

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МОДИФІКОВАНОГО ІНДЕКСУ EVI-S У СИСТЕМІ МОНІТОРИНГУ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ

Д.П. Васильєв, Т.В. Ільєнко

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: freimaster.af@gmail.com; ORCID: 0009-0005-0578-3539
e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5406-5449

Дослідження присвячено вивченню ефективності спектральних вегетаційних індексів, що найчастіше використовуються у методах дистанційного зондування Землі, зокрема NDVI, EVI, EVI2, SAVI та запропоновано модифікований індекс EVI-S (EVI-SAVI Hybrid). Метою роботи був аналіз їх можливостей щодо точності оцінки стану та щільності рослинного покриву, чутливості індексів до ґрунту й густоти рослинності. Також запропоновано й випробувано новий модифікований індекс EVI-S, який є модифікацією EVI та SAVI, на різних типах ландшафтів. Об'єктом дослідження стала Феодосіївська громада Київської обл., що поєднує природні лісові екосистеми, водойми, сільськогосподарські угіддя та урбанізовані зони. Для отримання даних використано супутникові знімки Sentinel-2 (L2A) з атмосферою корекцією за літній період із нульовою хмарністю. Попередня обробка передбачала геометричну корекцію, обрізку зображень та перетворення їх до єдиної проєкції. Подальший розрахунок індексів здійснено у середовищі QGIS за допомогою калькулятора растрів Semi-Automatic Classification Plugin. Було оцінено мінімальні, максимальні, середні й медіанні значення кожного індексу, а також проведено зональну статистику для різних типів територій (ліс, поле та забудова). Отримані результати загалом показали високу кореляцію між усіма індексами, що вказує на їх подібну чутливість до фотосинтетичної активної рослинності та принцип роботи. Зауважено, що EVI-S продемонстрував дещо відмінний характер розподілу значень, що свідчить про розширені можливості в оцінці густоти вегетації та фаз її розвитку. Особливо чітко ця різниця виявилася у густих лісових масивах і на сільськогосподарських ділянках із високим рівнем біомаси, де EVI-S був значно вищим за показники інших індексів. Індекс EVI-S може істотно доповнити існуючий набір вегетаційних індексів, надаючи більш точну інформацію про стан і динаміку розвитку рослинності в умовах різноманітних ландшафтних середовищ. Результати дослідження формують основу для подальших розробок у сфері екологічного моніторингу та раціонального використання природних ресурсів.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, стан рослинності, опустелювання, насичення індексів, супутникові знімки.

ВСТУП

Методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є потужним інструментом для здійснення екологічного моніторингу та проведення досліджень стану навколишнього середовища на тій чи іншій території. Вони забезпечують отримання об'єктивної інформації для виявлення змін у рослинному покриві для оцінки стану ландшафтів та виявлення негативних тенденцій. Аналіз стану рослинності за даними ДЗЗ є одним із найпоширеніших підходів у сучасних екологічних дослідженнях, який дає мож-

ливість ефективно оцінювати масштаби антропогенних та природних змін у біосфері.

Україна знаходиться у зоні помірного клімату, який має сприятливі умови для розвитку рослинності та ведення сільськогосподарства. Значна частина території країни зайнята сільськогосподарськими угіддями, які відіграють ключову роль в економіці та забезпеченні продовольчої безпеки. Водночас, аграрний сектор України стикається з викликами, пов'язаними зі змінами клімату, ерозійними процесами та антропогенним впливом, які є передумо-

вою деградації ґрунтів. Виявлення та моніторинг таких процесів — одна з ключових умов для забезпечення сталого розвитку агросфери та раціонального використання природних ресурсів.

У контексті екологічного моніторингу важливим завданням є оцінка змін рослинного покриву та їхнього впливу на довкілля. Використання даних ДЗЗ надає можливість відстежувати ці процеси у динаміці, що здатні ухвалювати своєчасні управлінські рішення задля збереження екосистем та ефективного управління сільськогосподарськими землями. Особливу роль у таких дослідженнях відіграють спектральні індекси. Вони дають можливість, зокрема, визначати стан рослинності, оцінювати рівень її продуктивності та щільність, а також виявляти зміни, спричинені як природними, так і антропогенними чинниками.

У цьому дослідженні розглядається можливість застосування різних спектральних індексів для оцінки стану рослинного покриву та запропоновано новий підхід до аналізу змін рослинності, який може бути використано для удосконалення систем екологічного моніторингу.

Мета цієї роботи — здійснити всебічний аналіз можливостей застосування вегетаційних індексів для оцінки стану рослинного покриву в різних ландшафтних умовах, розробити, обґрунтувати та апробувати новий модифікований індекс EVI-S, що поєднує переваги SAVI та EVI2 без атмосферної корекції, а також оцінити його ефективність та доцільність використання порівняно з існуючими індексами.

Зокрема, дослідження спрямовано на:

- виявлення та систематизацію ключових підходів і методів застосування NDVI, EVI, EVI2, SAVI та EVI-S у різних природних умовах, включаючи зони густої та рідкої рослинності, забудовані території та сільськогосподарські території;
- оцінку чутливості нового індексу EVI-S до впливу ґрунтового фону та особливостей рослинного покриву;
- визначення придатності EVI-S для моніторингу змін рослинного покриву, ана-

лізу процесів деградації земель та екологічного моніторингу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Використання спектральних індексів для оцінки стану рослинності стало одним із ключових інструментів визначення стану рослинності засобами ДЗЗ завдяки появі мультиспектральних супутникових знімків високої роздільної здатності у відкритому доступі. Найпоширенішими індексами, що використовуються для цих цілей, є NDVI, SAVI, EVI та їх модифікації.

Останні дослідження підтвердили, що кожен із цих індексів має свої переваги та обмеження, що залежать від особливостей ландшафту, ґрунтового фону, кліматичних умов та типу рослинного покриву. NDVI залишається одним із найстаріших і найбільш використовуваних індексів, проте має істотну чутливість до впливу ґрунту та атмосферних чинників. SAVI розроблено для мінімізації впливу ґрунту на розрахунок індексу рослинності. EVI, своєю чергою, був запропонований як покращена версія NDVI, з більшою стійкістю до насичення в областях із густою рослинністю та компенсацією атмосферних впливів [1].

