

АГРОМЕТЕОРОЛОГІЧНІ УМОВИ ТА ДИНАМІКА ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ У ПІВДЕННОМУ СТЕПУ УКРАЇНИ

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. Пшениця озима (*Triticum aestivum* L.) залишається однією з ключових культур зернового виробництва України, а Південний Степ є регіоном, де її продуктивний потенціал значною мірою визначається співвідношенням вологозабезпечення осіннього періоду, умов перезимівлі, весняного відновлення вегетації та тривалості фази наливу зерна. Для цієї зони типовими є висока міжрічна мінливість опадів, нерівномірний розподіл вологи впродовж вегетаційного періоду, часті епізоди ранньолітньої спеки та швидке виснаження запасів продуктивної вологи ґрунту у критичні фази росту та розвитку рослин. За таких умов традиційні польові спостереження доцільно поєднувати з дистанційним зондуванням Землі (ДЗЗ), яке дає змогу простежувати фізіологічний стан посівів у часовій динаміці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток платформи Google Earth Engine (GEE) створив технічні передумови для аналізу супутникових даних і побудови довгих часових рядів стану рослинного покриву [1, 5]. У сучасних дослідженнях для оцінювання реакції пшениці озимої на посуху використовують спектральні вегетаційні індекси та високочастотне спостереження за посівами [2]; для моніторингу росту і прогнозування стану культури поєднують ДЗЗ із моделями росту і розвитку рослин [3]; для виділення фенофаз росту і розвитку пшениці озимої застосовують часові ряди Sentinel-1 і Sentinel-2 у середовищі GEE, а також оптичні й радарні дані на рівні поля [4, 5]. Окремий напрям становить дистанційний моніторинг посухи за даними різних джерел, де водні індикатори є ключовими для раннього виявлення стресу рослин [6]. Попри розвиток супутникового моніторингу, для умов Південного Степу України залишається практично важливим порівняльний аналіз вегетаційного періоду, який одночасно враховує агрометеорологічні умови та реакцію на них спектральних вегетаційних індексів – NDVI, NDRE і NDMI. Особливої уваги потребує період від колосіння до наливу зерна пшениці озимої, коли візуально сформована біомаса ще може підтримувати високий NDVI, тоді як водний статус рослин уже погіршується.

Метою статті є комплексна оцінка агрометеорологічних умов вегетаційних періодів 2021–2025 рр. для пшениці озимої в умовах Південного Степу України та виявлення закономірностей динаміки вегетаційних індексів NDVI, NDRE і NDMI під впливом сезонної

мінливості температурного режиму, опадів і дефіциту вологи. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу вегетаційних періодів у розрізі основних фаз росту і розвитку рослин пшениці озимої.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проведені в умовах Навчально-науково-практичного центру Миколаївського національного аграрного університету, розташованих в поблизу с. Сеньчине Миколаївського району Миколаївської області. Регіон характеризується нестійким зволоженням, значним впливом осінніх і ранньовесняних опадів на формування продуктивного стеблостоя та ризиком теплового і водного стресу в червні та липні.

Метеорологічну основу дослідження щодо середньої температури повітря та сум атмосферних опадів за 2021–2025 рр. становили дані автоматичної метеостанції Pessl Instruments (iMETOS), розташованої на дослідному полі Миколаївського національного аграрного університету. Супутникові дані Sentinel-2 SR Harmonized опрацьовували в середовищі Google Earth Engine (GEE) [7–9], на основі яких розраховували спектральні вегетаційні індекси NDVI, NDRE і NDMI. Фази росту й розвитку рослин пшениці озимої визначали за результатами польових спостережень. У дослідженні розглядали такі фази росту і розвитку рослин: сході, кущіння, вихід рослин у трубку, колосіння, налив зерна та повна стиглість.

Для інтерпретації індексів використано співвідношення:

$$\begin{aligned} \text{NDVI} &= \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}; \\ \text{NDRE} &= \frac{\text{NIR} - \text{RedEdge}}{\text{NIR} + \text{RedEdge}}; \\ \text{NDMI} &= \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}, \end{aligned}$$

де NIR – відбивна здатність у ближньому інфрачервоному діапазоні, Red – у червоному, RedEdge – у діапазоні «червоного краю», SWIR – у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні спектра; відповідно використовували канали B8, B4, B5 і B11 супутника Sentinel-2.

У дослідженні індекс NDVI використовували як показник зеленої біомаси рослин пшениці озимої, NDRE – як індикатор стану хлорофільного апарату рослин, NDMI – як показник водного статусу рослин.



