УДК 581.54(477.7):633.19
DOI https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2026.35.35

ОЦІНЮВАННЯ КЛІМАТИЧНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ БАГАТОРІЧНОЇ ЗЕРНОВОЇ КУЛЬТУРИ KERNZA (*THINOPYRUM INTERMEDIUM*) В УМОВАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ СПЕКТРАЛЬНИХ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ

ПАНФІЛОВА А.В. – доктор сільськогосподарських наук, професор
orcid.org/0000-0003-0006-4090
Миколаївський національний аграрний університет
КОШКІН Д.Л. – кандидат технічних наук, доцент
orcid.org/0000-0002-6927-8487
Миколаївський національний аграрний університет

Постановка проблеми. Однією із найбільш актуальних проблем, що перешкоджає людству забезпечувати агроекологічну і продовольчу безпеки, зменшувати рівень бідності населення та досягати сталого сільського розвитку на глобальному рівні є зміна клімату. Сільське господарство України є найбільш вразливою галуззю економіки до коливань та змін клімату, оскільки функціонування галузей землеробства та тваринництва, їх спеціалізація, урожайність сільськогосподарських культур значною мірою залежать від агрокліматичних умов території і, насамперед, від її тепло- і вологозабезпеченості [1].

В умовах зміни клімату вирішальну роль у створенні стійких продуктивних агроекосистем відіграє використання багаторічних злакових культур. Їх вирощування вирішує ряд питань, що виникають за вирощування однорічних сільськогосподарських культур і забезпечує низку екологічних переваг, включаючи збереження ґрунту, утримання поживних речовин та покращення якості води [2, 3, 4].

Враховуючи значний вплив зміни клімату та деградації ґрунтів на продуктивність сільського господарства, перехід до багаторічної моделі виробництва зерна стає стратегічно важливим кроком. Kernza, як багаторічна зернова культура, відповідає потребам у зменшенні негативного екологічного впливу землеробства, одночасно забезпечуючи сталість продовольчих систем і раціональне використання природних ресурсів [5, 6].

Упродовж останніх 30 років аграрний сектор України зазнав суттєвих змін у зв'язку з глобальним потеплінням, при цьому країна продовжує залишатися важливим постачальником продовольства для багатьох країн світу [7]. Одним із інструментів підвищення стійкості агровиробництва, в т. ч. вирощування багаторічних злакових культур, зокрема Kernza, в умовах зміни клімату є інтеграція даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та агрометеорологічних спостережень.

У практиці оцінювання стану рослинного покриву широко застосовуються спектральні вегетаційні індекси та похідні біофізичні параметри. Зокрема, індекси NDVI та споріднені показники слугують базовими індикаторами біомаси й активної вегетації, тоді як використання додаткових спектральних каналів, зокрема в ділянці «червоного краю» (red edge), розширює можливості раннього виявлення фізіологічних змін у рослинному організмі та ознак стресу. Поєднання супутникових предикторів із метеорологічними змінними (опади, температура, водний баланс) формує основу агрометеорологічних моделей, що застосовуються для оцінювання продуктивності сільськогосподарських культур і ризиків впливу несприятливих погодних явищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні огляди та метааналізи підкреслюють, що найкращі прогностичні системи урожайності сільськогосподарських культур спираються на поєднання мультисенсорних супутникових даних, якісних масок посівів та методів машинного й глибинного навчання, а також на коректні протоколи валідації й перенесення моделей між роками та регіонами [8]. Практичні дослідження показують, що підвищення просторової роздільної здатності індексів NDVI та уточнення масок орних земель можуть істотно покращувати оцінювання урожайності й зменшувати вплив змішаних пікселів [9].

Важливим напрямом є інтеграція метеорологічних змінних із супутниковими часовими рядами, що підвищує стійкість моделей у роки з аномальними погодними умовами [10, 11]. Для моделювання внутрішньосезонної динаміки застосовують як класичні ансамблеві методи, зокрема Random Forest [11], так і глибинні архітектури з аналізом внеску ознак (explainability) [12] та моделі, натреновані на часових рядах Sentinel-2 на рівні поля [13].

Окремий клас підходів формують методи асиміляції даних (data assimilation), де супутникові спостереження регулярно інтегрують у модель росту культури для отримання прогнозів протягом вегетаційного періоду; такі рішення демонструють потенціал зменшення невизначеності та систематичних похибок прогнозу [14, 15]. Паралельно розвиваються методики агрокліматичного зонування та оцінки стресових умов у регіонах з дефіцитом вологи на основі дистанційних і метеорологічних даних [16], а також аналіз чутливості індексів до посухи та температурних аномалій [17].

Водночас більшість сучасних досліджень сфокусовані на однорічних сільськогосподарських культурах та не враховують повною мірою специфіку багаторічних злакових культур, розвиток яких має особливість – після збирання врожаю або скошування вони здатні до повторного відростання. Це створює потребу в адаптації інтегрованих підходів (Sentinel-2 + агрометеорологія) до умов вирощування Kernza та до задачі одночасної інтерпретації процесів росту та розвитку культури і водно-теплового стресу.

© Панфілова А.В., Кошкін Д.Л., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Окремим викликом залишається адаптація підходів дистанційного моніторингу до багаторічних злакових культур, зокрема Kernza (*Thinopyrum intermedium*). На відміну від однорічних зернових, Kernza характеризується багаторічним циклом розвитку, специфічною фенологічною динамікою та вираженою сезонною двофазністю, що ускладнює пряме перенесення моделей, розроблених для пшениці чи ячменю ярих. Водночас потенціал Kernza як культури зі зниженою потребою в обробітку ґрунту та з підвищеною екосистемною цінністю робить актуальним пошук надійних методів кількісного моніторингу стану посівів та водно-теплового стресу.

Метою статті є обґрунтування підходу до інтеграції спектральних вегетаційних індексів (NDVI, NDMI, NDRE) та агрометеорологічних показників для оцінки росту і розвитку рослин Kernza в період водно-теплового стресу в умовах півдня України.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проведені протягом 2023-2025 років на дослідному полі Навчально-науково-практичного центру Миколаївського національного аграрного університету, розташованого у Південній зоні України. Ґрунт дослідних ділянок представлений чорноземом південним, залишково-слабкосолонцюватим важкосуглинковим на лесах.

