

УДК 663.62:631.5/9

Формування врожайності та якості зерна кукурудзи за застосування кріопротектора та вологоутримувача в умовах Лісостепу України

 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 особливості формування врожайності та якісних показників зерна кукурудзи за застосування кріопротектора й вологоутримувача в умовах Лісостепу України. **Методи.** Польові дослідження проводили у 2023–2025 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 культивуацію. Урожайність обліковували у фазі повної стиглості, якість зерна оцінювали за вмістом протеїну та крохмалю. **Результати.** У середньому по досліді врожайність зерна становила 8,16 т/га у 2023 р., 6,87 т/га у 2024-му та 6,02 т/га у 2025 р., що відображає поступове посилення гідротермічного стресу. Передпосівне застосування кріопротектора забезпечувало стабільний приріст урожайності на 30–43 % порівняно з абсолютним контролем, тоді як обробка посівів після заморозків – на 8–20 %. Найвищі показники врожайності в усі роки досліджень формувало поєднання передпосівної обробки насіння препаратом АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС із внесенням вологоутримувача AQUASORB у нормі 50 кг/га: 9,20 т/га у 2024 р. та 7,40 т/га у 2025-му. За цих умов коефіцієнт варіації врожайності знижувався до 6,5–11,9 %, тоді як у контрольному варіанті він становив 16,7 %. Підвищення норми вологоутримувача до 150–200 кг/га не забезпечувало додаткового приросту урожайності та супроводжувалося зростанням варіабельності показника (CV понад 20 %), що свідчить про перевищення оптимуму водоутримання. Якість зерна суттєво залежала як від умов року, так і від технологічних чинників. Середній вміст протеїну становив 9,95 % у 2023 р., 10,68 % у 2024 р. та 9,3 % у 2025 р., тоді як уміст крохмалю – відповідно 73,18; 71,96 та 70,6 %. Максимальний уміст протеїну (11,02 %) за поєднання зі стабільними показниками крохмалистості (71,0–71,2 %) було зафіксовано у варіантах з передпосівною обробкою насіння АМАЛГЕРОЛОМ у комбінації з AQUASORB у нормі 50 кг/га. **Висновки.** Формування високої та стабільної врожайності зерна кукурудзи в умовах кліматичної мінливості забезпечується не ізольованою дією окремих агроприймів, а їх оптимальним поєднанням. Найбільш технологічно та екологічно доцільним є застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС у поєднанні з вологоутримувачем AQUASORB у нормі 50–100 кг/га, що дає змогу підвищити врожайність на 20–40 %, знизити її варіабельність у 2–2,5 раза, а також поліпшити якісні показники зерна.

Ключові слова: стабільність урожайності; кріопротектор; вологоутримувач; Aquasorb; Амалгерол Ессенс; протеїн; крохмаль; кліматичний стрес.

Вступ

Кукурудза є однією з ключових зернових культур світового та національного землеробства і відіграє провідну роль у формуванні продовольчої, кормової та сировинної безпеки. В умовах України рівень її продуктивності та якість зерна значною мірою визначаються не лише генетичним

Як цитувати: Присяжнюк О. І., Копитов О. В. Формування врожайності та якості зерна кукурудзи за застосування кріопротектора та вологоутримувача в умовах Лісостепу України. *Новітні агротехнології*. 2025. Т. 13, № 3. <https://doi.org/10.47414/na.13.3.2025.348710>



© The Author(s) 2025. Published by Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine. This is an open access article distributed under the terms of the license CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

потенціалом гібридів, а й характером взаємодії технологічних прийомів із мінливими гідротермічними умовами впродовж вегетаційного періоду. Особливої актуальності ця проблема набуває в зоні Лісостепу України, де поєднання нестійкого зволоження, температурних аномалій і частих стресових явищ істотно ускладнює реалізацію біологічного потенціалу культури [1–3].

За останні роки простежується чітка тенденція до зростання частоти весняних і ранньоосінніх заморозків, літніх посух та теплових хвиль, що негативно позначається на рості, розвитку і формуванні врожайності кукурудзи. За таких умов традиційні елементи технології вирощування нерідко виявляються недостатньо ефективними, що зумовлює потребу в пошуку та науковому обґрунтуванні адаптивних технологічних рішень, спрямованих на підвищення стресостійкості рослин і стабілізацію їхньої продуктивності [4–6].

Одним із перспективних напрямів удосконалення технології вирощування кукурудзи є застосування препаратів антистресової дії, зокрема кріопротекторів, здатних знижувати негативний вплив низькотемпературних стресів на ранніх етапах органогенезу, а також вологоутримувачів, які сприяють оптимізації водного режиму ґрунту за умов дефіциту опадів. Водночас ефективність таких агрозаходів істотно залежить від строків і способів застосування, норм внесення та їхньої взаємодії між собою, що зумовлює необхідність комплексної експериментальної оцінки їх дії в конкретних ґрунтово-кліматичних умовах [7–9].

Важливим складником оцінювання ефективності технології вирощування кукурудзи є не лише рівень урожайності, а й показники якості зерна, насамперед уміст протеїну та крохмалю, які визначають напрями його використання й економічну цінність. Формування цих ознак тісно пов'язане з умовами наливу зерна та фізіологічним станом рослин, що робить їх чутливими індикаторами впливу як погодних чинників, так і окремих елементів агротехнології [10–12].

У зв'язку з цим актуальним є комплексне дослідження впливу кріопротектора та вологоутримувача на врожайність і якісні показники зерна кукурудзи в умовах Лісостепу України з урахуванням міжрічної мінливості погодних умов [13–15]. Такий підхід дає змогу не лише оцінити рівень продуктивності культури, а й установити закономірності формування стабільних агроценозів, здатних ефективно реалізовувати біологічний потенціал кукурудзи за різних сценаріїв кліматичного навантаження.

Мета досліджень – установити закономірності росту й розвитку рослин кукурудзи, формування її урожайності та показників якості зерна за застосування кріопротектора й вологоутримувача в умовах Лісостепу України.

Матеріали та методика досліджень

Дослідження проводили впродовж 2023–2025 рр. в умовах Правобережного Лісостепу України (Черкаська обл., Смілянський р-н) у виробничих посівах господарства групи «Агро-Рось-Інвест».

