

СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ІНДЕКСИ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ ЯК ІНСТРУМЕНТ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АГРОЕКОСИСТЕМ ЗА КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Д.М. Шерстюк, Т.В. Ільєнко

*Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: volaf666@gmail.com; ORCID: 0009-0001-1687-5974
e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5406-5449*

Дослідження присвячене розробці методологічного підходу до моніторингу змін рослинного покриву України в умовах кліматичних трансформацій із застосуванням супутникових технологій. На прикладі полігону у Вишгородському р-ні Київської обл. проведено аналіз різноманітних об'єктів — водних, аграрних, лісових, лучних та урбанізованих територій — із використанням мультиспектральних даних Sentinel-2 (рівень L2A) за 2018 р. та 2025 р. Розраховано низку спеціалізованих індексів хлорофілу: CVI (Chlorophyll Vegetation Index), CARI (Chlorophyll Absorption Ratio Index), MTVI2 (Modified Triangular Vegetation Index), MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index) та GNDVI. Геопросторову обробку та візуалізацію здійснено в програмному середовищі QGIS за допомогою розрахункових формул для кожного індексу з урахуванням спектральних каналів Sentinel-2. Застосовано аналітичний метод порівняльного аналізу індексів з використанням функції Elevation Profile для візуалізації змін значень та отримання точних кількісних показників, що дало можливість оцінити їхню чутливість до фізіологічних параметрів рослинності та локальних відмінностей між типами землекористування. Порівняльний аналіз показав, що індекси хлорофілу забезпечують більш деталізоване відображення фотосинтетичної активності та пігментного складу рослин порівняно з узагальненим NDVI. Встановлено їхню здатність диференціювати хвойні та широколистяні деревостани, а також виявляти вплив урбанізації та аграрної діяльності. Валідація результатів за кліматичними даними NASA Giovanni (AIRS) за 2015–2022 рр. підтвердила кореляцію між підвищенням температури, зростанням концентрації CO₂ та змінами індексних значень, що відображають подовження вегетаційного періоду та посилення рівня хлорофілу. Наукова новизна роботи полягає у комплексному застосуванні спектральних індексів для багатоконпонентного середовища, що включає водні, аграрні, лісові та урбанізовані ділянки, що допомагає отримати більш точну картину екологічних процесів. Практичне значення подовження — у можливості використання запропонованої методики для моніторингу продуктивності агроєкосистем, оцінки стійкості лісових масивів та прогнозування ризиків деградації земель, що створює підґрунтя для розробки адаптивних стратегій управління природними та агроєкосистемами України в умовах глобальних кліматичних викликів, а також для інтеграції результатів у національні системи екологічного моніторингу та плануванні сталого розвитку.

Ключові слова: Sentinel-2, CVI, CARI, MTVI2, MCARI, QGIS, кліматичні показники, Copernicus BROWSER, рослинний покрив.

ВСТУП

Клімат наразі втрачає свою передбачуваність та стабільність внаслідок зміни характеристик, які були викликані збільшенням рівня CO₂ та загальною температурою, що є важливим регулятором клімату, екосистемі в якій ми проживаємо. За даними Міжурядової панелі з питань зміни клімату (IPCC), антропогенна діяльність спричи-

нила підвищення глобальної температури на 1,1°C порівняно з доіндустріальним періодом, що супроводжується критичними змінами у структурі та функціях рослинного покриву [1].

Унаслідок такої бурхливої активності дані про стан рослин можуть не збігатися або хибно інтерпретуватися через антропогенний вплив під час дослідження інших чинників. Особливої актуальності

ця проблема набуває в контексті України, де поєднуються інтенсивна аграрна діяльність, урбанізація та кліматичні зміни, що ускладнює об'єктивну оцінку екологічного стану територій.

Традиційні методи моніторингу рослинності, зокрема широко використовуваний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), попри свою універсальність, не завжди дають можливість диференціювати природні кліматичні чинники від антропогенного впливу за дослідження великих територій. Це створює критичний методологічний розрив у сучасній екологічній науці, особливо за умов прискорення темпів кліматичних змін та зростання антропогенного тиску на природні екосистеми.

Зростаюча концентрація CO₂ в атмосфері, яка за останнє десятиліття перевищила 420 ppm, безпосередньо впливає на фотосинтетичні процеси рослин, підвищуючи рівень хлорофілу та змінюючи тривалість вегетаційного періоду. Водночас паралельні процеси урбанізації, зміни землекористування та лісгосподарської діяльності створюють складну мозаїку впливів, які традиційні методи дистанційного зондування часто не здатні розмежувати.

Актуальність розробки нових підходів до моніторингу підкреслюється необхідністю забезпечення продовольчої безпеки, збереження біорізноманіття та адаптації до кліматичних змін. За прогнозами ФАО, до 2050 р. попит на харчові продукти зросте на 70%, що вимагає точного розуміння динаміки продуктивності рослинного покриття та чинників, що її визначають.

Це створює потребу у розробці більш точних методик оцінки стану рослинності з урахуванням кліматичних змін, що і визначає актуальність даного дослідження. У цьому контексті спеціалізовані індекси хлорофілу представляють перспективну альтернативу традиційним підходам, оскільки вони демонструють вищу чутливість до фізіологічних змін рослин та допомагають більш точно відокремлювати сигнали кліматичних змін від антропогенних впливів.

Мета дослідження — обґрунтувати використання спеціалізованих індексів хлорофілу (CVI, CARI, MTVI2, MCARI, LCI, GNDVI) як більш точної альтернативи NDVI для виявлення впливу кліматичних змін на рослинний покрив України з мінімізацією впливу антропогенних чинників на результати досліджень.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Глобальні кліматичні зміни продовжують чинити зростаючий тиск на екосистеми, викликаючи зміну рослинного покриття, деградацію земель і втрату біорізноманіття. Сучасні дослідження зосереджені на розробці методів оцінки цих змін, прогнозуванні наслідків, а також створенні систем адаптації та зменшення ризиків. В останніх дослідженнях велику увагу приділено поєднанню методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), геоінформаційних технологій (ГІС) та машинного навчання. Наприклад, у патентному дослідженні О.В. Ковирьової (2019) запропоновано інноваційний підхід до визначення змін у рослинному покритті внаслідок кліматичних змін і діяльності людини. Технологія передбачає багатофакторний аналіз із застосуванням супутникових даних Sentinel, вегетаційних індексів та статистичної моделі для визначення просторових закономірностей деградації покриття. Запропоновані алгоритми дають можливість встановити причинно-наслідкові зв'язки між змінами клімату, антропогенним тиском і змінами екосистем [2].

У дослідженні Н.І. Рябчун (2009) описано методику виявлення антропогенно-кліматичних чинників впливу на рослинність за допомогою індексу NDVI, класифікації покриття і фіксування змін багаторічної динаміки. Автори демонструють практичне застосування супутникових даних MODIS, а також GIS-аналізу для моніторингу екологічного стану територій, що зазнали трансформації. Результати дослідження підтверджують ефективність використання супутникових даних як інструменту для виявлення просторових проявів деградації [3].

Для динамічного моніторингу змін рослинності були розроблені відповідні методи і пристрої з застосуванням алгоритмів аналізу часових рядів супутникових знімків (Шерер, 2007). Особливістю підходу є адаптивне налаштування порогових значень для кожного регіону та класифікація на основі методів машинного навчання. Такий підхід дає змогу підвищити точність і ефективність виявлення локальних змін біомаси у різні сезони та роки [4].

У дослідженні Yi Lang (2022) було здійснено глибокий аналіз змін рослинного покриву в басейні р. Янцзи, як результату поєднаного впливу кліматичних змін і людської діяльності. Було використано NDVI, дані про температуру, кількість опадів та землекористування, що допомогло встановити пріоритетні чинники зміни екосистем і виявити більш значний вплив кліматичних чинників у верхній течії річки, тоді як у нижній течії домінує антропогенний вплив [5].