У досліді використано насіння Kernza сорту Clearwater, розроблений на основі ліній Інституту Землі (Land Institute, USA), виведений селекціонерами Університету штату Міннесота (University of Minnesota). Сівбу провели 19.09.2023 р. Kernza в одновидовому посіві – 5 млн./га, Kernza в сумісному посіві з лядвенецем рогатим – 2,5 млн./га, лядвенець рогатий в сумісному посіві – 2,5 млн./га. Сівбу Kernza в чистому посіві проводили з шириною міжрядь 30 см. Ширина міжрядь сумісного посіву 30 см (60 см Kernza + 60 см лядвенець рогатий, висіяний у міжряддя). Досліджували два варіанти удобрення: контрольний варіант без удобрення та варіант із внесенням 90 кг/га N, 56 кг/га P, 168 кг/га K. Повна норма фосфору і калію, а також стартова доза азоту (30 кг/га N), були внесені перед сівбою. Доза азоту (60 кг/га N) внесена в фазу активного весняного кущення Kernza при всіх способах сівби.

Межі дослідної ділянки визначали геопросторовим полігоном у системі координат WGS-84. Просторову однорідність посіву контролювали за супутниковими зображеннями у природній кольоровій композиції (RGB).

Джерелом матеріалів дистанційного зондування Землі слугували дані мультиспектральної місії Sentinel-2 програми Copernicus [18]. Використано гармонізовану колекцію атмосферно скоригованих зображень рівня поверхневої відбивної здатності Sentinel-2 Surface Reflectance (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) у хмарному середовищі Google Earth Engine [19]. Часовий інтервал аналізу охоплював період з січня 2024 р. по грудень 2025 р. включно. До вибірки включали сцени з часткою хмарності менше 10%.

Попередня обробка включала маскування хмар і снігу (QA60 та шар класифікації сцени SCL) і приведення цифрових значень до поверхневої відбивної здатності шляхом масштабування відповідно до специфікації продукту. Для розрахунку індексів використовували канали з просторовою роздільною здатністю 10 м: B2, B3, B4 та B8.

Стан рослинного покриву оцінювали за індексами NDVI, NDMI та NDRE. Для кожної дати визначали середні значення в межах полігону (просторова агрегація), після чого часові ряди агрегували у декадному форматі (36 значень на рік; 72 – за 2024–2025 рр.). Для індексів обчислювали декадні середні, мінімальні та максимальні значення, для опадів і евапотранспірації – декадні суми. Залишковий шум зменшували згладжуванням кубічними сплайнами.

Агрокліматичні показники за роки дослідженя отримані за даними метеостанції Pessl Instruments (iMETOS), розташованої безпосередньо на дослідному полі, а також через відкритий програмний інтерфейс доступу до історичних і прогнозних метеорологічних даних Open-Meteo (API).

Результати досліджень. Метеорологічні умови 2024 р. були нетиповими для півдня України, із середніми температурами березня, квітня та травня нижчими за середньобагаторічні показники на 0,5–5,9 °C (рис. 1).

Слід відмітити, зниження температури повітря січня-травня 2024 р. на 22,9% порівняно із середньобагаторічними даними. При цьому, температура повітря в лютому була на 1,1°C вищою за середньо багаторічні показники. Сума опадів за досліджуваний період склала 152,3 мм, що на 7,4 мм або 12,1% менше від середньобагаторічних даних. При цьому слід відміти, що у березні та квітні місяці випало відповідно на 33,2 та 27,0% більше за середньо багаторічні показники.

10 квітня 2024 р. рослини Kernza знаходились на етапі активного кущення (BBCH 27-29 залежно від варіанту досліду). Запаси вологи, які сформувалися за рахунок опадів II та III декади березня, а також активне наростання температури повітря на початку квітня сприяли активному росту і розвитку рослин, формування ними стеблостою. Так, залежно від варіанту досліду на 0,5 м налічувалося 75-93 стебла. 26 квітня 2024 р. було відмічено настання фази видовження стебла (BBCH 31-33 залежно від варіанту досліду). Рослини Kernza утворили на 0,5 м 81 стебло на варіанті без удобрення та 95 стебел за внесення мінеральних добрив.

Високий температурний режим і посушливі погодні умови, що встановилися з початку червня мали негативний вплив на ріст й розвиток рослин Kernza за рахунок пересихання верхні шарів ґрунту. 18 червня 2024 р. у переважної більшості рослин було відмічено фазу цвітіння (BBCH 61-63 залежно від варіанту досліду). Рослини сформували 86-106 стебел на 0,5 м.

До кінця червня ефективних опадів не спостерігалося, встановилася ґрунтова та повітряна посуха, слабкому розвитку рослин Kernza сприяло значне зменшення вмісту вологи у ґрунті і підвищення температури повітря та ґрунту.

В липні гребінь антициклону зумовив аномально спекотну, суху погоду. Максимальна температура повітря підвищувалась до 39-42˚С. У денні години поверхня ґрунту нагрівалася до 61-70°. Поєднання високих температур повітря та ґрунту, засухи та суховіїв негативно

