

# URBOGEOSYSTEM TRANSFORMATION OF URBAN GREEN SPACES UNDER ANTRHROPOGENIC AND WARTIME IMPACTS (A CASE STUDY OF KHARKIV)

<sup>1</sup>Sergiy KOSTRIKOV, <sup>2</sup>Viktor BEZRUK, <sup>3</sup>Viktor STETS

<sup>1,2,3</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

<sup>1</sup>[sergiy.kostrikov@karazin.ua](mailto:sergiy.kostrikov@karazin.ua) <sup>2</sup>[bezruk.viktor@student.karazin.ua](mailto:bezruk.viktor@student.karazin.ua) <sup>3</sup>[viktor.stets@student.karazin.ua](mailto:viktor.stets@student.karazin.ua)

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-4236-8474> <sup>2</sup><https://orcid.org/0009-0009-1380-3666>  
<sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0002-6385-2887>

## Abstract

This paper examines spatiotemporal changes of green urban geosystems within Kharkiv (2016-2024) under the effects of severe anthropogenic pressure and wartime impact. This research continues to develop a better understanding of the features transforming important recreation zones (T. G. Shevchenko Garden and Central Park) through the use of an urban geosystem approach, RS-methods and GIS-technique. The analysis employs an integrated approach using data from the Sentinel-2 multispectral satellite imagery (Level 2A) applying NDVI, EVI, SAVI, and NDBI indices so that traditional monitoring limitations can be eliminated. The findings indicate a complex transformation of the study area, with an average NDVI increasing by 4.3%, at the same time increasing by 32% for the spatial heterogeneity of the study area which demonstrates the fragmentation qualitative degradation of green zones has occurred. The authors refer to this phenomenon as the “NDVI paradox”, according to which local losses of mature tree stands, because of reconstruction and wartime damage, create a false impression of a general improvement in green space conditions. The analysis also shows that the development of infrastructure is a more important contributor to the loss of green biomass than residential construction and that the replacement of native old growth tree species with non-native ornamental landscaping tree species has had a negative impact on the ecological resilience of these areas. Verification using Google Earth Pro confirmed that anthropogenic impact was a cause of the observed spectral anomalies. The research strongly supports changing from older forms of monitoring to Digital Areal Management and the use of precise 3D Models. This type of monitoring will help develop policies for the post-war rebuilding strategy for Kharkiv using nature-based solutions for urban development and resilience.

**Key words:** green spaces, urban geosystem, GIS-analysis, remote sensing, vegetation indices, anthropogenic impact.

**First received:** 22-05-2026

**Accepted:** 03-07-2026

**Published:** 14-07-2026

**DOI:** <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2026.95.71-100>

**License:** Creative Commons Attribution CC BY 4.0

**ISSN:** 2413-7154 (print), 2413-7553 (online)

# УРБОГЕОСИСТЕМНА ТРАНСФОРМАЦІЯ ЗЕЛЕНИХ ЗОН ВЕЛИКОГО МІСТА В УМОВАХ АНТРОПОГЕННОГО ТА ВОЄННОГО НАВАНТАЖЕННЯ (НА ПРИКЛАДІ ХАРКОВА)

<sup>1</sup>Сергій КОСТРИКОВ, <sup>2</sup>Віктор БЕЗРУК, <sup>3</sup>Віктор СТЕЦЬ

<sup>1,2,3</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

<sup>1</sup>sergiy.kostrikov@karazin.ua <sup>2</sup>bezruk.viktor@student.karazin.ua <sup>3</sup>viktor.stets@student.karazin.ua

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-4236-8474> <sup>2</sup><https://orcid.org/0009-0009-1380-3666>  
<sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0002-6385-2887>

