

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗАБУДОВИ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ SENTINEL-2

Т. В. Ільєнко

кандидат сільськогосподарських наук

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-5449>

Д. П. Васильєв

аспірант

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: freimaster.af@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0578-3539>

У зв'язку з посиленням урбанізаційних процесів і сезонною мінливістю ландшафтного покриву виникає потреба в точному та адаптивному методі ідентифікації забудованих територій за даними дистанційного зондування Землі. Класичні спектральні індекси, зокрема NDBI та NDVI, демонструють недостатню стабільність під час зміни сезонів, особливо в умовах снігового покриву або за наявності відкритого ґрунту. У межах цього дослідження було проведено порівняльний аналіз індексів NDBI, NDWI, модифікованого індексу $NDBI_{blue}$ та запропонованого авторами індексу EVI-S. Перевагою обраного підходу стало використання сезонних мультиспектральних знімків Sentinel-2, що дозволило оцінити ефективність індексів у чотирьох сезонних періодах. Кожен з індексів продемонстрував різний рівень чутливості до трьох типів об'єктів — забудови, води та ріллі. Найкращі результати для виділення урбанізованих територій зафіксовано в літній період, тоді як зимовий сезон виявився непридатним для класифікації через значну кількість хибнопозитивних сигналів, зумовлених сніговим покривом. Фінальним етапом дослідження стала класифікація методом Maximum Likelihood із використанням трьох індексних шарів, що дозволило отримати векторизовану модель забудови з високим ступенем узгодженості з реальними супутниковими зображеннями. Дослідження демонструє перспективність гібридного підходу, який поєднує сезонну чутливість спектральних індексів із методами автоматизованої класифікації, та підкреслює необхідність вдосконалення методів для зменшення похибок у класах, зокрема за наявності відкритого ґрунту або затінених ділянок.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, спектральні індекси, опустелювання, урбанізація, сезонність спектральних індексів.

ВСТУП

Урбанізація, починаючи з другої половини ХХ століття і до сьогодні, є одним із найвагоміших чинників трансформації ландшафтів. Вона призводить до змін мікроклімату, скорочення площ рослинного покриву, підвищення температури земної поверхні та порушення водного балансу. Методи дистанційного зондування Землі відіграють ключову роль у сучасних дослідженнях антропогенного впливу на довкілля, зокрема в моніторингу процесів опустелювання та урбанізації. Використання супутникових даних дозволяє провести оцінку тенденцій і темпів урбанізації місцевості, її динаміки та впливу розширення міських територій на довкілля.

У контексті екологічного моніторингу важливим завданням є оцінка впливу урбанізації на деградацію ґрунту. Для цього застосовуються

різноманітні підходи, зокрема використання спектральних індексів.

Виявлення закономірностей змін у міських і природних ландшафтах під впливом урбанізації — важливий етап визначення її ролі в процесах опустелювання та оцінки ефективності спектральних індексів для моніторингу антропогенних чинників змін довкілля.

Мета нашої роботи — здійснити порівняльний аналіз ефективності спектральних індексів NDBI, $NDBI_{blue}$ та запропонованого модифікованого вегетаційного індексу EVI-S, який, за попередніми дослідженнями, має підвищену чутливість до стану рослинності.

У дослідженні вперше пропонується перевірити можливість застосування EVI-S не лише для моніторингу рослинності, а й для виявлення інших ландшафтних класів (збудови та во-

дойм), оцінюючи його ефективність порівняно зі спеціалізованими індексами.

Зокрема, робота спрямована на:

- оцінку придатності індексу EVI-S для розмежування забудованих територій, полів і водойм;
- визначення оптимального сезонного періоду для максимально ефективного виділення забудови за допомогою аналізу сезонних гістограм спектральних індексів;
- порівняння ефективності EVI-S із традиційними індексами NDBI та $NDBI_{Blue}$ для виявлення забудови;

визначення можливостей застосування EVI-S як універсального інструмента дистанційного зондування для ідентифікації різних типів ландшафтних об'єктів (збудова, сільськогосподарські землі, водойми).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз сучасної наукової літератури свідчить про активне використання спектральних індексів для картографування урбанізованих територій, ідентифікації водних об'єктів і диференціації типів покриття. У фокусі дослідників — як спеціалізовані індекси ($NDBI$, $NDBI_{Blue}$, $NDWI$) [1; 2], так і адаптація вегетаційних індексів ($NDVI$, $SAVI$, EVI) для розв'язання задач, не пов'язаних безпосередньо з рослинністю. У цьому контексті особливу увагу привертають роботи, які поєднують кілька індексів або розширюють їхню сферу використання. Це створює методологічну основу для перевірки ефективності EVI-S — модифікованого вегетаційного індексу, який запропоновано в нашому дослідженні як засіб виявлення різних класів покриття.

У дослідженні G. S. Santecchia, G. N. Revollo Sarmiento, S. A. Genchi та ін. проведено глибоку оцінку трьох варіантів $NDWI$ для виявлення мілководних водойм на прикладі озера Ла-Салада (Аргентина). Результати засвідчили значну варіабельність індексу залежно від супутника (Landsat-8 чи Sentinel-2) та формули. Аналіз виявив систематичну нестабільність варіацій $NDWI$ у складних умовах, таких як мілководдя та каламутність, що підвищують ризики хибної класифікації [3].

Подібні обмеження підтверджуються в роботі [4], де порівнювали індекс $NDWI$ з емпіричними даними щодо водних ресурсів у Махараштрі (Індія). Встановлено розбіжності між супутниковими та фактичними даними, зумовлені сезонністю, вегетаційним покривом і роздільною здатністю.

Ці роботи підкреслюють необхідність критичної оцінки $NDWI$ та обґрунтовують доціль-

ність перевірки альтернативних індексів для задач диференціації водних об'єктів.

N. Drešković, S. Đug та M. Osmanović у своїй роботі продемонстрували застосування $NDVI$ і $NDBI$ для аналізу міських теплових островів у Сараєво. Виявлено просторову кореляцію між температурою поверхні суші та індексами, причому $NDBI$ краще фіксує розподіл урбанізованих площ [5].

Робота H. Hashim, Z. Abd Latif та N. A. Adnan висвітлює ефективність $NDVI$ у поєднанні з супутниковими зображеннями високої роздільної здатності. У дослідженні представлено виокремлення міської рослинності та зон без рослинного покриття, які можуть відповідати забудованим територіям. Класифікація досягла точності 70,7%, що свідчить про перспективність застосування вегетаційних індексів у задачах аналізу землекористування та земельного покриття (LULC) [6].

У дослідженні I. Loukili, A. Laamrani, M. El Ghorfi та ін. [7] індекси $NDVI$, $NDBI$ і $NDWI$ використано для моніторингу трансформацій навколо великої шахти. Робота підкреслює ефективність поєднання класичних індексів у часовому аналізі змін забудови та сільськогосподарських угідь.

K. Rouibah та M. Belabbas довели, що комбінація $NDVI$ з індексами ґрунту ($NDTI$, BSI) дає змогу надійно виявляти міські зони в умовах напівпосушливого клімату [8].

Автори дослідження [9] використали комбінації п'яти індексів ($NDVI$, $SAVI$, $NDWI$, $MNDWI$, $NDBI$) та продемонстрували, що комбінація $NDBI$ та $MNDWI$ забезпечує найвищу точність (90,3%) у виявленні забудови. Ця робота підтверджує ефективність трансформаційних підходів.

У роботі Y. Zheng, L. Tang та H. Wang представлено індекс $ENUI$, який об'єднує дані нічного освітлення (NPP-VIIRS) з $NDVI$, $NDWI$, $NDBI$. Запропонований індекс забезпечив точність у 93,56%, що свідчить про потенціал гібридних індексів для класифікації міських ландшафтів [10].