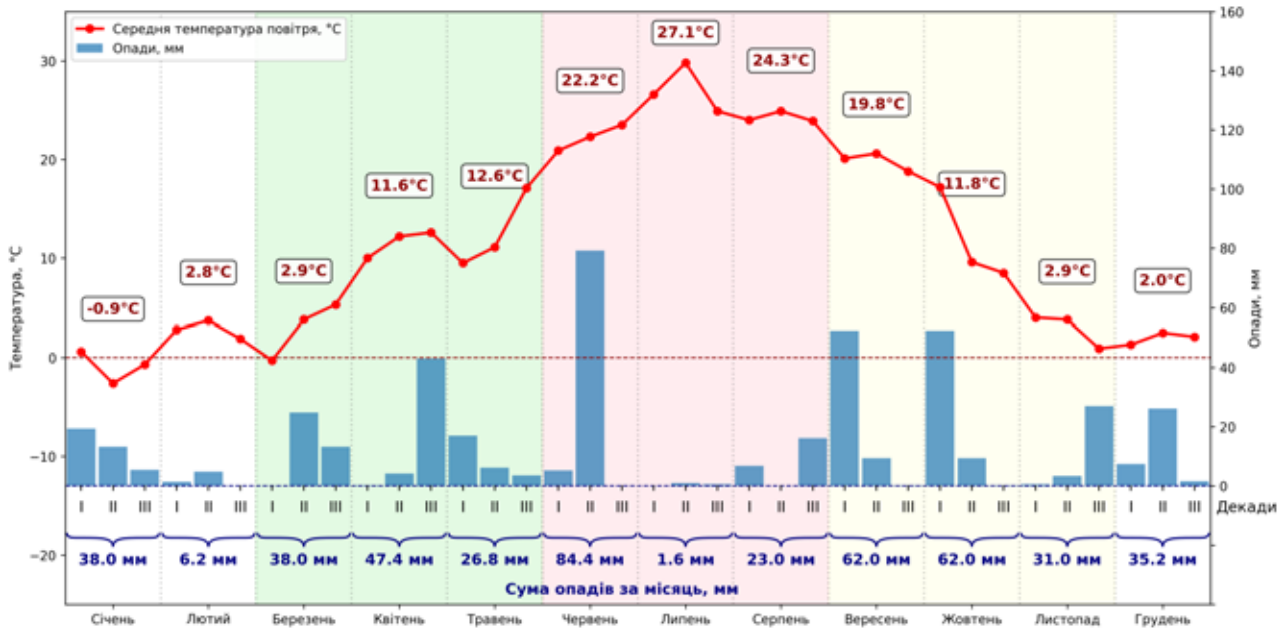


Рис. 1. Агрометеорологічна характеристика 2024 р.

вплинуло на ріст та розвиток досліджуваної культури – у Kernza було відмічено стрімке відмирання стебел культури, їх кількість зменшилася порівняно з попереднім періодом визначення на 6,4 – 24,2% залежно від варіанту. 29 липня 2024 р. у рослин відмічено фазу початку дозрівання зерна (ВВСН 91-93 залежно від варіанту досліду).

Середня температура повітря серпня була в межах норми та становила 24,3°С. У другій декаді серпня утримувалася жарка та суха погода, яка була вкрай несприятливою для рослин Kernza. Спостерігалася ґрунтова засуха.

У вересні спостерігалась дуже тепла, переважно дощова погода. Середня температура повітря становила 19,8°С. Сума опадів склала 62,0 мм. Жовтень 2024 р. характеризувався достатньої кількістю опадів – за місяць випало 62,4 мм за середньомісячної температури повітря 11,8°С, що позитивно позначилося на ростових процесах рослин Kernza. Станом на 22 жовтня 2024 р. рослини Kernza перебували у фазі кущіння (ВВСН 26-28). Дещо меншою кількість опадів була відмічена у листопаді і грудні 2024 р. – відповідно 3 та 35,0 мм, при температурі повітря 2,9 та 2,0°С.

Агрокліматичні умови 2025 р. також були нетиповими для умов півдня України (рис. 2). Зимовий період характеризувався аномально теплою погодою: середня температура січня становила 2,4°С (на 2,1°С вище норми), що забезпечило сприятливі умови для перезимівлі посівів Kernza.

Погодно – кліматичні умови мали вирішальний вплив на ріст і розвиток рослин Kernza у весняний період. Слід відмітити аномальне, для півдня України, явище весняного періоду 2025 р. – 11-12 квітня спостерігалися опади у вигляді снігу. Зниження температури повітря у квітня сприяли пригніченню росту і розвитку рослин Kernza, формування ними стеблостою. Так, залежно від варіанту досліду на 0,5 м налічувалося 152-221 стебел (ВВСН 29-31). Погодні умови в травні були зумовлені переважно циклонічною діяльністю. Оцінка розвитку посівів у фазі видовження стебла рослин Kernza (ВВСН 50-58), проведена 27 травня 2025 року, показала, що впродовж 43 діб після попереднього обліку рослини отримали 370,0 °С позитивних температур та 76,7 °С ефективних температур при незначній кількості опадів 62,6 мм. Рослини Kernza утворили на 0,5 м 182-223 стебла на варіантах без удобрення та 215-247 стебел за внесення мінеральних добрив.

Погода в червні була нестійкою з коливаннями температури та незначними опадами в окремі дні. 16 червня 2025 р. у переважної більшості рослин Kernza було відмічено фазу цвітіння (ВВСН 63-67 залежно від варіанту досліду). Слід відзначити, що цвітіння рослин Kernza відбувалося не постійно, а в певну пору дня. Зранку на колосках спостерігалися поодинокі пиляки, а після обіду (15.00-16.00) колоски різко викидали пиляки, які ставали жовтого кольору. Це відбувалося декілька годин, після чого пиляки знову ставали поодинокими і втрачали колір з жовтого до коричнево-червоного. При цьому рослини Kernza сформували 167-245 стебел на 0,5 м. Липень був посушливий та аномально жаркий. Запаси продуктивної вологи (станом на 22 липня) в орному шарі повністю вичерпані, а в метровому – вкрай низькі (17 мм), що також свідчить про ґрунтову засуху. У серпні із температурами вище +30ºС налічувалося 14-25 днів. Період бездощів'я тривав понад 68 днів. Ґрунтово-повітряна засуха активно поширювалася та поглиблювалася, що несприятливо позначилося на стані рослин Kernza. 27 липня було відмічено початок дозрівання зерна (ВВСН 90-92 залежно від варіанту досліду).