Значну роль у прогнозуванні змін лісових екосистем відіграє застосування геопросторових даних. У публікації Dan M. Savastru (2019) обґрунтовано використання супутникових знімків, даних LIDAR і геопросторових баз для оцінки впливу змін клімату на ліси. У дослідженні розроблено індикаторну модель, яка дає можливість враховувати вразливість лісових ресурсів, сценарії кліматичних змін і природну адаптивну здатність екосистем [6].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження виконано на території полігону у межах Вишгородського р-ну Київської обл., що охоплює Київське водосховище, фрагменти сільськогосподарських угідь, лісові масиви різного типу, лучну рослинність, населені пункти та елементи транспортної інфраструктури. Така комбінація водних, лісових, лучних, аграрних та урбанізованих об'єктів створює репрезентативні умови для порівняльної оцінки чутливості спектральних індексів хлорофілу щодо різних типів підстильної поверхні та інтенсивності антропогенного навантаження.

Як вихідні дані використано мульти-спектральні супутникові знімки Sentinel-2 (рівень L2A з атмосферною корекцією), відібрані за критеріями мінімальної хмарності та повного накриття дослідної ділянки за 2.06.2018 та 8.06.2025. Для розрахунку індексів залучено спектральні канали у видимому, ближньому та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах із просторовою роздільною здатністю 10–60 м (*табл. 1*).

Таблиця 1. Канали Sentinel-2, використані для розрахунку індексів, їх діапазони і просторова роздільна здатність [7]

Канали індексів	Діапазон, просторова роздільна здатність
B3 (Green)	560 нм, 10 м
B4 (Red)	665 нм, 10 м
B5 (Red edge)	705 нм, 20 м
B8 (Near IR)	842 нм, 10 м
B8A (Narrow Near IR)	865 нм, 20 м

У роботі проаналізовано низку індексів, чутливих до вмісту хлорофілу та структурних характеристик рослинного покриву: NDVI, GNDVI, CIVI, CARI, LCI, MCARI, MTVI2 та комбінований показник MCARI/MTVI2. Їх формули та адаптовані вирази для супутника Sentinel-2 в програмному середовищі QGIS [8] наведено в *табл. 2*. Вибір саме цих індексів зумовлений їх здатністю уточнювати оцінку фізіологічного стану рослин порівняно з узагальнювальним індексом NDVI, а також можливістю виділення локальних відмінностей між різними типами рослинності та класами землекористування.

Підбір спектральних каналів здійснювали з урахуванням вимог до індексів хлорофілу, використовуючи базу Index Database для перевірки коректності їх застосування до сенсора Sentinel-2 (*табл. 3*).

Геопросторову обробку даних виконано в програмному середовищі QGIS. На основі вихідних каналів Sentinel-2 у модулі Raster Calculator розраховано растрові шари індексів згідно з наведеними формулами, після чого знімки було обрізано за контуром полігону дослідження.

Таблиця 2. Формули індексів та їх адаптація для супутника Sentinel-2 у програмному середовищі програми QGIS [9; 10]

Індекс	Формула	QGIS Formula
NDVI	$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$
GNDVI	$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Green}}{\text{NIR} + \text{Green}}$	$(B8 - B3) / (B8 + B3)$
CVI	$\text{CVI} = \frac{R750}{R705} - 1$	$(B8 - B4) / B4$
CARI	$\left(\frac{R700}{R670} \right) \frac{\sqrt{(a \cdot 670 + R670 + b)^2}}{(a^2 + 1)^{0.5}}$ $a = (R700 - R550) / 150,$ $b = (R550 - ((R700 - R550) / 150 * 550))$	$\text{ABS}(((B5 - B3) / 150) \times B4 + (B3 - ((B5 - B3) / 150) \times 550)) / \text{sqrt}(((B5 - B3) / 150)^2 + 1)$
LCI	$\text{LCI} = \frac{R865 - R665}{R865 + R705}$	$(B8A - B4) / (B8A + B5)$
MCARI	$\text{MCARI} = [(R700 - R670) - 0,2 \cdot (R700 - R550)] \cdot \left(\frac{R700}{R670} \right)$	$((B5 - B4) - 0,2 \times (B5 - B3)) \times (B5 / B4)$
MTVI2	$\text{MTVI2} = \frac{1,5[1,2(R800 - R550) - 2,5(R670 - R550)]}{\sqrt{(2R800 + 1)^2 - (6R800 - 5\sqrt{R670})} - 0,5}$	$(1,5 \times (1,2 \times (B8 - B3) - 2,5 \times (B4 - B3))) / \text{sqrt}((2 \times B8 + 1)^2 - (6 \times B8 - 5 \times \text{sqrt}(B4)) - 0,5)$
MCARI/ MTVI2	$\frac{\text{MCARI}}{\text{MTVI2}} = \frac{\text{MCARI}}{\text{MTVI2}}$	$((B5 - B4) - 0,2 \times (B5 - B3)) \times (B5 / B4) / ((1,5 \times (1,2 \times (B8 - B3) - 2,5 \times (B4 - B3))) / \text{sqrt}((2 \times B8 + 1)^2 - (6 \times B8 - 5 \times \text{sqrt}(B4)) - 0,5))$

Примітки: Green, RED, NIR – значення КСВ відповідно в зеленій, червоній та ближній ІЧ зонах спектра; $R\lambda$ – значення КСВ для довжини хвилі λ нм; B_i – значення КСВ в i -тому каналі супутника Sentinel-2; КСВ – коефіцієнт спектрального відбиття.

Таблиця 3. Індеси хлорофілу, канали та їх просторова роздільна здатність

Індеси	Діапазон нм. Канал Sentinel-2	Просторова роздільна здатність
CVI	705 B5	20 м
	740–750 B6	20 м
GNDVI	842 B8	10 м
	560 B3	10 м
MCARI/MTVI2	550 B3	10 м
	670 B4	10 м
	700 B5	20 м
	800 B8	10 м

Індекси	Діапазон нм. Канал Sentinel-2	Просторова роздільна здатність
CARI	865 B8A	20 м
	705 B5	20 м
	665 B4	10 м
LCI	865 B8A	20 м
	705 B5	20 м
	665 B4	10 м

Порівняльний аналіз індексів проведено на основі дослідження їхніх гістограм та ключових статистичних характеристик (мінімум, максимум, середнє значення, медіана, стандартне відхилення) для одних і тих самих ділянок. Для аналізу просторової мінливості індексних значень використано інструмент Elevation Profile View: уздовж заданих лінійних відрізків, прокладених через водні об'єкти, аграрні поля, лісові масиви, луки, населені пункти та лінійну інфраструктуру, побудовано профілі інтенсивності індексів та отримано точкові кількісні значення. Дистанцію профілів уніфіковано в метрах, що забезпечило коректне порівняння різних розрізів.

Для перевірки узгодженості супутникових показників із кліматичними умовами здійснено валідацію на основі даних платформи NASA Giovanni [11] для території України за 2015–2022 рр. (концентрація CO₂ за даними AIRS та температурні характеристики). Статистичне порівняння часових рядів індексів із клімато-атмосферними змінними дало змогу виявити загальні тренди та можливі систематичні відхилення інтерпретації супутникових оцінок.

Тому, обрана комбінація різнотипних об'єктів на дослідному полігоні, інструментарій Sentinel-2, система індексів хлорофілу та комплекс процедур геопросторового й статистичного аналізу забезпечують можливість цілісної оцінки ефективності спектральних індексів для моніторингу стану рослинного покриву та встановлення антропогенних змін ландшафтів, за аналогією до підходу, реалізованого в попередніх роботах з аналізу спектральних індексів на основі Sentinel-2.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Індекси хлорофілу становлять інформативний та практично значущий інструмент для дослідження рослинного покриву на великих територіях. Вони дають змогу детально характеризувати фізіологічний стан рослинності та забезпечують більш коректне зіставлення (зокрема кореляційний аналіз) з іншими спектральними показниками, як-от NDVI, що підвищує точність і надійність інтерпретації результатів. Перевага індексів хлорофілу полягає в їхній більш тісній пов'язаності саме з фотосинтетичною активністю та пігментним комплексом рослин, тоді як узагальнені вегетаційні індекси відображають стан рослинності більш інтегрально.