У роботі [11] запропоновано індекс штучної поверхні (ASI), який у поєднанні з RRI досяг найвищої точності виявлення сільської забудови серед порівнюваних індексів.

P. Lynch, L. Blesius і E. Hines випробували індекси NBI , $BAEI$ та $NDCCI$ для деталізації структури міської забудови. Представлені результати засвідчили перевагу мультиіндексного підходу [12].

Розглянуті дослідження демонструють широке практичне використання індексів $NDVI$, $NDWI$, $NDBI$ та їхніх модифікацій для виявлення урбанізованих і водних територій. Індекси

NDVI та SAVI, хоча й традиційно використовуються для оцінки рослинності, демонструють ефективність і для виявлення інших об'єктів ландшафту. Водночас застосування комбінованих підходів, а також нових формул — таких як ENUI, ASI або NDCCI — значно підвищує точність класифікації, особливо в складних міських і природних середовищах.

Слід відзначити, що аналіз сезонної динаміки значень індексів та їхньої спектральної стабільності для різних кліматичних умов досі залишається недостатньо розробленим у науковій літературі.

У цьому контексті запропоноване в нашому дослідженні тестування індексу EVI-S, який є модифікованим вегетаційним індексом із потенціалом відсікання як урбанізованих територій, так і водних об'єктів, дозволяє заповнити виявлену наукову нішу. Врахування спектральної чутливості в поєднанні з відносною простотою застосування та здатністю адаптуватися до сезонних змін робить цей підхід перспективним з огляду на обмеження, виявлені в попередніх роботах.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведено на території Феодосійської об'єднаної територіальної громади, розташованій в Обухівському районі Київської області. Громада охоплює вісім населених пунктів, а її площа становить майже 115 км² [13]. Територія належить до Лісостепової зони України і здебільшого характеризується хвилястим рівнинним рельєфом. Поєднання природних ландшафтів з аграрними угіддями та різновидами забудови (садибна, багатоквартирна, виробнича) робить цю територію репрезентативною для вивчення процесів урбанізації.

Клімат помірний, зі середньорічною температурою повітря в межах +7...+9°C та середньорічною кількістю опадів приблизно 500–600 мм [14]. Такі умови сприяють активному розвитку як природних, так і антропогенно трансформованих екосистем. Наявні водойми забезпечують умови для перевірки можливостей диференціації різних типів об'єктів.

Дослідження виконано з використанням мультиспектральних супутникових знімків Sentinel-2 з атмосферною корекцією. Вибір платформи зумовлений наявністю відповідних спектральних каналів для розрахунку індексів і достатньою роздільною здатністю. Обробку знімків здійснено в програмному середовищі QGIS з використанням модуля Semi-Automatic Classification Plugin (SCP).

Для аналізу розподілу значень індексів використано гістограми, побудовані за допомо-

гою Python-скрипту, з використанням бібліотек rasterio, numpy та matplotlib.

Дослідження передбачає побудову шарів спектральних індексів для чотирьох різних пір року з подальшим виокремленням контрольних ділянок трьох типів: забудова, поля та водойми. Для кожного типу розраховуються гістограми розподілу значень індексів із метою визначення характерних діапазонів та оптимальних порогів для диференціації. Після аналізу сезонної динаміки здійснюється векторизація забудованих ділянок, що мають типові спектральні ознаки за кожним індексом.

У підсумковій частині роботи виконано порівняння ефективності EVI-S, UI, NDBI у виокремленні забудови за точністю та здатністю уникати накладання на інші типи об'єктів. За векторними шарами здійснюється розрахунок площі забудованих територій.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Різноманітні спектральні індекси посіли важливе місце в задачах ідентифікації різних типів покриття та об'єктів ландшафтів. Слід зауважити, що ефективність цих індексів значною мірою залежить від типу ландшафту, спектральних властивостей поверхні та атмосферних умов.

Нормалізований диференційний індекс забудови (NDBI) є одним із найбільш широко застосовуваних індексів для ідентифікації урбанізованих територій за даними ДЗЗ [15]. Він був запропонований J. Zha, J. Gao та S. Ni у 2003 році. Метою його розроблення було ефективне виявлення урбанізованих територій за допомогою мультиспектральних супутникових зображень, зокрема Landsat [16]. Його формула має вигляд:

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}, \quad (1)$$

де *SWIR* — відбиття в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні; *NIR* — відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні [15].

З формули (1) видно, що індекс базується на характерних спектральних властивостях забудованих територій, які мають вищу відбивну здатність у *SWIR* та нижчу в *NIR* порівняно з природними об'єктами та рослинністю. Високі значення NDBI свідчать про наявність забудови, тоді як низькі значення відповідають рослинності або відкритому ґрунту. Значення індексу коливаються від -1 до 1.

Нормалізований диференційний водний індекс (NDWI) використовується для виявлення водних об'єктів та оцінки вологості поверхні. Індекс було запропоновано McFeeters у 1996

році для покращення контрасту між водою та іншими типами покриття, зокрема рослинністю та міськими структурами [16]. NDWI розраховується за формулою:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}, \quad (2)$$

де *GREEN* — відбиття в зеленому спектральному діапазоні; *NIR* — відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні [15; 17].

Водні об'єкти зазвичай мають додатні значення, тоді як суха поверхня та рослинність — від'ємні. Слід відзначити чутливість NDWI до типу водойми та наявності суспензій у воді, тому результати можуть змінюватися залежно від прозорості та стану водойм.

Модифікований нормалізований індекс забудови на основі синього та ближнього інфрачервоного каналів $NDBI_{Blue}$ є версією класичного NDBI, що використовує спектральні відбиття в синьому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Формула розрахунку має вигляд:

$$NDBI_{Blue} = \frac{BLUE - NIR}{BLUE + NIR}, \quad (3)$$

де *BLUE* — відбиття в синьому спектральному діапазоні; *NIR* — відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні.

Цей індекс використовує підхід, аналогічний до класичного NDBI (який ґрунтується на SWIR та NIR), однак замість SWIR-діапазону застосовується синій канал.

$NDBI_{Blue}$ також дозволяє виділяти забудовані території, використовуючи контраст між світлими поверхнями забудови та рослинним покривом. Будівлі та автошляхи мають високу відбивну здатність у синьому діапазоні, тоді як рослинність інтенсивно відбиває в NIR діапазоні.

Ідея розрахунку подібних модифікованих індексів на основі Blue- та NIR- каналів згадується в роботі А. Javed, Q. Cheng та ін., які пропонують альтернативні урбаністичні індекси з використанням обмежених спектральних діапазонів [18].

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

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

де *L* — коефіцієнт корекції впливу ґрунту, що забезпечує мінімізацію його ефекту на відбиття спектру.

EVI-S поєднує переваги SAVI та EVI2, що робить його придатним для аналізу рослинного покриву в умовах, де є значний вплив ґрунтового фону.

Хід виконання аналізу спектральних індексів у QGIS. Для аналізу урбанізації територій було використано супутникові знімки Sentinel-2 (L2A) з атмосферною корекцією (Level-2A) та відсутністю хмарного покриву (0% хмарності), отримані для чотирьох пір року.

Знімки було завантажено за допомогою модуля SCP у середовищі QGIS та підготовано до розрахунку спектральних індексів.

У проєкт QGIS було додано растрові знімки Sentinel: канали B2, B3, B4, B8, B11 за 17 січня 2024, 9 квітня 2024, 15 липня 2024 та 21 жовтня 2024.

Нижче наведено відповідність номерів каналів частотним діапазонам:

Канал 2 — Синій;

Канал 3 — Зелений;

Канал 4 — Червоний;

Канал 8 — NIR (Near-Infrared — ближній інфрачервоний діапазон);

Канал 11 — SWIR (Short-Wave Infrared — короткохвильовий інфрачервоний діапазон).

За допомогою інструмента Clip Raster by Mask Layer растри були обрізані по полігону досліджуваної ділянки.