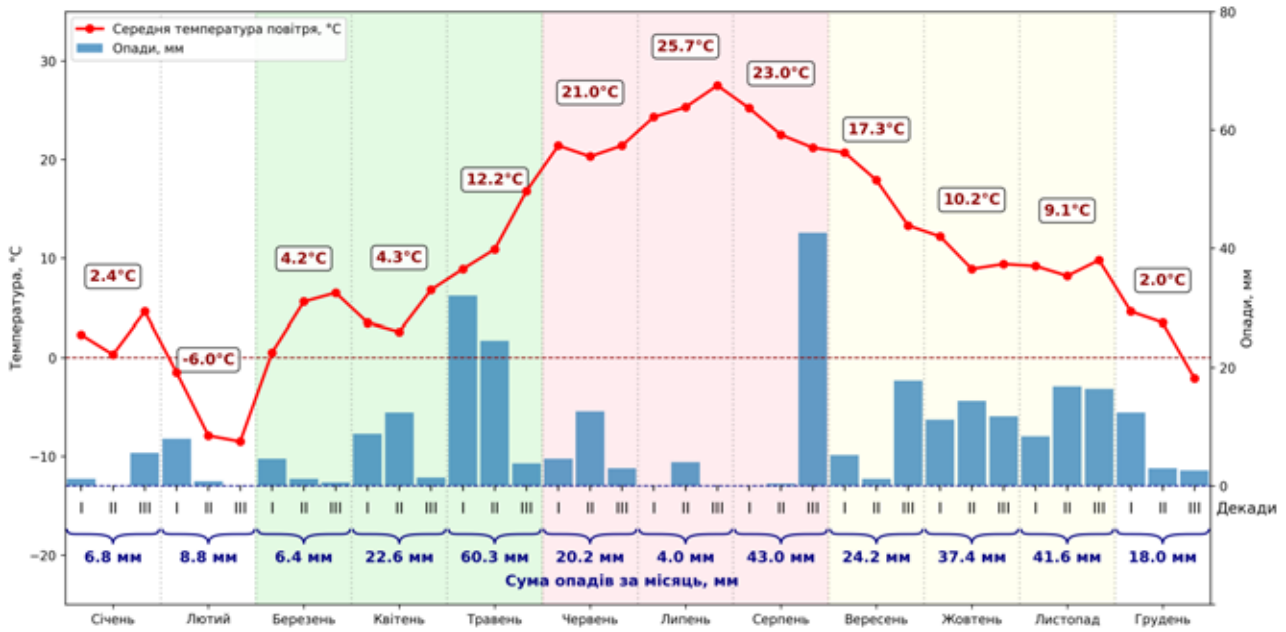


Рис. 2. Агрометеорологічна характеристика 2025 р.

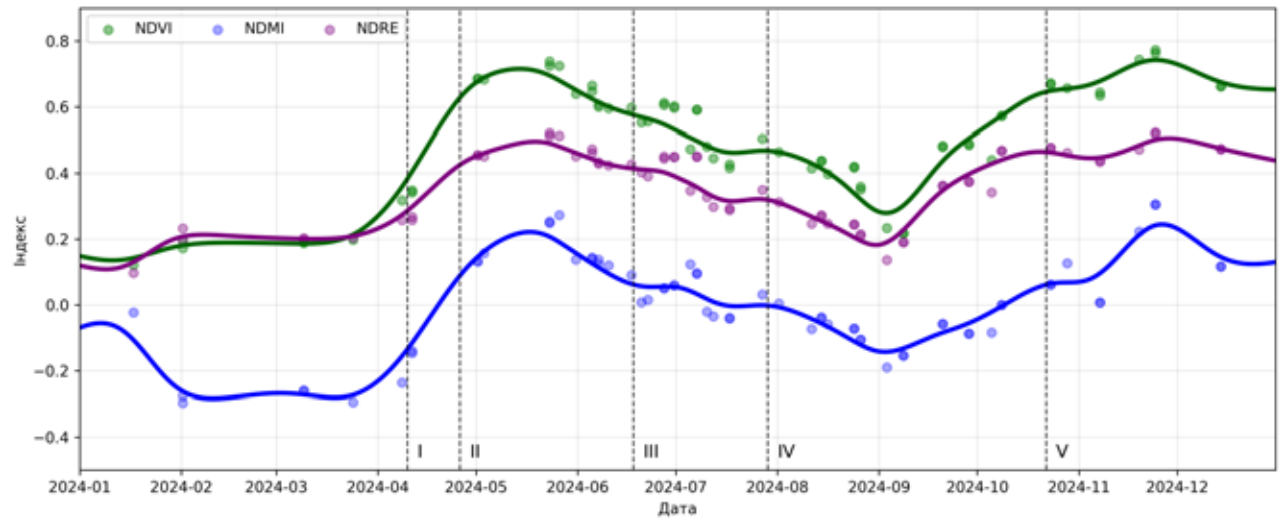


Рис. 3. Значення індексів NDVI, NDMI та NDRE у 2024 р.

Примітка: I – BBCH 27-29, II – BBCH 31-33; III – BBCH 61-63; IV – BBCH 91-93, V – BBCH 26-28

Протягом вересня переважала аномально тепла та в більшості днів суха погода. Дощі у вигляді локальних злив проходили в окремі дні місяця.

В більшості днів жовтня переважала волога та тепла погода, яка була сприятливою для осінньої вегетації сільськогосподарських культур, в т. ч. і Kernza. Стан посівів після осіннього відростання (22.10.2025 р.) був задовільним, переважна більшість рослин знаходились у фазі активного кущіння (BBCH 25–28). Рослини Kernza сформували 128-220 стебел на 0,5 м. У листопаді спостерігалася тепла погода – температура повітря склала 9,1°C, а сума опадів – 42,0 мм. У грудні температура повітря становила 2,0°C, а опадів за місяць випало на рівні 18,0 мм.

Динаміка агрокліматичних показників у роки досліджень узгоджується зі змінами спектральних вегетаційних індексів. Так, у 2024 р. весняний період характеризувався помірними температурами та епізодами опадів, що сприяло інтенсивному зростанню індексів, натомість літній період супроводжувався високими температурами та зростанням водного дефіциту (на тлі високої евапотранспірації), що відповідає спадній фазі NDVI, NDMI та DRE (рис. 3).

Часові ряди індексів NDVI, NDMI та NDRE у роки досліджень відображають типовий для багаторічних злаків двофазний характер вегетації: весняне наростання зеленої маси з максимумом у період активного кущіння –видовження стебла, подальше зниження

індексів у літній період від фази достигання до осіннього відростання рослин восени.

Нашими дослідженнями встановлено, що індекс NDVI за вирощування Kernza в умовах півдня України у 2024 р. коливався в межах 0,383 – 0,646 залежно від фази росту і розвитку рослин.