Крім того, широкє розмаїття наявних індексів хлорофілу дає змогу добирати їх з урахуванням видового складу та морфологічних особливостей місцевої флори. Це створює передумови для диференційованого виділення окремих груп рослин, зокрема хвойних і широколистяних деревостанів, оскільки форма, просторове розміщення та анатомічна будова листків істотно впливають на характер відбиття випромінювання й, відповідно, на значення індексів. Зазначений підхід є особливо корисним для аналітичних досліджень, спрямованих на діагностику стану рослинного покриву, фіксування просторових відмін та оцінювання впливу антропогенних і кліматичних чинників.

У межах цієї роботи було відібрано низку вегетаційних індексів хлорофілу, розрахованих за даними одного з найпоширеніших та доступних джерел супутникової

інформації — Sentinel-2 (див. *табл. 2*), та здійснено оцінку їхньої ефективності для моніторингу різнотипних об'єктів рослинного покриву.

CVI (Chlorophyll Vegetation Index) призначений для оцінювання вмісту хлорофілу за спектральними діапазонами, чутливими до пігментів, зокрема вузькими червоними та NIR-каналами Sentinel-2. Індекс вирізняється підвищеною чутливістю на ранніх і середніх етапах вегетації, проте його стабільність знижується за значних варіацій освітлення та атмосферних умов [12].

GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) — є модифікацією NDVI із заміною червоного каналу на зелений. Це підвищує чутливість до вмісту хлорофілу в листках, особливо на початкових стадіях розвитку рослин, коли зміни у фізіологічному стані ще слабо відображаються в традиційних вегетаційних індексах [12].

Індекс CARI (Chlorophyll Absorption Ratio Index) оцінює інтенсивність поглинання хлорофілу в червоній ділянці спектра та точніше реагує на зміну його вмісту, а не лише на щільність пологую чи LAI. Водночас індекс є чутливим до шуму у вузьких спектральних смугах і потребує ретельної калібровки [13].

LCI (Leaf Chlorophyll Index) використовує спектральні ділянки Red Edge («червоного краю») для оцінки хлорофілу в листках. Попри орієнтацію на високоспектральні дані, добре адаптується до Sentinel-2 завдяки наявності вузькосмугових каналів. Демонструє менше насичення на ділянках густої рослинності та кращу чутливість до змін хлорофілу порівняно з NDVI [12].

MCARI спрямований на зменшення впливу тіней, яскравості та структурних особливостей пологую. Як модифікація CARI, він є більш чутливим до концентрації хлорофілу, зокрема за середньої щільності рослинного покриву, та краще відокремлює вплив ґрунтового фону й структури пологую, залишаючись водночас чутливим до спектральних шумів [13].

MTVI2 (Modified Triangular Vegetation Index 2) — нормалізує вплив структури рослинного покриву, враховуючи неліній-

ність спектральної відповіді за високої біомаси. Показує менше насичення за високих значень LAI та ефективніше працює на різних ґрунтових фонах, відображаючи структурно-біомасні характеристики рослинності [13].

MCARI/MTVI2 — поєднує властивості двох індексів, зменшуючи вплив ґрунтового фону та освітлення. Однак на основі доступних даних і літературних джерел він продемонстрував найгіршу ефективність, яка обмежена просторовою роздільністю Sentinel-2, тому він придатний лише для невеликих територій із використанням високороздільних даних [13].

Для цілісної оцінки можливостей спектральних індексів хлорофілу в межах дослідного полігону виділено тестові ділянки з різнотипними об'єктами: лісовими масивами, сільськогосподарськими угіддями, водоймами та урбанізованими територіями (*рис. 1*).

Під час виконання досліджень були отримані растри вище наведених індексів за супутниковими даними Sentinel-2 (02.06.2018 та 08.06.2025). Для візуального порівняння поведінки спектральних індексів на різних типах поверхні було розглянуто NDVI та CARI (*рис. 2*). Візуальне зіставлення індексів NDVI та CARI на одній і тій самій території допомогло оцінити їхню диференційну чутливість до типів підстильної поверхні. В обох випадках добре окреслюються її основні типи: русло річки й прибережна смуга, мозаїка сільськогосподарських угідь, лісові масиви та урбанізовані території. Втім виявлено істотні відмінності в контрастності та чутливості до різних типів покриву.

Водні об'єкти NDVI визначає як ділянки з найнижчими значеннями (світло-зелені відтінки). CARI характеризується вищою контрастністю між водою та прибережною рослинністю, що забезпечує чіткіше окреслення меж водойм.

Лісові масиви на NDVI відображаються насиченими темно-зеленими тонами. CARI показує аналогічну інтенсивність, проте виявляє більшу диференціацію всередині деревостанів, що вказує на різницю

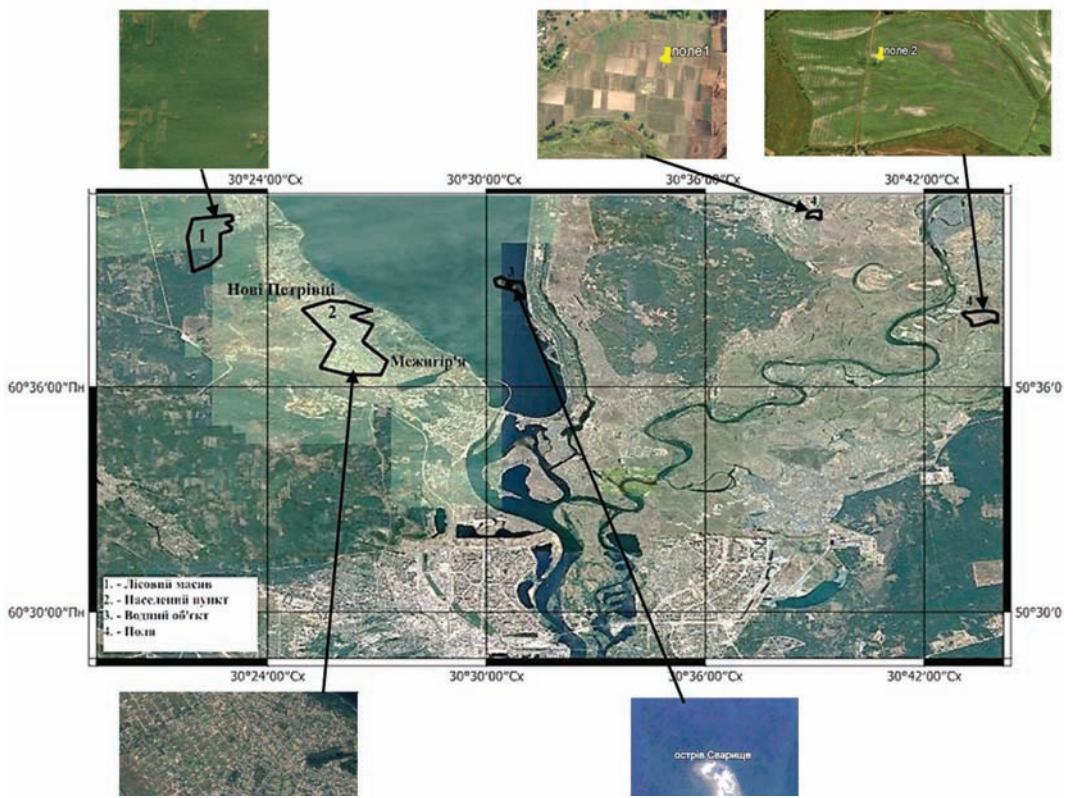


Рис. 1. Дослідний полігон з тестовими ділянками

Примітка: створено авторами з використанням супутникових зображень Google Maps.