Розрахунок спектральних індексів.

Далі під час виконання роботи обчислено по чотири спектральні індекси для кожної з пір року за допомогою Raster Calculator у QGIS згідно з формулою:

$$(B02 - B08) / (B02 + B08) @NDBI_{Blue}$$

$$(B11 - B08) / (B11 + B08) @NDBI$$

$$(B03 - B08) / (B03 + B08) @NDWI$$

$$2.5 \times (B08 \times B04) \times (1 + 0.5) / (B08 + 2.4 \times B04 + 0.5) @EVI-S$$

Візуалізація та графічний аналіз.

Після обчислення індексів проведено візуалізацію результатів. Усі індексні шари збережено у форматі GeoTIFF для подальшого аналізу. Виконано зміну налаштувань графічного відображення в одноканальний псевдоколір відповідно до значень індексів для кращого візуального сприйняття:

- — низькі значення індексу;
- — помірно низькі;
- — середні;
- — помірно високі;
- — високі значення.

На рис. 1–4 наведено згруповані растрові шари за різні пори року для кожного індексу.

Усі індекси демонструють яскраво виражену сезонність, зумовлену змінами стану

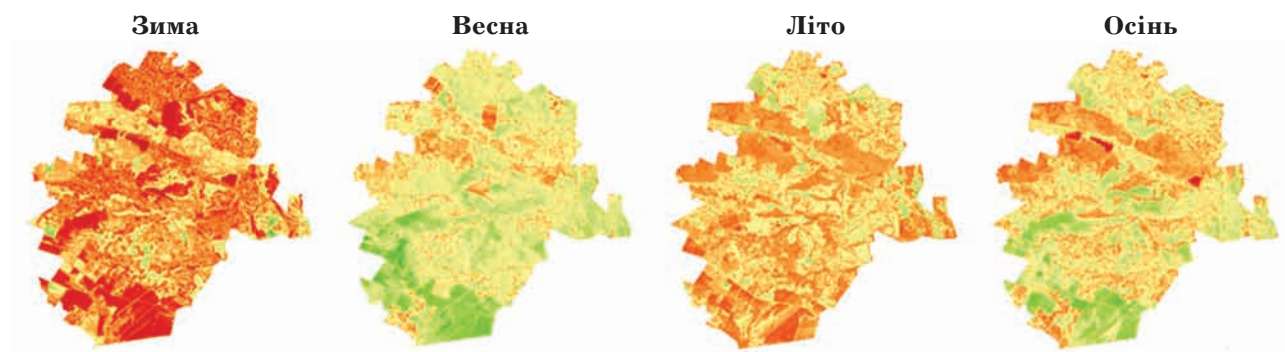


Рис. 1. Растрові шари індексу NDBI для чотирьох пір року

Джерело: розроблено авторами.

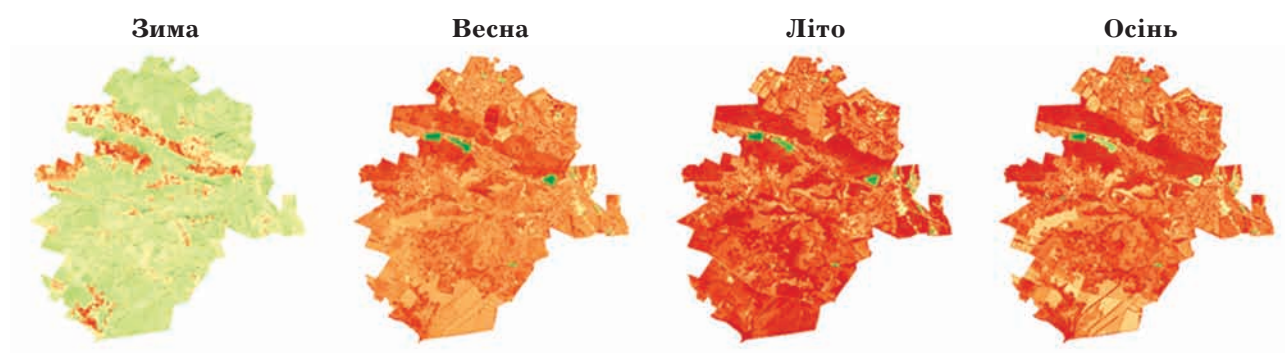


Рис. 2. Растрові шари індексу NDWI для чотирьох пір року

Джерело: розроблено авторами.

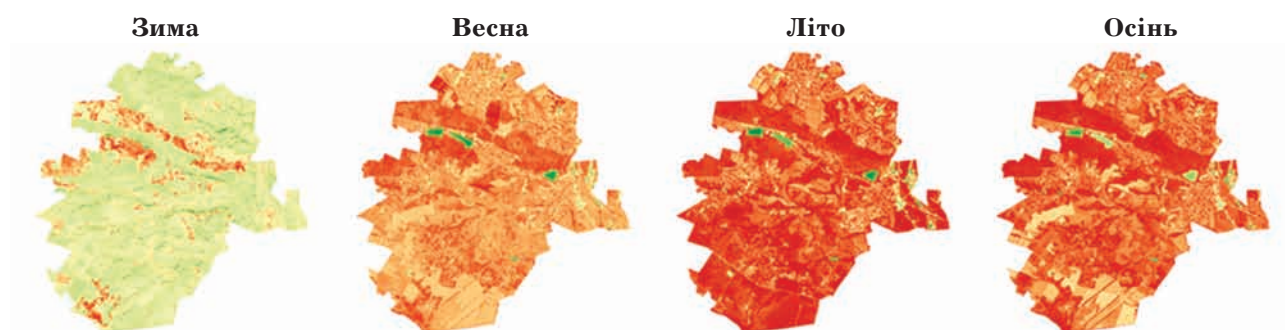


Рис. 3. Растрові шари індексу NDBIBlue для чотирьох пір року

Джерело: розроблено авторами.

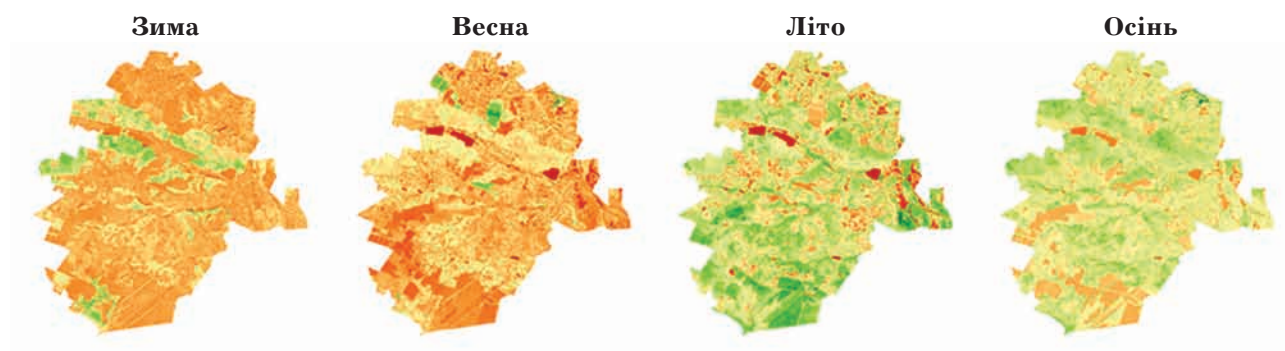


Рис. 4. Растрові шари індексу EVI-S для чотирьох пір року

Джерело: розроблено авторами.

рослинності, наявністю снігового покриву та відкритого ґрунту.

Загальною рисою для всіх індексів є те, що в літній період вони забезпечують найкращу інформативність завдяки чіткому спектральному розділенню між рослинністю, водою та урбанізованими територіями. Усі індекси виявляють чутливість до відкритого ґрунту навесні та восени, що ускладнює класифікацію забудови через спектральну подібність із штучними покриттями. Сніговий покрив у зимовий період унеможливує чітку класифікацію за значеннями індексів.