Нами встановлено, що станом на 10 квітня 2024 р. індекс NDVI був на рівні 0,383, що можна пояснити ранньою фазою росту та розвитку рослин Kernza, зокрема була відмічена фаза активного весняного кущення (BBCH 27-29). Визначення індексу NDVI в наступні фази росту і розвитку рослин підтвердило активне наростання вегетативної маси рослин Kernza. Так, у фазі видовження стебла (BBCH 31-33) індекс NDVI склав 0,628, фазі цвітіння (BBCH 61-63) – 0,577, а у фазі осіннього кущіння (BBCH 26-28) – 0,646. Слід відмітити, що за рахунок відсутності ефективних опадів та високих температур повітря в літні місяці, рослини Kernza перебували у стані стресу, зокрема 29 липня 2024 р. на початку дозрівання зерна Kernza (BBCH 91-93) індекс NDVI склав 0,468.

У результаті дешифрування серії супутникових знімків у 2025 р. встановлено що індекс NDVI коливався в межах 0,261 – 0,668 залежно від строку визначення (рис. 4).

При цьому, у фазі весняно кущіння (BBCH 29-31) та у фазі видовження стебла рослин Kernza (BBCH 50-58) було визначено найвищі показники досліджуваного показника – відповідно 0,691 та 0,668, що говорить про сприятливі умови для росту і розвитку рослин, формування ними розвиненої надземної маси. Подальше підвищення температурного режиму та відсутність атмосферних опадів у літні місяці спричинило гальмування ростових процесів і відмирання надземних вегетативних органів рослин. Індекс NDVI 16 червня 2025 р. (BBCH 63-67) склав 0,484, а 24 липня 2025 р. (BBCH 90-92) – 0,261, що підтверджує наявність стресу у рослин від погодних умов. Завдяки теплій та вологій погоді у жовтні 2025 року спостерігалася активна вегетація Kernza, що сприяло зростанню індексу NDVI до 0,397. Водночас посіви продовжували перебувати у стресовому стані, попри позитивну динаміку накопичення біомаси.

Індекс NDMI демонструє найбільш виражену реакцію на водний режим: упродовж вологозабезпечених періодів значення зростають, тоді як у посушливі місяці знижуються [17]. Нашими дослідженнями встановлено, що у 2024 р. рослини Kernza відчували помірний водний стрес у всі фази росту і розвитку (індекс NDMI -0,135 – 0,088), окрім фази дозрівання зерна – індекс NDMI становив -0,002, що вказує на дуже низьку вологозабезпеченість.

2025 рік був менш сприятливим за вологозабезпеченням, що підтверджує значення індексу NDMI. Так, у весняний період росту і розвитку рослин Kernza значення індексу NDMI становило 0,194 – 0,269 – вологозабезпеченість посівів була середньою, рослини не відчували стресу. Літня спека та дефіцит опадів призвели до зниження індексу NDMI до 0,033 під час цвітіння Kernza, що свідчило про помірний водний стрес. На подальших етапах – від дозрівання до осіннього кущіння – дефіцит вологи посилився до критичного рівня: значення NDMI знизилися до -0,087…-0,116, що підтверджує перебування посівів у стані глибокого стресу через вкрай низьку вологозабезпеченість.

Ще один, не менш важливий, спектральний вегетаційний індекс, який використовується в точному землеробстві для оцінки вмісту хлорофілу та рівня азоту в рослинах є індекс NDRE. Нашими дослідженнями визначено, що у всі роки досліджень забезпечення рослин азотом була достатньою, а ушкодження посівів збудниками хвороб відсутнім – у 2024 р. індекс NDRE коливався в межах 0,286 – 0,465 залежно від фази росту і розвитку рослин, а у 2025 р. – 0,254 – 0,515. Винятком стала фаза дозрівання зерна у 2025 р. – індекс NDRE становив 0,159, що підтвердило незначне ушкодження рослин кернзи збудниками хвороб.

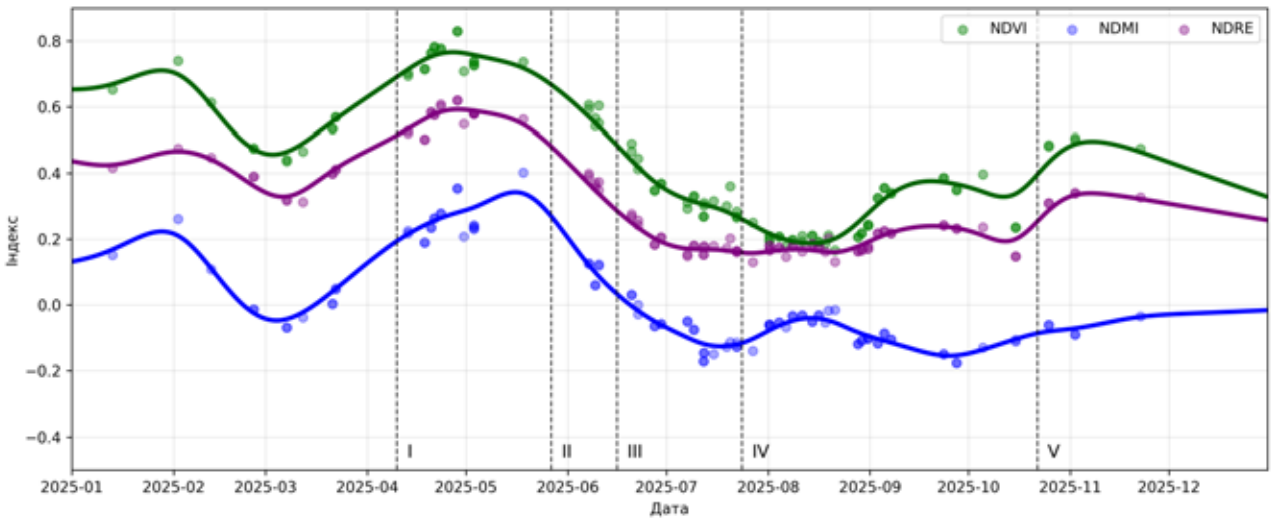


Рис. 4. Показники індексів NDVI, NDMI та NDRE у 2025 р.