Дослідження використання вегетаційних індексів акцентують увагу на ефективності цих індексів у різних природних умовах. У дослідженні Nwilo, Okolie, Umar та ін. [2] на прикладі району озера Чад показано, що NDVI, EVI та SAVI можуть ефективно використовуватися для виявлення змін ґрунтового покриву, до того ж між цими індексами встановлено високий коефіцієнт кореляції. У роботі Matsushita B., Yang W., Chen J. та ін. [3] розглянуто вплив топографії на прикладі щільних насаджень кипариса. Визначено, що за рахунок коригувального коефіцієнта «L» EVI є більш чутливим до рельєфу, ніж NDVI, та потребує додаткової топографічної корекції. У праці Shibani N., Pandey A., Satyam V.K. та ін. [4] проаналізовано варіації NDVI, SAVI та EVI у штаті Пенджаб (Індія), та виявлено, що ці індекси по-різному реагують на зміни в агроландшафтах, а NDVI

та SAVI мають тісний взаємозв'язок, вказуючи на схожість у відображенні стану рослинного покриву. Досвід Pamungkas S. [5] присвячений оцінці щільності мангрових лісів у прибережній зоні. Дослідження проведено з використанням NDVI, EVI2 та SAVI. Автор зауважує, що відмінності у показниках індексів на ґрунтові та водні параметри дають можливість підвищити точність густоти рослинності. У роботі [6] (Trevisiol F., Mattivi P., Mandanici E. та ін.) здійснено порівняльний аналіз NDVI, EVI, SAVI, NDMI у рамках гармонізації даних Landsat і Sentinel. Вчені підкреслюють важливість узгодження відбиття поверхні з метою забезпечення коректних часових рядів у масштабних моніторингових системах. У роботі Gaitán J.J., Bran D., Oliva G. та ін. [7], присвяченій степовим екосистемам Патагонії, наведено дані про кореляцію NDVI з індикаторами інфільтрації та кругообігу поживних речовин. Дослідження демонструє значний потенціал застосування багатоспектральних індексів для відстеження просторової мінливості рослинного покриву. У праці Zhen Z., Chen S., Yin T. та ін. [8] увагу зосереджено на використанні негативного коефіцієнта коригування у формулі SAVI для пом'якшення ефекту насичення в регіонах із густою рослинністю. Такий підхід дав змогу точніше оцінити Leaf Area Index в умовах високої щільності біомаси. У роботі [9] запропоновано GDVI (Generalized Difference Vegetation Index), та наголошено на його підвищеній чутливості до низької рослинності порівняно з NDVI, SAVI та EVI. Це підтвердило ефективність нового індексу у здійсненні моніторингу деградації земель у посушливих зонах. Silva Junior U.J., Gonçalves R.M., Oliveira L.M.M. та ін. у своїй роботі [10] дослідили GNDVI, NDVI, EVI у сезонно-сухих прибережних лісах. Виявлено, що перші два краще ідентифікують узбережні ділянки, тоді як EVI виразніше фіксує водну поверхню, що вказує на доцільність комбінованого застосування індексів. Mutie F.N. у роботі [11] аналізує можливості моделювання посухи на основі EVI, NDVI, SAVI та інших показників. Встановлено, що SMI, VCI та NDWI

мають найтісніший зв'язок із вегетаційними індексами. Результати вказують на доцільність комплексного підходу до оцінки стану рослинності. У роботі Jiang H., Wu B., Wang X. [12] запропоновано індекс TAVI, де до даних у ближньому інфрачервоному та червоному каналах додається спеціальний коефіцієнт топографічного коригування для зменшення впливу складного рельєфу без застосування цифрової моделі висот.

Загальний аналіз наведених робіт демонструє зосередження дослідників на порівнянні спектральних індексів для вивчення рослинного покриву за різних ландшафтно-кліматичних умов, а також на удосконаленні формул, зокрема через коригування впливів ґрунту чи топографічної компоненти. Дослідження спрямовані на підвищення точності визначення рослинності та уникнення проблем пов'язаних з обмеженнями того чи іншого індексу.

Більшість досліджень підтверджують ефективність NDVI, SAVI та EVI, та їх успішне застосування для аналізу різних типів рослинності, включаючи лісові та сільськогосподарські угіддя, прибережні зони й посушливі регіони. Виявлено стабільно високу кореляцію між традиційними індексами. Отже, виявлено їхню схожість у відображенні основних спектральних характеристик рослинного покриву. До того ж проблема насичення на ділянках із високою щільністю біомаси залишається актуальною, і більшість досліджень спрямовані на пошук методів зменшення втрат інформації, у випадках досягнення максимальних значень індексу.

Індекси відрізняються також чутливістю до ґрунтового фону. NDVI значно залежить від кольору та вологості ґрунту, тоді як у SAVI та EVI реалізовано коефіцієнти корекції. Вплив рельєфу також виявляється важливим чинником, оскільки EVI є досить чутливим до кривизни рельєфу, в той час як NDVI демонструє стабільність у гористій місцевості. Використання модифікованих формул свідчить про різні підходи до вирішення проблеми точності оцінки рослинного покриву.

Різноманітні адаптації індексів, як-от EVI2 без синього каналу, GDVI для посушливих зон або TAVI із топографічним компонентом, створюють більш універсальний набір методів, який дає можливість врахувати специфічні умови ландшафту та клімату. Спостерігається тенденція до використання удосконалених формул та комбінування методів для забезпечення точності аналізу стану рослинності.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведено на території Феодосійської територіальної громади, яка розташована в Київській обл. та належить до лісостепової зони України і включає 8 населених пунктів. Площа території громади становить близько 115 км² [13]. Ландшафт місцевості переважно рівнинний, із характерними для Лісостепу хвилястими формами рельєфу. Територія громади поєднує природні екосистеми та сільськогосподарські угіддя, які становлять значну частину її земельного фонду. Наявні водні об'єкти на цій території відіграють важливу роль у підтриманні водного балансу.

Помірний клімат, притаманний даній місцевості, характеризується м'якими зимами та теплим літом. Середньорічна температура повітря коливається від +7 до +9°C, а річна кількість опадів сягає близько 500–600 мм [14]. Зими зазвичай малосніжні, а літо помірно вологе. Територія має сприятливі умови для розвитку природної рослинності та ведення аграрного виробництва.