NDWI стабільно виявляє водойми незалежно від сезону, окрім зимового. $NDBI_{Blue}$ демонструє високу чутливість до водних об'єктів. EVI-S демонструє здатність ефективно диференціювати об'єкти ландшафту, незважаючи

на інверсію значень, порівняно з іншими індексами.

Для більш детального аналізу розподілу значень індексів виділено тестові ділянки з різними типами об'єктів ландшафту.

На *рис. 5* наведено тестові ділянки в межах дослідного полігону з використанням базової карти OpenStreetMap і збільшених фрагментів Google Satellite Map. За векторними шарами тестових ділянок було вирізано фрагменти кожного з растрів індексів, отриманих раніше. Таким чином, було отримано по три фрагменти кожного індексу для кожної з обраних дат у форматі GeoTIFF.

Для зручності візуалізації та накладення діаграм було розроблено Python-скрипт для побудови гістограм розподілу значень для растрів, аналогічних вбудованій функції QGIS. З метою



Рис. 5. Векторні шари тестових ділянок

Джерело: створено авторами з використанням даних OpenStreetMap і супутникових зображень Google Maps.

виділення забудови проаналізовано розподіл значень індексу для трьох основних класів покриття: забудова (“build”), поле (“field”) та водойми (“lake”). Основним аналітичним підходом є оцінка характеру гістограм, зокрема ступеня сепарації між класом забудови та іншими типами покриття.

Значущими є мінімальне перекриття розподілів і максимальна віддаленість піків гістограм: перекриття призведе до помилкової класифікації. Крім того, важливим є значення частоти: чим воно вище і чіткіше виражене, тим більше пікселів мають подібні значення, що свідчить про стабільність індексу в межах класу забудови.

З гістограм індексу NDBI видно, що для кожного із сезонів спостерігається значне перекриття розподілу значень забудови з полем. Навіть у літній період, коли очікується найбільший контраст, значення класу “field” суттєво накладаються на забудову та переважають за частотою, що істотно ускладнює формування чіткого порогового значення (рис. 6).

Сезонні гістограми для індексу NDWI свідчать про його високу чутливість до водних об'єктів і чітке виділення класу “lake”, крім зимового сезону. Водночас класи “build” та “field” суттєво перекриваються між собою та мають значення в негативному діапазоні, що ускладнює їхню диференціацію за цим індексом (рис. 7).

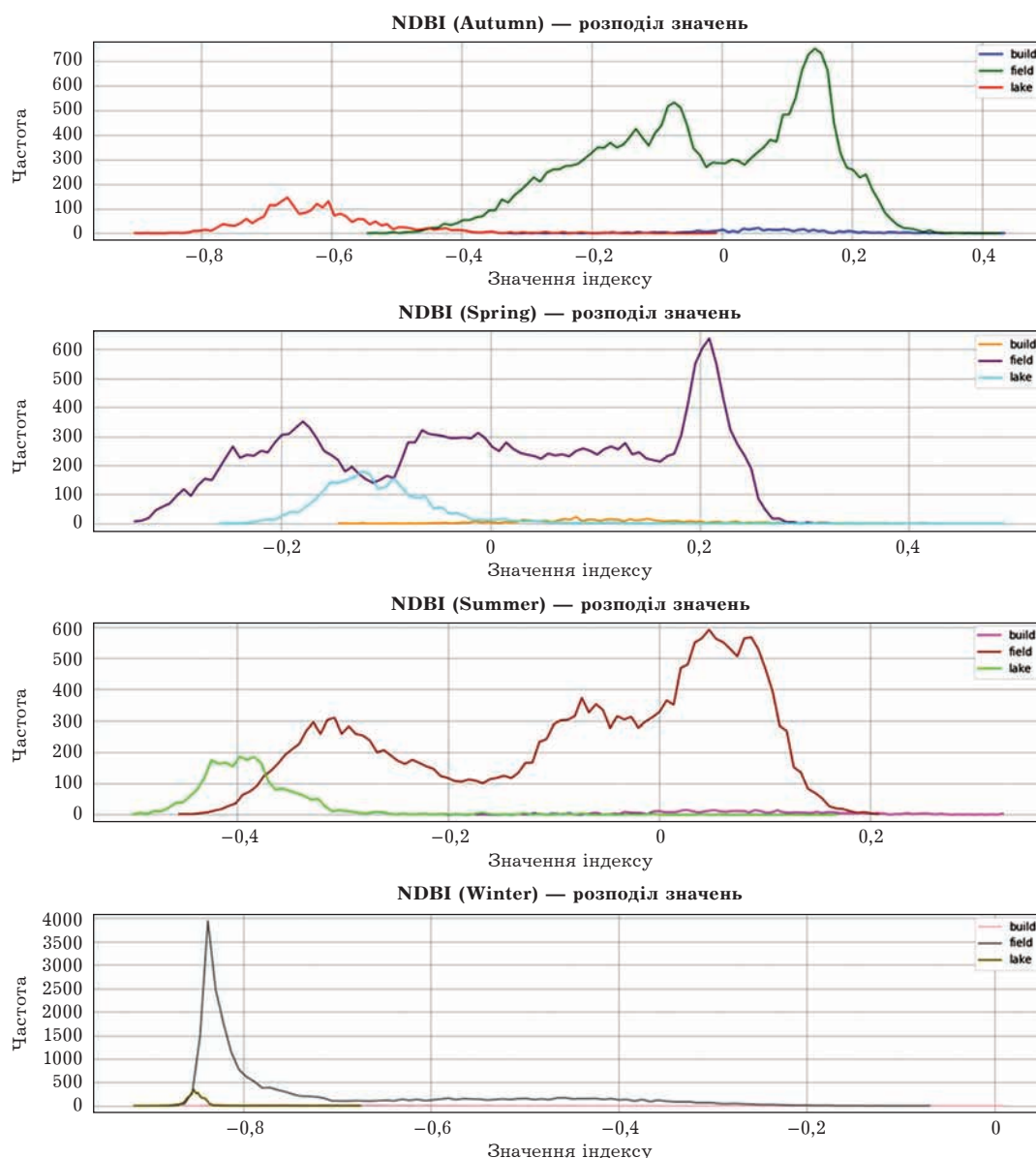


Рис. 6. Сезонна варіативність індексних значень NDBI для тестових ділянок за порами року
Джерело: побудовано авторами.