Примітка: I – BBCH 29-31, II – BBCH 50-58; III – BBCH 63-67; IV – BBCH 90-92, V – BBCH 25-28

Модельну невизначеність оцінювали за дисперсією залишків згладжувального сплайну. У середньому за роки досліджень, інтегральна похибка для спектрального вегетаційного індексу NDVI склала 0,033; NDMI – 0,034, а NDRE – 0,023. Отримані значення відображають інтегральну варіабельність апроксимуючої моделі та не є довірчими інтервалами окремих супутникових спостережень.

Висновки. Агрокліматичні умови 2024 – 2025 рр. на півдні України були нетиповими та суттєво впливали на ріст і розвиток рослин Kernza. У 2024 р. сприятлива весна забезпечила активне кущіння (NDVI 0,628 – 0,646), тоді як літня спека (до 39 – 42 °C) спричинила водний стрес і зниження NDVI до 0,468 та NDMI до -0,002. У 2025 р. тепла зима та сприятлива весна зумовили інтенсивне наростання біомаси рослин (NDVI 0,668 – 0,691), однак тривала літня посуха (понад 68 днів) призвела до глибокого стресу (NDVI 0,261; NDMI -0,116). Осінні умови обох років сприяли відновленню вегетації.

Встановлено тісний взаємозв'язок між агрокліматичними чинниками та спектральними показниками стану посівів Kernza. Отримані результати підтверджують доцільність використання спектральних вегетаційних індексів для оперативного моніторингу фізіологічного стану рослин і оцінки впливу погодних умов на формування їх продуктивності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Корнійчук Т. Напрями адаптації до змін клімату, технологій вирощування сільськогосподарських культур. *Кліматичні зміни та сільське господарство. Виклики для аграрної науки та освіти* : збірник матеріалів VII Міжнародної науково-практичної конференції, 27 березня 2024 р., Науково-методичний центр ВФПО. – Київ, 2024. С. 16 – 19.
2. Crews T. E., Carton W., Olsson L. Is the future of agriculture perennial? Imperatives and opportunities to reinvent agriculture by shifting from annual monocultures to perennial polycultures. *Global Sustainability*. 2018. 1. e11. https://doi.org/10.1017/sus.2018.11
3. Ryan M. R., Crews T. E., Culman S. W., DeHaan L. R., Hayes R. C., Jungers J. M., Bakker M. G. Managing for multifunctionality in perennial grain crops. *Bioscience*. 2018. 68(4). P. 4–304. https://doi.org/10.1093/biosci/biy014.
4. Zhang S., Huang G., Zhang Y., Lv X., Wan K., Liang J., Feng Y., Dao J., Wu S., Zhang L., Yang X., Lian X., Huang L., Shao L., Zhang J., Qin S., Tao D., Crews T. E., Sacks E. J., Hu, F. Sustained productivity and agronomic potential of perennial rice. *Nature Sustainability*. 2023. 6. P. 28-38. https://doi.org/10.1038/s41893-022-00997-3
5. Marti A., Qiu X., Schoenfuss T. C., Seetharaman K. Characteristics of perennial ryegrass (*Thinopyrum intermedium*) and a blend of refined wheat flour: effect on rheological properties. *Cereal chemistry*. 2015. № 92. P. 34–440. https://doi.org/10.1094/CCHEM-01-15-0017-R.
6. Кургак В., Крюс Т., Ворнер Р., Сарунайте Л., Ткаченко М., Коломієць Л., Ткаченко А. Неймет І. Перспективи вирощування багаторічного проміжного пирію (*Thinopyrum intermedium*) в Україні на зерно та корми. *Землеробство та рослинництво: теорія та практика.* 2024. Вип. 1(11). С. 44-56. https://doi.org/10.54651/agri.2024.01.05
7. Кривохижа Є. М., Матвіїшин А. І., Бринь В. Т. Вплив зміни клімату на врожайність основних сільськогосподарських культур в Україні. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка.* 2024. Вип. 3 (44). С. 33 – 37. https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-3.5
8. Aslan M. F., Durdu A., Sabanci K., Ropelewska E. A survey of crop yield prediction using remote sensing and machine learning. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(15). Art. 6566. https://doi.org/10.3390/su16156566.
9. Dlamini S., Ramoelo A., Cho M. A., Mathieu R., Weepener H. Improving crop yield estimation applying higher resolution satellite NDVI imagery and cropland masks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022. Vol. 25. Art. 100693. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100693.
10. Zhou Y., Liu X., Zhu X., Guo W. Integrating climate and satellite remote sensing data for predicting county-level wheat yield in china using machine learning methods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 111. Art. 102861. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102861.
11. Zhu X., Guo W., Liu X., Xu X. Crop yield prediction based on agrometeorological indices and remote sensing data using random forest. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13(10). Art. 2016. https://doi.org/10.3390/rs13102016
12. Li F., Yan H., Zhang X., Wang M., Chen Z. A Deep learning framework for crop yield prediction using multi-source remote sensing and meteorological data with explainability analysis. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Art. 3217. https://doi.org/10.3390/rs16173217
13. Sun J., Zhao Y., Han B., Li Y., Sun Y. Winter wheat yield prediction at the field scale from Sentinel-2 time series using a temporal convolutional network. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 17886. https://doi.org/10.1038/s41598-024-67663-1
14. Bouras E. H., Bolton D. K., Viña A., Daughtry C. S. T., Townsend P. A. Assimilating remote sensing observations with an ensemble kalman filter for in-season forecasting of wheat yield. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(18). Art. 4425. https://doi.org/10.3390/rs15184425
15. Desloires S., Nicolas H., Baret F., Weiss M. Assimilation of crop phenology observations and remote sensing data into a crop model to forecast wheat yield. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 213. Art. 107807. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107807
16. Faraslis, I., Dalezios, N. R., Alpanakis, N., Tziatzios, G. A., Spiliotopoulos, M., Sakellariou, S., Sidiropoulos, P., Dercas, N., Domínguez, A., Martínez-López, J. A., López-Urrea, R., Karam, F., Amami, H., & Nciri, R. (2023). Remotely sensed agroclimatic classification and zoning in water-limited mediterranean areas towards sustainable agriculture. *Remote Sensing*. *15*(24). 5720. https://doi.org/10.3390/rs15245720
17. Xiao C., Wu Y., Zhu X. Evaluation of the monitoring capability of 20 vegetation indices and 5 mainstream satellite band settings for drought in spring wheat using a simulation method. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Art. 4838. https://doi.org/10.3390/rs15194838
18. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P.,

Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy, O., Marchese F., Bargellini P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

19. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
20. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Rome: FAO, 1998.