Ґрунтовий покрив території громади складається переважно з родючих чорноземів, які є одними з найпродуктивніших для сільського господарства. В даному районі домінують глибокі чорноземи на лесових породах, а також сірі та темно-сірі опідзолені ґрунти, характерні для лісостепової зони України [15; 16]. Також на території трапляються сірі та темно-сірі лісові ґрунти, які мають високу родючість і використовуються для вирощування зернових культур, овочевих насаджень і садівництва.

Природний ландшафт громади гармонійно поєднується із забудовою, яка представлена як сільськими поселеннями, так і сучасними житловими масивами, розвинутою інфраструктурою й промисловими об'єктами. Територія громади активно освоюється для ведення аграрного виробництва, водночас зберігаючи значні площі природних лісових масивів.

Поєднання сприятливих кліматичних умов, родючих ґрунтів, водних ресурсів і розвинутої інфраструктури робить Феодосійську громаду не лише важливим аграрним та екологічним осередком регіону, а й перспективним об'єктом для дослідження. Саме ця територія надає можливість оцінити ефективність різних спектральних індексів у моніторингу змін рослинного покриву, аналізувати вплив природних і антропогенних чинників на стан сільськогосподарських угідь та визначати оптимальні підходи до екологічного моніторингу.

У цьому дослідженні використовуються методи дистанційного зондування Землі із застосуванням супутникових знімків Sentinel-2. Дані обробляються в середовищі QGIS за допомогою Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). В рамках роботи здійснюється комплексний аналіз літературних джерел, наукових публікацій, патентних матеріалів та інших інформаційних ресурсів, що стосуються використання спектральних індексів для оцінки змін рослинного покриву.

Процес дослідження включає отримання супутникових даних шляхом завантаження Sentinel-2 через QGIS SCP, з відбором знімків відповідно до сезону та умов освітлення. Після отримання даних здійснюється їх попередня обробка. Вона включає корекцію радіометричних і геометричних параметрів, а також обрізку зображень по межах досліджуваної території. Далі проводиться розрахунок спектральних індексів NDVI, EVI, EVI2, SAVI та запропонованого EVI-S за допомогою калькулятора растрів в QGIS, з отриманням растрових індексних шарів у результаті.

Після обробки знімків здійснюється аналіз отриманих даних. Проводиться по-

рівняння ефективності різних індексів, оцінюється їхня чутливість до впливу ґрунтового фону та щільності рослинного покриву. Для виявлення закономірностей у розподілі індексних значень застосовуються методи геостатистичного аналізу та просторового моделювання. Отримані результати дадуть змогу оцінити ефективність нового індексу EVI-S порівняно з традиційними підходами, а також сформулювати рекомендації щодо його практичного використання у дослідженнях рослинного покриву.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Спектральні індекси широко застосовуються для оцінки стану рослинного покриву, проте їх ефективність залежить від особливостей ландшафту, типу рослинності та атмосферних умов. Серед найпоширеніших індексів варто виділити NDVI, EVI, EVI2, SAVI, а також запропонований у цьому дослідженні модифікований індекс EVI-S.

Нормалізований диференційний індекс рослинності (NDVI) є одним із найрозповсюдженіших і найстаріших спектральних індексів, що використовується для оцінки вегетації. Він розраховується за формулою (1):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

де NIR — відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні, а RED — відбиття у червоному спектральному діапазоні [17; 18].

NDVI дає змогу оцінювати рівень фотосинтетичної активності рослинного покриву. Високі значення NDVI відповідають густій зеленій рослинності, тоді як низькі значення свідчать про відсутність рослинності або її поганий стан. Основними обмеженнями цього індексу є чутливість до ґрунтового фону та атмосферних впливів.

Розширений індекс рослинності (EVI) розроблено для компенсації деяких обмежень NDVI, як-от вплив ґрунту та атмосферних часток [19–21]. Формула індексу (2) має вигляд:

$$EVI = 2,5 \times \frac{NIR - RED}{(NIR + C_1 \times RED - C_2 \times BLUE + L)}, \quad (2)$$

де $C_1=6$, $C_2=7,5$, $L=1$ — коефіцієнти корекції, а BLUE — відбиття у синьому спектральному діапазоні.

На відміну від NDVI, EVI має підвищену чутливість до густої рослинності та забезпечує атмосферну корекцію. Однак залежність від синього каналу може обмежувати його застосування у випадках, коли цей канал недоступний або має значні атмосферні спотворення.

Двосмуговий розширений індекс рослинності (EVI2) досліджено для модифікації EVI [22], що виключає синій спектральний канал, і як наслідок спрощує розрахунок індексу та робить його менш чутливим до атмосферного впливу. Формула EVI2 (3) подано так:

$$EVI2 = 2,5 \times \frac{NIR - RED}{(NIR + 2,4 \times RED + 1)}, \quad (3)$$

Цей індекс має більшість переваг EVI, але не залежить від синього спектрального діапазону.

Скорегований індекс рослинності ґрунту (SAVI) розроблено для регіонів із низьким рівнем рослинного покриву, де ґрунтовий фон значно впливає на спектральні відбиття. Він вводить коригувальний коефіцієнт L (4), який дає змогу мінімізувати вплив ґрунту:

$$SAVI = 2,5 \times \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \times (1 + L), \quad (4)$$

де L зазвичай приймається рівним 0,5 для регіонів із середньою щільністю рослинності. Поправочний коефіцієнт яскравості ґрунту (L) змінюється залежно від щільності рослинності:

- для ділянок з високою щільністю рослинності: $L = 0,25$.
- для ділянок з проміжною щільністю рослинності: $L = 0,5$.
- для ділянок з низькою щільністю рослинності: $L = 1,0$.

SAVI особливо ефективний для аналізу рослинності в напівзасушливих і засушливих регіонах, де традиційні індекси, як-от NDVI, можуть спотворювати результати через домінуючий вплив ґрунту [23–25].

Модифікований індекс EVI-S (EVI-SAVI Hybrid без атмосферної корекції). Для усунення обмежень існуючих індексів у цьому дослідженні запропоновано новий модифікований індекс EVI-S, який поєднує характеристики EVI2 та SAVI. Формула (5) індексу має вигляд:

$$\text{EVI-S} = 2,5 \times \frac{\text{NIR} - \text{RED} \times (1 + L)}{\text{NIR} + 2,4 \times \text{RED} + L}, \quad (5)$$

де L — коефіцієнт корекції впливу ґрунту.