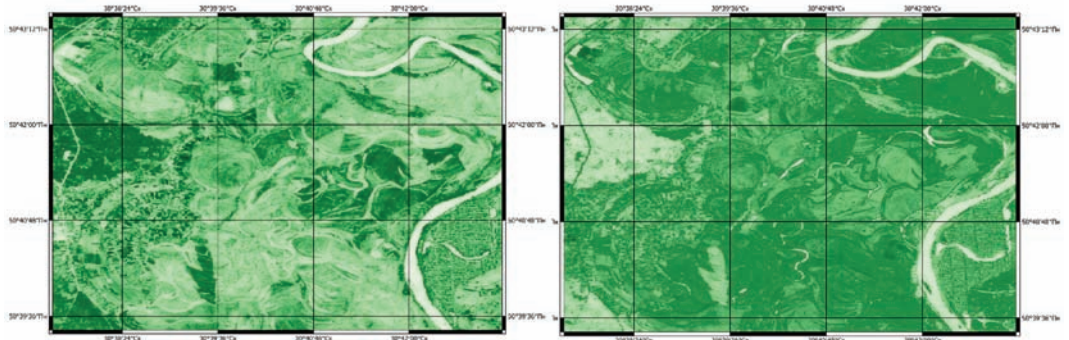


Рис. 2. Растри індексів NDVI та CARI за даними Sentinel-2 08.06.2025 р.

Примітка: створено авторами.

в концентрації хлорофілу між окремими фітоценозами.

Сільськогосподарські поля NDVI представляє помірними значеннями (середньо-зелені відтінки). CARI демонструє вищу варіабельність, що дає змогу краще розрізняти окремі поля з різним станом посівів, із виразнішою текстурою та чіткішими межами між ділянками.

Антропогенні об'єкти, як-от дороги, проєкти та забудовані ділянки проявляються на обох зображеннях як світлі лінії та плями. CARI визначає ці об'єкти з вищою чіткістю, особливо дрібні елементи інфраструктури, що пов'язано з меншою чутливістю до фонового відбиття ґрунту.

Отже можна зробити висновок, що NDVI забезпечує згладжене відображення рослинного покриву, ефективно для загального картування вегетації, тоді як CARI фіксує підвищену чутливість до варіацій вмісту хлорофілу, вищу просторову мінливість значень та кращу диференціацію окремих типів рослинності, що підтверджує його перспективність для детального моніторингу стану фітоценозів та встановлення локальних змін.

Детальне вивчення ефективності індексів здійснюється шляхом їх статистичного аналізу. Об'єднана гістограма (рис. 3)

демонструє частотний розподіл за 2018 і 2025 рр. значень п'яти спектральних індексів CVI, GNDVI, LCI, NDVI та MTVI2, що використовуються для оцінки стану рослинного покриву. Для більшості показників (NDVI, GNDVI, LCI, CVI) основна маса значень зосереджена в діапазоні низьких і середньопозитивних інтервалів, що відповідає домінуванню територій із помірною розвиненістю рослинного покриву. Порівняльний аналіз частотних розподілів індексів між 2018 та 2025 рр. виявив тенденцію до зменшення значень у бік вищих інтервалів, що може свідчити про загальне підвищення вегетаційної активності та вмісту хлорофілу в рослинному покриві. Найбільш виразні зміни спостерігаються у зменшенні піків низьких значень: якщо у 2018 р. для більшості індексів фіксувалися високі частоти в діапазоні 0,1–0,2 (особливо для CVI з піком ~80), то у 2025 р. розподіл стає більш рівномірним із підвищенням частки середніх та високих значень. Така динаміка вказує на зменшення площ із низькою вегетаційною активністю та зростання просторової неоднорідності рослинного покриву, що може бути зумовлено як фенологічними чинниками (різні дати зйомки, фази вегетації), так і реальними змінами в структурі

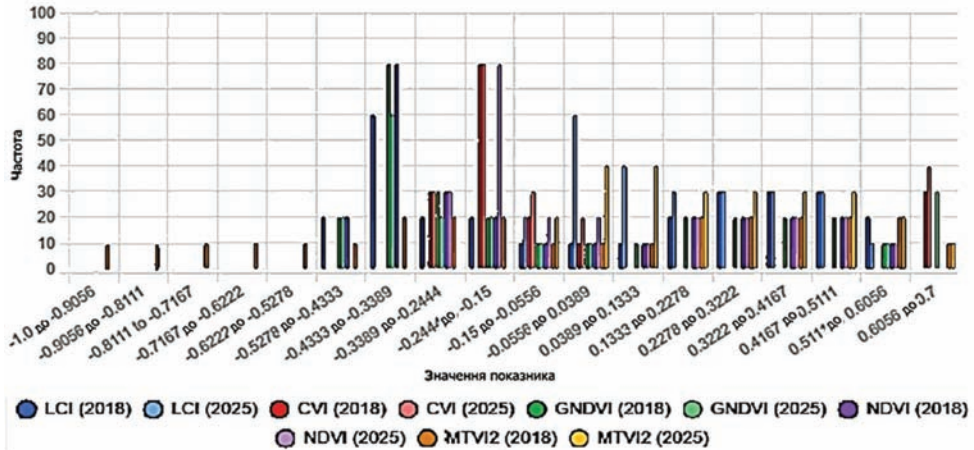


Рис. 3. Гістограма спектральних індексів CVI, GNDVI, LCI, NDVI та MTVI2 за 2018 та 2025 рр., для дослідного полігона

Примітка: побудовано авторами за супутниковими знімками Sentinel-2 (2.06.2018 та 8.06.2025).

турі землекористування чи кліматичними умовами вегетаційних періодів. MTVI2 у 2025 р. показує збільшення частки позитивних значень, що підтверджує зростання показників просторової структури й біомаси пологу. Виявлені зміни засвідчують позитивну динаміку стану рослинності з одночасним посиленням контрастів між різними типами фітоценозів та категоріями землекористування.

Така динаміка підтверджує доцільність використання хлорофільних індексів для деталізації змін, які не завжди фіксуються традиційними вегетаційними показниками.

Більш детальний аналіз для визначення впливу кліматичних умов певних років на сільськогосподарські угіддя за спектральними індексами було здійснено порівнянням їх гістограм для двох тестових полів (рис. 4; 5). Порівняльний аналіз частотних розподілів NDVI, GNDVI та LCI для першого поля в 2018 і 2025 рр. продемонстрував

загальну тенденцію до зміщення значень у бік вищих інтервалів, що вказує на покращання вегетаційних умов (див. рис. 4). У 2018 р. NDVI мав максимум переважно в зоні 0,15–0,25 з довгою «хвильою» до 0,7–0,8, що характеризувало значну частку площ із низькими й помірними значеннями індексу. В 2025 р. його розподіл змістився вправо (максимум 0,55–0,65) за практичної відсутності низьких значень, що свідчить про формування суцільного й добре розвинутого рослинного покриву. Крім того, розподіл LCI в обидва роки залишається відносно стабільним (0,5–0,7), тоді як GNDVI зміщується від максимуму близько 0,9 у 2018 р. до 1,7–1,9 у 2025 р., що відображає істотне нарощування зеленої біомаси.

Для другого поля в 2018 р. гістограми розподілу вегетаційних індексів демонструють майже повний збіг кривих NDVI та LCI з максимумом у діапазоні 0,33–0,36, що пояснює про відносно однорідний стан посівів із переважанням середньовисоких

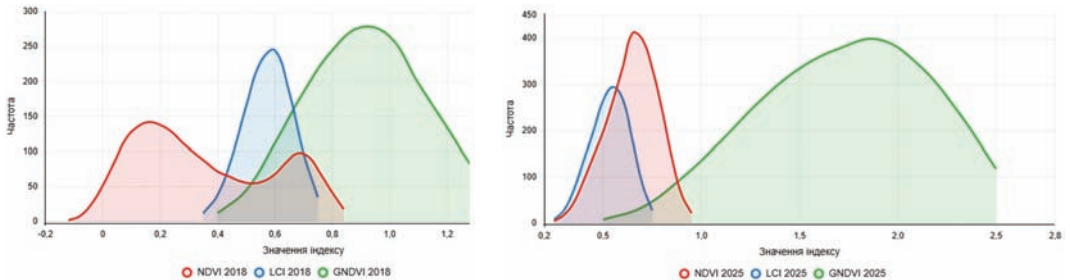


Рис. 4. Гістограма індексів NDVI, LCI, GNDVI (тестова ділянка — поле 1)

Примітка: побудовано авторами.