REFERENCES:

1. Korniichuk, T. (2024). Napriamy adaptatsii do zmin klimatu, tekhnolohii vyroshchuvannia silskohospodarskykh kultur [Directions for adaptation to climate change and crop cultivation technologies. Climate change and agriculture]. Klimatychni zminy ta silske hospodarstvo. Vyklyky dlia ahrarnoi nauky ta osvity : zbirnyk materialiv VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 27 bereznia 2024 r., Naukovo-metodychnyi tsentr VFPO. – Kyiv, 2024. S. 16 – 19. [in Ukrainian]
2. Crews, T. E., Carton, W., & Olsson, L. (2018). Is the future of agriculture perennial? Imperatives and opportunities to reinvent agriculture by shifting from annual monocultures to perennial polycultures. *Global Sustainability*, 1, e11. https://doi.org/10.1017/sus.2018.11
3. Ryan, M. R., Crews, T. E., Culman, S. W., DeHaan, L. R., Hayes, R. C., Jungers, J. M., & Bakker, M. G. (2018). Managing for multifunctionality in perennial grain crops. *Bioscience*, 68(4), 4-304. https://doi.org/10.1093/biosci/biy014.
4. Zhang, S., Huang, G., Zhang, Y., Lv, X., Wan, K., Liang, J., Feng, Y., Dao, J., Wu, S., Zhang, L., Yang, X., Lian, X., Huang, L., Shao, L., Zhang, J., Qin, S., Tao, D., Crews, T. E., Sacks, E. J., & Hu, F. (2023). Sustained productivity and agronomic potential of perennial rice. *Nature Sustainability*, 6, 28-38. https://doi.org/10.1038/s41893-022-00997-3
5. Marti A., Qiu X., Schoenfuss TC, & Seetharaman K. (2015). Characteristics of perennial ryegrass (*Thinopyrum intermedium*) and a blend of refined wheat flour: effect on rheological properties. *Cereal chemistry,* № 92, 34–440. https://doi.org/10.1094/CCHEM-01-15-0017-R.
6. Kurhak, V., Krius, T., Vorner, R., Sarunaite, L., Tkachenko, M., Kolomiiets, L., Tkachenko, A. & Neimet, I. (2024). Perspektyvy vyroshchuvannia bahatorichnoho promizhnoho pyriiu (*Thinopyrum intermedium*) v Ukraini na zerno ta kormy [Prospects of perennial intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) cultivation in Ukraine for grain and feed purposes]. *Zemlerobstvo ta roslynnytstvo: teoriia ta praktyka.* Vyp. 1(11). S. 44-56. https://doi.org/10.54651/agri.2024.01.05 [in Ukrainian].
7. Kryvokhyzha, Ye. M., Matviishyn, A. I. & Bryn, V. T. (2024). Vplyv zminy klimatu na vrozhainist osnovnykh silskohospodarskykh kultur v Ukraini. [The impact of climate change on the yield of the main agricultural crops in Ukraine]. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika*. Vyp. 3 (44). S. 33 – 37.https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-3.5. [in Ukrainian].
8. Aslan, M. F., Durdu, A., Sabanci, K., & Ropelewska, E. (2024). A survey of crop yield prediction using remote sensing and machine learning. *Sustainability*, 16(15), Art. 6566. https://doi.org/10.3390/su16156566.
9. Dlamini, S., Ramoelo, A., Cho, M. A., Mathieu, R., & Weepener, H. (2022). Improving crop yield estimation applying higher resolution satellite NDVI imagery and cropland masks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Vol, 25. Art. 100693. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100693.
10. Zhou, Y., Liu, X., Zhu, X., & Guo, W. (2022). Integrating climate and satellite remote sensing data for predicting county-level wheat yield in china using machine learning methods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 111, Art. 102861. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102861.
11. Zhu, X., Guo, W., Liu, X., & Xu, X. (2021). Crop yield prediction based on agrometeorological indices and remote sensing data using random forest. *Remote Sensing*, Vol. 13(10), Art. 2016. https://doi.org/10.3390/rs13102016
12. Li, F., Yan, H., Zhang, X., Wang, M., & Chen, Z. A. (2024). Deep learning framework for crop yield prediction using multi-source remote sensing and meteorological data with explainability analysis. *Remote Sensing*, Vol. 16, Art. 3217. https://doi.org/10.3390/rs16173217
13. Sun, J., Zhao, Y., Han, B., Li, Y., & Sun, Y. (2024). Winter wheat yield prediction at the field scale from Sentinel-2 time series using a temporal convolutional network. *Scientific Reports*, Vol. 14, Art. 17886. https://doi.org/10.1038/s41598-024-67663-1
14. Bouras, E. H., Bolton, D. K., Viña, A., Daughtry, C. S. T., & Townsend, P. A. (2023). Assimilating remote sensing observations with an ensemble kalman filter for in-season forecasting of wheat yield. *Remote Sensing*, Vol. 15(18), Art. 4425. https://doi.org/10.3390/rs15184425
15. Desloires, S., Nicolas, H., Baret, F., & Weiss, M. (2023). Assimilation of crop phenology observations and remote sensing data into a crop model to forecast wheat yield. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 213, Art. 107807. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107807
16. Faraslis, I., Dalezios, N. R., Alpanakis, N., Tziatzios, G. A., Spiliotopoulos, M., Sakellariou, S., Sidiropoulos, P., Dercas, N., Domínguez, A., Martínez-López, J. A., López-Urrea, R., Karam, F., Amami, H., & Nciri, R. (2023). Remotely Sensed Agroclimatic Classification and Zoning in Water-Limited Mediterranean Areas towards Sustainable Agriculture. *Remote Sensing*, *15*(24), 5720. https://doi.org/10.3390/rs15245720
17. Xiao, C., Wu, Y., & Zhu, X. (2023). Evaluation of the monitoring capability of 20 vegetation indices and 5 mainstream satellite band settings for drought in spring wheat using a simulation method. *Remote Sensing*, Vol. 15, Art. 4838. https://doi.org/10.3390/rs15194838
18. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon F.,Hoersch, B., Isola C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 120, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026
19. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine:

Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

20. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Rome: FAO, 1998.