EVI-S поєднує переваги SAVI та EVI2. Таке поєднання має забезпечити аналіз рослинного покриву в умовах, де існує значний вплив ґрунтового фону. Також очікується забезпечення більшої точності оцінки стану рослинності без врахування впливу атмосферних чинників.

Хід виконання аналізу спектральних індексів у QGIS. Для дослідження стану рослинного покриву на території Феодосіївської громади використано супутникові знімки Sentinel-2 (L2A) з атмосферою корекцією (Level-2A) та 0% хмарності, отримані за 2024-07-15. Дані було завантажено через Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) та оброблено у QGIS для подальшого розрахунку спектральних індексів.

Після завантаження супутникових даних було виконано їхню попередню обробку, а саме: вирізано область дослідження за межами Феодосіївської громади за допомогою інструмента «Clip Raster by Mask Layer» та перетворено дані у проекцію EPSG: 32636 (WGS 84 / UTM zone 36N) для коректного геопросторового аналізу.

Розрахунок спектральних індексів

Для оцінки стану рослинності було обчислено п'ять спектральних індексів за допомогою Raster Calculator у QGIS:

- NDVI: $(B08 - B04) / (B08 + B04)$.
- EVI: $(B08 - B04) / (B08 + 6 \times B04 - 7,5 \times B02 + 1)$.

- EVI2: $(B08 - B04) / (B08 + 2,4 \times B04 + 1)$.
- SAVI: $(B08 - B04) / (B08 + B04 + 0,5) \times (1 + 0,5)$.
- EVI-S: $2,5 \times (B08 - B04) \times (1 + 0,5) : (B08 + 2,4 \times B04 + 0,5)$.

Візуалізація та графічний аналіз

Після обчислення індексів проведено візуалізацію результатів (рис. 1): всі індексні шари збережено у форматі GeoTIFF для подальшого аналізу.

Виконано класифікацію отриманих даних на 5 зон рослинного покриву:

- Низький рівень рослинності.
- Помірно низький.
- Середній.
- Помірно високий.
- Високий рівень рослинності.

Використано псевдокольорову палітру RdYlGn для покращання візуальної інтерпретації значень індексів (червоний — низька рослинність, зелений — густа рослинність).

Аналізуючи мінімальні та максимальні значення різних індексів, можна зробити висновки про їхню якість та особливості. Індекси мають різні межі значень. Це вказує на їхню різну чутливість до рослинного покриву. Наприклад, EVI-S має найвище максимальне значення (1,886761), що може свідчити про його більшу чутливість до вегетації. В той самий час у NDVI найнижче мінімальне значення (–0,232775). Це є підтвердженням наявності областей із низькою або навіть від'ємною відбивною здатністю, як-от водні об'єкти.

З огляду на ці розрахунки, слід відмітити, що мінімальні значення у всіх індексів близькі до нуля або мають незначні від'ємні значення, що вказує на їх правильну нормалізацію. У випадку EVI-S ширший діапазон значень може означати його здатність краще розрізняти рівні вегетаційного покриву. Однак це припущення вимагає перевірки на наявність можливих аномалій, адже надто високі чи низькі значення можуть бути спричинені шумами або особливостями формули.

Відображення індексів зроблено для візуального порівняння розподілу рослинності. Оскільки діапазони значень не були