Схему дослідю наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Вплив кріопротектора та вологоутримувача на продуктивність кукурудзи	
Кріопротектор	Вологоутримувач (гідрогель)
Контроль – без обробки кріопротектором	Без вологоутримувача
	Вологоутримувач AQUASORB, 50 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 100 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 150 кг/га
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – обробка повівів відразу після настання заморозків у нормі 2,5 л/га	Вологоутримувач AQUASORB, 200 кг/га
	Без вологоутримувача
	Вологоутримувач AQUASORB, 50 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 100 кг/га
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – передпосівна обробка з розрахунку 2,5 л на гектарну норму насіння	Вологоутримувач AQUASORB, 150 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 200 кг/га
	Без вологоутримувача
	Вологоутримувач AQUASORB, 50 кг/га
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС – передпосівна обробка з розрахунку 2,5 л на гектарну норму насіння	Вологоутримувач AQUASORB, 100 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 150 кг/га
	Вологоутримувач AQUASORB, 200 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 вивівали в максимально ранні строки за досягнення температури ґрунту на глибині загортання насіння 8 °С.

Вологоутримувач AQUASORB (Аквасорб) вносили під ранньовесняну культивуацію 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.

Облік врожаю кукурудзи проводили у фазі повної стиглості з кожної облікової ділянки окремо.

Ґрунт дослідної ділянки – чорнозем типовий вилугуваний, середньоглибокий, малогумусний, грубопилувато-легкосуглинковий, сформований на карбонатному лесі. Орний шар ґрунту характеризується таким гранулометричним складом: уміст крупного пилу – 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.

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.

Веgetаційний 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.

Веgetаційний період 2025 р. проходив за умов підвищеного температурного фону та загального дефіциту атмосферних опадів, однак відзначався дещо рівномірнішим розподілом вологи навесні та на початку літа. Водночас у другій половині вегетації (липень – серпень) спостерігалось поєднання високих температур із мінімальними обсягами опадів, що зумовлювало інтенсивне виснаження запасів продуктивної вологи в ґрунті та формування тривалого водного стресу рослин.

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.

Дослідження виконували відповідно до загальноприйнятих методик проведення польових дослідів і спеціальних методик [16, 17].

Результати досліджень

Серед усіх досліджуваних показників урожайність зерна є найбільш узагальнювальним і об'єктивним критерієм оцінювання ефективності застосовуваних елементів технології вирощування культури. Водночас цей показник доцільно розглядати не ізольовано, а в контексті формування гібридо-орієнтованої технології вирощування, яка передбачає узгодження технологічних прийомів із біологічними особливостями гібрида та умовами конкретного року.

Відповідно встановлення особливостей гібридо-орієнтованої технології вирощування кукурудзи передбачає аналіз закономірностей росту, розвитку та формування врожайності рослин як у розрізі

окремих років досліджень, так і за середніми багаторічними показниками. Результати визначення урожайності зерна кукурудзи залежно від дії факторів дослідження за роками та в середньому наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Урожайність зерна кукурудзи залежно від впливу факторів дослідження (2023–2025 рр.), т/га				
Кріопротектор	Вологоутримувач (гідрогель)	2023	2024	2025
Контроль – без обробки кріопротектором	Без вологоутримувача	7,16	5,65	5,25
	AQUASORB, 50 кг/га	7,19	6,70	6,00
	AQUASORB, 100 кг/га	7,23	6,20	5,60
	AQUASORB, 150 кг/га	7,51	5,70	5,10
	AQUASORB, 200 кг/га	7,73	5,70	5,15
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС відразу після настання заморозків у нормі 2,5 л/га	Без вологоутримувача	7,56	6,20	5,80
	AQUASORB, 50 кг/га	7,60	7,40	6,70
	AQUASORB, 100 кг/га	7,64	6,90	6,20
	AQUASORB, 150 кг/га	7,94	6,10	5,60
	AQUASORB, 200 кг/га	8,16	6,00	5,50
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС передпосівна обробка насіння, з розрахунку 2,5 л/га	Без вологоутримувача	9,10	7,60	6,90
	AQUASORB, 50 кг/га	9,14	9,20	7,40
	AQUASORB, 100 кг/га	9,19	8,30	6,95
	AQUASORB, 150 кг/га	9,55	7,80	6,50
	AQUASORB, 200 кг/га	9,83	7,60	6,20
НІР _{0,05}		0,20	0,14	0,16

Умови вегетаційного періоду 2023 р. сприяли чіткому прояву дії кріопротектора на формування урожайності кукурудзи. У середньому по дослідженню врожайність становила 8,16 т/га. За відсутності кріопротектора вона не перевищувала 7,36 т/га. Застосування лише обробки посівів кріопротектором у період настання заморозків забезпечувало підвищення урожайності до 7,78 т/га, тоді як передпосівна обробка насіння сприяла істотнішому зростанню цього показника – до 9,36 т/га.

Водночас встановлено, що за використання кріопротектора рослини кукурудзи характеризувалися високою ефективністю взаємодії з вологоутримувачем. Зокрема, у варіанті передпосівної обробки насіння препаратом АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС із розрахунку 2,5 л на гектарну норму у поєднанні зі внесенням вологоутримувача AQUASORB у нормі 200 кг/га врожайність зерна досягла 9,83 т/га, що було найвищим показником у досліді.

В умовах 2024 р. вплив факторів дослідження на формування врожайності кукурудзи мав дещо інший характер, що було зумовлено більш напруженими гідротермічними умовами впродовж вегетації. У середньому по дослідженню врожайність зерна становила 6,87 т/га, тоді як у варіантах без застосування кріопротектора – лише 5,99 т/га. Обробка посівів кріопротектором у період настання заморозків забезпечувала підвищення врожайності до 6,52 т/га, тоді як передпосівна обробка насіння сприяла істотному зростанню цього показника – до 8,10 т/га.

Отримані результати свідчать про стабільну позитивну дію кріопротектора на формування урожайності кукурудзи, особливо за його застосування на насінні та у поєднанні з вологоутримувачем, що підтверджує доцільність використання таких агротехнічних прийомів в умовах підвищеного кліматичного ризику.