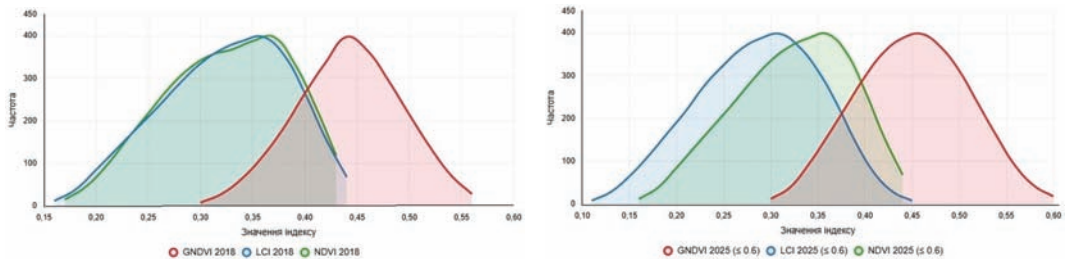


Рис. 5. Гістограма індексів NDVI, LCI, GNDVI (тестова ділянка — поле 2)

Примітка: побудовано авторами.

значень індексів (див. *рис. 5*). Розподіл GNDVI 2018 зміщений у бік вищих значень (пік близько 0,44–0,46; діапазон 0,35–0,55), відображаючи добре розвинену листову поверхню рослинності. В 2025 р. форма розподілу GNDVI загалом зберігається з максимумом у тому самому інтервалі, проте розподіл LCI істотно зміщується вліво (пік 0,28–0,31, розширення до 0,12–0,40) з появою значної частки низьких значень.

Загалом, перше поле демонструє більш виражене покращання спектральних характеристик у 2025 р., тоді як зниження пікових значень LCI на другому полі може свідчити про зменшення пігментної насиченості або більшу неоднорідність покриву. Така динаміка підтверджує доцільність застосування кількох індексів для комплексної оцінки стану рослинності, враховуючи як хлорофільні, так і структурно-біомасні аспекти. Тому, якщо для першого поля простежується тенденція до деградації частини площ, то для другого поля спостерігається покращання загального стану посівів та підвищення їх продуктивного потенціалу. Аналіз статистичних характеристик гісто-

грам індексів для кожної тестової ділянки з різнотипними об'єктами (лісовими масивами, сільськогосподарськими угіддями, водоймами та урбанізованими територіями) сприяє визначенню інформативності цих індексів щодо кожного класу цих об'єктів та особливостей їх застосування. Для цього для кожної тестової ділянки (див. *рис. 1*) було сформовано таблиці статистичних характеристик для вищезгаданих спектральних індексів (*табл. 4–7*) і проаналізовано їх зміни у 2025 р. порівняно з 2018 р.

Для тестової ділянки «поле 1» для більшості індексів (CARI, MCARI, MCARI/MTVI2, NDVI, MTVI2, GNDVI, частково LCI) спостерігається збільшення середніх і медіанних значень у 2025 р. порівняно з 2018 р. (див. *табл. 4*), що свідчить про кращий розвиток рослинності та підвищення продуктивного потенціалу поля. Одночасно для багатьох показників (особливо GNDVI, CIVI, MCARI, MCARI/MTVI2, NDVI) зростають стандартні відхилення й коефіцієнти варіації, тобто можна припустити, що просторова структура покриву стає більш мозаїчною.

Таблиця 4. Основні статистичні параметри вегетаційних індексів у 2018 та 2025 рр. (об'єкт – поле 1)

Індекс	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
CARI 2018	1795,406	8698,252	4501,733	4491,230	1051,812	0,234
CARI 2025	1926,773	9662,924	4692,122	4689,466	1188,911	0,253
CVI 2018	1,260	53,530	9,317	8,108	4,995	0,536
CVI 2025	1,933	41,094	8,975	6,851	5,968	0,665
GNDVI 2018	0,317	0,741	0,519	0,517	0,071	0,137
GNDVI 2025	0,459	4,488	1,294	1,061	0,674	0,521
LCI 2018	0,226	0,721	0,463	0,458	0,080	0,172
LCI 2025	0,248	0,689	0,471	0,456	0,083	0,176
MCARI 2018	-39,593	12892,427	3717,804	3464,903	1768,621	0,476
MCARI 2025	-214,222	11987,504	4326,158	3845,016	2293,870	0,530
MCARI/MTVI2 2018	-154,757	14495,353	5894,731	5751,160	1781,235	0,302
MCARI/MTVI2 2025	-831,195	14365,483	6723,522	6360,037	2293,576	0,341
MTVI2 2018	0,209	0,895	0,603	0,607	0,121	0,201
MTVI2 2025	0,258	0,872	0,607	0,603	0,130	0,215
NDVI 2018	0,225	0,852	0,518	0,512	0,109	0,211
NDVI 2025	0,263	0,827	0,529	0,513	0,119	0,225

Таблиця 5. Основні статистичні параметри вегетаційних індексів у 2018 і 2025 рр. (об'єкт – лісовий масив)

Індекс	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
CARI 2018	943,485	8539,167	2040,780	1903,003	622,321	0,305
CARI 2025	721,270	6398,052	1963,743	1905,689	443,919	0,226
CVI 2018	2,780	85,926	23,144	22,118	7,006	0,303
CVI 2025	3,934	32,842	15,427	15,330	2,721	0,176
GNDVI 2018	0,340	0,677	0,605	0,611	0,032	0,053
GNDVI 2025	0,702	3,996	2,138	2,111	0,384	0,179
LCI 2018	0,178	0,651	0,571	0,580	0,044	0,077
LCI 2025	0,347	0,689	0,585	0,586	0,034	0,059
MCARI 2018	-884,294	7046,561	3037,455	3051,938	645,946	0,213
MCARI 2025	410,004	11535,280	4507,283	4433,982	1059,203	0,235
MCARI MTVI2 2018	-3004,313	12260,969	4142,208	4117,984	796,504	0,192
MCARI MTVI2 2025	975,478	13799,732	5739,581	5667,454	1127,508	0,196
MTVI2 2018	0,172	0,845	0,730	0,745	0,064	0,087
MTVI2 2025	0,407	0,892	0,780	0,784	0,046	0,059
NDVI 2018	0,221	0,745	0,643	0,656	0,056	0,087
NDVI 2025	0,381	0,812	0,689	0,692	0,044	0,065

Таблиця 6. Основні статистичні параметри вегетаційних індексів у 2018 і 2025 рр. (об'єкт – населений пункт)

Індекс	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
CARI 2018	12,782	65535,000	6425,246	5945,186	2576,060	0,401
CARI 2025	22,454	37835,867	6779,178	6397,877	2625,583	0,387
CVI 2018	-0,365	98,373	10,919	8,082	10,114	0,926
CVI 2025	-0,272	71,837	4,022	2,929	3,782	0,940
GNDVI 2018	-0,374	0,749	0,367	0,383	0,107	0,292
GNDVI 2025	-0,473	5,535	0,709	0,605	0,450	0,634
LCI 2018	-0,485	0,676	0,292	0,305	0,104	0,357
LCI 2025	-0,619	0,710	0,340	0,345	0,122	0,358
MCARI 2018	-8885,128	823213,440	2164,291	2010,423	5345,303	2,470
MCARI 2025	-7363,104	40442,180	2711,007	2310,794	2400,121	0,885
MTVI2 2018	-0,822	0,991	0,373	0,387	0,166	0,446
MTVI2 2025	-0,661	0,915	0,422	0,427	0,189	0,448
NDVI 2018	-0,270	0,825	0,321	0,327	0,122	0,379
NDVI 2025	-0,260	0,853	0,363	0,354	0,149	0,411

Загалом, можна зробити висновок, що у 2025 р. поле характеризується інтенсивнішою та більш розвинутою вегетацією, але з помітною внутрішньою неоднорідністю, яка відображає різні умови живлення,

зволоження або агротехніки на окремих ділянках.