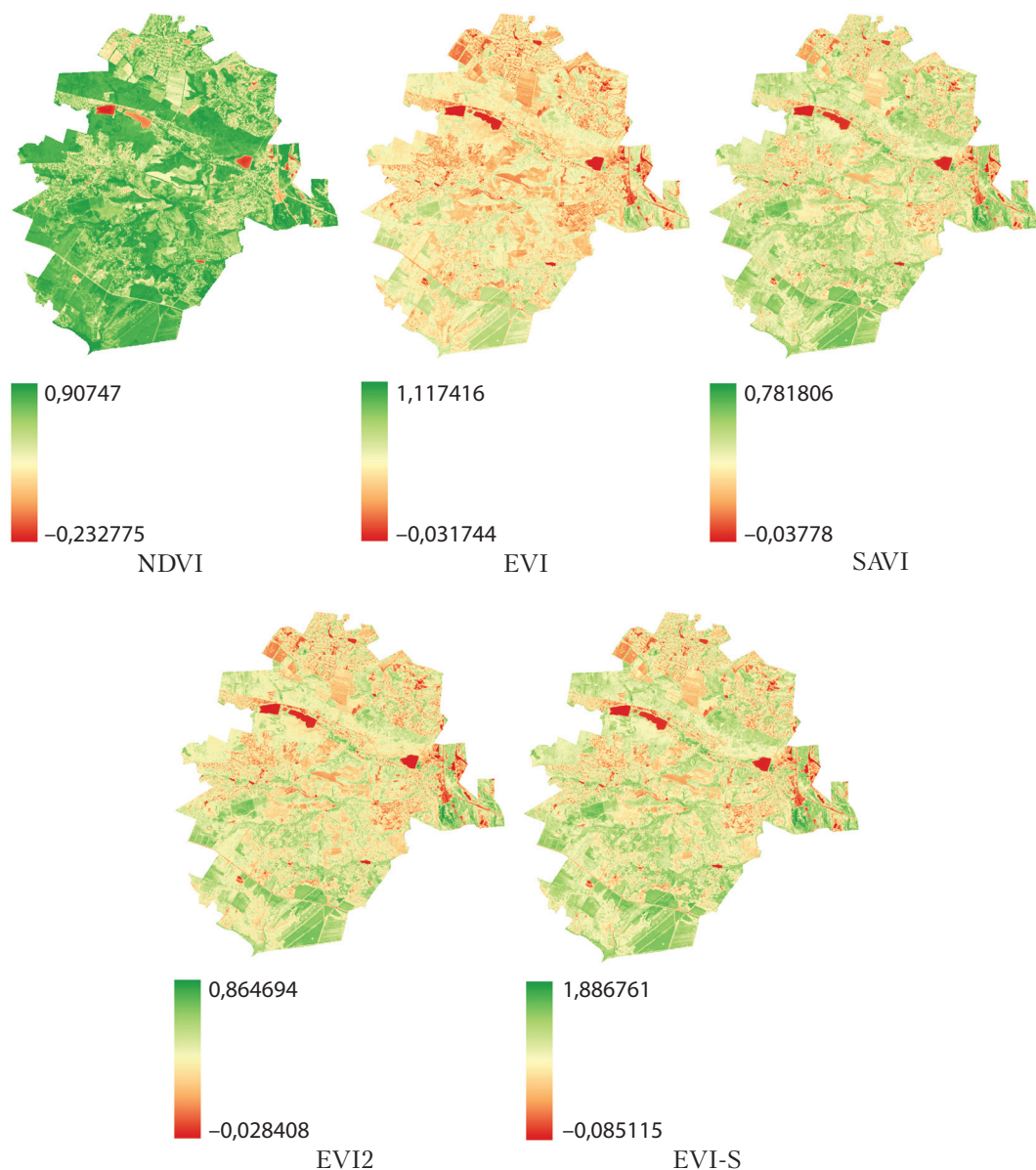


Рис. 1. Візуалізація індексів у початкових межах значень

уніфіковані, безпосереднє порівняння може бути некоректним. Один і той самий регіон може мати різний колір на різних растрах індексів лише через різні шкали, що ускладнює аналіз. Для коректного порівняння слід виставити однаковий діапазон значень, наприклад, від $-0,2$ до $2,0$

або від 0 до $1,5$, залежно від очікуваного розподілу.

EVI-S є новим модифікованим індексом, його вищий діапазон значень може свідчити про більшу чутливість до густоти рослинних покривів, де стандартний EVI може насичуватися. Це також може

означати зменшену залежність від впливу ґрунту чи атмосфери у порівнянні з класичним EVI або використання модифікованих коефіцієнтів у формулі, що змінюють вихідний діапазон. Для визначення його переваг необхідно перевірити, чи не виникають аномально високі значення у місцях, де цього не очікується, а також порівняти результати з іншими індексами на тих самих територіях.

Зображення вищезгаданих індексів із діапазоном значень $-0,2...1,5$ наведено на рис. 2.

Зображення NDVI, EVI, SAVI та EVI2 виглядають схожими за кольоровою гамою, домінують жовто-оранжеві відтінки, що свідчить про помірний рівень вегетації в регіоні. SAVI є трохи менш контрастним, що пояснюється його корекцією впливу

ґрунту. EVI2 подібний до EVI, але не використовує синій канал, що може впливати на його точність.

Найбільш контрастним виглядає EVI-S, у ньому чітко виражені зони активної рослинності, які мають насичений зелений колір. Це демонструє, що цей індекс краще розрізняє густу вегетацію. Також на всіх растрах помітні червоні ділянки, що вказує на території з відсутньою рослинністю та водойми.

Завдяки порівнянню растрів у однаковому діапазоні значень можна зробити висновки, що EVI-S дає найбільш контрастну картину розподілу рослинності, тоді як NDVI, EVI, SAVI та EVI2 демонструють більш рівномірний перехід значень без таких різких відмінностей. Це вказує на можливість кращої диференціації рослин-

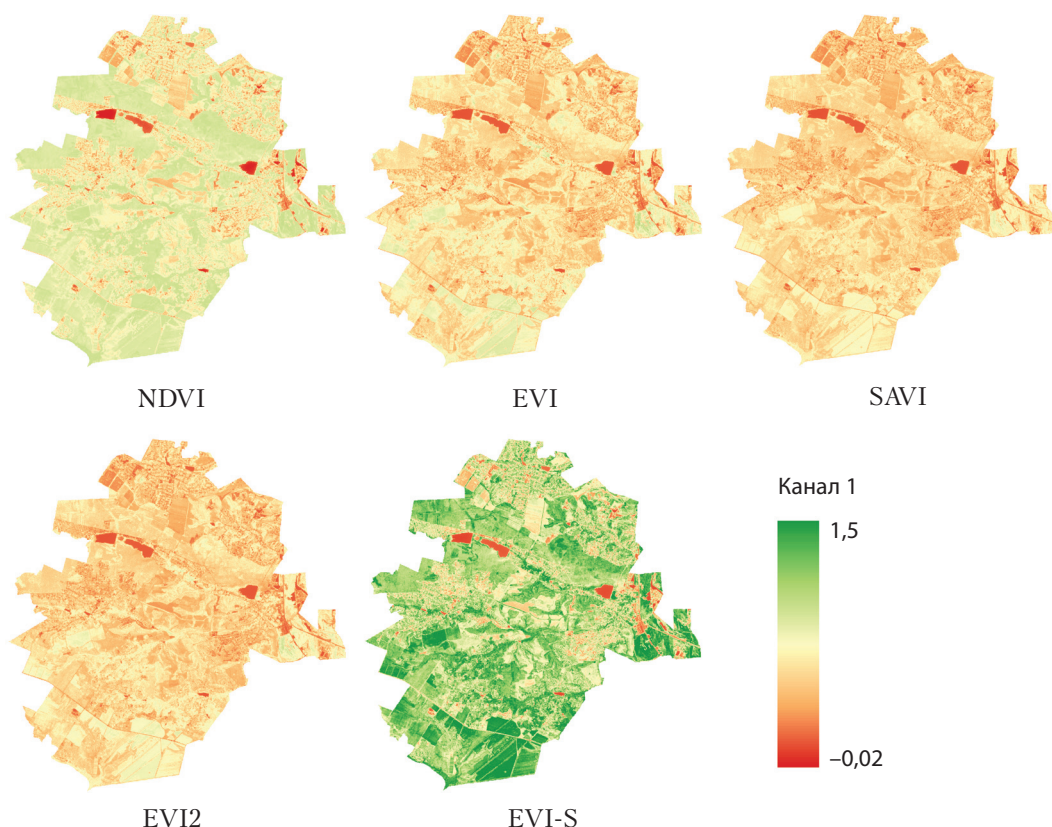


Рис. 2. Візуалізація індексів у межах значень $-0,2...1,5$

ного покриву за допомогою EVI-S. Нижче запропоновано дані зональної статистики для всього дослідного полігону (табл. 1).

Значення даних зональної статистики показують найвищі середні та максимальні значення EVI-S, що підтверджує кращу диференціацію вегетаційних рівнів. NDVI демонструє стабільні значення, але через обмежений діапазон менш чутливий до змін у густоті біомаси.

Для більш детального аналізу доцільно навести дані зональної статистики окремо для лісових масивів, забудованих територій та сільськогосподарських посівів, щоб визначити, як різні індекси реагують різну густоту рослинності та урбанізовані площі.