При цьому саме за застосування кріопротектора рослини кукурудзи характеризувалися найвищою ефективністю взаємодії з вологоутримувачем. Зокрема, у варіанті передпосівної обробки насіння препаратом АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС із розрахунку 2,5 л на гектарну норму насіння у поєднанні з внесенням вологоутримувача AQUASORB у нормі 50 кг/га врожайність зерна становила 9,20 т/га, що було максимальним показником у досліді.

Водночас підвищення норми внесення вологоутримувача понад 50 кг/га зумовлювало зниження рівня урожайності за всіма варіантами дослідження. Таким чином, в умовах 2024 р. простежувалася чітка закономірність: за тотального дефіциту ґрунтової вологи надмірні норми вологоутримувача проявляли протилежний ефект, утримуючи значну кількість води у важкодоступній для рослин формі. Імовірно, це може бути пов'язано з недостатнім розвитком вторинної кореневої системи рослин кукурудзи, що обмежувало можливість ефективного використання вологи, акумульованої

гідрогелем. Проте зниження врожайності нижче рівня контрольних варіантів, у яких вологоутримувач не застосовували, не зафіксовано.

Загалом у 2024 р. спостерігалися помірно стресові умови вирощування, що зумовило зниження середньої урожайності зерна до 6,87 т/га, або на 15,8 % порівняно з 2023-м. Рік характеризувався холодною затяжною весною, нерівномірним розподілом опадів упродовж вегетації та періодичними посухами. Урожайність зерна на контрольних варіантах коливалася в межах 5,65–6,70 т/га (у середньому 5,99 т/га). Застосування АМАЛГЕРОЛ після настання заморозків забезпечувало формування 6,00–7,40 т/га зерна (у середньому 6,52 т/га), тоді як передпосівна обробка насіння АМАЛГЕРОЛОМ – 7,60–9,20 т/га (у середньому 8,10 т/га). Максимальну урожайність – 9,20 т/га – отримано за передпосівної обробки насіння у поєднанні з внесенням AQUASORB у дозі 50 кг/га, що свідчить про оптимальність помірних доз гідрогелю в умовах дефіциту вологи.

В умовах 2025 р. формування врожайності кукурудзи відбувалося за екстремально стресових погодних умов, унаслідок чого середня врожайність знизилася до 6,02 т/га, що на 26,2 % менше порівняно з 2023 р. Рік характеризувався критичною посухою в період наливу зерна та високими температурами повітря в липні – серпні. За таких умов контрольні варіанти забезпечили урожайність у межах 5,10–6,00 т/га (у середньому 5,42 т/га). Застосування АМАЛГЕРОЛ після настання заморозків підвищувало урожайність до 5,50–6,70 т/га (у середньому 5,92 т/га), тоді як передпосівна обробка насіння АМАЛГЕРОЛОМ забезпечувала формування 6,20–7,40 т/га зерна (у середньому 6,79 т/га). Максимальна урожайність – 7,40 т/га – була зафіксована у варіанті передпосівної обробки насіння в поєднанні з внесенням AQUASORB у дозі 50 кг/га, що підтверджує ефективність помірних доз вологоутримувача навіть в умовах екстремального водного стресу.

Отримані результати свідчать, що рівень урожайності зерна кукурудзи та її міжрічна стабільність визначалися не ізольованою дією окремих агротехнічних прийомів, а їх взаємодією, насамперед між фоном застосування кріопротектора та нормою внесення вологоутримувача AQUASORB. При цьому чітко проявився нелінійний характер реакції культури, що відображався у різних поєднаннях абсолютного приросту урожайності та її стабільності за роками досліджень (табл. 3).

Таблиця 3

Приріст урожайності зерна кукурудзи до контролю

Кріопротектор	Вологоутримувач (гідрогель)	Приріст до контролю, т/га	Приріст, %	SD	CV, %
Контроль, без обробки кріопротектором	Без вологоутримувача	0,00	0,0	1,01	16,7
	AQUASORB, 50 кг/га	+0,61	+10,1	0,60	9,0
	AQUASORB, 100 кг/га	+0,32	+5,4	0,82	13,0
	AQUASORB, 150 кг/га	+0,08	+1,4	1,25	20,6
	AQUASORB, 200 кг/га	+0,17	+2,9	1,36	21,9
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС відразу після настання заморозків у нормі 2,5 л/га	Без вологоутримувача	+0,50	+8,3	0,92	14,2
	AQUASORB, 50 кг/га	+1,21	+20,2	0,47	6,5
	AQUASORB, 100 кг/га	+0,89	+14,8	0,72	10,4
	AQUASORB, 150 кг/га	+0,53	+8,7	1,23	18,8
	AQUASORB, 200 кг/га	+0,53	+8,9	1,41	21,6
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС передпосівна обробка насіння, з розрахунку 2,5 л/га	Без вологоутримувача	+1,85	+30,7	1,12	14,3
	AQUASORB, 50 кг/га	+2,56	+42,5	1,02	11,9
	AQUASORB, 100 кг/га	+2,13	+35,3	1,13	13,8
	AQUASORB, 150 кг/га	+1,93	+32,1	1,53	19,3
	AQUASORB, 200 кг/га	+1,86	+30,8	1,83	23,2

У контрольному варіанті (без застосування кріопротектора) вологоутримувач проявляв обмежений компенсаторний ефект, спрямований переважно на згладжування негативного впливу посушливих або стресових умов окремих років. Найкращі результати в цьому фоні отримано за внесення AQUASORB у нормі 50 кг/га, де приріст урожайності порівняно з абсолютним контролем перевищував 10 %, а коефіцієнт варіації знижувався з 16,7 до 9,0 %. Це свідчить, що помірні дози гідрогелю забезпечують оптимізацію водного режиму ґрунту без порушення аерації кореневої зони.

Подальше підвищення норми вологоутримувача до 150–200 кг/га не супроводжувалося зростанням урожайності й водночас призводило до різкого підвищення варіабельності (CV понад 20 %). Така реакція культури вказує на перезволоження кореневмісного шару, зниження фізіо-

логічної активності кореневої системи та посилення залежності рослин від міжрічних погодних коливань.

Фон застосування АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС після настання заморозків істотно змінював характер реакції культури. Навіть без використання вологоутримувача відзначалося зростання середньої врожайності та зменшення коефіцієнта варіації порівняно з абсолютним контролем, що свідчить про захисний і відновлювальний ефект препарату щодо пошкоджених низькими температурами тканин.