Панфілова А.В., Кошкін Д.Л. Оцінювання кліматичної пластичності багаторічної зернової культури Kernza (*Thinopyrum intermedium*) в умовах півдня України за даними спектральних вегетаційних індексів

Мета. Обґрунтування підходу до інтеграції спектральних вегетаційних індексів Sentinel-2 (NDVI, NDMI, NDRE) та агрометеорологічних показників для оцінки росту і розвитку рослин Kernza в період водно-теплового стресу в умовах півдня України. **Методи**. Методи дешифрування космічних знімків та польові дослідження виконувалися відповідно до сучасних вимог і стандартів дослідної справи в агрономії та точному землеробстві. **Результати**. Встановлено, що погодні умови обох років характеризувалися значною мінливістю та відхиленням від середньобагаторічних показників. У 2024 р. помірні температури та достатнє зволоження навесні сприяли активному кущінню й формуванню стеблостою, тоді як літня аномальна спека (до 39 – 42°С) і дефіцит опадів зумовили розвиток ґрунтово-повітряної посухи та пригнічення ростових процесів. У 2025 р. тепла зима забезпечила сприятливу перезимівлю посівів, а весняний період сприяв інтенсивному наростанню біомаси, проте тривалий бездощівний період улітку (понад 68 днів) призвів до глибокого водного стресу рослин. Динаміка спектральних вегетаційних індексів NDVI, NDMI та NDRE узгоджується з фазами розвитку рослин (BBCH) і змінами погодних умов. Максимальні значення NDVI (0,628 – 0,691) зафіксовано у фазах активного кущіння та видовження стебла, мінімальні (до 0,261) – у період дозрівання за умов посухи. Індекс NDMI відобразив ступінь вологозабезпеченості посівів і розвиток водного стресу, тоді як NDRE засвідчив загалом достатній рівень азотного живлення рослин. **Висновки**. Агрокліматичні умови 2024 – 2025 рр. на півдні України були нетиповими та суттєво впливали на ріст і розвиток рослин Kernza. У 2024 р. сприятлива весна забезпечила активне кущіння (NDVI 0,628 – 0,646), тоді як літня спека (до 39 – 42 °С) спричинила водний стрес і зниження NDVI до 0,468 та NDMI до -0,002. У 2025 р. тепла зима та сприятлива весна зумовили інтенсивне наростання біомаси рослин (NDVI 0,668 – 0,691), однак тривала літня посуха (понад 68 днів) призвела до глибокого стресу (NDVI 0,261; NDMI -0,116). Осінні умови обох років сприяли відновленню вегетації. Встановлено тісний взаємозв'язок між агрокліматичними чинниками та спектральними показниками стану посівів Kernza. Отримані результати підтверджують доцільність використання спектральних вегетаційних індексів для оперативного моніторингу фізіологічного стану рослин і оцінки впливу погодних умов на формування їх продуктивності.

Ключові слова: Kernza (*Thinopyrum intermedium*), температура повітря, опади, спектральні вегетаційні індекси NDVI, NDMI, NDRE.

Panfilova A.V., Koshkin D.L. Assessment of the Climatic Plasticity of the Perennial Grain Crop Kernza (*Thinopyrum intermedium*) under the Conditions of Southern Ukraine Based on Spectral Vegetation Indices

Objective. To substantiate an approach for integrating Sentinel-2 spectral vegetation indices (NDVI, NDMI, NDRE) with agrometeorological indicators to assess the growth and development of Kernza under water and thermal stress conditions in southern Ukraine. **Methods**. Satellite image interpretation and field experiments were conducted in accordance with current standards of agronomic research and precision agriculture. **Results**. Weather conditions during both study years were characterized by pronounced variability and significant deviations from long-term climatic normals. In 2024, moderate spring temperatures and adequate moisture promoted active tillering and canopy formation, whereas anomalously high summer temperatures (up to 39–42 °C) combined with precipitation deficits led to soil–atmospheric drought and suppression of growth processes. In 2025, a mild winter ensured favorable overwintering, and spring conditions supported intensive biomass accumulation; however, a prolonged summer rainless period (over 68 days) resulted in severe water stress.

The temporal dynamics of NDVI, NDMI, and NDRE corresponded closely to crop phenological stages (BBCH scale) and prevailing weather conditions. Maximum NDVI values (0.628–0.691) were recorded during active tillering and stem elongation, while minimum values (down to 0.261) occurred during grain maturation under drought conditions. NDMI effectively reflected crop water status and the progression of water stress, whereas NDRE indicated generally sufficient nitrogen supply throughout the growing seasons.

Conclusions. The agrometeorological conditions of 2024–2025 in southern Ukraine were atypical and had a pronounced impact on the growth and development of Kernza. In 2024, favorable spring weather promoted intensive tillering (NDVI 0.628–0.646), whereas extreme summer heat (up to 39–42 °C) combined with precipitation deficits induced water stress, reducing NDVI to 0.468 and NDMI to −0.002. In 2025, a mild winter and favorable spring conditions enhanced biomass accumulation (NDVI 0.668–0.691); however, a prolonged summer drought (over 68 days) resulted in severe physiological stress (NDVI 0.261; NDMI −0.116). Autumn conditions in both years supported partial recovery of vegetation activity. A strong and consistent relationship was identified between agrometeorological drivers and derived spectral indicators of canopy condition. The findings demonstrate the suitability of spectral vegetation indices for operational crop monitoring and for quantifying the effects of hydrothermal variability on productivity formation.

Key words: Kernza (*Thinopyrum intermedium*), air temperature, precipitation, hydrothermal conditions, spectral vegetation indices, NDVI, NDMI, NDRE.

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 06.05.2026