Для лісового масиву (див. *табл. 5*) можна дійти висновку, що між 2018 і 2025 рр. переважає тенденція до зміцнення й част-

Таблиця 7. Основні статистичні параметри вегетаційних індексів у 2018 і 2025 рр. (об'єкт – водний об'єкт)

Індекс	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
CARI 2018	40,340	24673,600	1980,768	1563,417	2127,163	1,074
CARI 2025	25,324	8684,725	1107,141	808,011	831,229	0,751
CVI 2018	-0,486	35,341	-0,005	-0,083	1,156	-236,358
CVI 2025	-0,301	0,147	-0,091	-0,107	0,054	-0,590
GNDVI 2018	-0,372	0,427	-0,206	-0,236	0,112	-0,542
GNDVI 2025	-0,525	-0,012	-0,305	-0,311	0,137	-0,448
LCI 2018	-0,631	0,296	-0,281	-0,296	0,118	-0,420
LCI 2025	-0,661	0,253	0,025	0,060	0,146	5,881
MCARI 2018	-2199,366	9853,522	441,202	95,727	917,131	2,079
MCARI 2025	-969,778	4381,512	1411,769	1355,709	392,850	0,278
MCARI/MTVI2 2018	-637357,900	329549,100	-492,603	-142,002	18958,447	-38,486
MCARI/MTVI2 2025	-1328010,900	4179870,500	4530,295	5290,429	128254,340	28,310
MTVI2 2018	-1,986	0,321	-0,708	-0,650	0,419	-0,591
MTVI2 2025	-1,605	0,562	-0,006	0,087	0,309	-51,817
NDVI 2018	-0,431	0,302	-0,238	-0,252	0,105	-0,442
NDVI 2025	-0,510	0,090	-0,190	-0,170	0,151	-0,796

кового вирівнювання стану деревної рослинності, із деяким посиленням зеленої біомаси. Вищі значеннями NDVI, MTVI2 та більшістю хлорофіл-чутливих індексів вказують на посилення продуктивності та «озеленення» деревного покриву порівняно з 2018 р. Для CARI, CVI, LCI, NDVI та MTVI2 відзначається зменшення дисперсії й варіації, тобто структура лісового пологую стає більш однорідною, без різко виділених ослаблених зон. Окрім того, для індексів GNDVI, MCARI і MCARI/MTVI2 спостерігається зростання як середніх значень, так і частково варіації, що може вказувати на формування ділянок із надзвичайно високою зеленою біомасою й активністю хлорофілу (наприклад, більш вологі фрагменти масиву).

Отже, за сукупністю індексів, у 2025 р. лісовий масив загалом виглядає більш здоровим, зеленим і структурно вирівняним, із локальними зонами ще інтенсивнішого розвитку деревної рослинності.

Для населеного пункту розподіл індексів істотно відрізняється від поля чи лісу й добре відображає мозаїку забудови, грун-

тів, окремих зелених ділянок та техногенних поверхонь (див. *табл. 6*). За більшістю індексів (CARI, MCARI, MCARI/MTVI2, LCI, NDVI, MTVI2, GNDVI) у 2025 р. зростають середні та медіанні значення, що свідчить про посилення вегетаційного сигналу в межах населеного пункту – збільшення площі та/або інтенсивності зелених насаджень.

Показники варіації залишаються високими, а для частини індексів (NDVI, GNDVI) ще й зростають, тобто урбанізоване середовище залишається дуже мозаїчним, із різкими переходами між забудованими, відкритими та озеленими територіями. Сильне зниження середніх значень CVI на фоні зростання інших індексів підкреслює, що різні вегетаційні показники реагують на міський ландшафт по-різному; за інтерпретації треба враховувати наявність дахів, асфальту, тіней та інших урбаністичних ефектів.

Тому за комплексом індексів можна зробити висновок, що в 2025 р. населеному пункту властивий більш виражений і локально інтенсивний рослинний покрив,

але з дуже високою просторовою неоднорідністю, характерною для міських агломерацій.

Для водної поверхні індекси поведуться інакше, ніж на суходолі: переважають негативні або близькі до нуля значення, що відображає поглинання випромінювання водою та відсутність розвинутої наземної рослинності (див. *табл. 7*). В обидва роки вода характеризується негативними NDVI та GNDVI, тобто відсутністю наземного рослинного покриву. Істотні зміни в LCI та MTVI2 (перехід від стабільно негативних до значень навколо нуля або слабо позитивних) разом із зростанням дисперсії підтверджують, що оптичні властивості водної поверхні стали істотно більш неоднорідними – ймовірно, через поєднання мілководних ділянок, домішок. Хлорофіл-чутливі індекси (CARI, MCARI) у 2025 р. показують загалом нижчий контраст, але більш стабільний сигнал, що свідчить про певне вирівнювання умов у межах водного об'єкта.

Отже, за комплексом індексів, водна поверхня в обох роках чітко відрізняється від суходолу, але в 2025 р. вона виглядає менш оптично однорідною, із більш вираженими змінами прозорості, глибини та/або вмісту домішок і прибережної рослинності. Для водних об'єктів усі розглянуті вегетаційні

індекси виконують радше функцію спектральної маски, ніж інструмента оцінки рослинності.

Тому, ефективність використання вегетаційних індексів виявилася істотно залежною від типу об'єкта – орних полів, лісових масивів, урбанізованих територій та водної поверхні. Узагальнюючи результати, можна підкреслити, що NDVI, GNDVI, LCI та MTVI2 є найбільш універсальними індексами для порівняння різних типів рослинного покриву. Водночас CARI, CIVI, MCARI та MCARI/MTVI2 є більш чутливими до пігментного складу та біомаси, що робить їх особливо корисними для аналізу полів і лісів, але менш ефективними в урбанізованих чи водних умовах. Поєднання цих індексів дає можливість комплексно оцінити стан рослинності, її продуктивність і неоднорідність, а також чітко відокремити суходіл від водних територій.

Виявлені зміни у частотних розподілах індексів між 2018 та 2025 рр. можуть бути пов'язані із кліматичними змінами, які спостерігаються на території України за останнє десятиліття. Аналіз супутникових даних NASA за 2015–2022 рр. засвідчив стійку тенденцію до зростання концентрації CO₂ в атмосфері (*рис. 6*) та температури повітря над територією України (*рис. 7*), що узгоджується з сучасними уявленнями

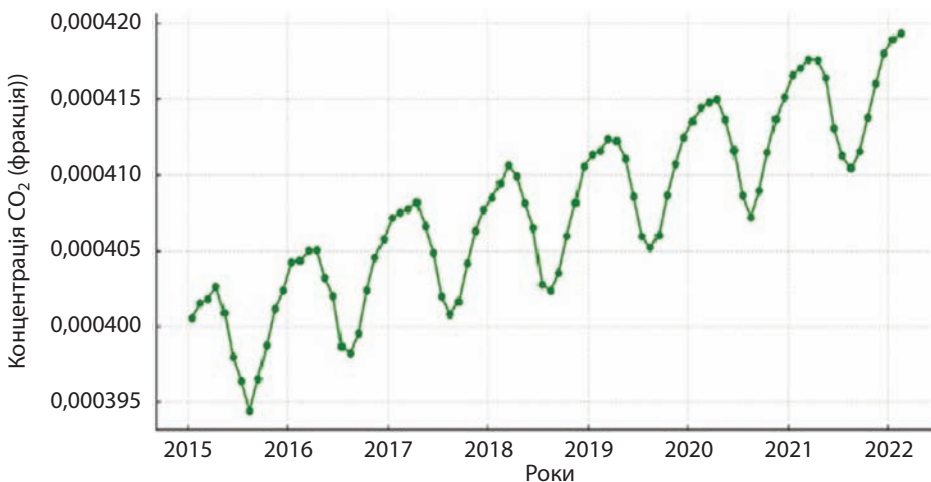


Рис. 6. Графік динаміки рівня вуглекислого газу за період від 2015 до 2022 рр.