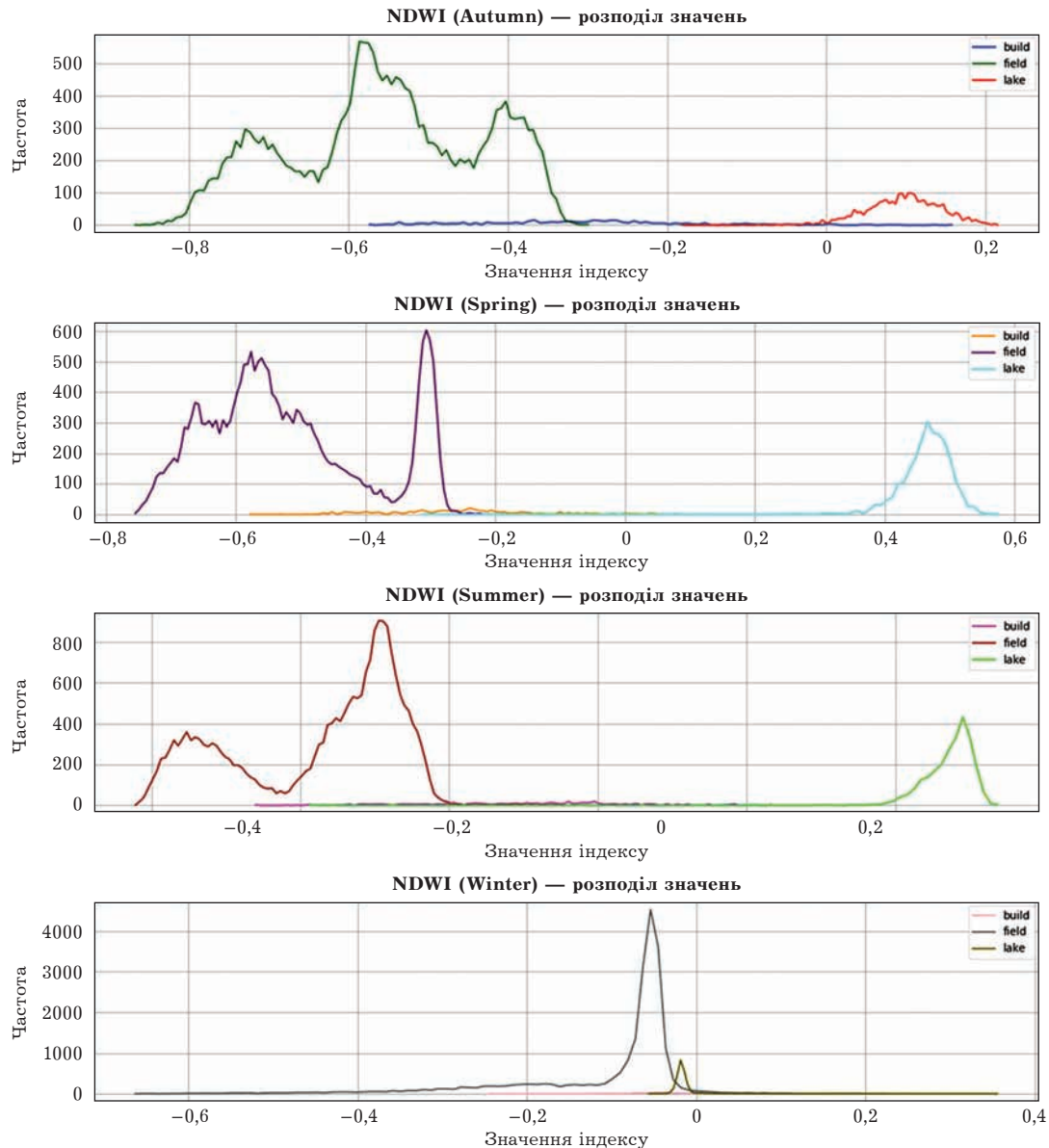


Рис. 7. Сезонна варіативність індексних значень NDWI для тестових ділянок за порами року
Джерело: побудовано авторами.

NDBI_{Blue}, згідно з гістограмами за чотири сезони, демонструє високу чутливість до водних об'єктів і частково — до об'єктів класу "field". У всіх сезонах пік для класу "lake" чітко зосереджений у позитивних значеннях, із помірною амплітудою та слабким перекриттям з іншими класами, що забезпечує ефективну диференціацію водойм. Лише в літній період спостерігається найкращий розподіл значень для "build", "field" і "lake", що дозволяє говорити про найвищу ефективність цього індексу в теплу пору року (див. рис. 8).

Дані гістограм індексу EVI-S для всіх сезонів свідчать про його порівняно високу стабільність у розрізненні основних класів по-

криву: забудова, поле, водойми. У літній сезон індекс демонструє найкращий розподіл значень трьох класів: пік забудови локалізується в зоні від'ємних або низьких значень, тоді як клас "field" займає середній діапазон, а водойми — значення, наближені до нуля (див. рис. 9).

Загалом, EVI-S є найстабільнішим серед розглянутих індексів і забезпечує хорошу класифікаційну чіткість у всіх сезонах, з особливою ефективністю влітку, коли контраст між класами досягає максимуму. Це дозволяє рекомендувати його для виявлення забудови незалежно від сезону з коригуванням порогових значень відповідно до сезонної динаміки.

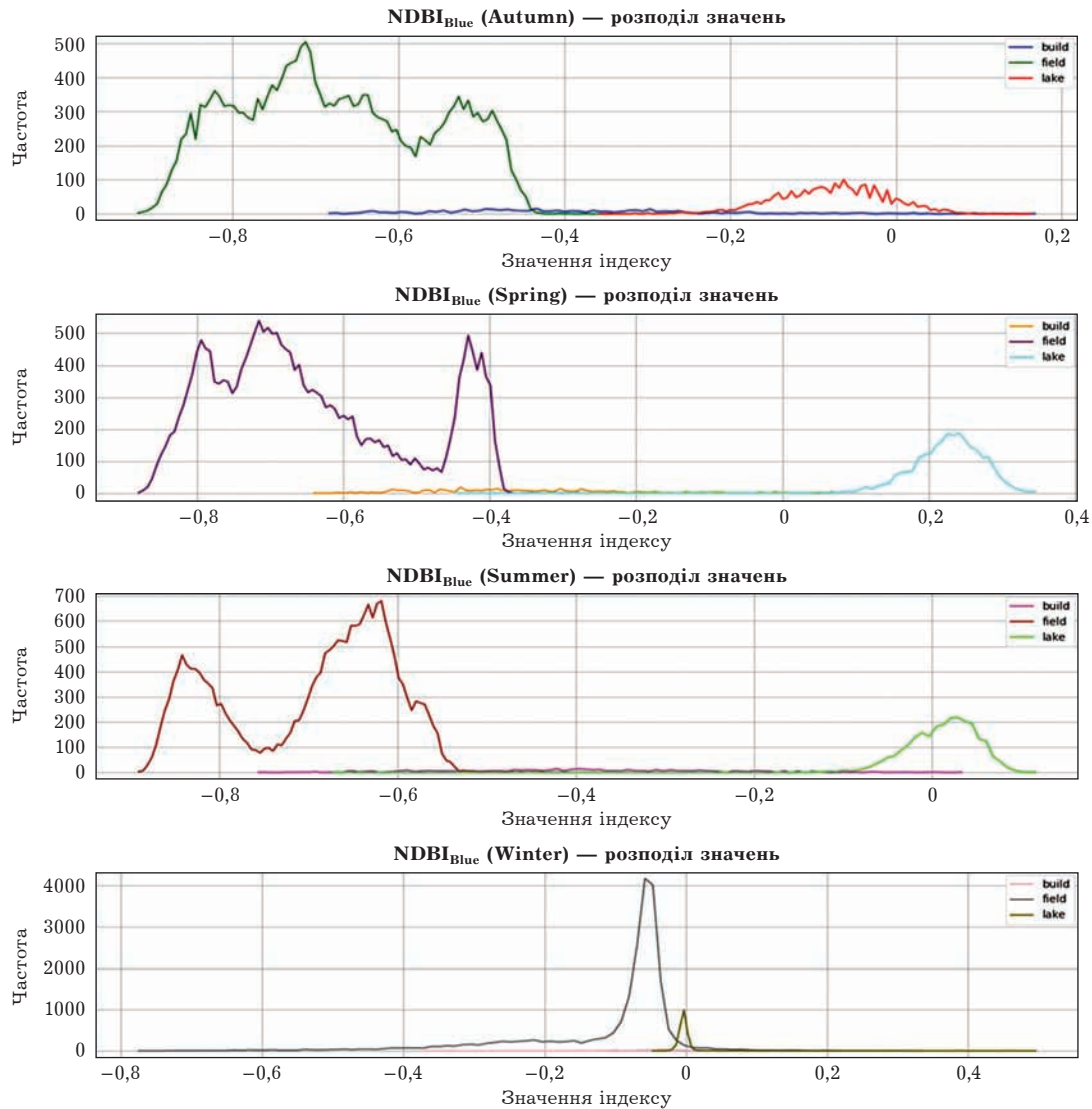


Рис. 8. Сезонна варіативність індексних значень $NDBI_{Blue}$ для тестових ділянок за порами року
Джерело: побудовано авторами.