## Анотація

У статті досліджено просторово-часову динаміку зеленого компоненту урбогеосистеми Харкова (2016-2024 рр.) в умовах антропогенного та воєнного навантаження. Метою роботи є оцінка трансформаційних процесів у ключових рекреаційних об'єктах (Сад ім. Т. Г. Шевченка та Центральний парк) з використанням урбогеосистемного підходу, методів дистанційного зондування та геоінформаційного моделювання. Методологічна база включає інтегрований аналіз мультиспектральних даних супутників Sentinel-2 (рівень L2A) із застосуванням індексів NDVI, EVI, SAVI та NDBI. Результати засвідчили складний характер трансформації: формальне зростання середнього NDVI на 4,3% супроводжується суттєвим збільшенням просторової гетерогенності (+32%), що є прямим індикатором фрагментації та якісної деградації зелених зон. Автори описують феномен «парадоксу NDVI», де локальні втрати зрілих деревостанів внаслідок реконструкції або воєнних пошкоджень маскуються зонами спонтанної сукцесії, створюючи хибне враження про покращення стану зелених насаджень. Виявлено, що інфраструктурний розвиток (мощення, розширення алей) виступає потужнішим фактором скорочення зеленої біомаси, ніж житлова забудова, а заміна старовікових дерев інтродуцентами знижує екологічну стійкість. Верифікацію виявлених спектральних аномалій проведено шляхом аналізу візуалізацій Google Earth Pro, що підтвердило антропогенне походження цих аномалій. Дослідження підкреслює необхідність переходу від площинного обліку до концепції цифрового територіального управління (DAM) та інтеграції 3D-моделювання для точного моніторингу об'єму біомаси. Запропонована методика та отримані дані мають практичне значення для розробки стратегій післявоєнної відбудови Харкова, спрямованих на збереження екологічного каркаса міста, адаптацію до кліматичних змін та впровадження рішень для забезпечення довгострокової якості міського середовища.

**Ключові слова:** зелені зони, урбогеосистема, ГІС-аналіз, дистанційне зондування, вегетаційні індекси, антропогенне навантаження.

Рукопис вперше отримано: 22-05-2026

Прийнято до друку: 03-07-2026

Опубліковано: 14-07-2026

DOI: <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2026.95.71-100>

Ліцензія: Creative Commons Attribution CC BY 4.0

ISSN: 2413-7154 (друкована версія), 2413-7553 (електронна версія)

## Вступ

Сучасні міста являють собою складні просторові системи, у межах яких природні, техногенні та соціальні компоненти перебувають у стані постійної взаємодії. У таких умовах зелені зони виконують не лише рекреаційну або декоративну функцію, а виступають ключовими елементами екологічної стабільності міського середовища, забезпечуючи регуляцію мікроклімату, зменшення теплового навантаження, підтримання біорізноманіття та формування комфортного життєвого простору для міського населення (Benedict & McMahon, 2012; Kostrikov et al., 2018; Niemelä, 2011; Braubach et al., 2017; Pan & Qu, 2024). Особливого значення це набуває для великих урбанізованих центрів Східної Європи, зокрема – України, де процеси інтенсивної реконструкції міського простору поєднуються з наслідками воєнних дій та загальним зростанням антропогенного навантаження (Pereira et al., 2022; Zuckov, 2023).

Харків є одним із найбільших урбанізованих центрів України, структура зелених зон якого за останні роки зазнала суттєвих трансформацій. Реконструкція Саду імені Т. Г. Шевченка, Центрального парку культури та відпочинку, прилеглих громадських просторів і транспортної інфраструктури супроводжувалася зміною структури рослинного покриву, розширенням площ штучних поверхонь та перебудовою рекреаційних територій (Morar et al., 2022; Zhang et al., 2024; Sokolenko et al., 2026). Після лютого 2022 р. до цих процесів додався вплив воєнних дій, який спричинив нові форми деградації міських ландшафтів, порушення систем догляду за насадженнями та появу феномену «військового дичавіння» (*war-wilding*) (Krainiuk et al., 2024; Pichura & Potravka, 2025), яке було вже помічено через засоби глобального моніторингу у інших регіонах світу раніше (Gorelik et al., 2017).

Для Харкова вказана загальна проблема має особливе значення у зв'язку з розбіжностями між офіційними статистичними даними та результатами ГІС-аналізу. За даними муніципальної статистики, площа зелених насаджень міста становить близько 15,4 тис. га (Kharkiv City Council, 2026), однак результати авторського просторового аналізу та дані OpenStreetMap (OSM) свідчать про значно меншу площу компактних деревостанів – близько 5–8 тис. га (Morar et al., 2022). Це вказує на відсутність єдиного цифрового кадастру зелених зон та необхідність переходу від формального статистичного обліку до просторово-структурного аналізу міського середовища.

У межах даного дослідження для інтерпретації трансформації міських зелених зон використовується урбогеосистемний підхід, відповідно до якого парк розглядається не як ізольований природний об'єкт, а як елемент цілісної урбогеосистеми міста, сформованої взаємодією рослинного покриву, інфраструктури, відкритих поверхонь, транспортної мережі та соціально-рекреаційних функцій міста.