Примітка: розроблено авторами згідно [11].

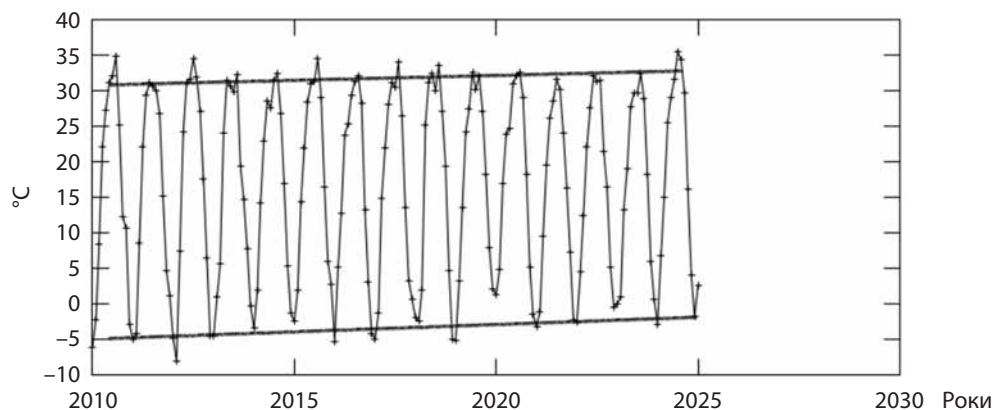


Рис. 7. Графік динаміки температури за період від 2015 до 2022 рр.

Примітка: розроблено авторами згідно [11].

про регіональні прояви глобальних кліматичних змін.

Це, своєю чергою, відображається на життєвому циклі рослинності та зумовлює підвищення вмісту хлорофілу й подовження вегетаційного періоду, що простежується порівняно індексних зображень за 2018 та 2025 рр. (див. *рис. 3*).

Для більш детального аналізу просторової мінливості значень індексів застосовано інструмент Elevation Profile програмного забезпечення QGIS, який дає змогу візуалізувати зміни стану рослинного покриву уздовж заданих профілів через різні типи підстильної поверхні (*рис. 8*).

Графіки профіля NDVI (див. *рис. 8*) загалом повторюють один одного, що підтверджує стабільність основних типів землеко-

ристування вздовж профілю. Максимальні значення NDVI (0,6–0,75) на початку та в другій половині профілю відповідають ділянкам із густою рослинністю (лісові масиви, добре розвинені посіви). Відмінності між роками переважно незначні: у низці сегментів 2025 р. спостерігаються трохи вищі піки NDVI, але в зонах низької вегетації криві практично збігаються. Це свідчить про відносну стабільність загальної біомаси та щільності рослинного покриву.

За профілями індексу MCARI (*рис. 9*) простежується подібний загальний хід кривих у 2018 та 2025 рр., що відображає сталість просторової структури ландшафту вздовж профілю (чергування аграрних угідь, лісових масивів, відкритого ґрунту, водних або урбанізованих ділянок). Вод-

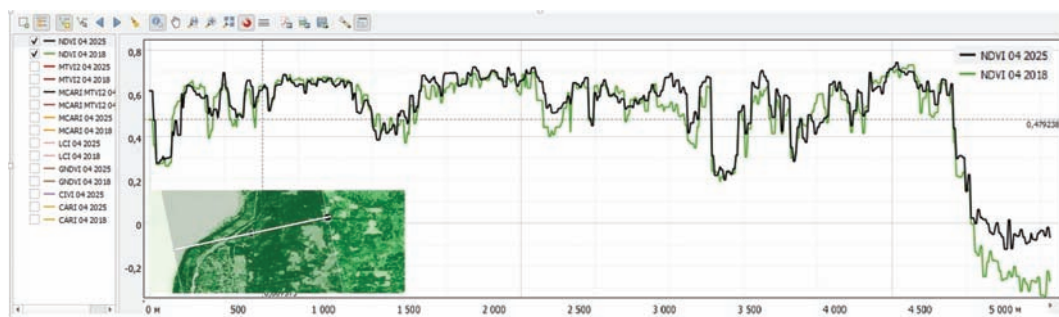


Рис. 8. Профіль NDVI, побудований авторами з використанням інструменту Elevation Profile QGIS

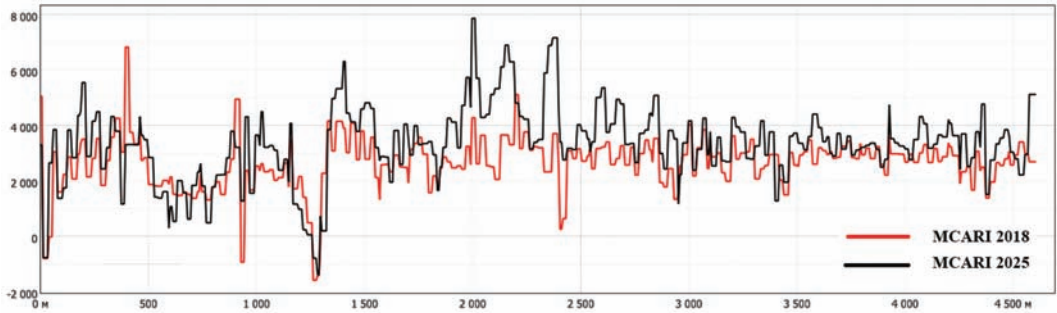


Рис. 9. Профіль MCARI, побудований авторами з використанням інструменту Elevation Profile QGIS

ночас майже на всій довжині профілю значення MCARI у 2025 р. (чорна крива) є вищими за показники 2018 р. Це пояснює підвищення вмісту хлорофілу та/або зміни структури пологу (згущення, збільшення частки деревної рослинності) за незмінної конфігурації підстильної поверхні. Підвищення MCARI у 2025 р. за відносно стабільних значень NDVI може інтерпретуватися як покращання фізіологічного стану рослинності (зростання вмісту хлорофілу, зміна видового складу чи вікової структури насаджень) без істотної зміни загальної площі й щільності рослинного покриву. Це підтверджує доцільність використання чутливих до хлорофілу індексів для деталізації змін, які не завжди виявляються за допомогою традиційних вегетаційних індексів.

Отже, застосування інструменту Elevation Profile забезпечує отримання точних кількісних значень індексів у конкретних точках, що підвищує достовірність інтерпретації результатів. Однак слід зазначити обмеження методу: оцінка здійснюється лише вздовж вибраних профільних ліній, а не для всієї площі дослідження, що потребує ретельного відбору репрезентативних відрізків.

Отримані результати узгоджуються із сучасними тенденціями використання спектральних індексів хлорофілу для моніторингу рослинності та оцінки стану сільськогосподарських культур. Дослідження Nadjla et al. (2022) продемонструвало

ефективність застосування індексів RECI (Red-Edge Chlorophyll Vegetation Index) та GCI (Green Chlorophyll Vegetation Index) для аналізу багаторічних змін сільськогосподарських угідь на плато Мостаганем в Алжирі, встановивши, що індекс GCI виявився більш ефективним для автоматичного виділення сільськогосподарських площ і чіткішої диференціації рослинних формацій порівняно з індексом RECI. Це підтверджує наші висновки про вищу ефективність хлорофіл-специфічних індексів для деталізації стану агроценозів [14].

Thinley et al. (2024) порівнювали п'ять вегетаційних індексів та три хлорофіл-специфічні індекси на основі супутникових знімків Sentinel-2 для моделювання надземної біомаси міського дендропарку в субтропічному Квінсленді, Австралія [15]. Дослідження показало, що модифікований індекс коригованої вегетації (MSAVI) та модифікований індекс поглинання хлорофілу (MCARI) найкраще прогнозували надземну біомасу, що узгоджується з нашими результатами щодо високої інформативності MCARI для оцінки стану як лісових, так і міських насаджень.