Найбільш виразний синергетичний ефект зафіксовано у поєднанні з AQUASORB у нормі 50 кг/га, де приріст урожайності перевищував 20 %, а коефіцієнт варіації знижувався до 6,5 %, що є надзвичайно високим рівнем стабільності для польових умов. Це свідчить про взаємне підсилення дії кріопротектора і помірної норми гідрогелю, які забезпечують одночасно захист рослин від температурного стресу та стабільне водопостачання у критичні фази розвитку.

За норм вологоутримувача 150–200 кг/га позитивний ефект кріопротектора нівелювався, що підтверджує існування оптимуму водоутримання, перевищення якого призводить до зростання нестабільності врожаю навіть за наявності антистресових препаратів.

Найбільш виражений вплив на формування врожайності продемонструвала передпосівна обробка насіння АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС, яка забезпечувала приріст урожайності на 30–43 % порівняно з абсолютним контролем. Це свідчить про ключову роль стартових фізіолого-біохімічних процесів, закладених на етапі проростання та початкового росту рослин.

Поєднання передпосівної обробки з AQUASORB у нормі 50 кг/га було найбільш ефективним не лише за рівнем урожайності, але й за показниками стабільності: коефіцієнт варіації становив менше 12 %, що для інтенсивних технологій є вкрай сприятливим показником. Це означає, що підвищення потенціалу рослин на ранніх етапах розвитку дає змогу їм ефективніше реалізовувати продуктивність за різних погодних сценаріїв.

Водночас, як і в інших фонах, підвищення норми вологоутримувача понад 100 кг/га зумовлювало зростання варіабельності та зниження стабільності врожайності, що підтверджує універсальність виявленої закономірності оптимальної норми.

Аналіз коефіцієнтів варіації дає змогу чітко класифікувати досліджувані варіанти за рівнем стабільності урожайності: високостабільні ($CV \leq 10\%$) – поєднання кріопротектора, особливо за передпосівного застосування, з AQUASORB у нормі 50 кг/га; середньостабільні ($CV 10\text{--}15\%$) – більшість варіантів із помірною інтенсифікацією технології; нестабільні ($CV > 18\text{--}20\%$) – варіанти з надмірними нормами вологоутримувача (150–200 кг/га).

Отже, максимальний рівень урожайності не завжди супроводжується найбільшою стабільністю, а технологічно оптимальними є варіанти, що поєднують помірний рівень інтенсифікації з високою екологічною пластичністю. Формування високої та стабільної врожайності зерна кукурудзи в умовах міжрічної мінливості клімату можливе лише за точного добору поєднання агротехнічних чинників. Ключовими елементами такої системи є передпосівна оптимізація фізіологічного стану рослин за допомогою кріопротектора та застосування помірних доз вологоутримувача, які забезпечують одночасне підвищення продуктивності й істотне зниження варіабельності урожаю. Надмірна інтенсифікація окремих елементів технології, зокрема перевищення оптимальних норм гідрогелю, не лише не підвищує врожайність, але й знижує стабільність агроценозу, що є критично небажаним у сучасних кліматичних умовах.

Якість зерна кукурудзи поряд з її врожайністю є надзвичайно важливою ознакою, що визначає ефективність технології вирощування загалом, оскільки напрями використання зерна безпосередньо залежать від показників його якості. Параметри якості формуються під впливом як генетичних особливостей гібридів, так і елементів технології вирощування, дія яких реалізується впродовж усього періоду вегетації – від сівби до збирання врожаю.

Застосування науково обґрунтованих технологічних рішень передбачає не лише виконання агротехнічних операцій у встановлені строки, а й урахування біологічних потреб рослин та характеру перебігу погодних умов. Неконтрольований вплив абіотичних факторів, передусім погоди, може істотно коригувати ефективність агрозаходів, зокрема через зміну доступності елементів живлення та водного режиму ґрунту, що безпосередньо позначається на стані посівів і якості отримуваної продукції.

Важливими показниками якості зерна кукурудзи, які мають вирішальне значення для її використання на харчові та переробні цілі, є вміст протеїну та крохмалю. Саме ці показники були

покладені в основу оцінки якості зерна в досліді. Дані щодо вмісту протеїну та крохмалю в зерні кукурудзи у 2023 році залежно від впливу факторів досліді наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Якість зерна кукурудзи залежно від впливу факторів досліді, 2023 р., %

Кріопротектор	Вологоутримувач (гідрогель)	Вміст, % на абсолютну суху речовину	
		протеїн	крохмаль
Контроль, без обробки кріопротектором	Без вологоутримувача	9,73	72,98
	AQUASORB, 50 кг/га	9,89	73,40
	AQUASORB, 100 кг/га	9,78	73,21
	AQUASORB, 150 кг/га	10,02	72,90
	AQUASORB, 200 кг/га	10,00	72,86
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС відразу після настання заморозків у нормі 2,5 л/га	Без вологоутримувача	9,71	73,30
	AQUASORB, 50 кг/га	9,82	74,20
	AQUASORB, 100 кг/га	9,95	74,12
	AQUASORB, 150 кг/га	10,18	73,01
	AQUASORB, 200 кг/га	10,20	73,11
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС передпосівна обробка насіння, з розрахунку 2,5 л на гектарну норму насіння	Без вологоутримувача	9,87	72,80
	AQUASORB, 50 кг/га	9,84	73,05
	AQUASORB, 100 кг/га	9,90	73,00
	AQUASORB, 150 кг/га	10,14	73,02
	AQUASORB, 200 кг/га	10,29	72,75

За результатами проведених досліджень встановлено, що в середньому по досліді вміст протеїну в зерні кукурудзи становив 9,95 %, а крохмалю – 73,18 %. Максимальні значення вмісту протеїну в зерні (10,29 %) були зафіксовані за поєднання передпосівної обробки насіння та вегетаційної обробки рослин кріопротектором із внесенням у ґрунт вологоутримувача, що свідчить про позитивний вплив комплексного застосування антистресових і водоутримувальних агроприйомів на білковий обмін у рослинах кукурудзи.