Для цього за знімками сервісу Google Satellite Map (URL: <https://maps.google.com/maps>) обрано ділянки з відповідними об'єктами ландшафту (рис. 3), для яких отримано дані зональної статистики для

Таблиця 1. Зональна статистика в межах полігону

Індекс	Мінімум	Середнє	Максимум
NDVI	-0,311531	0,671109	0,915961
EVI	-0,215770	0,474458	1,814927
EVI2	-0,105500	0,429297	0,910382
SAVI	-0,117486	0,425206	0,794709
EVI-S	-0,193398	0,984961	1,918320

полігонів «Ліс», «Поле» та «Забудова», що представлено у табл. 2–4.

Згідно з даними зональної статистики, NDVI стабільно розрізняє ліси, поля та забудову, маючи найвищі середні значення у лісах, трохи нижчі на полях і значно менші у забудованій території. EVI та EVI2 виявляють більшу фотосинтетичну активність на полях, ніж у лісах, що може бути пов'язано з активною фазою росту сільськогосподарських культур. SAVI де-

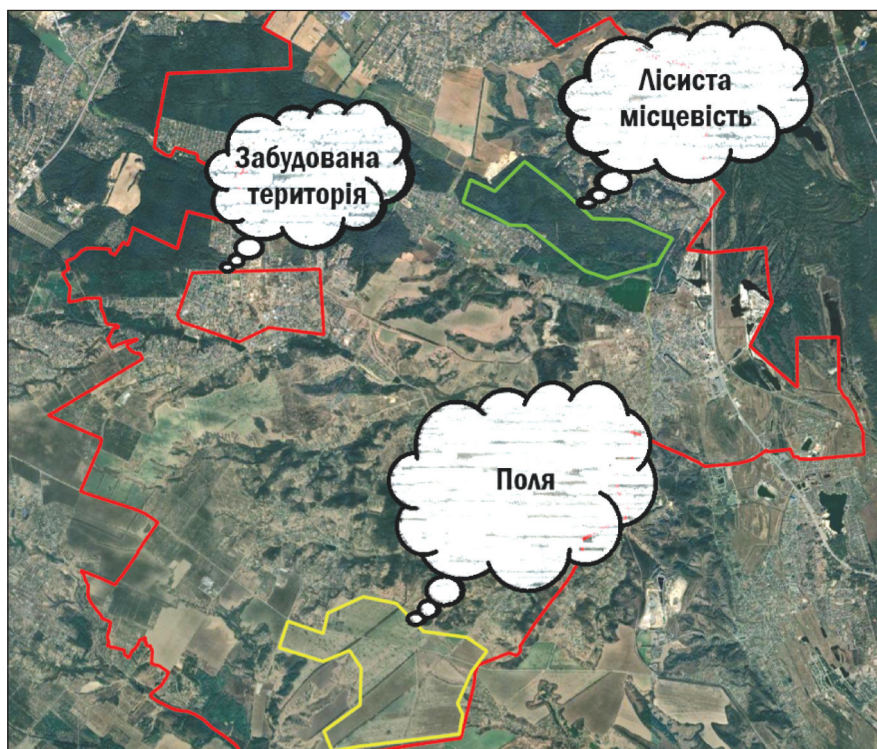


Рис. 3. Вибір полігонів з різними типами об'єктів ландшафту

Таблиця 2. Дані зональної статистики полігону для лісу

Індекс	min	mean	max	median
NDVI	0,259	0,814	0,906	0,819
EVI	0,210	0,525	0,852	0,523
EVI2	0,178	0,477	0,778	0,437
SAVI	0,188	0,473	0,705	0,472
EVI-S	0,377	1,129	1,697	1,127

Таблиця 3. Дані зональної статистики полігону для поля

Індекс	min	mean	max	median
NDVI	-0,011	0,781	0,910	0,805
EVI	-0,002	0,670	0,906	0,709
EVI2	-0,001	0,606	0,829	0,642
SAVI	-0,002	0,573	0,741	0,605
EVI-S	-0,004	1,341	1,787	1,424
EVI-S	-0,084	0,807	1,637	0,824

Таблиця 4. Дані зональної статистики полігону для забудови

Індекс	min	mean	max	median
NDVI	-0,066	0,570	0,883	0,595
EVI	-0,102	0,394	0,818	0,399
EVI2	-0,042	0,354	0,749	0,360
SAVI	-0,047	0,358	0,685	0,368

монструє більш згладжені значення, особливо для полів та забудови. EVI-S має найбільший розкид значень. Високі значення у забудованих територіях вказують на присутність значної кількості дерев та інших рослин між будівлями.

Ліси на зображенні представлені лише суцільним деревним покривом, тому тут NDVI та EVI мають стабільно високі значення. Культури полів на обраному полігоні, згідно всіх п'яти індексів перебувають в активній вегетаційній фазі, містять смуги насаджень уздовж доріг, що пояснює дещо вищі значення індексів, ніж очікувалося для відкритих сільськогосподарських угідь. Забудовані території включають рослинність між будівлями, ймовірно, сади

та сквери, що підвищує середні значення NDVI та EVI-S порівняно з типовими урбанізованими зонами.

EVI-S фіксує високу чутливість до щільності рослинного покриву та фотосинтетичної активності, що було раніше виявлено на знімках, де він показував значно вищі середні та максимальні значення порівняно з іншими індексами. Це робить його більш придатним для виявлення фаз вегетації та оцінки стану рослинності, через здатність краще диференціювати ділянки з інтенсивним ростом та активною біомасою. На відміну від NDVI, який може насичуватися за високої густоти рослинного покриву, EVI-S має ширший динамічний діапазон та дає змогу точніше оцінювати зміну вегетаційного стану у густих лісах, аграрних культурах та змішаних ландшафтах.

Порівняно з EVI та EVI2, EVI-S є більш чутливим до змін у фотосинтетичній активності. Ця особливість може виявитись дуже корисною для моніторингу вегетації на різних стадіях росту. Підвищені значення у міських територіях вказують на чутливість не лише до щільності рослинності, але й на наявність рослинних об'єктів навіть у змішаних ландшафтах (дерева, сади, трава між будівлями). Це може свідчити про можливу переоцінку рослинного покриву в урбанізованих територіях та потребує додаткової перевірки.