Зв'язок між погодою та індексами оцінювали шляхом порівняльного графічного аналізу: зіставляли строки опадів, температурні максимуми, висоту й тривалість плато індексів та моменти різкого спаду NDMI, NDVI і NDRE.

Результати досліджень.

Агрометеорологічна характеристика вегетаційних періодів. Динаміку температури повітря та атмосферних опадів представлено на рис. 1 і 2. Для полегшення інтерпретації сезонної динаміки метеорологічних показників фоновим кольором виділено календарні пори року: осінь, зиму, весну та літо.

Веgetаційний період 2021–2022 рр. був переважно сприятливим: осінь забезпечила формування достатніх запасів вологи у ґрунті, зима була м'якою, а ранньовесняний період характеризувався відносно добрим вологозабезпеченням. Основним лімітуючим фактором формування врожаю став тепловий і водний стрес під час наливу зерна пшениці озимої (рис. 1 а).

У вересні–жовтні середня температура повітря становила 12,7 °С, сума опадів – 78,8 мм, при цьому ефективними були опади у другій декаді вересня – 29,2 мм та другій декаді жовтня – 43,7 мм. У листопаді випало 42,8 мм при середньомісячній температурі повітря 6,7 °С. У грудні–лютому середня температура повітря становила близько 1,3 °С, опади – 99,1 мм, тому ризик вимерзання був невисоким. У березні–квітні 2022 р. середня температура повітря становила 6,0 °С, а сума опадів – 59,5 мм, що сприяло процесам весняного відновлення вегетації рослин пшениці озимої. Травень характеризувався температурою повітря 15,9 °С та

кількістю опадів 36,2 мм. У цей період рослини пшениці озимої перебували у фазах виходу у трубку та колосіння. У червні–липні 2022 р. посилювався несприятливий вплив погодних умов на ріст і розвиток рослин. Так, температура повітря у червні склала 21,6 °С, а кількість опадів 40,4 мм. Вкрай несприятливі умови за вологозабезпеченням склалися у липні – лише 8,8 мм опадів за температури повітря 23,7 °С, що сприяло скороченню періоду наливу зерна пшениці озимої.

Веgetаційний період 2022–2023 рр. був помірно сприятливим, але з різко нерівномірним розподілом опадів: посушливий жовтень, вологі листопад–квітень, запізнілі травневі дощі та сухий жаркий червень (рис. 1 б).

У вересні–жовтні середня температура повітря становила 13,3 °С, опади – 76,4 мм. При цьому основний запас вологи сформували опади другої декади вересня – 49,4 мм. Початок жовтня був майже бездощовим, тому сходи й початок кушіння рослин були нерівномірними. Листопад із 39,6 мм опадів частково компенсував дефіцит вологи.

Зима 2022–2023 рр. була м'якою. Середня температура повітря у грудні–лютому становила 1,3 °С, а сума опадів – 66,6 мм. Мінімальне значення середньої декадної температури повітря досягало –2,6 °С, що свідчить про низький ризик пошкодження посівів унаслідок дії морозів.

Найсприятливіші умови для росту і розвитку рослин пшениці озимої склалися у березні–квітні 2023 р. – середньодобова температура повітря становила 7,6 °С, а сума опадів – 108,0 мм. Водночас у травні розподіл

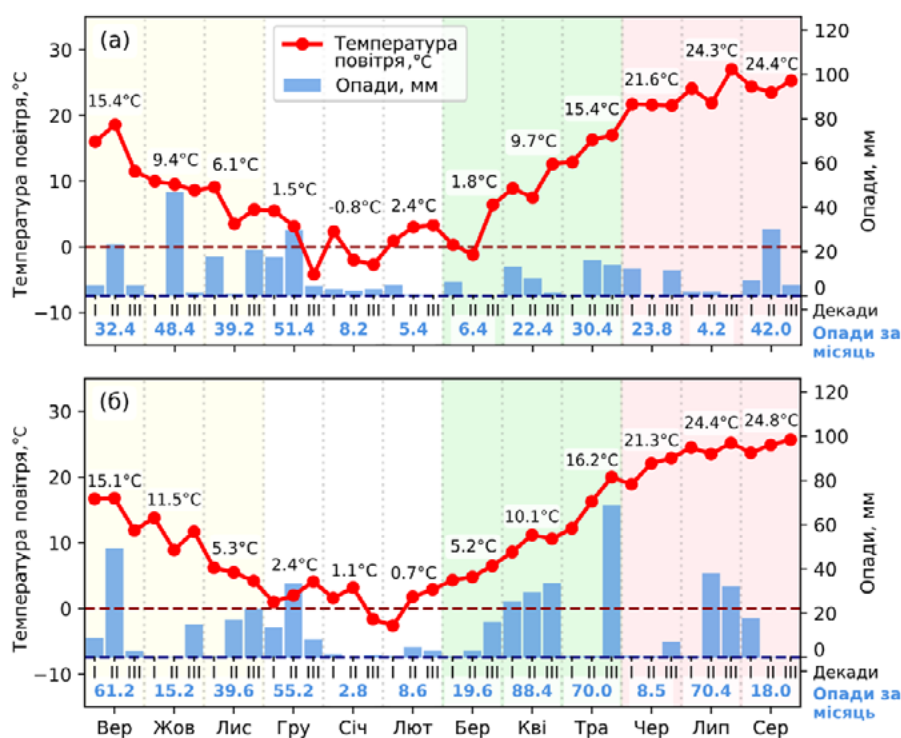


Рис. 1. Динаміка декадної температури повітря та суми опадів упродовж вегетаційних періодів пшениці озимої (а – 2021–2022 рр.; б – 2022–2023 рр.)

опадів був нерівномірним: із загальної місячної суми 70,0 мм 68,8 мм випало лише у третій декаді місяця. Найбільш стресовим за вологозабезпеченням був червень, коли випало лише 8,5 мм опадів за середньої температури повітря 21,3 °С.

Веgetаційний період 2023–2024 рр. був контрастним: дуже сухий і теплий початок осені змінився надмірно вологим листопадом, м'якою зимою та достатнім зволоженням на початку весняної веgetації (рис. 2 а).

У вересні–жовтні 2023 р. середня температура повітря становила 17,1 °С, а сума опадів – лише 12,8 мм, що затримувало появу сходів та обмежувало осіннє куціння рослин пшениці озимої. У листопаді випало 116,8 мм опадів, що частково поліпшило умови вологозабезпечення, однак не компенсувало повністю наслідки посушливого початку веgetації. У грудні–лютому середня температура повітря становила 1,4 °С, а сума опадів – 67,4 мм.

У березні–квітні 2024 р. 85,4 мм опадів за середньої температури повітря 7,2 °С створили сприятливі умови для компенсаторного росту та розвитку рослин пшениці озимої. У травні випало лише 16,8 мм опадів, тоді як у червні – 84,4 мм за середньої температури повітря 22,2 °С. У липні сформувалися вкрай несприятливі умови вологозабезпечення: за температури повітря 27,1 °С випало лише 1,6 мм опадів, що сприяло розвитку водного стресу та прискоренню досягання рослин.

Веgetаційний період 2024–2025 рр. характеризувався сприятливими погодними умовами восени, але

менш сприятливими умовами навесні. Спостерігалось слабше весняне наростання біомаси та прискорене проходження фаз росту і розвитку рослин пшениці озимої через холодну суху ранню весну і жаркий кінець веgetаційного періоду (рис. 2 б).

У вересні–жовтні 2024 р. середня температура повітря становила 16,1 °С, а сума опадів – 133,0 мм. Визначальними були 53,4 мм у другій декаді вересня і 62,1 мм у першій декаді жовтня. Дуже сухий листопад (6,4 мм опадів) сприяв ранньому припиненню активної веgetації пшениці озимої.

Грудень і січень були м'якими, однак у другій і третій декадах лютого середня температура повітря знижувалася до –7,9 і –8,5 °С при лише 8,8 мм опадів. У березні–квітні 2025 р. середня температура повітря становила 4,3 °С, а сума опадів – 29,0 мм, що обмежувало відновлення весняної веgetації пшениці озимої. Погодні умови травня частково поліпшили умови росту і розвитку рослин: за місяць випало 60,3 мм опадів. Проте у червні–липні 2025 р. домінували високі температури повітря та дефіцит вологи – відповідно 21,0 °С і 20,2 мм опадів у червні та 25,7 °С і 4,4 мм у липні, що негативно вплинуло на процеси росту, розвитку та формування продуктивності рослин пшениці озимої.

Динаміка веgetаційних індексів (NDVI, NDRE, NDMI). Зміни агрокліматичних показників у роки досліджень узгоджувалися зі змінами спектральних веgetаційних індексів. На початку осінньої веgetації 2021 р. значення NDVI становили близько 0,2, NDRE – 0,15–0,2.

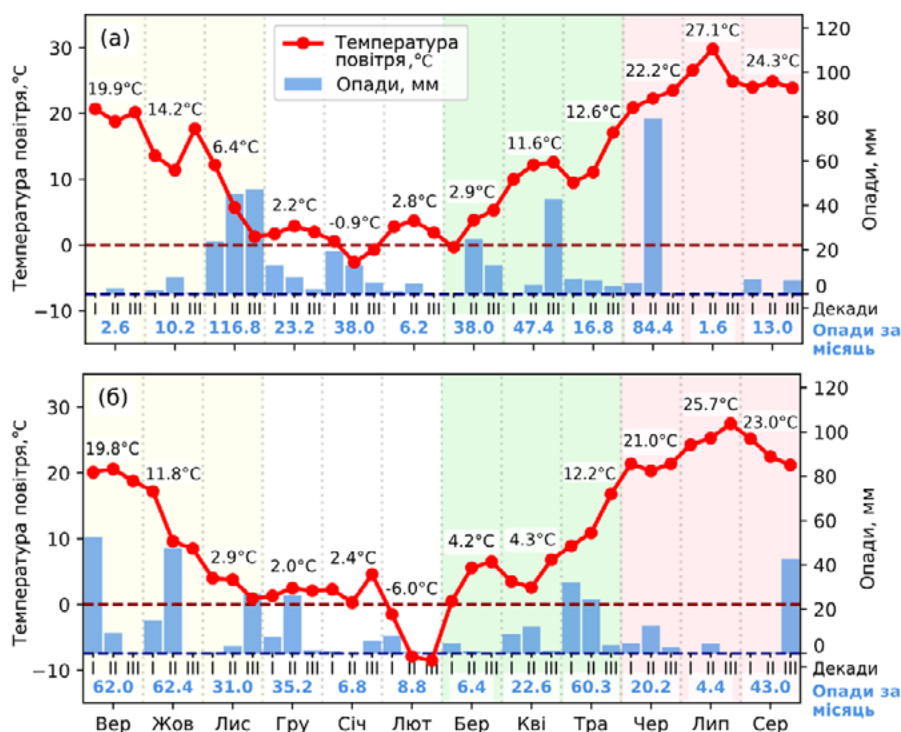


Рис. 2. Динаміка декадної температури повітря та суми опадів упродовж веgetаційних періодів пшениці озимої (а – 2023–2024 рр.; б – 2024–2025 рр.)

Упродовж жовтня–листопада вони зросли приблизно до 0,8 та 0,5 відповідно, що свідчило про активне формування біомаси рослин (рис. 3 а).

На рис. 3–4 наведено сезонну динаміку вегетаційних індексів озимої пшениці. Зелена крива відповідає індексу NDVI, фіолетова – NDRE, синя – NDMI. Точки відображають супутникові спостереження Sentinel-2, суцільні лінії – згладжені часові ряди. Вертикальними пунктирними лініями позначено календарні дати настання ключових фаз росту і розвитку пшениці озимої.

Після весняного відновлення індекси зростали синхронно. Так, у міжфазний період від виходу рослин у трубку до колосіння NDVI досягав 0,8, NDRE – 0,6–0,7, а NDMI – близько 0,3. У період наливу зерна та досягання спостерегалось поступове зниження всіх індексів: NDMI знижувався до нульових або від'ємних значень, NDVI – до 0,3–0,4, а NDRE – до близько 0,3. Така динаміка відображала посилення теплового та водного стресу наприкінці вегетаційного періоду пшениці озимої.

Осінній ріст і розвиток рослин пшениці озимої у 2022 р. були уповільненими – від сівби до фази кушіння індекс NDVI становив близько 0,2–0,3, а NDRE – 0,1–0,2 (рис. 3 б). У листопаді–грудні індекси стабілізувалися на рівні 0,6–0,7 для NDVI і 0,4–0,5 для NDRE, що свідчило про часткове відновлення та покращення стану посівів після осіннього дефіциту вологи. Погодні умови весняного періоду 2023 р. сприяли різкому зростанню індексів – у міжфазний період виходу рослин у трубку–колосіння NDVI досягав близько 0,9, NDRE – 0,7, а NDMI – 0,4. Подальший ранній спад NDMI до нуля та скорочення плато NDVI в червні відображали перехід до водного і теплового стресу рослин пшениці озимої.

Динаміка вегетаційних індексів у 2023–2024 рр. відображає контраст між пригніченим осіннім розвитком і компенсаторним весняним наростанням біомаси рослин пшениці озимої (рис. 4 а).

У міжфазний період сівби–сходи у 2023 р. NDVI становив лише 0,15–0,2, NDRE – 0,1–0,15, що відповідало посушливим умовам осені. До зими NDVI підвищувався лише до 0,4–0,5, а NDRE – до 0,25–0,3, що свідчило про недостатньо сформовану асиміляційну поверхню рослин. Навесні відбулося різке компенсаторне зростання: у фазі колосіння значення NDVI досягали 0,75–0,8, NDRE – близько 0,6, NDMI – близько 0,3. Після колосіння всі індекси швидко спадали, а NDMI рано переходив до значень поблизу нуля і нижчих.

Динаміка індексів у вегетаційному періоді 2024–2025 рр. відображає добрі погодні умови осіннього періоду 2024 р. і послаблення ростових процесів пшениці озимої навесні 2025 р. (рис. 4 б).

У період сівби–сходи у 2024 р. NDVI становив 0,15–0,2, NDRE – 0,1–0,15. У жовтні–листопаді індекси зросли відповідно до 0,6–0,7 і 0,4–0,5, що підтверджувало сприятливий осінній розвиток рослин пшениці озимої. Весняне відновлення вегетації і наростання надземної маси рослин пшениці озимої були помірними: у фазі колосіння NDVI досягав 0,75–0,8, NDRE – 0,6–0,65, NDMI – близько 0,3, однак тривалість плато була незначною. Швидке зниження NDMI до нульових або від'ємних значень, а також спад NDVI до 0,3–0,4 свідчили про прискорене старіння фотосинтезуючого апарату рослин пшениці озимої під впливом водного та теплового стресу.

Дослідження встановлено, що найвищі значення NDVI та NDRE у міжфазний період виходу рослин

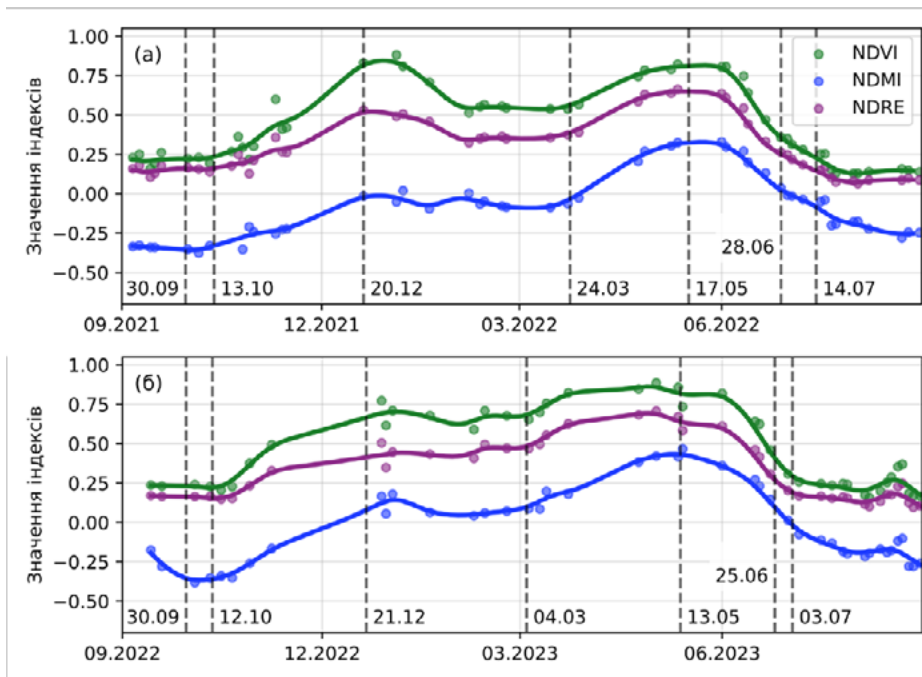
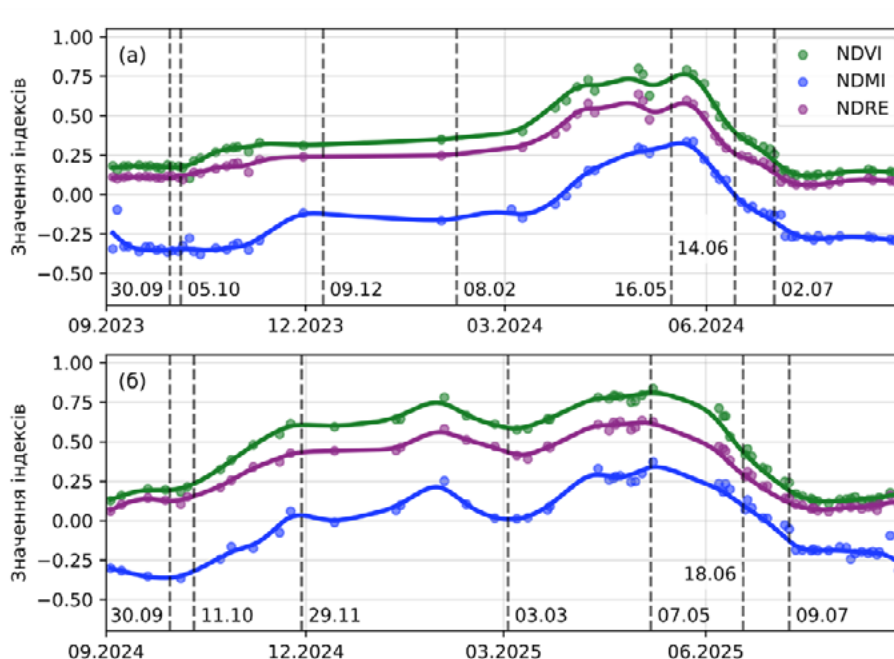


Рис. 3. Сезонна динаміка вегетаційних індексів озимої пшениці упродовж вегетаційних періодів:
(а) – 2021–2022 рр.; (б) – 2022–2023 рр.



**Рис. 4. Сезонна динаміка вегетаційних індексів озимої пшениці
упродовж вегетаційних періодів
(а – 2023–2024 рр.; б – 2024–2025 рр.)**

у трубку – колосіння формувалися за достатнього запасу вологи після зими й на початку весняної вегетації. У 2021–2022 рр. це забезпечувало добрий осінній розвиток і ранньовесняне відновлення рослин за достатнього вологозабезпечення, у 2022–2023 рр. – вологі березень–квітень і компенсаторне наростання біомаси. Саме ці вегетаційні періоди мали найвищі показники вегетаційних індексів – NDVI близько 0,8–0,9, а NDRE – 0,6–0,7.

Індекс NDMI виявився найбільш послідовним індикатором погіршення водного статусу рослин. У 2021–2022 рр. його зниження відповідало розвитку теплового та водного стресу наприкінці вегетації; у 2022–2023 рр. різкий спад у червні збігався з дефіцитом опадів; у 2023–2024 рр. раннє зниження NDMI відображало поєднання посушливого травня, нестійкого зволоження у червні та високих температур у липні; у 2024–2025 рр. – наслідки холодної та сухої весни, а також жаркого завершення вегетаційного періоду. Отже, червень був критичним періодом щодо формування водного стресу, при цьому NDMI реагував на його розвиток раніше за NDVI, тоді як скорочення тривалості плато NDVI свідчило про обмеження реалізації продуктивного потенціалу посівів пшениці озимої.

Порівняння вегетаційних періодів показало, що 2021–2022 і 2022–2023 рр. були найсприятливішими для формування вегетативної маси рослин пшениці озимої. Перший із них характеризувався стабільним осінньо-весняним розвитком посівів, тоді як другий – найвищими весняними значеннями NDVI після часткової компенсації осіннього дефіциту вологи. Водночас в обох досліджуваних вегетаційних періодах високий рівень розвитку рослин не забезпечив повної реалізації потенціалу

продуктивності культури через водний стрес у завершальні фази росту та розвитку рослин пшениці озимої.

Веgetаційний період 2023–2024 рр. підтвердив компенсаторну здатність пшениці озимої: після посушливих вересня і жовтня опади, які пройшли в листопаді, березні та квітні забезпечили інтенсивне весняне зростання значень NDVI та NDRE. Проте короткочасність плато та швидкий спад індексів після фази колосіння свідчили про неповну компенсацію несприятливих умов осіннього періоду.

Веgetаційний період 2024–2025 рр. продемонстрував інший тип обмеження розвитку посівів: сприятливі агрометеорологічні умови осінньої вегетації не трансформувалися у тривале весняне плато вегетаційних індексів через холодну та відносно суху весну.

Висновки. Веgetаційні періоди 2021–2022 і 2022–2023 рр. були найсприятливішими для формування вегетативної маси рослин пшениці озимої: у міжфазний період виходу рослин у трубку–колосіння значення NDVI досягали 0,8–0,9, а NDRE – 0,6–0,7. Веgetаційний період 2023–2024 рр. продемонстрував компенсаторний весняний ріст після посушливої осені, але коротша тривалість плато вегетаційних індексів і їх швидкий спад після фази колосіння свідчили про неповну компенсацію осіннього пригнічення рослин. Веgetаційний період 2024–2025 рр. характеризувався добрим осіннім розвитком посівів, проте слабшою весняною реакцією через низькі температури та дефіцит вологи у березні та квітні.

Найкритичнішим періодом розвитку водного стресу у всі роки досліджень був червень, коли рослини переходили від фази колосіння до наливу зерна. При цьому тривалість плато NDVI скорочувалася, а спад NDRE

і NDMI посилювався. Індекс NDMI виявився найбільш чутливим раннім індикатором водного стресу рослин, оскільки його значення змінювалися раніше та більш виражено у відповідь на погіршення водного режиму порівняно з індексом NDVI.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. 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.
2. Bhandari M., Baker S., Rudd J.C., Ibrahim A.M.H., Chang A., Xue Q., Jung J., Landivar J., Auvermann B. Assessing the effect of drought on winter wheat growth using unmanned aerial system (UAS)-based phenotyping. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13(6). Article 1144. <https://doi.org/10.3390/rs13061144>.
3. Ma C., Liu M., Ding F., Li C., Cui Y., Chen W., Wang Y. Wheat growth monitoring and yield estimation based on remote sensing data assimilation into the SAFY crop growth model. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 5473. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09535-9>.
4. El Imanni H.S., El Harti A., Panimboza J. Investigating Sentinel-1 and Sentinel-2 data efficiency in studying the temporal behavior of wheat phenological stages using Google Earth Engine. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, no. 10. Article 1605. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101605>.
5. Lobert F., Löw J., Schwieder M., Gocht A., Schlund M., Hostert P., Erasmí S. A deep learning approach for deriving winter wheat phenology from optical and SAR time series at field level. *Remote Sensing of Environment*. 2023. Vol. 298. Article 113800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113800>.
6. Tian G., Zhu L. Drought monitoring of winter wheat in Henan Province, China based on multi-source remote sensing data. *Agronomy*. 2024. Vol. 14, no. 4. Article 758. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040758>.
7. European Space Agency. Sentinel-2 user handbook. ESA Standard Document. 2015. URL: <https://sentinel.esa.int/> (дата звернення: 16.05.2026).
8. Copernicus Data Space Ecosystem. Sentinel-2 mission and products. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/> (дата звернення: 16.05.2026).
9. Google Earth Engine. Earth Engine documentation. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/> (дата звернення: 16.05.2026).

REFERENCES:

1. 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.
2. Bhandari, M., Baker, S., Rudd, J.C., Ibrahim, A.M.H., Chang, A., Xue, Q., Jung, J., Landivar, J. & Auvermann, B. (2021). Assessing the effect of drought on winter wheat growth using unmanned aerial system (UAS)-based phenotyping. *Remote Sensing*, Vol. 13(6), 1144. <https://doi.org/10.3390/rs13061144>.
3. Ma, C., Liu, M., Ding, F., Li, C., Cui, Y., Chen, W. & Wang, Y. (2022). Wheat growth monitoring and yield estimation based on remote sensing data assimilation into the SAFY crop growth model. *Scientific Reports*, Vol. 12, 5473. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09535-9>.

4. El Imanni, H.S., El Harti, A. & Panimboza, J. (2022). Investigating Sentinel-1 and Sentinel-2 data efficiency in studying the temporal behavior of wheat phenological stages using Google Earth Engine. *Agriculture*, Vol. 12, no. 10, 1605. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101605>.
5. Lobert, F., Löw, J., Schwieder, M., Gocht, A., Schlund, M., Hostert, P. & Erasmí, S. (2023). A deep learning approach for deriving winter wheat phenology from optical and SAR time series at field level. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 298, 113800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113800>.
6. Tian, G. & Zhu, L. (2024). Drought monitoring of winter wheat in Henan Province, China based on multi-source remote sensing data. *Agronomy*, Vol. 14, no. 4, 758. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040758>.
7. European Space Agency. Sentinel-2 user handbook. ESA Standard Document. 2015. URL: <https://sentinel.esa.int/> (дата звернення: 16.05.2026).
8. Copernicus Data Space Ecosystem. Sentinel-2 mission and products. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/> (дата звернення: 16.05.2026).
9. Google Earth Engine. Earth Engine documentation. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/> (дата звернення: 16.05.2026).

Панфілова А.В., Кошкін Д.Л. Агrometeorологічні умови та динаміка вегетаційних індексів пшениці озимої у Південному Степу України

Мета. Комплексно оцінити агrometeorологічні умови вегетаційних періодів 2021–2025 рр. для пшениці озимої в умовах Південного Степу України та встановити закономірності динаміки вегетаційних індексів NDVI, NDRE і NDMI під впливом сезонної мінливості температурного режиму, опадів і дефіциту вологи. **Методи.** Дослідження проведено на базі Навчально-науково-практичного центру Миколаївського національного аграрного університету. Використано метеорологічні дані автоматичної станції Pessl Instruments (iMETOS) за 2021–2025 рр. та супутникові дані Sentinel-2 SR Harmonized, оброблені в середовищі Google Earth Engine. Для оцінки стану посівів розраховано індекси NDVI, NDRE і NDMI та виконано їх порівняльний аналіз у взаємозв'язку з температурним режимом, кількістю опадів і перебігом основних фенологічних фаз розвитку пшениці озимої. **Результати.** Встановлено істотні міжрічні відмінності агrometeorологічних умов, які визначали характер формування та сезонної динаміки вегетаційних індексів. Найсприятливішими для розвитку рослин були вегетаційні періоди 2021–2022 та 2022–2023 рр., коли значення NDVI досягали 0,8–0,9, а NDRE – 0,6–0,7. Вегетаційний період 2023–2024 рр. характеризувався пригніченим осіннім розвитком і компенсаторним весняним наростанням біомаси, тоді як у 2024–2025 рр. добрі умови осінньої вегетації не забезпечили тривалого весняного розвитку через холодну й відносно суху весну. Встановлено, що найбільш критичним періодом розвитку водного стресу був червень, коли рослини переходили від фази колосіння до наливу зерна. Індекс NDMI найраніше реагував на погіршення водного режиму посівів і був найбільш чутливим індикатором розвитку водного стресу, тоді як скорочення тривалості плато NDVI відображало обмеження реалізації продуктивного потенціалу посівів. **Висновки.** Динаміка вегетаційних індексів пшениці озимої тісно пов'язана

з особливостями сезонного перебігу температурного режиму та зволоження. Вирішальне значення для формування фізіологічного стану рослин мали умови весняного періоду, а найбільш критичним щодо розвитку водного стресу був перехід від колосіння до наливу зерна. Індекс NDMI доцільно використовувати як ранній індикатор водного стресу, тоді як комплексне застосування NDVI, NDRE і NDMI забезпечує ефективний моніторинг стану посівів, а скорочення тривалості плато NDVI може бути використане як індикатор обмеження реалізації продуктивного потенціалу озимої пшениці.

Ключові слова: пшениця озима, агрометеорологічні умови, дистанційне зондування Землі, Google Earth Engine, Sentinel-2, вегетаційні індекси, NDVI, NDRE, NDMI.

Panfilova A.V., Koshkin D.L. Agrometeorological conditions and dynamics of vegetation indices of winter wheat in the Southern Steppe of Ukraine

Objective. To comprehensively assess the agrometeorological conditions of the 2021–2025 growing seasons for winter wheat in the Southern Steppe of Ukraine and to identify the patterns of NDVI, NDRE, and NDMI vegetation index dynamics under seasonal variations in temperature, precipitation, and water deficit. **Methods.** The study was conducted at the Educational, Scientific and Practical Center of Mykolaiv National Agrarian University. Meteorological data from the Pessl Instruments (iMETOS) automatic weather station for 2021–2025 and Sentinel-2 SR Harmonized satellite imagery processed in the Google Earth Engine environment were used. NDVI, NDRE, and NDMI were calculated to assess crop conditions, and their dynamics

were comparatively analyzed in relation to air temperature, precipitation, and the main phenological growth stages of winter wheat. **Results.** Significant interannual differences in agrometeorological conditions were found to determine the formation and seasonal dynamics of vegetation indices. The 2021–2022 and 2022–2023 growing seasons were the most favorable for crop development, with NDVI reaching 0.8–0.9 and NDRE 0.6–0.7. The 2023–2024 season was characterized by suppressed autumn growth followed by compensatory biomass accumulation in spring, whereas the favorable autumn conditions of 2024–2025 did not ensure prolonged spring development because of a cold and relatively dry spring. June was identified as the most critical period for the development of water stress during the transition from heading to grain filling. NDMI responded earliest to deterioration of crop water status and proved to be the most sensitive indicator of water stress, whereas the shortening of the NDVI plateau indicated limitations in the realization of the crop productivity potential. **Conclusions.** The dynamics of winter wheat vegetation indices are closely associated with seasonal temperature and moisture conditions. Spring weather conditions played a decisive role in determining crop physiological status, while the transition from heading to grain filling was the most critical period for water stress development. NDMI is recommended as an early indicator of crop water stress, whereas the combined use of NDVI, NDRE, and NDMI provides effective crop monitoring, and the shortening of the NDVI plateau may serve as an indicator of limitations in the realization of winter wheat productivity potential.

Key words: winter wheat, agrometeorological conditions, remote sensing, Google Earth Engine, Sentinel-2, vegetation indices, NDVI, NDRE, NDMI.

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.08.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.09.2026