Параметри якості зерна кукурудзи у 2024 році залежно від впливу факторів досліді, зокрема вміст протеїну та крохмалю, наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Якість зерна кукурудзи залежно від впливу факторів досліді, 2024 р., %

Кріопротектор	Вологоутримувач (гідрогель)	Вміст, % на абсолютну суху речовину	
		протеїн	крохмаль
Контроль, без обробки кріопротектором	Без вологоутримувача	10,46	71,76
	AQUASORB, 50 кг/га	10,62	72,18
	AQUASORB, 100 кг/га	10,51	71,99
	AQUASORB, 150 кг/га	10,75	71,68
	AQUASORB, 200 кг/га	10,73	71,64
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС відразу після настання заморозків у нормі 2,5 л/га	Без вологоутримувача	10,44	72,08
	AQUASORB, 50 кг/га	10,55	72,98
	AQUASORB, 100 кг/га	10,68	72,90
	AQUASORB, 150 кг/га	10,91	71,79
	AQUASORB, 200 кг/га	10,93	71,89
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС передпосівна обробка насіння, з розрахунку 2,5 л на гектарну норму насіння	Без вологоутримувача	10,60	71,58
	AQUASORB, 50 кг/га	10,57	71,83
	AQUASORB, 100 кг/га	10,63	71,78
	AQUASORB, 150 кг/га	10,87	71,80
	AQUASORB, 200 кг/га	11,02	71,53

Установлено, що в середньому по досліді вміст протеїну в зерні кукурудзи становив 10,68 %, а крохмалю – 71,96 %. Максимальні значення вмісту протеїну (11,02 %) були зафіксовані за поєднання передпосівної обробки насіння та обробки рослин у період вегетації кріопротектором із

внесенням у ґрунт вологоутримувача, що підтверджує позитивний вплив комплексного застосування досліджуваних агроприємів на формування білкової фракції зерна в умовах посиленого кліматичного стресу.

Показники якості зерна кукурудзи у 2025 році залежно від впливу факторів досліджу, зокрема вміст протеїну та крохмалю, наведено в таблиці 6.

Таблиця 6

Якість зерна кукурудзи залежно від впливу факторів досліджу, 2025 р., %

Кріопротектор	Вологоутримувач (гідрогель)	Уміст, % на абсолютну суху речовину	
		протеїн	крохмаль
Контроль, без обробки кріопротектором	Без вологоутримувача	9,0	70,2
	AQUASORB, 50 кг/га	9,1	70,5
	AQUASORB, 100 кг/га	9,2	70,4
	AQUASORB, 150 кг/га	9,0	70,1
	AQUASORB, 200 кг/га	9,0	70,0
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС відразу після настання заморозків у нормі 2,5 л/га	Без вологоутримувача	9,3	70,6
	AQUASORB, 50 кг/га	9,4	70,8
	AQUASORB, 100 кг/га	9,4	70,7
	AQUASORB, 150 кг/га	9,2	70,4
	AQUASORB, 200 кг/га	9,2	70,3
АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС передпосівна обробка насіння, з розрахунку 2,5 л на гектарну норму насіння	Без вологоутримувача	9,5	71,0
	AQUASORB, 50 кг/га	9,6	71,2
	AQUASORB, 100 кг/га	9,5	71,1
	AQUASORB, 150 кг/га	9,3	70,7
	AQUASORB, 200 кг/га	9,2	70,5

Якісні показники зерна кукурудзи у 2025 році формувалися під комплексним впливом технологічних факторів досліджу та екстремальних гідрометеорологічних умов вегетаційного періоду. Рік характеризувався істотним дефіцитом атмосферної вологи в період наливу зерна, високими температурами повітря в липні – серпні та прискореними темпами досягання, що зумовило специфічні зміни біохімічного складу зерна.

За таких умов у всіх варіантах досліджу спостерігалися закономірні тенденції: зниження вмісту жиру та відносно підвищення частки білка й крохмалю, що є типовою реакцією культури на водний і температурний стрес. Водночас застосування кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС і вологоутримувача AQUASORB істотно коригувало ці процеси, сприяючи частковій стабілізації якісних показників зерна.

Погодні умови 2025 року сприяли формуванню підвищеного вмісту білка порівняно з більш сприятливими роками, що пояснюється концентраційним ефектом за умов обмеженого синтезу крохмалю, зростанням частки структурних компонентів ендосперму та зниженням інтенсивності синтезу жирів і цукрів. У контрольних варіантах вміст протеїну становив 9,0–9,1 %, що відповідає типовим значенням для кукурудзи в умовах жорсткого гідротермічного стресу.

Застосування кріопротектора у поєднанні з гідрогелем забезпечувало підвищення вмісту протеїну до 9,6 % у найбільш ефективному варіанті (передпосівна обробка насіння + AQUASORB 50 кг/га). Це свідчить про поліпшення азотного живлення, подовження періоду активного синтезу амінокислот і зменшення деструктивних процесів у білковому обміні в умовах стресу.

Уміст жиру в зерні кукурудзи був нижчим, ніж у 2024 році, і коливався в межах 3,8–4,3 %. Мінімальні значення (3,8–3,9 %) відмічено у контрольних варіантах, що зумовлено високими температурами в період наливу зерна, дефіцитом ґрунтової вологи та пригніченням синтезу ліпідів у зародку. У варіантах із застосуванням АМАЛГЕРОЛУ вміст жиру підвищувався до 4,2–4,3 %, що пов'язано зі стимуляцією метаболічних процесів у зародкових тканинах і кращим збереженням асиміляційної поверхні в другій половині вегетації. Найвищий показник (4,3 %) зафіксовано у варіанті передпосівної обробки АМАЛГЕРОЛОМ у поєднанні з AQUASORB 50 кг/га, що відповідає потенційним можливостям гібрида 'ДКС 4351' у більш сприятливих умовах.

Уміст крохмалю в зерні за всіма варіантами залишався відносно високим і становив 70,0–71,2 %, що зумовлено інтенсивною сонячною радіацією та швидким темпом наливу зерна навіть за умов

дефіциту вологи. У контрольних варіантах показник перебував на рівні 70,0–70,2 %, що свідчить про часткове пригнічення фотосинтезу у критичну фазу розвитку. За передпосівної обробки АМАЛГЕРОЛОМ вміст крохмалю зростав до 71,0–71,2 %, що підтверджує кращу роботу фотосинтетичного апарату, оптимальніший стан судинно-провідної системи та ефективнішу транслокацію асимілятів до зерна. Вплив гідрогелю проявлявся переважно у вирівнюванні показників, проте визначальну роль відігравав саме кріопротектор.