Для аналізу кореляції між досліджуваними різними індексами рослинності, представленими у вигляді растрових файлів розроблено Python-скрипт. Далі проводиться розрахунок кореляційної матриці за методом Пірсона. Кореляційна матриця дає змогу визначити рівень взаємозв'язку з ними. Для візуалізації результатів будується теплова карта кореляційної матриці, яка наочно підтверджує ступінь схожості або відмінності між досліджуваними показниками. Кореляцію індексів наведено на рис. 4.

Отримані результати показують, що всі індекси мають значення кореляції, наближені до 1, що очікувано, оскільки їхній загальний принцип роботи є подібним. Найтісніший зв'язок спостерігається між

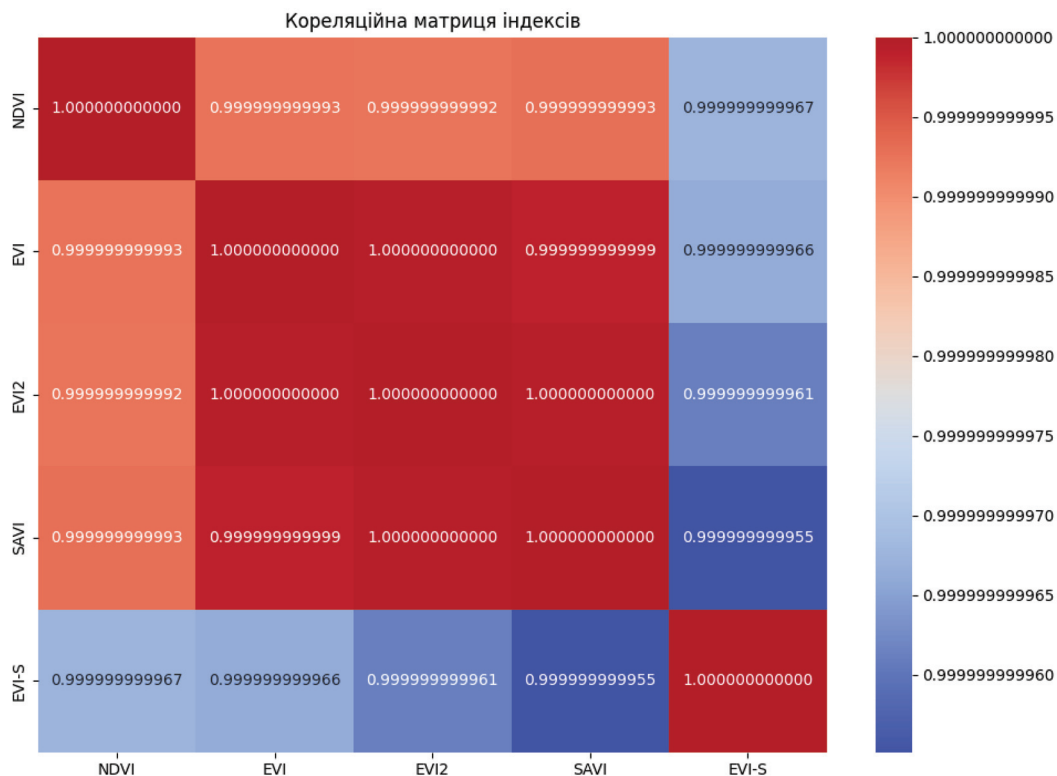


Рис. 4. Кореляційна матриця індексів

EVI, EVI2 та SAVI, які показують майже ідеальну кореляцію. Це підтверджує їхню взаємозамінність у загальних оцінках рослинного покриву, оскільки вони засновані на схожих розрахункових принципах і реагують на однакові спектральні особливості.

NDVI, попри свою високу кореляцію з іншими індексами, фіксує трохи нижчий рівень відповідності, що пояснюється його чутливістю до ефекту насичення за високих значень вегетації та відсутністю механізму корекції впливу ґрунтового фону. Відомо, що такі особливості NDVI впливають на точність його результатів у регіонах із густою рослинністю або змішаними ландшафтами, де присутність відкритого ґрунту створює додаткові спотворення.

Найнеочікуванішим стало те, що EVI-S, який розроблено на основі EVI2 та SAVI,

демонструє найвищу кореляцію саме з NDVI, а не з вихідними індексами. Це вказує на те, що, попри його модифіковану формулу, він зберігає певні характеристики, притаманні NDVI, можливо, через подібну чутливість до структурної неоднорідності покриву. Водночас його відмінність від EVI2 та SAVI пояснюється тим, що він має вищу чутливість до густоти й фізіологічного стану рослинності, а також майже вдвічі ширший масштаб значень. Це показує меншу кореляцію із вихідними індексами, оскільки він поєднує в собі їхні переваги, але при цьому відображає більше варіацій у рослинному покриві.

У складних ландшафтних умовах, як-от міські території, EVI-S може свідчити про ще більші відмінності порівняно з іншими індексами. NDVI та EVI часто занижують рівень рослинного покриву через присут-

ність штучних поверхонь, тоді як EVI-S, завдяки своїй модифікованій нормалізації, може завищувати ці значення. Це пояснює його дещо меншу кореляцію з іншими індексами, а також підтверджує його потенціал у завданнях, що потребують точнішого аналізу щільності та продуктивності рослинності.

З огляду на те, що більшість традиційних індексів можуть використовуватися взаємозамінно, EVI-S надає додаткову інформацію завдяки своїй вищій чутливості. Виявлені особливості модифікованого індексу вказують на його переваги, коли необхідна більш деталізована оцінка стану рослинності або аналіз територій із високою неоднорідністю покриву. Додаткові дослідження можуть допомогти з'ясувати, в яких умовах використання EVI-S дасть найбільші переваги порівняно з іншими індексами.

ВИСНОВКИ

Результати дослідження продемонстрували високу ефективність методів дистанційного зондування Землі у вивченні стану рослинного покриву та підкреслили важливість правильного вибору спектрального індексу для аналізу різних типів ландшафтів. Основний блок традиційних індексів (EVI, EVI2, SAVI) встановив майже повну взаємну кореляцію. Отже підтверджено їхню схожість у відображенні рослинного покриву та взаємозамінність у загальних оцінках вегетації. Втім NDVI та EVI-S, хоч і мають, здавалося б, найбільші відмінності під час порівняння, демонструють найбільшу кореляцію.