За результатами аналізу виявлено, що розподіл значень для виокремлення забудови влітку є найбільш сприятливим. За даними графіків за літній період визначено порогові значення для класу забудови (табл. 1).

За отриманими значеннями шляхом виведення відповідних формул для SCP зрізано пікселі класів “field” та “lake” для подальшо-

го перетворення растрів у вектор. Оскільки для $NDBI$ присутнє велике перекриття класом “field”, мінімальне значення прийнято за “0”, що означає відсутність забудови.

У результаті проведеної обробки було сформовано векторні шари для кожного з індексів, що репрезентують ділянки забудови. Початково були сформовані растрові шари ін-

Таблиця 1

Порогові значення індексів для класу “build” за літній період

Значення	NDBI	NDWI	$NDBI_{Blue}$	EVI-S
Min	0	-0.38	-0.5	0.06
Max	0.32	0.03	-0.15	0.38

Джерело: сформовано авторами.

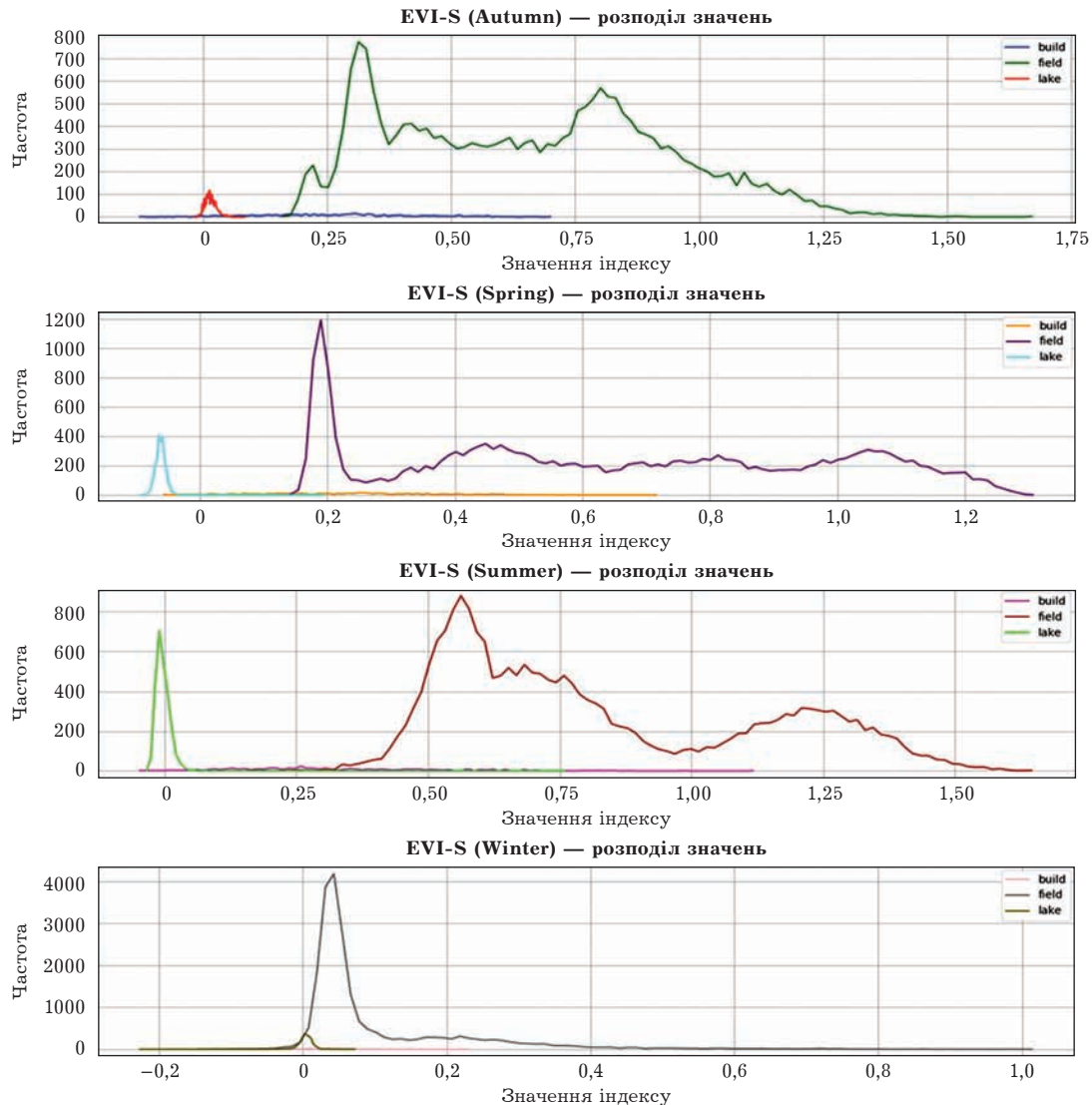


Рис. 9. Сезонна варіативність індексних значень EVI-S для тестових ділянок за порами року
Джерело: створено авторами.

дексів (EVI-S, NDWI, NDBI, NDBI_{Blue}), після чого для кожного з них було застосовано порогову сегментацію.

Відповідно до визначених діапазонів значень індексів, що найбільш імовірно відповідають класу “build”, значення пікселів було приведено до двійкового формату: 1 — значення в межах діапазону класу “build”; 0 — усі інші пікселі.

Для бінарних растрових зображень, отриманих у результаті, здійснено фільтрацію за значенням “1”. Таким чином, отримано полігони, які репрезентують контури урбанізованих територій на основі кожного окремого індексу (див. рис. 10).

Після порогової фільтрації об’єктів векторних шарів було виявлено помітні відмінності в площах, отриманих із різних індексів.

З огляду на це, подальше застосування класифікації методом Maximum Likelihood стало логічним кроком для отримання більш достовірних результатів із метою подальшого порівняння. Цей метод дозволяє враховувати розподіл значень усіх обраних індексів одночасно, оцінюючи ймовірність належності пікселя до певного класу на основі багатовимірного статистичного аналізу.

Для побудови класифікаційної моделі обрано три індекси:

- EVI-S — як модифікований вегетаційний індекс, що демонструє стабільну реакцію на відкриті ґрунти та рослинний покрив;
- NDWI — ефективно виявляє водні об’єкти, чітко розмежовуючи їх від інших типів об’єктів;
- NDBI_{Blue} — модифікований індекс, який краще за класичний NDBI, згідно з рис. 10, за-

EVI-S

NDBI_{Blue}

NDWI

NDBI

Рис. 10. Результати векторизації зон забудови на основі індексів EVI-S, NDWI, NDBI, NDBI_{Blue}
Джерело: створено авторами.

Вектори
індексів

Класифіковане
зображення

Супутникове зображення
Google

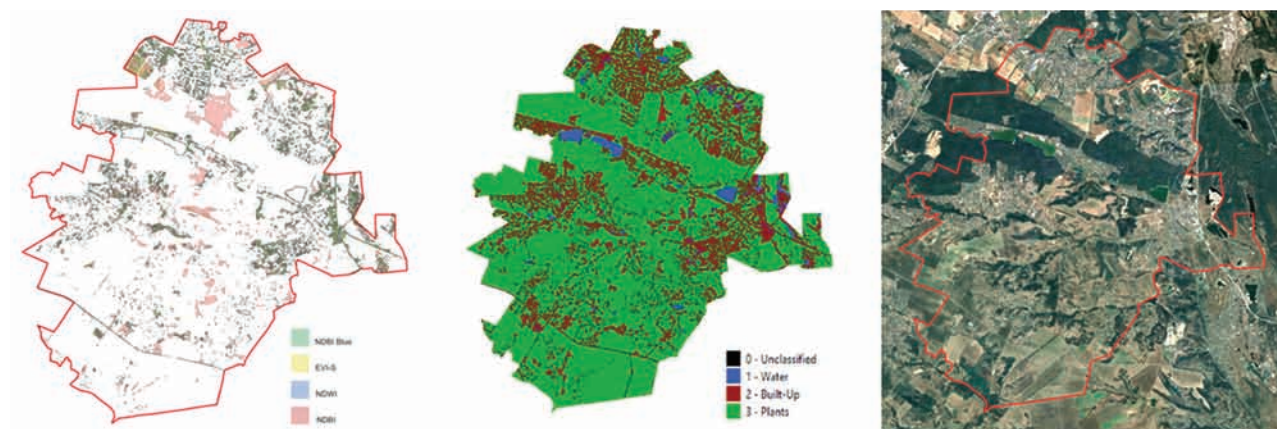


Рис. 11. Візуалізація результатів індексного аналізу, класифікації та супутникового підтвердження урбанізованих територій

Джерело: створено авторами.