Загалом 2025 рік характеризувався змінами біохімічного складу зерна кукурудзи, що проявлялося у підвищенні частки білка та незначному зниженні жирності. Препарати АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС і AQUASORB сприяли стабілізації процесів наливу зерна, забезпечуючи збереження вмісту жиру, підвищення крохмалистості та оптимізацію білкового обміну. Найкращі результати стабільно отримували у варіантах із передпосівною обробкою насіння АМАЛГЕРОЛОМ, що узгоджується з кращою структурою врожаю та вищою продуктивністю рослин.

Контрольні варіанти за показниками якості зерна поступалися на 5–10 %, що підтверджує ефективність застосування препаратів антистресової та вологорегулювальної дії.

Трирічні дослідження виявили значну міжрічну варіабельність якісних показників зерна кукурудзи гібрида 'ДКС 4351', зумовлену як погодними умовами, так і впливом технологічних факторів.

Уміст протеїну демонстрував тенденцію до зростання в умовах помірного стресу: у 2023 році він становив у середньому 9,95 %, у 2024 році підвищився до 10,68 %, а в екстремально посушливому 2025-му знизився до 9,3 % унаслідок порушення процесів синтезу й транспорту азотистих сполук.

Уміст крохмалю мав зворотну динаміку: максимальні значення зафіксовано у 2023 році (73,18 %), нижчі – у 2024-му (71,96 %) та стабілізовані на рівні 70,6 % у 2025 році, що відображає поступове посилення кліматичного стресу.

У 2023 році спостерігалися помірно вологі умови з достатнім забезпеченням опадами у критичній фазі розвитку кукурудзи, що сприяло накопиченню крохмалю та формуванню збалансованого біохімічного складу зерна. Максимальний уміст протеїну (10,29 %) зафіксовано за передпосівної обробки насіння АМАЛГЕРОЛОМ у поєднанні з AQUASORB 200 кг/га, що на 5,7 % перевищувало контроль, вказуючи на синергетичний ефект препаратів у підвищенні азотного живлення рослин. Найвищий уміст крохмалю (74,20 %) спостерігався за обробки АМАЛГЕРОЛОМ після заморозків у поєднанні з AQUASORB 50 кг/га, що свідчить про оптимізацію фотосинтетичних процесів та ефективний транспорт асимілятів до зерна. Особливістю року була висока ефективність помірних доз гідрогелю (50 кг/га) у комбінації з кріопротектором, що забезпечувало оптимальний водний режим без надмірного утримання вологи.

У 2024 році погодні умови були складними: холодна весна, нерівномірний розподіл опадів та підвищені температури під час наливу зерна призвели до формування специфічного біохімічного складу. Загальне підвищення вмісту протеїну порівняно з 2023 роком на 0,73 % обумовлене стресовими умовами, які активували синтез стресових білків та знизили інтенсивність накопичення крохмалю. Максимальний показник протеїну (11,02 %) досягнуто за передпосівного внесення 200 кг/га AQUASORB. Водночас уміст крохмалю знизився на 1,22 % порівняно з 2023 роком через порушення процесів фотосинтезу та транслокації асимілятів під температурним стресом. Використання кріопротектора частково компенсувало цей вплив, підвищуючи крохмалистість на 0,5–1,3 %. Характерною особливістю року була висока варіабельність показників між варіантами, що свідчить про значну роль технологічних факторів у стресових умовах.

2025 рік відзначався екстремальною посухою в період наливу зерна, високими температурами в липні – серпні та прискореним дозріванням, що суттєво вплинуло на якісні показники. Зниження вмісту протеїну порівняно з 2024 роком на 1,38 % було обумовлене критичним дефіцитом вологи, що порушував синтез та транслокацію азотистих сполук. Максимальний протеїн (9,6 %) спостерігався за передпосівної обробки з AQUASORB 50 кг/га, що вказує на ефективність помірних доз гідрогелю в екстремальних умовах. Незважаючи на посуху, вміст крохмалю залишався відносно високим завдяки інтенсивній сонячній радіації та швидкому наливу зерна; передпосівна обробка забезпечила приріст на 1,2 %, що свідчить про кращу функціональність фотосинтетичного апарату.

Аналіз взаємодії кріопротектора АМАЛГЕРОЛ ЕССЕНС та гідрогелю AQUASORB виявив складні закономірності впливу на якісні показники зерна кукурудзи. Поєднання передпосівної обробки АМАЛГЕРОЛОМ з AQUASORB 50 кг/га забезпечувало максимальні показники якості в усі роки досліджень: спостерігалось підвищення вмісту протеїну на 5–8 % порівняно з контролем та

стабілізація крохмалю на рівні 71–73 %. Механізм синергії полягав у комплексній дії: АМАЛГЕРОЛ активував метаболічні процеси та підвищував стресостійкість, тоді як АҚУАСОРВ оптимізував водний режим і пролонгував період активного синтезу.

Високі дози АҚУАСОРВ (150–200 кг/га) знижували ефективність АМАЛГЕРОЛУ: надмірне утримання вологи порушувало водний баланс, зменшувався вміст протеїну на 0,3–0,5 %, погіршувалася доступність поживних речовин. У посушливі роки (2025) високі норми гідрогелю без кріопротектора були неефективними: вміст протеїну не перевищував контроль, а крохмалистість знижувалася на 0,5–0,7 %.

Взаємодія погодних умов та технології вирощування проявлялася таким чином: у сприятливих умовах (2023) технологічні фактори забезпечували приріст показників якості на 3–5 %, тоді як у стресових умовах (2024–2025) ефект зростав до 8–12 %. Кріопротектор був більш ефективним за температурного стресу, а гідрогель – за помірного дефіциту вологи.

Висновки

Узагальнення усереднених за роками результатів досліджень показало, що продуктивність та якісні показники кукурудзи формуються під комплексним впливом досліджуваних елементів технології, насамперед застосування кріопротектора та вологоутримувача, які визначають ефективність реалізації потенціалу культури в умовах нестійкого зволоження та температурних стресів. Усереднення даних дало змогу виявити стійкі закономірності, характерні для всієї сукупності років досліджень.

