>
5. Olarinde, L. O. (2011). *Analysis of technical efficiency differentials among maize farmers in Nigeria* (Working Paper). African Economic Research Consortium. <https://aercafrica.org/old-website/wp-content/uploads/2018/07/RP232.pdf>
6. Hellin, J., Krishna, V., Erenstein, O., Boeber, C., Hellin, J., Krishna, V., Erenstein, O., & Boeber, C. (2015). India's poultry revolution: The rapid growth of the poultry industry and implications for its sustenance and the global poultry trade. *International Food and Agribusiness Management Review*, 18, 151–164. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.207008>
7. Falkowski, T. B., Chankin, A., Diemont, S. A. W., & Padian, R. W. (2019). More than just corn and calories: A comprehensive assessment of the yield and nutritional content of a traditional Lacandon Maya milpa. *Food Security*, 11, 389–404. <https://doi.org/10.1007/s12571-019-00901-6>
8. Boundeth, S., Nanseki, T., & Takeuchi, S. (2012). Analysis on technical efficiency of maize farmers in the northern province of Laos. *African Journal of Agricultural Research*, 7(49), 6579–6587. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.1814>
9. Jones, P. G., & Thornton, P. K. (2003). The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*, 13(1), 51–59. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(02\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(02)00090-0)
10. Morris, M., Mekuria, M., & Gerpacio, R. (2003). Impacts of CIMMYT maize breeding research. In *Crop variety improvement and its effect on productivity: The impact of international agricultural research* (pp. 135–158). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851995496.0135>
11. García-Lara, S., Chuck-Hernandez, C., & Serna-Saldivar, S. O. (2019). Development and structure of the corn kernel. In *Corn* (3rd ed., pp. 147–163). AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00006-1>
12. Wang, C., & Wu, J. X. (2015). Production technology efficiency and its influencing factors of China's maize industry – Based on the provincial panel data. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 36(4), 23–32.
13. Jia, L., & Xia, Y. (2017). Scale efficiency of grain production and influencing factors based on survey data from Heilongjiang, Henan and Sichuan. *Resources Science*, 39(5), 924–933. <https://doi.org/10.18402/resci.2017.05.12>
14. Dios-Palomares, R., Alcaide, D., Diz, J., Jurado, M., Prieto, A., Morantes, M., & Zúñiga, C. A. (2015). Analysis of the efficiency of farming systems in Latin America and the Caribbean considering environmental issues. *Revista Científica-Facultad de Ciencias Veterinarias*, 25(1), 43–50.
15. Prysiashniuk, O. I., Klymovych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2> [In Ukrainian]
16. Ermantraut, E. R., Prysiashniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statistical analysis of agronomic research data in the Statistica 6.0 package: guidelines*. PolihrafKonsaltnyh. [In Ukrainian]

UDC 663.62:631.5/9

Prysiashniuk, O. I.*, & **Kopytov, O. V.** (2025). Modification variability and adaptability of maize depending on cultivation technology elements. *Advanced Agritechnologies*, 13(2). <https://doi.org/10.47414/na.13.2.2025.348241> [In Ukrainian]

*Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03141, Ukraine, *e-mail: ollpris@gmail.com*

Purpose. To establish the patterns of modification variability and adaptability of maize under the application of cryoprotectant and moisture-retaining agent in the Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** Field studies were conducted in 2023–2024 in production fields of the “Ahro-Ros-Invest” farm (Cherkasy region) on typical chernozem. The maize hybrid ‘DKC 4351’ was sown. The experimental design included the use of the cryoprotectant AMALGEROL ESSENCE for seed treatment and spraying crops after frost, combined with the application of the moisture-retaining agent AQUASORB (0, 50, 100, 150, and 200 kg/ha) during early spring cultivation. Modification variability and adaptability of the growth, yield, and quality traits of maize were assessed by variance (S^2), coefficient of variation (CV), and index

of phenotypic stability (IF). **Results.** It was established that the modification variability of the studied traits differed significantly. Seed germination and plant density had low variability (CV 2.1–5.0%), whereas grain yield and grain weight per cob showed increased sensitivity to environmental conditions (CV 6.0–17.0%). Among quality indicators, starch content in grain exhibited the highest stability (CV 1.6–2.0%), while protein content was more variable (CV 3.3–6.3%). Seed treatment with cryoprotectant combined with the application of AQUASORB at 50–100 kg/ha ensured the highest values of the phenotypic stability index for most traits. Under these conditions, the coefficient of variation of yield decreased from 16–17% in the control to 6–10%, while IF values increased 1.5–2.5 times. Grain yield under optimal technological factor combinations increased on average by 20–40% compared with the absolute control. Increasing the moisture-retaining agent rate to 150–200 kg/ha did not lead to further increases in mean values and resulted in higher variance and lower IF. **Conclusions.** The application of the cryoprotectant AMALGEROL ESSENCE for seed treatment combined with moderate application rates of the moisture-retaining agent AQUASORB (50–100 kg/ha) provides the highest adaptability and stability of maize yield and quality traits in the Forest Steppe of Ukraine, whereas post-stress use of cryoprotectant maintains productivity without high stability. The use of indices S^2 , CV, and IF enables objective assessment of the adaptive reliability of agrotechnologies and allows the establishment of a clearly defined adaptive optimum for maize cultivation, ensuring both high productivity and stability of yield and grain quality under climatic variability.

Keywords: maize; modification variability; adaptability; grain yield; grain quality; coefficient of variation; phenotypic stability index; cryoprotectant; moisture-retaining agent.

Надійшла / Received 22.08.2025
Погоджено до друку / Accepted 15.09.2025