Таблиця 2

Значення площі забудови за векторними шарами, га

Загальна площа	Класифікація	NDBI	NDWI	NDBI _{Blue}	EVI-S
11506,76	2277,54	1229,59	603,79	689,01	476,92

Джерело: сформовано авторами.

безпечує виявлення забудованих територій, маючи меншу чутливість до полів і ґрунтів.

Три обрані растри індексів забезпечують цільове охоплення основних класів об'єктів: вода, рослинність / відкритий ґрунт, забудова. Відповідно, класифікація на основі растрів забезпечує необхідну точність результатів.

Зображення результату накладення векторів чотирьох індексів із класом забудови, растру класифікованих об'єктів та знімку Google Satellite наведено на *рис. 11*.

На *рис. 11* для порівняння наведено результат накладення векторних шарів, отриманих за індексами (ліворуч), результат класифікації методом Maximum Likelihood на основі індексів EVI-S, NDWI та NDBI_{Blue} (у центрі) і супутникове зображення Google (праворуч). Червоний контур позначає межі досліджуваної території.

На наступному етапі дослідження зображення, отримане в результаті класифікації, було перетворено з растрового формату у векторний.

Після векторизації виконано фільтрацію за значенням класу 2, який у межах класифікації відповідає урбанізованим територіям (*рис. 12*).

На основі цих векторних шарів було розраховано площі забудованих територій для кожного шару, отриманого з відповідного індексу (*табл. 2*). Це дозволяє кількісно порівняти ефективність індексів у виявленні забудови, визначити їхню чутливість до урбанізованих об'єктів та зіставити результати з даними візуального спостереження та класифікації.

Таблиця з наведеними площами забудови дозволяє оцінити ефективність використання індексів у виявленні урбанізованих територій. Кількісна оцінка допомагає обґрунтувати вибір найкращого індексу для подальшого аналізу.

ВИСНОВКИ

Наше дослідження засвідчило як потенціал, так і обмеження сучасних спектральних індексів для виявлення урбанізованих територій. Аналіз сезонних розподілів значень індексів NDWI, NDBI, NDBI_{Blue} та запропонованого модифікованого індексу EVI-S дозволив виявити

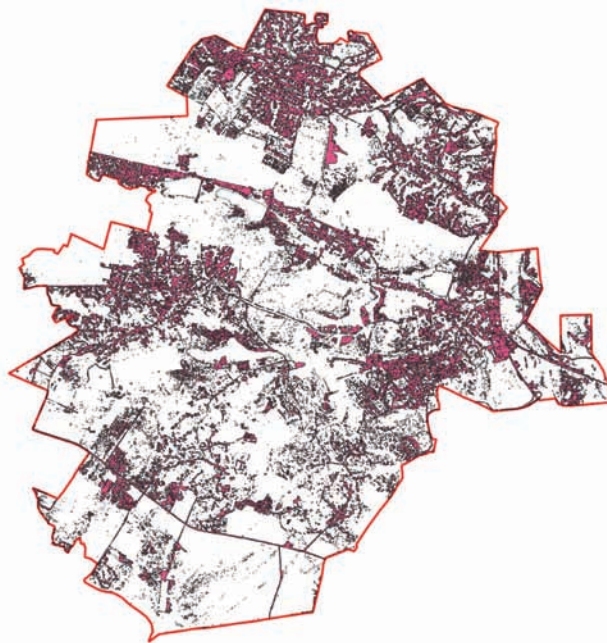


Рис. 12. Векторизований шар класифікованих об'єктів із фільтром по забудові

Джерело: створено авторами.

як загальні закономірності, так і критичні обмеження їхнього застосування.

Насамперед знімки за зимовий період виявилися непридатними для використання жодного з досліджуваних індексів через наявність снігового покриву, який унеможливорює точну класифікацію та ставить під сумнів доцільність обробки зимових знімків для виявлення урбанізованих об'єктів.

У літній період спектральний контраст між рослинністю, водними об'єктами та забудовою є найвиразнішим. Проте, як показав аналіз гістограм, жоден з індексів не забезпечує абсолютно чіткої сегментації забудованих територій. Навіть ті індекси, розроблені для таких задач (зокрема NDBI), виявляють суттєві похибки. Модифікований індекс NDBI_{Blue} показав дещо кращі результати, але й він має свої недоліки.

Застосування класифікації методом Maximum Likelihood із використанням трьох індексних растрів (EVI-S, NDWI, NDBI_{Blue}) дозволило компенсувати індивідуальні слабкі сторони

кожного з індексів. Попри наявність похибок, результат класифікації показав більшу площу забудованих територій порівняно з попередніми векторними результатами. Це частково пояснюється включенням прилеглих територій (дворів, доріг, майданчиків), які функціонально пов'язані з урбанізованим середовищем. Хоча така генералізація не завжди є точною в межах конкретного пікселя, з практичної точки зору це забезпечує більш цілісне відображення фактичної забудови.

Отже, різноманітні методи автоматичної класифікації виявляються більш перспективними, особливо за умови попереднього ретельного підбору індексів, які відображають різні аспекти ландшафтного покриття. Водночас слід враховувати обмеження — похибки через сезонні умови, змішані пікселі та недосконалість спектральної

реакції деяких об'єктів (наприклад, новобудов або ділянок із тимчасовими покриттями).

У подальших дослідженнях доцільно розглядати не лише вдосконалення комбінацій індексів, але й використання додаткових джерел даних — таких як нічне освітлення, підвищення просторової роздільної здатності або машинне навчання на основі тренувальних векторів. Перспективним також є поєднання класифікації з методами семантичного сегментування, що дозволяє враховувати просторовий контекст і морфологічні особливості забудови.