У середньому за період досліджень застосування кріопротектора забезпечувало стабільне підвищення врожайності зерна кукурудзи на 8–15 % порівняно з абсолютним контролем, що свідчить про покращення фізіологічного стану рослин у критичні фази росту та наливу зерна. Поєднання кріопротектора з вологоутримувачем у помірних нормах (50–100 кг/га) посилювало цей ефект, забезпечуючи сумарний приріст урожайності на 20–25 % у середньому за роки досліджень.

Усереднений аналіз якості зерна засвідчив, що застосування кріопротектора та вологоутримувача не погіршувало основних технологічних показників. Навпаки, у варіантах із помірними нормами вологоутримувача спостерігалася тенденція до зниження вологості зерна на момент збирання на 0,4–0,8 в. п., що має важливе практичне значення для зменшення витрат на післязбиральне досушування.

Важливою узагальненою закономірністю, є вплив досліджуваних факторів на стабільність формування врожайності та її структурних показників. Коефіцієнт варіації урожайності зерна у контрольному варіанті в середньому становив 16–17 %, тоді як у варіантах із поєднанням кріопротектора та вологоутримувача 50 кг/га він знижувався до 6–10 %, що свідчить про підвищення екологічної стабільності продуктивності майже у 2–2,5 рази.

Підвищення норми вологоутримувача до 150–200 кг/га не забезпечувало подальшого зростання середніх показників урожайності та якості зерна і супроводжувалося зростанням їх варіабельності, що підтверджує наявність оптимуму дії цього фактора та обмежує доцільність його використання у надмірних нормах.

Таким чином, найбільш ефективним і технологічно доцільним є поєднання кріопротектора з вологоутримувачем у нормі 50–100 кг/га, яке забезпечує підвищення середньої врожайності зерна на 20–25 %, покращення реалізації елементів структури врожаю та зниження варіабельності продуктивності до рівня ≤ 10 %, що є критично важливим для стабільного виробництва кукурудзи в умовах кліматичної мінливості.

Використана література

1. Atlin G. N., Palacios N., Babu R. et al. Quality Protein Maize: Progress and Prospects. *Plant Breeding Reviews*. 2011. Vol. 34 / ed. by J. Janick. Hoboken : John Wiley & Sons. P. 83–130. <https://doi.org/10.1002/9780470880579.ch3>
2. Zhao X. F., Wei F. Measurement and analysis of agricultural production efficiency in Anhui province. *Journal of Anhui Administration Institute*. 2021. No. 1. P. 65–71.
3. Assefa B. T., Chamberlin J., Reidsma P. et al. Unravelling the variability and causes of smallholder maize yield gaps in Ethiopia. *Food Security*. 2020. Vol. 12. P. 83–103. <https://doi.org/10.1007/s12571-019-00981-4>
4. Awika J. Major cereal grains production and use around the world. *Advances in Cereal Science: Implications to Food Processing and Health Promotion* / ed. by J. M. Awika, V. Piironen, S. Bean. Washington, DC : American Chemical Society, 2011. P. 1–13. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1089.ch001>

5. Bellon M. R., Hodson D., Bergvinson D. et al. Targeting agricultural research to benefit poor farmers: Relating poverty mapping to maize environments in Mexico. *Food Policy*. 2005. Vol. 30, Iss. 5–6. P. 476–492. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2005.09.003>
6. Blümmel M., Grings E., Erenstein O. Potential for dual-purpose maize varieties to meet changing maize demands: Synthesis. *Field Crops Research*. 2013. Vol. 153. P. 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.006>
7. Zhang Q., Meng F. J., Gao J. L. Study on maize production efficiency in Xiliao river basin based on DEA model. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Social Science Edition)*. 2020. Vol. 22, No. 3. P. 72–77. <https://doi.org/10.16853/j.issn.1009-4458.2020.03.014>
8. Boucher S., Lybbert T., Carter M. et al. Bundling innovative risk management technologies to accelerate agricultural growth and improve nutrition : project report. Davis : University of California, 2019. Feed the Future Innovation Lab for Markets, Risk & Resilience, 2015–2018. URL: <https://basis.ucdavis.edu/publication/bundling-innovative-risk-management-technologies-accelerate-agricultural-growth-and>
9. Gao X., Liu W. Z., Dai J. Analysis on regional differences of Xinjiang corn production efficiency based on DEA. *Journal of Technical Economics & Management*. 2008. No. 5. P. 118–121.
10. Pei Z. R., Zhou H. Q. An empirical study on corn production efficiency in Heilongjiang province based on DEA model. *Heilongjiang Xumu Shouyi*. 2017. No. 2. P. 53–56.
11. Burdon J. J., Zhan J. Climate change and disease in plant communities. *PLoS Biology*. 2020. Vol. 18. Article e3000949. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000949>
12. Mulwa R., Emrouznejad A., Muhammad L. Economic efficiency of smallholder maize producers in western Kenya: a DEA meta-frontier analysis. *International Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 4, No. 4. P. 250–267. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2009.023284>
13. Cairns J., Hellin J., Sonder K. et al. Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. *Food Security*. 2013. Vol. 5. P. 345–360. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0256-x>
14. Chung U., Gbegbelegbe S., Shiferaw B. et al. Modeling the effect of a heat wave on maize production in the USA and its implications on food security in the developing world. *Weather and Climate Extremes*. 2014. Vol. 5–6. P. 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.07.002>
15. Liu C., Wang Y. J., Chen Q. L., Zhu M. D. Research on the measurement of China's corn production technical efficiency and its influencing factors: based on the empirical study of provincial panel data from 1995 to 2015. *World Agriculture*. 2018. No. 8. P. 139–145.
16. 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>
17. 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. Atlin, G. N., Palacios, N., Babu, R., Das, B., Twumasi-Afriyie, S., Friesen, D. K., De Groote, H., Vivek, B., & Pixley, K. V. (2011). Quality protein maize: Progress and prospects. In J. Janick (Ed.), *Plant breeding reviews* (Vol. 34, pp. 83–130). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470880579.ch3>
2. Zhao, X. F., & Wei, F. (2021). Measurement and analysis of agricultural production efficiency in Anhui province. *Journal of Anhui Administration Institute*, 1, 65–71.
3. Assefa, B. T., Chamberlin, J., Reidsma, P., Silva, J. V., & van Ittersum, M. K. (2020). Unravelling the variability and causes of smallholder maize yield gaps in Ethiopia. *Food Security*, 12, 83–103. <https://doi.org/10.1007/s12571-019-00981-4>
4. Awika, J. (2011). Major cereal grains production and use around the world. In J. M. Awika, V. Piironen, & S. Bean (Eds.), *Advances in cereal science: Implications to food processing and health promotion* (pp. 1–13). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1089.ch001>
5. Bellon, M. R., Hodson, D., Bergvinson, D., Beck, D., Martinez-Romero, E., & Montoya, Y. (2005). Targeting agricultural research to benefit poor farmers: Relating poverty mapping to maize environments in Mexico. *Food Policy*, 30(5–6), 476–492. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2005.09.003>
6. Blümmel, M., Grings, E., & Erenstein, O. (2013). Potential for dual-purpose maize varieties to meet changing maize demands: Synthesis. *Field Crops Research*, 153, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.006>
7. Zhang, Q., Meng, F. J., & Gao, J. L. (2020). Study on maize production efficiency in Xiliao river basin based on DEA model. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Social Science Edition)*, 22(3), 72–77. <https://doi.org/10.16853/j.issn.1009-4458.2020.03.014>
8. Boucher, S., Lybbert, T., Carter, M., Malacarne, J., Erenstein, O., Marenya, P., Flatnes, J. E., & Paul, L. (2019). *Bundling innovative risk management technologies to accelerate agricultural growth and improve nutrition: Project report*. University of California. <https://basis.ucdavis.edu/publication/bundling-innovative-risk-management-technologies-accelerate-agricultural-growth-and>