Zhang et al. (2025) представили глобальний продукт вмісту хлорофілу в листках (LCC) з роздільною здатністю 10 м, використовуючи індекс чутливості до хлорофілу (CSI) та платформу Google Earth Engine. Висока роздільна здатність продукту дає змогу фіксувати детальніший просторовий розподіл і розумні часові про-

філі, що робить його придатним для точного землеробства та моніторингу лісових насаджень, підтверджуючи перспективність використання даних Sentinel-2 для регіонального моніторингу [16].

Vekturov et al. (2024) застосували індекс хлорофілу (CI) для визначення дефіциту поживних речовин у сільськогосподарських культурах Чуйської обл. Киргизстану методами дистанційного зондування, встановивши, що використання хлорофільних індексів є найбільш ефективним для раннього виявлення дефіциту поживних речовин. Це вводить нашу гіпотезу про можливість використання індексів LCI та CARI для диференційованої оцінки фізіологічного стану посівів на окремих полях [17].

Zhang et al. (2022) запропонували новий червоно-крайовий спектральний індекс CSI для визначення вмісту хлорофілу в листках, який демонструє стійкість до варіацій структури крони та фону ґрунту [18].

Amorim et al. (2024) проаналізували тренди та варіабельність поверхневого хлорофілу в Німецькій бухті (Північне море) за період 1998–2020 рр., використовуючи дані дистанційного зондування Copernicus GlobColour, що засвідчує універсальність підходів на основі хлорофільних індексів для моніторингу як наземних, так і водних екосистем [19].

Тому, сучасні дослідження підтверджують високу ефективність хлорофіл-специфічних індексів для моніторингу стану рослинності, оцінки біомаси та виявлення екологічних змін у різних екосистемах, що узгоджується з результатами даного дослідження та пояснює доцільність їх застосування для регіонального моніторингу та точного землеробства.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження зафіксовано, що спеціалізовані індекси хлорофілу (CVI, GNDVI, LCI, CARI, MCARI, MTVI2) становлять ефективний інструмент для диференціації кліматичних та антропогенних змін рослинного покриву, забезпечуючи вищу чутливість до фізіо-

логічного стану рослинності порівняно з традиційним індексом NDVI.

Встановлено диференційовану ефективність індексів залежно від типу об'єктів дослідження. NDVI, GNDVI, LCI та MTVI2 виявилися найбільш універсальними для порівняння різних типів рослинного покриву. CARI продемонстрував підвищену чутливість до варіацій вмісту хлорофілу та забезпечив кращу диференціацію окремих типів рослинності, визначаючи більшу просторову неоднорідність всередині лісових масивів та сільськогосподарських угідь. MCARI був особливо інформативним для визначення тонких фізіологічних змін, які не фіксуються традиційними вегетаційними індексами.

Профільний аналіз із використанням інструменту Elevation Profile View підтвердив, що підвищення значень MCARI у 2025 р. за відносної стабільності NDVI свідчить про покращання фізіологічного стану рослинності без істотної зміни загальної біомаси та щільності покриву. Це підтверджує, що індекси хлорофілу здатні виявляти зміни, зумовлені природними кліматичними чинниками (подовження вегетації, підвищення фотосинтетичної активності), тоді як різкі локальні перепади значень на коротких відстанях є індикаторами антропогенного впливу (вирубки, зміна землекористування, створення насаджень).

Результати дослідження узгоджуються із сучасними науковими публікаціями щодо ефективності хлорофіл-специфічних індексів для моніторингу рослинності, оцінки біомаси та фіксування екологічних змін у різних екосистемах. Комплексне використання індексів CVI, GNDVI, LCI, CARI та MCARI в поєднанні з аналізом супутникових даних щодо концентрації CO₂ та температури забезпечує надійну методику диференціації природних кліматичних та антропогенних чинників змін рослинного покриву на великих територіях.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці адаптованих моделей індексів хлорофілу для специфічних типів рослинності з урахуванням морфологічних

особливостей листкових пластинок різних таксономічних груп, що дасть можливість підвищити точність селективної ідентифікації окремих фітоценозів. Доцільним є також залучення супутникових даних із

вищою просторовою роздільністю та проведення додаткових наземних досліджень фізіологічних властивостей листків для валідації дистанційних оцінок вмісту хлорофілу на регіональному рівні.

ЛІТЕРАТУРА

- IPCC. (2023). Sections. In H. Lee & J. Romero (Eds.), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35–115). IPCC. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Ковирьова, О. В. (2019). Патент України 1563950. УкрНОІВІ. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1563950/>.
- Рябчун, Н. І. (2009). Патент України 266337. УкрНОІВІ. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/266337/>.
- Шерер, В. О. (2007). Патент України 307602. УкрНОІВІ. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/307602/>.
- Yi, L., Sun, Y., Ouyang, X., & Yin, S. (2022). Identifying the impacts of climate change and human activities on vegetation cover changes: A case study of the Yangtze River Basin, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), Article 6239. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19106239>.
- Savastru, D. M., Zoran, M. A., & Savastru, R. S. (2019). Geospatial information for assessment of climate change impact on forest phenology. *Proceedings of SPIE*, 11174, Article 1117402. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2532257>.
- Copernicus Data Space Ecosystem. (n.d.). *Sentinel-2*. URL: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>.
- QGIS Development Team. (n.d.). QGIS Geographic Information System (Ver. 3.34) [Computer software]. Open Source Geospatial Foundation.
- Index DataBase. (n.d.). *A database for remote sensing indices*. URL: <https://www.indexdatabase.de/db/i.php>
- Sentinel Hub. (n.d.). *Sentinel-2 RS indices*. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/indexdb/>.
- NASA GES DISC. (n.d.). *Giovanni — Interactive online visualization and analysis*. URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
- Li, X., Zhu, B., Li, S., Liu, L., Song, K., & Liu, J. (2025). A comprehensive review of crop chlorophyll mapping using remote sensing approaches: Achievements, limitations, and future perspectives. *Sensors*, 25(8), 2345. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25082345>.
- Janse, P. V., Deshmukh, R. R., Kayte, J. N., & Randive, P. U. (2019). Estimation of crop chlorophyll content by spectral indices using hyperspectral non-imaging data. In K. Santosh & R. Hegadi (Eds.), *Recent trends in image processing and pattern recognition (RTIP2R 2018) (Communications in Computer and Information Science, Vol. 1037)*. Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-9187-3_32.
- Nadjla, B., Assia, S., & Ahmed, Z. (2022). Contribution of spectral indices of chlorophyll (RECI and GCI) in the analysis of multi-temporal mutations of cultivated land in the Mostaganem plateau. In *2022 7th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA)* (pp. 1–6). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISPA54004.2022.9786326>.
- Thinley, J., Pickering, C., & Ndehedehe, C. (2024). Using vegetation and chlorophyll indices to model above-ground biomass over time in an urban arboretum in subtropical Queensland. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 34, Article 101202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101202>.
- Zhang, H., Li, J., Gu, C., Guan, L., Wang, X., Mumtaz, F., ... Yu, W. (2025). The 10 m-resolution global leaf chlorophyll content product using Sentinel-2 based on chlorophyll sensitive index CSI [Preprint]. *Earth System Science Data Discussions*. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-2025-42>.
- Bekturov, M., Zhumabekova, A., & Konurbayeva, G. (2024). Application of chlorophyll index to detect nutrient deficiency in agricultural plants by remote sensing. *Bulletin of the Kyrgyz National Agrarian University*, 22(5), 17–24.
- Zhang, H., Li, J., Liu, Q., Lin, S., Huete, A., Liu, L., ... Yu, W. (2022). A novel red-edge spectral index for retrieving the leaf chlorophyll content. *Methods in Ecology and Evolution*, 13, 2771–2787. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13994>.
- Amorim, F. D., Balkoni, A., Sidorenko, V., & Wiltshire, K. H. (2024). Analyses of sea surface chlorophyll a trends and variability from 1998 to 2020 in the German Bight (North Sea). *Ocean Science*, 20, 1247–1265. DOI: <https://doi.org/10.5194/os-20-1247-2024>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 04.11.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.12.2025
 Дата публікації: 27.02.2026