Головним досягненням дослідження стала апробація та верифікація шляхом порівняння нового модифікованого індексу EVI-S з класичними вегетаційними індек-

сами. Останній виявився достатньо подібним за характером розподілу значень, але показав істотну відмінність самих значень. Його особлива формула дала можливість підвищити чутливість до густої та активної вегетації та визначення фази росту та стану культур різної щільності біомаси. Аналіз зональної статистики продемонстрував, що EVI-S дає змогу виділити ділянки із щільним рослинним покривом, проте може фіксувати завищені значення у міських територіях із вкрапленнями рослинності між будівлями. Дещо нижча кореляція цього індексу з рештою засвідчила його здатність відображати характеристики, які не охоплюються стандартними індексами, та збагатила загальний інструментарій моніторингу рослинності.

Проведене дослідження підтвердило, що EVI-S може виступати вагомою альтернативою або доповненням до наявних індексів у тих випадках, коли необхідна підвищена чутливість до фаз вегетації або необхідності розрізнення рослинного покриву різної густини у межах різномірних ландшафтних умов. Встановлено, що найбільшу практичну користь від застосування EVI-S можна отримати під час оцінювання стану сільськогосподарських культур у різні періоди росту або для моніторингу лісових масивів із високою біомасою. Водночас було виявлено потребу у подальшому вивченні особливостей його застосування на урбанізованих територіях.

Результати дослідження створюють передумови для подальшого удосконалення систем моніторингу, підвищення точності прогнозування змін в аграрному секторі, а також для прийняття ефективних управлінських рішень щодо збереження та раціонального використання природних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Streambatch.io. (б. д.). *In the Field: NDVI, SAVI, EVI Compared*. URL: <https://www.streambatch.io/knowledge/in-the-field-ndvi-savi-evi-compared>.
2. Nwilo, P. C., Okolie, Ch. J., Umar, A. A., Akinnusi, S. A., Ojebile, B. M., & Olanrewaju, H. O. (2021). Spatial relationship between NDVI, EVI, SAVI and land cover change in the Lake Chad area from 1987 to 2017. *Intercontinental Geoinformation Days*, 3, 128–131. URL: https://www.researchgate.net/publication/356894048_Spatial_relationship_between_NDVI_EVI_SAVI_and_land_cover_change_in_the_Lake_Chad_area_from_1987_to_2017.
3. Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index

- (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-density Cypress Forest. *Remote Sensing of Natural Resources and the Environment*, 7(11), 2636–2651. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs7112636>.
4. Shibani, N., Pandey, A., Satyam, V. K., Bhari, J. S., Karimi, B. A., & Gupta, S. K. (2023). Study on the variation of NDVI, SAVI and EVI indices in Punjab State, India. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1110, 012070. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012070>.
 5. Pamungkas, S. (2023). Analysis of vegetation index for NDVI, EVI-2, and SAVI for mangrove forest density using Google Earth Engine in Lembar Bay, Lombok Island. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1127, 012034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1127/1/012034>.
 6. Trevisiol, F., Mattivi, P., Mandanici, E., & Bitelli, G. (2023). Cross-sensors comparison of popular vegetation indexes from Landsat TM, ETM+, OLI, and Sentinel MSI for time-series analysis over Europe. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3343071>.
 7. Gaitán, J. J., Bran, D., Oliva, G., Ciari, G., Nakamatsu, V., Salomone, J., ... Maestre, F. T. (2013). Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes. *Ecological Indicators*, 34, 181–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.05.007>.
 8. Zhen, Z., Chen, S., Yin, T., Chavanon, E., Lauret, N., Guilleux, J., ... Gastellu-Etchegorry, J.-P. (2021). Using the negative soil adjustment factor of Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) to resist saturation effects and estimate Leaf Area Index (LAI) in dense vegetation areas. *Sensors*, 21(6), 2115. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21062115>.
 9. Wu, W. (2014). The Generalized Difference Vegetation Index (GDVI) for dryland characterization. *Remote Sensing*, 6(2), 1211–1233. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6021211>.
 10. Silva Junior, U. J., Gonçalves, R. M., Oliveira, L. M. M., & Silva Junior, J. A. (n.d.). Sensibilidade espectral dos índices de vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na mata ciliar do reservatório de Serrinha II — PE, Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 73, 17–35. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv73n1-55252>.
 11. Mutie, F. N. (2023). Vegetation indices as indicators of drought, a remote sensing perspective: A case study of Narok County (Master's thesis, University of Nairobi). University of Nairobi eRepository. URL: <https://erepository.uonbi.ac.ke/handle/11295/164103>.
 12. Jiang, H., Wu, B., & Wang, X. (2010). Developing a novel topography-adjusted vegetation index (TAVI) for rugged areas. *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2075–2078. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5654222>.
 13. Decentralization.ua. (б. д.). *Новостворені громади*. URL: <https://decentralization.ua/newgromada/4092>.
 14. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. (б. д.). URL: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/>.
 15. SuperAgronom.com. (б. д.). Інтерактивна карта ґрунтів України. URL: <https://superagronom.com/karty/karta-gruntiv-ukrainy#x>.
 16. Геомар.land. (б. д.). *Карта ґрунтів України*. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/soil-1-950.html>.
 17. U.S. Geological Survey. (б. д.). *Landsat Normalized Difference Vegetation Index*. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>.
 18. EOS Data Analytics. (б. д.). *Вегетаційні індекси та їх застосування в агросекторі*. URL: <https://eos.com/uk/blog/vehetatsiini-indeksy/>.
 19. U.S. Geological Survey. (б. д.). *Landsat Enhanced Vegetation Index*. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index>.
 20. Soft.Farm. (2015, 1 травня). *Вегетаційні індекси NDVI, EVI, GNDVI, CVI, True color*. URL: <https://www.soft.farm/uk/blog/vegetacijni-indeksi-ndvi-evi-gndvi-cvi-true-color-140>.
 21. Esri. (б. д.). *EVI (Enhanced Vegetation Index)*. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/3.3/arcpy/image-analyst/evi.htm>.
 22. Sentinel Hub. (б. д.). *EVI2 (Enhanced Vegetation Index 2)*. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/evi2/>.
 23. EOS Data Analytics. (б. д.). *Вегетаційні індекси*. URL: <https://eos.com/uk/blog/vehetatsiini-indeksy/>.
 24. Esri. (б. д.). *SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)*. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/savi.htm>.
 25. U.S. Geological Survey. (б. д.). *Landsat Soil Adjusted Vegetation Index*. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-soil-adjusted-vegetation-index>.

Стаття надійшла до редакції журналу 19.01.2025