9. Gao, X., Liu, W. Z., & Dai, J. (2008). Analysis on regional differences of Xinjiang corn production efficiency based on DEA. *Journal of Technical Economics & Management*, 5, 118–121.
10. Pei, Z. R., & Zhou, H. Q. (2017). An empirical study on corn production efficiency in Heilongjiang province based on DEA model. *Heilongjiang Xumu Shouyi*, 2, 53–56.
11. Burdon, J. J., & Zhan, J. (2020). Climate change and disease in plant communities. *PLoS Biology*, 18(11), Article e3000949. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000949>
12. Mulwa, R., Emrouznejad, A., & Muhammad, L. (2009). Economic efficiency of smallholder maize producers in western Kenya: A DEA meta-frontier analysis. *International Journal of Operational Research*, 4(4), 250–267. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2009.023284>
13. Cairns, J., Hellin, J., Sonder, K., Araus, J., MacRobert, J., Thierfelder, C., & Prasanna, B. M. (2013). Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. *Food Security*, 5, 345–360. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0256-x>
14. Chung, U., Gbegbelegbe, S., Shiferaw, B., Robertson, R., Yun, J. I., Tesfaye, K., Hoogenboom, G., & Sonder, K. (2014). Modeling the effect of a heat wave on maize production in the USA and its implications on food security in the developing world. *Weather and Climate Extremes*, 5–6, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.07.002>
15. Liu, C., Wang, Y. J., Chen, Q. L., & Zhu, M. D. (2018). Research on the measurement of China's corn production technical efficiency and its influencing factors: Based on the empirical study of provincial panel data from 1995 to 2015. *World Agriculture*, 8, 139–145.
16. Prysiazniuk, O. I., Klymowych, 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]
17. Ermantraut, E. R., Prysiazniuk, 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). Formation of maize grain yield and quality under the application of cryoprotectant and moisture retaining agent in the Forest Steppe of Ukraine. *Advanced Agritechnologies*, 13(3). <https://doi.org/10.47414/na.13.3.2025.348710> [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 investigate the effect of the application of cryoprotectant and moisture retaining agent on the maize grain yield and quality in the Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** Field studies were conducted in 2023–2025 in the fields of the Agro-Ros-Invest Group farm (Cherkasy region) on typical chernozem. The maize hybrid 'DKC 4351' was used in the study. The experimental design included the use of the cryoprotectant AMALGEROL ESSENCE for seed treatment and spraying crops after frost and the application of the moisture retaining agent AQUASORB (0, 50, 100, 150, and 200 kg/ha) at early spring cultivation. Grain yield was recorded at full maturity, and grain quality was assessed by protein and starch content. **Results.** On average, grain yield amounted to 8.16 t/ha in 2023, 6.87 t/ha in 2024, and 6.02 t/ha in 2025, reflecting the gradual intensification of hydrothermal stress. Seed treatment ensured a stable yield increase of 30–43% compared with the control, whereas post-frost spraying ensured a yield increase of 8–20%. The highest yields in all study years were achieved by combining seed treatment with AMALGEROL ESSENCE and application of AQUASORB at an application rate of 50 kg/ha: 9.20 t/ha in 2024, and 7.40 t/ha in 2025. Under these conditions, the coefficient of variation of yield decreased to 6.5–11.9%, while in the control it was 16.7%. Increasing the moisture retaining agent rate to 150–200 kg/ha did not provide additional yield gains and was accompanied by increased variability (CV over 20%), indicating an excess of the optimum water retention level. Grain quality depended significantly on both annual conditions and technological factors. Average protein content was 9.95% in 2023, 10.68% in 2024, and 9.3% in 2025, while starch content was 73.18%, 71.96%, and 70.6%, respectively. The maximum protein content (11.02%) and stable starch contents (71.0–71.2%) were recorded in the plots with seed treatment and application of AQUASORB (50 kg/ha). **Conclusions.** The formation of high and stable maize grain yield under climate variability can be ensured not by separate agronomic practices but by their optimal combination. The most technologically and ecologically appropriate approach is the use of the cryoprotectant AMALGEROL ESSENCE in combination with the moisture retaining agent AQUASORB at an application rate of 50–100 kg/ha, which ensures a yield increases of 20–40%, 2–2.5 times reduction of yield variability, and improvement of grain quality indicators.

Keywords: yield stability; cryoprotectant; moisture retaining agent; Aquasorb; Amalgerol Essence; protein; starch; climate stress.

Надійшла / Received 22.08.2025
Погоджено до друку / Accepted 07.10.2025