Результати дослідження підтверджують, що ефективне виявлення забудови потребує поєднання індексного та класифікаційного підходів із врахуванням сезонної придатності даних і структурної складності урбанізованого середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. NDBI. *ArcGIS Pro*. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/ndbi.htm> (accessed: 07.06.2025).
2. Index Formula List. *RIndCalc documentation*. URL: <https://rindcalc.readthedocs.io/en/latest/Index%20Formula%20List.html> (accessed: 07.06.2025).
3. Santecchia G. S., Revollo Sarmiento G. N., Genchi S. A. et al. Assessment of Landsat-8 and Sentinel-2 water indices: A case study in the southwest of the Buenos Aires Province (Argentina). *Journal of Imaging*. 2023. Vol. 9, iss. 9. Article 186. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging9090186>
4. Bhangale U., More S., Shaikh T., Patil S. Analysis of surface water resources using Sentinel-2 imagery. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 171. P. 2645–2654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.287>
5. Drešković N., Đug S., Osmanović M. NDVI and NDBI indexes as indicators of the creation of urban heat islands in the Sarajevo basin. *Geographica Pannonica*. 2024. Vol. 28, no. 1. P. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.5937/gp28-48216>
6. Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N. A. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2023. Vol. XLII-4/W16. P. 237–241. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019>
7. Loukili I., Laamrani A., El Ghorfi M., El Moutak S., Ghafiri A. Monitoring land changes at an open mine site using remote sensing and multi-spectral indices. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41845>
8. Rouibah K., Belabbas M. Applying multi-index approach from Sentinel-2 imagery to extract urban area in dry season (semi-arid land in North East Algeria). *Revista de Teledetección*. 2020. No. 56. P. 89–101. DOI: <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13787>
9. Hidayati I. N., Suharyadi R., Danoedoro P. Developing an extraction method of urban built-up area based on remote sensing imagery transformation index. *Forum Geografi*. 2018. Vol. 32, no. 1. P. 96–108. DOI: <https://doi.org/10.23917/forgeo.v32i1.5907>
10. Zheng Y., Tang L., Wang H. An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 328. 129488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129488>
11. Zhu W., Yuan C., Tian Y. et al. A new high-resolution rural built-up land extraction method based on artificial surface index with short-wave infrared downscaling. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No 7. 1126. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16071126>
12. Lynch P., Blesius L., Hines E. Classification of urban area using multispectral indices for urban planning. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 15. 2503. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12152503>
13. Феодосіївська територіальна громада. Портал “Децентралізація”. URL: <https://decentralization.ua/newgromada/4092> (дата звернення: 07.06.2025).
14. Кліматичні дані по Києву. Центральна геофізична обсерваторія ім. Бориса Срезневського. URL: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/> (дата звернення: 07.06.2025).
15. Why does NDVI, NDBI, NDWI Ranges From -1 to 1? *GIS Resources*. URL: <https://gisresources.com/ndvi-ndbi-ndwi-ranges-1-1/> (accessed: 07.06.2025).
16. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24 (3). P. 583–594. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
17. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water

features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, no. 7. P. 1425–1432. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

18. Javed A., Cheng Q., Peng H., Altan O., Li Y., Ara I., Huq M. E., Ali Y., Saleem N. Review of spectral indices for urban remote sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2021. Vol. 87, no. 7. P. 513–524. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.87.7.513>

COMPARATIVE ANALYSIS OF SPECTRAL INDICES FOR BUILDING DETECTION BASED ON SENTINEL-2 SATELLITE IMAGES

Iliencko T.

Candidate of Agricultural Sciences

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-5449>

Vasiliev D.

Postgraduate student

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: freimaster.af@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0578-3539>

As a result of the accelerated processes of urbanization and the seasonal variations in the landscape cover, adaptive and precise methods for built-up area identification from space are necessary. The conventional spectral indices, majorly NDBI and NDVI, show inadequate stability over seasonal variations particularly when snow is present and where open soil exists. Within this study, a comparison between NDBI, NDWI, modified NDBI_{Blue}, and EVI-S indices proposed by the authors is made. Seasonal multispectral Sentinel-2 images were chosen to test them. This gives an opportunity to evaluate these indices' effectiveness in four seasonal periods. According to the three types of categories — building water areas and arable land each index gave out varied sensitivity levels. The optimum results for the discrimination of urbanized areas were obtained during summer, and winter proved to be an inappropriate season for classification since there is a very high number of false positives due to snow coverage. The last step of this work was classification with Maximum Likelihood using three index layers, building a vectorized model of the structures with great fidelity to what is seen in the satellite image. This study can initiate trust in a hybrid approach that takes seasonal sensitivity from spectral indices and hands over to automated methods of classification while it points out that there is constant need that methods should be advanced having errors within classes reduced particularly when open ground or shaded areas are present.

Keywords: remote sensing, spectral indices, desertification, urbanization, seasonal variability of spectral indices.

REFERENCES

1. ArcGIS Pro. (n.d.). *Normalized Difference Built-up Index (NDBI)*. Retrieved from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/ndbi.htm>
2. RIndCalc documentation. (n.d.). *Index Formula List*. Retrieved from <https://rindcalc.readthedocs.io/en/latest/Index%20Formula%20List.html>
3. Santeccchia, G. S., Revollo Sarmiento, G. N., Genchi, S. A., Vitale, A. J., & Delrieux, C. A. (2023). Assessment of Landsat-8 and Sentinel-2 water indices: A case study in the southwest of the Buenos Aires Province (Argentina). *Journal of Imaging*, 9(9), 186. doi: 10.3390/jimaging9090186
4. Bhangale, U., More, S., Shaikh, T., & Patil, S. (2020). Analysis of surface water resources using Sentinel-2 imagery. *Procedia Computer Science*, 171, 2645–2654. doi: 10.1016/j.procs.2020.04.287
5. Drešković, N., Đug, S., & Osmanović, M. (2024). NDVI and NDBI indexes as indicators of the creation of urban heat islands in the Sarajevo basin. *Geographica Pannonica*, 28(1), 34–43. doi: 10.5937/gp28-48216
6. Hashim, H., Abd Latif, Z., & Adnan, N. A. (2019). Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W16, 237–241. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019
7. Loukili, I., Laamrani, A., El Ghorfi, M., El Moutak, S., & Ghafiri, A. (2025). Monitoring land changes at an open mine site using remote sensing and multi-spectral indices. *Heliyon*, 11(2), e41845. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41845
8. Rouibah, K., & Belabbas, M. (2020). Applying multi-index approach from Sentinel-2 imagery to extract urban area in dry season (semi-arid land in North East Algeria). *Revista de Teledetección*, 56, 89–101. doi: 10.4995/raet.2020.13787
9. Hidayati, I. N., Suharyadi, R., & Danoedoro, P. (2018). Developing an extraction method of urban built-up area based on remote sensing imagery transformation index. *Forum Geografi*, 32(1), 96–108. doi: 10.23917/forgeo.v32i1.5907
10. Zheng, Y., Tang, L., & Wang, H. (2021). An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129488. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129488
11. Zhu, W., Yuan, C., Tian, Y., Wang, Y., Liping, L., & Hu, C. (2024). A new high-resolution rural built-up land extraction method based on artificial surface index with short-wave infrared downscaling. *Remote Sensing*, 16(7), 1126. doi: 10.3390/rs16071126

12. Lynch, P., Blesius, L., & Hines, E. (2020). Classification of urban area using multispectral indices for urban planning. *Remote Sensing*, 12(15), 2503. doi: 10.3390/rs12152503
13. Decentralization portal. (n.d.). Feodosiivska Territorial Community. Retrieved June from <https://decentralization.ua/newgromada/4092>
14. Sreznevskyi Central Geophysical Observatory. (n.d.). Climatic data for Kyiv. Retrieved from <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/>
15. GIS Resources. (n.d.). Why does NDVI, NDBI, NDWI range from -1 to 1? Retrieved from <https://gisresources.com/ndvi-ndbi-ndwi-ranges-1-1>
16. Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. doi: 10.1080/01431160304987
17. McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. doi: 10.1080/01431169608948714
18. Javed, A., Cheng, Q., Peng, H., Altan, O., Li, Y., Ara, I., & Saleem, N. (2021). Review of spectral indices for urban remote sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 87(7), 513–524. doi: 10.14358/PERS.87.7.513

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ІЛЬЄНКО Тетяна Володимирівна — кандидат сільськогосподарських наук, завідувач лабораторії, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-5449>).

ВАСИЛЬЄВ Дмитро Петрович — аспірант, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: freimaster.af@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0578-3539>).

Новини

Новини

Новини • Новини • Новини

Згідно з Законом України №3855-IX “Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення”, який набуває чинності 8 серпня 2025 року, підприємства матимуть 3 роки для подання заяви та додатковий 1 рік на отримання інтегрованого дозвілу (ІДД). Як повідомило Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів, першочерговим кроком для бізнесу є визначення, чи підпадає їхня діяльність під перелік, що вимагає отримання ІДД. Відлік термінів для екомодернізації розпочнеться з моменту набрання чинності закону, що створює чіткі рамки для переходу підприємств на нові екологічні стандарти.