Особливого значення урбогеосистемний підхід набуває при аналізі саме паркових територій, оскільки дозволяє враховувати не лише кількісні характеристики рослинності,

але й просторову організацію парку, ступінь його фрагментації, взаємозв'язок із транспортною та рекреаційною інфраструктурою, а також вплив реконструкційних процесів. У цьому контексті Сад імені Т. Г. Шевченка (далі також – Сад Шевченка) та Центральний парк культури і відпочинку є репрезентативними прикладами різних моделей трансформації міського зеленого простору Харкова. Тобто, такий підхід дозволяє аналізувати не лише зміну площ озеленення, але й трансформацію функціональної структури міського ландшафту, спричинену, зокрема, мілітарним імпаком (Pereira et al., 2022; Kholoshyn et al., 2023; Kostrikov & Serohin, 2025).

**Метою** статті є аналіз просторово-часової динаміки зелених зон Харкова на прикладі ключових ділянок — Саду імені Т. Г. Шевченка та Центрального парку — в умовах антропогенного і воєнного навантаження із застосуванням методів ДДЗ, ГІС та урбогеосистемного підходу.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- визначити релевантну методику ГІС-аналізу даних дистанційного зондування і обрати необхідну програмно-апаратну платформу;
- здійснити мультитемпоральний аналіз динаміки *NDVI* у межах досліджуваних паркових територій;
- здійснити мультитемпоральний аналіз динаміки додаткових спектральних індексів *EVI*, *SAVI* та *NDBI* у межах досліджуваних ключових ділянок парків;
- виявити просторові закономірності деградації та трансформації рослинного покриву;
- проаналізувати вплив реконструкційних процесів та воєнного чинника на структуру паркових територій;
- оцінити можливості урбогеосистемного підходу для аналізу трансформації міських зелених зон.

## Теоретико-методологічні основи дослідження

### Дистанційне зондування та ГІС у дослідженнях міських зелених зон

Урбаністичні та урбоекологічні дослідження вже декілька десятиліть як дедалі ширше використовують методи дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу для оцінки стану міського довкілля і моніторингу трансформації зелених зон (Tucker, 1979; Lillesand, 2015; Morar et al., 2022). Використання супутникових даних *Sentinel-2* та *Landsat* забезпечує можливість просторово-часового аналізу рослинного покриву з високою періодичністю спостережень та достатньою просторовою роздільною здатністю для урбанізованих територій (Drusch et al., 2012; Phiri et al., 2020).

Одним із найбільш поширених індикаторів стану рослинності є *нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI)*, запропонований у 1973 р. (Rouse et al., 1974) і

розвинений у подальших роботах (Tucker, 1979; Pettorelli, 2013). *NDVI* базується на співвідношенні відбивної здатності поверхні у червоному та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах і дозволяє оцінювати щільність та стан рослинного покриву. Значення індексу вище 0,6 зазвичай відповідають густій деревній рослинності, тоді як низькі значення характерні для відкритого ґрунту, забудови або штучних поверхонь.

Мультитемпоральний аналіз *NDVI* широко використовується для дослідження динаміки урбанізованих територій, зокрема для виявлення втрат деревостану, фрагментації зелених зон та оцінки наслідків інфраструктурного розвитку (Estoque & Murayama, 2017; Wellmann et al. 2020). У міських умовах поєднання супутникових даних із методами ГІС дозволяє інтегрувати растрову інформацію з векторними кадастровими шарами, даними карт глобального покриття OSM та муніципальними реєстрами.

Разом із тим низка досліджень підкреслює обмеження використання *NDVI* в урбанізованому середовищі (Small, 2003). Зокрема, агреговані значення індексу можуть приховувати локальні процеси деградації, фрагментації або заміни старовікових дерев декоративними насадженнями, що формує так званий «парадокс *NDVI*». У таких випадках загальний рівень вегетаційної активності може залишатися стабільним або навіть зростати, незважаючи на структурну деградацію екосистеми (Zhou et al., 2011).

### **Просторовий аналіз трансформації зелених зон Харкова**

Проблематика трансформації зелених зон Харкова останніми роками стала предметом окремих урбоєкологічних та геоінформаційних досліджень (Morar et al., 2022; Pereira et al., 2022). Аналіз супутникових даних і просторових моделей свідчить про суттєві розбіжності між офіційною статистикою площ озеленення та фактичними показниками компактного деревного покриву.

У межах альтернативних проєктів *GDK-1* та *GDK-2* було встановлено, що реальна площа компактних деревостанів Харкова становить близько 5040 га, тоді як офіційні дані декларують понад 15 тис. га зелених насаджень (Morar et al., 2022). Навіть із використанням розширеної класифікації OpenStreetMap сумарна площа зелених територій не перевищує 8589 га. Подібні розбіжності пов'язуються з використанням застарілих методик обліку та відсутністю єдиного цифрового кадастру зелених зон Харкова.

Як авторські польові спостереження, так і аналіз новітньої нормативної документації (Kharkiv City Council, 2026) фіксують значний вплив реконструкцій на структуру рослинного покриву міських парків. Для Саду Шевченка та Центрального парку характерними є:

- розширення площ твердого покриття;
- збільшення рекреаційної інфраструктури;
- заміна старовікових дерев декоративними інтродуцентами;
- зростання просторової фрагментації деревостану.

Водночас після 2022 р. суттєвого значення набув фактор воєнного впливу. У сучасних дослідженнях описується вже згадуваний нами вище феномен «військового дичавіння», коли покинуті території демонструють підвищення *NDVI* через природну сукцесію рослинності (Baumann & Kuemmer, 2016). Проте таке «позеленіння» не означає реального відновлення екосистемних функцій, оскільки ці території часто залишаються деградованими, небезпечними або непридатними для рекреаційного використання.

Одним із дуже небагатьох спеціалізованих досліджень трансформації зелених зон Харкова є робота, присвячена аналізу змін міських парків після реконструкції на основі супутникових знімків та методів автоматизованої класифікації земного покриття (Sokolemko et al., 2026). Автори застосували підходи контрольованої та неконтрольованої класифікації в середовищі GIS та EO Browser для оцінки просторової динаміки зелених насаджень у 2017–2021 рр. Отримані результати засвідчили скорочення площ озеленення після реконструкції парків, зокрема у Салтівському парку, де частка зелених територій зменшилася до менш ніж 30% площі об'єкта. Дослідження також показало, що автоматизовані методи дешифрування супутникових знімків є ефективними для швидкого аналізу міських ландшафтів, однак потребують поєднання з більш детальним просторовим аналізом та контекстною інтерпретацією результатів для уникнення помилкових висновків щодо якості міського середовища.

На відміну від низки зазначених вище робіт, у нашому дослідженні аналіз здійснюється в межах урбогеосистемного підходу, який розглядає зелені зони не лише як елементи земного покриття, а як складні просторово-функціональні системи, чутливі до поєднання антропогенних, інфраструктурних та воєнних впливів.

### **Урбогеосистемний підхід до аналізу міських зелених зон**

Теоретичною основою дослідження виступає, як вже підкреслювалося, *урбогеосистемний підхід*, у межах якого міське середовище розглядається як інтегрована система взаємодії природних, техногенних та соціально-функціональних компонентів (Kostrikov et al., 2018; Kostrikov & Seryogin, 2022; Kostrikov et al., 2023). На відміну від традиційних підходів, орієнтованих переважно на статистичний облік площ озеленення, урбогеосистемний аналіз акцентує увагу на структурі, просторовій зв'язності та функціональному стані міських ландшафтів.

У межах цього підходу зелена зона трактується як елемент *цілісної урбогеосистеми*, функціонування якої визначається через *модельне урбаністичне середовище*. Останнє виокремлює взаємодію:

- рослинного покриття;
- інфраструктури;
- транспортної мережі;
- відкритих поверхонь;
- рекреаційного навантаження;

- антропогенних та кризових впливів.

Застосування урбогеосистемного підходу в поєднанні з методами ДЗЗ та ГІС дозволяє перейти від формального аналізу площ озеленення до дослідження морфологічної та функціональної трансформації міських ландшафтів, що є особливо актуальним для міст, які перебувають під впливом масштабних реконструкцій і мілітарного чинника.

Таким чином, в рамках даного дослідження ми намагаємося відійти від традиційного площинного обліку озеленення на користь урбогеосистемного підходу. Парк не є лише сукупністю дерев, а являє собою цілісну систему, де морфологічна структура, функціональна неоднорідність та просторова зв'язність визначають його життєздатність.

Одним з ключових елементів запропонованого підходу є розв'язання «парадоксу NDVI» (Wu et al., 2023). Традиційно високий показник вегетаційного індексу інтерпретується як позитивна ознака, проте в умовах міста ми часто спостерігаємо зворотну кореляцію. Заміна старовікових деревостанів декоративними інтродуцентами або спонтанна сукцесія (феномен “*war-wilding*”) можуть генерувати сильний супутниковий сигнал, приховуючи при цьому втрату кліматорегулюючих функцій. Таким чином, наш аналіз базується на поєднанні кількісних показників спектральної яскравості та якісних характеристик просторової структури урбогеосистем.

### **Трансформаційні траєкторії урбогеосистем та європейський контекст**

Розуміння динаміки зелених зон сучасного міста вимагає переходу від статичного опису об'єктів до аналізу їхніх *трансформаційних траєкторій*. Під цим терміном ми розуміємо спрямовані зміни структурно-функціональних параметрів урбогеосистеми під впливом антропогенних, управлінських та форс-мажорних (зокрема воєнних) чинників. Європейський досвід останнього десятиліття виокремлює кілька домінуючих траєкторій, які слугують еталонами для нашого порівняння.

Результати моніторингу Саду Шевченка та Центрального парку Харкова за 2016–2024 рр., що викладаються у наступних секціях статті, демонструють складну динаміку, де зростання інтегрального показника NDVI на 4,3% маскує внутрішню структурну деградацію (зростання фрагментації на 32%). Цей феномен потребує порівняльного аналізу з досвідом міст ЄС, які вже пройшли шлях від технократичного управління до впровадження сталого екосистемного підходу. Можна вважати, що наведені далі декілька прикладів відбивають певні світові тренди урбоекології.

1. *Траєкторія інституційної трансформації та «розпечатування» (Unpaving).* Харківський кейс демонструє домінування «інфраструктурного» підходу, де пріоритетом реконструкції є заміна природних компонентів штучними (мощення, фонтани, атракціони). Це контрастує з сучасним *трендом NbS*, що активно впроваджується в Західній Європі.

*Приклад Варшави (Польща):* Дослідження (Kronenberg, 2015) щодо зеленої інфраструктури Варшави вказують на важливість «розпечатування» (unpaving) міських

територій. На відміну від Саду Шевченка, де площа непроникних поверхонь зростає, європейські проєкти, як-от ревіталізація *Поля Мокотовського (Pole Mokotowskie)*, спрямовані на створення дощових садів та збільшення площі поглинання води. Харківський «парадокс позеленіння» підтверджує існуючі висновки (Pauleit et al., 2017): візуальна естетика парку часто входить у конфлікт із його екологічною стійкістю.

Таким чином, кейс Варшави підсвічує проблему інституційних бар'єрів. Дослідники, на яких ми посилаємося вище, вказують на «парадокс управління», коли задекларовані стратегії озеленення входять у конфлікт із реальними механізмами забудови. Траєкторія розвитку Варшави останніх років спрямована на ревіталізацію відкритих просторів та зменшення площі непроникних поверхонь, що є критично важливим для міст із високим рівнем техногенного навантаження, до яких належить і Харків.

2. *Траєкторія екосистемної оптимізації (Nature-based Solutions, NbS)*. Ця модель передбачає пріоритет природних механізмів саморегуляції над інженерними рішеннями. Фундаментальні праці (Pauleit et al., 2017) доводять, що успішні європейські міста (наприклад, Копенгаген чи Мюнхен) фокусуються на створенні цілісної «зеленої інфраструктури». У цьому контексті парк розглядається не як ізольований об'єкт, а як вузол екологічної мережі. Ключовим тут є збереження зв'язності (*connectivity*), що прямо протиставляється процесам фрагментації, які ми спостерігаємо в українських реаліях.

3. *Траєкторія спонтанної сукцесії та «четвертої природи»*. Досвід Берліна (Kowarik, 2011) вводить у науковий обіг поняття «четвертої природи» — екосистем, що виникають на покинутих або пошкоджених промислових та інфраструктурних об'єктах. Ця траєкторія є надзвичайно релевантною для аналізу наслідків воєнних дій. Вона дозволяє розглядати феномен «військового дичавіння» не просто як занедбаність, а як специфічну форму екологічної адаптації міста, де *NDVI* демонструє зростання за рахунок рудеральної рослинності.

4. *Траєкторія цифрового територіального управління (Digital Areal Management, DAM)*. Сучасна європейська практика (наприклад, досвід Відня) базується на створенні «цифрових двійників» зелених зон (Thaler et al., 2023). Це дозволяє подолати обмеження традиційного *NDVI*, інтегруючи дані *LiDAR* та наземного сканування для оцінки об'єму біомаси. Як зазначається (Wellmann et al. 2020), перехід до точного картографування кожної одиниці насаджень дозволяє уникнути «маскування» деградації зрілих дерев молодими саджанцями.

5. *Траєкторія дефіциту екосистемних послуг: заміна зрілих деревостанів*. Критичним моментом для Харкова є заміна зрілих дубів та кленів молодими декоративними інтродуцентами. Хоча це дає позитивний сигнал на супутнику через 3-5 років, якість екосистемних послуг падає.

*Приклад Лондона (Велика Британія)*: Використання моделі *i-Tree Eco* в Лондоні (Nowak et al., 2018) довело, що одне зріле дерево забезпечує у 60-70 разів більше

депонування вуглецю та охолодження, ніж саджанець. