

УДК 631.52: 291.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.145.1.22>

АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ І ФЕНОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ПОСІВІВ БУРКУНУ БІЛОГО З ВИКОРИСТАННЯМ НОРМАЛІЗОВАНОГО ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ВЕГЕТАЦІЙНОГО ІНДЕКСУ

Лиховид П.В. – д.с.-г.н., старший дослідник,
провідний науковий співробітник відділу зрошуваного землеробства
та декарбонізації агроєкосистем,
Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України
orcid.org/0000-0002-0314-7644

Вожегова Р.А. – д.с.-г.н., професор, академік
Національної академії аграрних наук України,
директор,
Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України
orcid.org/0000-0002-3895-5633

Аверчев О.В. – д.с.-г.н., професор,
завідувач кафедри землеробства,
Херсонський державний аграрно-економічний університет
orcid.org/0000-0002-8333-2419

Представлене дослідження присвячене актуальній темі дистанційного моніторингу сільськогосподарських культур за допомогою нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (далі – НДВІ). Однорічний буркун білий (*Melilotus albus*) сорту Південний було обрано у якості досліджуваної культури, враховуючи його недостатню вивченість у цьому контексті та агроєкологічну цінність як покривної, медоносної культури та фіксатора атмосферного азоту. Культура вирощувалася на півночі Франції (околиці Флекс'єра) впродовж літа та осені 2025 року. Фенологічні стадії були зафіксовані в польових умовах, а значення НДВІ були отримані з хмарної платформи моніторингу OneSoil (використовує зображення Sentinel-2 з роздільною здатністю 10 м). Зібрані дані показують чітку закономірність розвитку: спочатку поступове збільшення НДВІ, потім фаза плато і, нарешті, зменшення, що відповідає реальній динаміці росту культури і подальшому припиненню вегетативного росту (старіння). Поліноміальний регресійний аналіз (поліном третього ступеня) продемонстрував можливість математичного моделювання кривої розвитку культури на основі значень НДВІ, досягнувши високого рівня відповідності ($R^2 = 0,81$). Важливо, що величини НДВІ ефективно відобразили негативний вплив абіотичного стресу, зокрема посухи, на життєздатність рослин буркуну білого. Графік НДВІ показав різке зниження індексу в середині циклу росту, що співпало з періодом інтенсивної посухи, з подальшим відновленням, коли покращилися умови природного зволоження, що підкреслює стійкість і адаптивність культури, а також здатність НДВІ фіксувати агроєкологічні стреси. Крім того, аналіз НДВІ дозволив побудувати унікальний спектральний профіль однорічного буркуну білого, який може бути включений в автоматизовані системи розпізнавання культур на основі НДВІ. Результати дослідження мають важливе значення для розвитку цифрового сільського господарства та інтеграції агроєкологічних принципів у точне управління. Майбутні дослідження будуть зосереджені на розширенні набору даних за наступні вегетаційні періоди та вивченні моделей НДВІ культури в різних місцях вирощування для оцінки впливу мінливості навколишнього середовища.

Ключові слова: екологія, *Melilotus albus*, регресійний аналіз, дистанційне зондування, вегетаційний індекс.

Lykhovyd P.V., Vozhehova R.A., Averchev O.V. Agroecological and phenological monitoring of white melilot crops using normalized difference vegetation index

*This study addresses the pertinent subject of remote crop monitoring using the normalized difference vegetation index (hereafter referred to as NDVI). We selected annual white melilot (*Melilotus albus* var. *Pivdennyi*) as the basic crop, given its scarcely studied potential within this context and its agroecological value as a cover crop, honey-bearing crop and atmospheric nitrogen fixer. The crop was cultivated in northern France (Flesquières vicinity) during the summer and autumn of 2025. Phenological stages were recorded under field conditions, while NDVI values were retrieved from the OneSoil cloud monitoring platform (uses Sentinel-2 images with 10 m resolution). The collected data reveals a clear developmental pattern: an initial gradual increase in NDVI, followed by a plateau phase, and a final decrement corresponding to optimal crop growth and subsequent vegetative growth cessation (senescence). Polynomial regression analysis (third-degree polynomial) demonstrated the feasibility of mathematically modeling the crop's developmental curve based on NDVI values, achieving a strong fit ($R^2 = 0.81$). Crucially, the NDVI values effectively captured the suppressive effects of abiotic stress, specifically drought, on the white melilot's canopy vigor. The NDVI plot showed a sharp decrease in the index during the middle of the growth cycle when severe drought events occurred, followed by a subsequent recovery when natural moisture availability improved, highlighting the crop's resilience and adaptive capacity, as well as ability of NDVI to capture agroecological stresses. Furthermore, NDVI analysis enabled the construction of a unique spectral profile for annual white melilot, which can be incorporated into automated, NDVI-based crop recognition systems. The results of this study hold significant importance for advancing digital agriculture and integrating agroecological principles into precision management. Future research will focus on expanding the dataset across subsequent growing seasons and examining the crop's NDVI patterns across different growing locations to assess environmental variability effects.*

Key words: ecology, *Melilotus albus*, regression analysis, remote sensing, vegetation index.

Актуальність дослідження. Вивчення можливостей залучення даних дистанційного зондування Землі у форматі вегетаційних індексів для моніторингу посівів сільськогосподарських культур є одним із провідних трендів сучасної агрономічної науки, що рухається у бік цифровізації процесу виробництва продукції рослинництва [1]. Одним із важливих питань у цьому напрямку є визначення закономірностей внутрішньосезонної динаміки вегетаційних індексів за різними видами рослинних угруповань, включаючи культурні рослини та їх агрофітоценози, що істотно допомагає у вирішенні проблеми поліпшення точності та економіко-організаційної ефективності картування сільськогосподарських угідь, вивчення структури посівних площ і сівозмін на засадах сучасних геоінформаційних технологій. Крім того, важливим залишається питання вивчення реакції культур на агроекологічні умови вирощування та те, яким чином вегетаційні індекси здатні опосередковано відображати ці реакції культурних рослин на абіотичні та біотичні стресори. Вищевикладене визначає актуальність обраного напрямку досліджень, їх теоретичну та практичну цінність для аграрної науки сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед усіх вегетаційних індексів, які застосовуються в агрономічній науці та практиці, найбільш широке застосування знайшов нормалізований диференційний вегетаційний індекс (далі – НДВІ) [2], який використовується для загального моніторингу стану посівів, у якості маркеру інтенсивності стресу сільськогосподарських культур, в системах автоматизованого дистанційного розпізнавання посівів, як компонент у системах агроекологічного та агрокліматичного моніторингу, тощо [3, 4]. Широта застосування у науково-практичній сфері зумовлена доступністю даного вегетаційного індексу у готовому до використання виді на низці хмарних платформ, що надають доступ до даних аерокосмічного моніторингу, оскільки його величина може бути розрахована за використання практично будь-якого мультиспектрального сенсору, а також його достатньо високої універсальності та простоти інтерпретації.

Одним із цікавих з науково-практичної точки зору застосувань НДВІ є залучення його у системи дистанційного фенологічного моніторингу посівів. Дане питання отримало доволі широке висвітлення у публікаціях закордонних науковців. Так, 3-річні дослідження, виконані в США, довели можливість точного встановлення фаз росту і розвитку [5]. Позитивні результати використання часової серії НДВІ для аналізу фенологічних фаз сільськогосподарських культур знаходимо у звіті французьких та індійських науковців, які виконували свої спостереження впродовж 2018 року [6]. На особливу увагу заслуговує американське дослідження, де науковці використали часову серію НДВІ для оцінки фенології пшениці. Крім того, що часова серія супутникового вегетаційного індексу виявилася вдалим вибором для дистанційного відстеження росту і розвитку культури, було доведено, що похідні від НДВІ параметри фенологічного моніторингу дозволили поліпшити точність прогнозування врожайності культури [7].

Варто відзначити, що проблематикою вивчення можливостей дистанційного фенологічного моніторингу посівів за даними супутникових вегетаційних індексів в останні роки активно займалися і українські науковці. Так, встановлено закономірності сезонної динаміки величини НДВІ для таких культур як пшениця та ячмінь озимі, ріпак озимий, нут, горох, сорго зернове, кукурудза зернова, соя та соняшник в умовах південного Степу України [8]. Крім того, у згаданому дослідженні запропоновано градуйовані шкали дисперсії вегетаційного індексу за фазами фенологічного розвитку по кожній із перелічених культур, а також встановлено граничні величини НДВІ, які можуть вважатися такими, що не є репрезентативними для культурної рослинності (в межах 0,2). Встановлено, що пікових величини індекс набуває у такі фази росту і розвитку досліджуваних культур: озимі зернові – трубкування; ріпак – цвітіння; нут – початок активного галузнення; горох – бутонізація та цвітіння; соняшник – період активного росту до формування кошика; соя – формування бобів; сорго та кукурудза – викидання волоті та початок цвітіння волоті.

Динаміку величини НДВІ на посівах пшениці озимої в розрізі росту і розвитку рослин культури вивчали науковці Інституту водних проблем і меліорації НААН, Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства НААН та Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Вегетаційний індекс застосовано у якості маркера загального розвитку рослин пшениці. Науковцями зафіксовано середні величини НДВІ по етапах росту і розвитку культури, але не розроблено шкали встановлення фенофаз за показниками НДВІ [9].

Науковцями Інституту агроєкології і природокористування НААН розроблено та успішно застосовано методику встановлення термінів початку та завершення вегетаційного періоду за різними природними зонами України із залученням НДВІ як одного із основних маркерів початку інтенсивного росту культурних рослин [10]. Учені Херсонського державного аграрно-економічного університету в кооперації з науковцями Миколаївського національного аграрного університету дослідили, яким чином можна відстежувати фенологічний розвиток рослин соняшнику за даними супутникового НДВІ, отриманого за знімками Sentinel-2. Встановлено середню величину НДВІ за основними фазами розвитку культури залежно від умов вирощування та гібридного складу, що є надзвичайно важливим для практичного впровадження у системи дистанційної оцінки фенології [11].

В цілому, українська наука знаходиться на передовій у вивченні питання дистанційного фенологічного моніторингу, що підтверджується достатньою кількістю висвітлення цієї проблематики у наукових публікаціях. Втім, фокус уваги

науковців зосереджено на основних продовольчих культурах, а нішові та малопоширені культури досліджені вкрай недостатньо. До однієї з маловивчених у плані дистанційної оцінки фенології культур належить однорічний буркун білий (*Melilotus albus*), який є цінною кормовою, медоносною та фітомеліоративною культурою, яка додатково відрізняється високою посухостійкістю та невибагливістю до умов вирощування [12].

Постановка завдання. Мета дослідження передбачала наступне:

1) Провести аналіз динаміки супутникового НДВІ для посівів буркуну білого однорічного та встановити закономірності зміни вегетаційного індексу залежно від фенологічної фази розвитку культури та агроекологічних чинників, запропонувати шкалу вегетаційного індексу за фенологічними фазами буркуну білого однорічного.

2) Виконати математичне моделювання величини НДВІ залежно від часового проміжку від дати сівби до конкретної доби після неї шляхом застосування поліноміальної регресії (поліном третього ступеня).

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконували впродовж літньо-осіннього періоду на півночі Франції (поблизу Флесьєра) із рослинами культури буркун білий однорічний сорту Південний, оригіном якого є Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства НААН. Сівбу культури виконували 10 липня 2025 року. Дані щодо вегетації культури було люб'язно надано Роменом Йоосом, французьким агровиробником. Величину НДВІ культури у відповідні періоди росту і розвитку оцінювали за даними хмарної платформи OneSoil, яка використовує супутникові знімки Sentinel-2 з роздільною здатністю 10 м. НДВІ враховували тільки для безхмарних зображень із чистотою понад 80%. Середні значення НДВІ за дослідними полями були використані для відображення динаміки росту культури та встановлення математичних патернів її розвитку шляхом побудови поліноміальної моделі третього ступеня. Якість моделі оцінювали за величиною коефіцієнта детермінації R^2 та відносною абсолютною похибки [13]. Середні за фазами фенологічного розвитку показники НДВІ розраховували як просте арифметичне середнє усіх показників за період. Стандартне відхилення (СВ) та варіювання (КВ) розраховували за міжнародною методикою для оцінки внутрішньофазної мінливості величини вегетаційного індексу [14]. Математичні розрахунки та побудову графічної апроксимації поліноміальної моделі виконували у Microsoft Excel 365.

В першу чергу варто звернути увагу на динаміку НДВІ на посівах досліджуваної культури (Рис. 1). Помітно, що стрімке наростання величини вегетаційного індексу співпадає із періодом появи повних сходів буркуну білого (10–15 діб після сівби). Крім того, відмічається зигзагоподібна крива у період активного росту культури, що пов'язано із періодами інтенсивної посухи. Стрімке зниження вегетаційного індексу в певні періоди свідчить про реакцію культури на абіотичний кліматичний стрес, а стрімке відновлення після нього – на високі адаптивні властивості буркуну білого, що підтверджує пластичність та високу толерантність культури до посухи. Після 65 доби спостерігається поступове зменшення величини НДВІ, що пов'язано із входом буркуну білого у фазу дозрівання, яка супроводжується поступовим відмиранням вегетативної маси.

Враховуючи закономірності, зафіксовані у наземних спостереженнях, а також накладаючи дані щодо величини НДВІ, нами було розроблено орієнтовну шкалу росту і розвитку однорічного буркуну білого (Табл. 1).

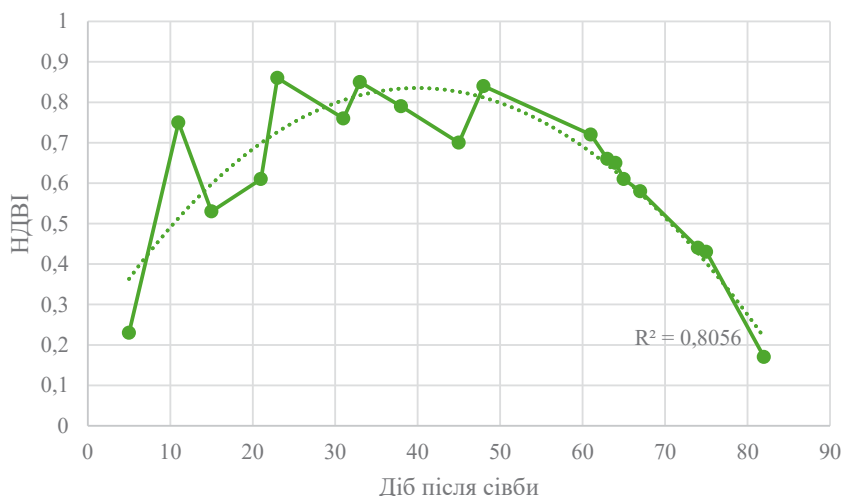


Рис. 1. Динаміка НДВІ на посівах однорічного буркуну білого та крива поліноміальної регресії для оцінки величини вегетаційного індексу залежно від періоду росту і розвитку культури

Таблиця 1

Орієнтовна шкала НДВІ для оцінки росту і розвитку однорічного буркуну білого сорту Південний

Фенологічна фаза	Величини НДВІ $\pm$ СВ (КВ)
Сівба – повні сходи	$0,53 \pm 0,22$ (41,45%)
Вегетативний ріст і галузнення	$0,80 \pm 0,06$ (7,79%)
Цвітіння – дозрівання	$0,64 \pm 0,05$ (8,26%)
Дозрівання – відмирання вегетативної маси	$0,35 \pm 0,09$ (27,12%)

Встановлено, що пікових величин НДВІ набуває у фазі активного вегетативного росту, а мінімальних – у період дозрівання насіння. Найбільш нестабільним показник є на початкових етапах росту і розвитку буркуну білого, у той час як у основний період до відмирання зеленої маси спостерігаються мінімальні коливання величини вегетаційного індексу. Втім, варто відзначити, що стрімкі коливання величини НДВІ на початкових етапах розвитку культури можуть бути пов'язані із сильним абіотичним стресом – посухою.

Цікавим із теоретичної точки зору є моделювання величини НДВІ на посівах буркуну білого однорічного за часом (кількість діб) від його сівби до дозрівання. Нами було побудовано поліном третього ступеня для оцінки зміни величини вегетаційного індексу у часовому розрізі. Даний поліном зображено на Рис. 1. Коефіцієнт детермінації моделі становить 0,81 – а це свідчить про достатньо високу її надійність [15]. Середня відносна похибка моделі також знаходиться у припустимих межах, і становить 18% [16]. Таким чином, використання розробленої регресійної моделі, яка має вигляд $\text{НДВІ} = 0,2149 + 0,0318 \text{ Д} - 0,0004 \text{ Д}^2 + 0,0000005 \text{ Д}^3$ (Д – кількість діб після сівби), є обґрунтованим у науково-теоретичних цілях.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Вперше встановлено внутрішню сезонну динаміку величини нормалізованого диференційного вегетаційного індексу на посівах буркуну білого однорічного. Розроблено орієнтовну шкалу для дистанційного фенологічного моніторингу культури, а також розроблено високоточну прогностичну модель величини НДВІ в часовому розрізі. Результати дослідження мають важливе значення для розвитку цифрового сільського господарства та інтеграції агроекологічних принципів у точне управління. Майбутні дослідження будуть зосереджені на розширенні набору даних за наступні вегетаційні періоди та вивченні моделей НДВІ культури в різних місцях вирощування для оцінки впливу мінливості навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Vidican R., Mălinaş A., Ranta O., Moldovan C., Marian O., Gheţe A., Ghise C. R., Popovici F., Căţunescu, G. M. Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops: A critical review. *Agronomy*. 2023. Vol. 13(12). P. 3040. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123040>
2. Radočaj D., Šiljeg A., Marinović R., Jurišić M. State of major vegetation indices in precision agriculture studies indexed in web of science: A review. *Agriculture*. 2023. Vol. 13(3). P. 707. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030707>
3. Лиховид П. В. Нормалізований диференційний вегетаційний індекс як маркер ідентифікації озимих культур у системах автоматизованого картування посівів. *Аграрні інновації*. 2024. Вип. 23. С. 98–104. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.23.14>
4. Peters A. J., Walter-Shea E. A., Ji L., Vina A., Hayes M., Svoboda M. D. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 2002. Vol. 68(1). P. 71–75.
5. Kovalskyy V., Roy D. P., Zhang X. Y., Ju J. The suitability of multi-temporal web-enabled Landsat data NDVI for phenological monitoring—a comparison with flux tower and MODIS NDVI. *Remote Sensing Letters*. 2012. Vol. 3(4). P. 325–334. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.593581>
6. Boori M. S., Choudhary K., Paringer R., Sharma A. K., Kupriyanov A., Corgne S. Monitoring crop phenology using NDVI time series from Sentinel 2 satellite data. *2019 5th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP)*. 2019. P. 62–66. <https://doi.org/10.1109/ICFSP48124.2019.8938078>
7. Magney T. S., Eitel J. U., Huggins D. R., Vierling L. A. Proximal NDVI derived phenology improves in-season predictions of wheat quantity and quality. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2016. Vol. 217. P. 46–60. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.009>
8. Lykhovyd P. V. Seasonal dynamics of normalized difference vegetation index in some winter and spring crops in the South of Ukraine. *Agrology*. 2021. Vol. 4(4). P. 187–193. <https://doi.org/10.32819/021022>
9. Ковальчук В., Войтович О., Бутенко Я., Бурикiна С., Лукашук В., Ковальчук О. Використання метеосервісів, дистанційних і польових методів для обґрунтування температурних показників розвитку пшениці озимої. *Вісник аграрної науки*. 2023. Вип. 101(5). С. 71–80. <https://doi.org/10.31073/agrovysnyk202305-10>
10. Ільєнко Т. В., Білокінь О. А. Варіювання вегетаційного циклу сільськогосподарських культур в процесі змін клімату за супутниковими даними. *Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека та збалансоване природокористування в агропромисловому виробництві»*. С. 143–147.
11. Пічура В., Домарацький Є., Потравка Л. Застосування дистанційного зондування землі для дослідження вегетаційного розвитку гібридів соняшника за різних кліматичних умов зони Степу. *Екологічні науки*. 2023. № 2(47). С. 196–205. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.32>

12. Влащук А. М., Дробіт О. С., Шапарь Л. В., Коблай О. О., Шабля О. С. Сучасні тенденції вирощування бобових кормових культур на півдні України за умов зміни клімату. *Вісник аграрної науки*. 2024. Вип. 102(4). С. 60–67. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202404-09>
13. Chicco D., Warrens M. J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj Computer Science*. 2021. Vol. 7. P. e623. <http://dx.doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
14. Abdi H. Coefficient of variation. *Encyclopedia of Research Design*. 2010. Vol. 1(5). P. 169–171.
15. Helland I. S. On the interpretation and use of R² in regression analysis. *Biometrics*. 1987. Vol. 43. P. 61–69. <https://doi.org/10.2307/2531949>
16. Moreno J. J. M., Pol A. P., Abad A. S., Blasco B. C. Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy. *Psicothema*. 2013. Vol. 25(4). P. 500–506. <https://doi.org/10.7334/psicothema2013.23>

Дата першого надходження рукопису до видання: 05.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.10.2025

Дата публікації: 05.12.2025
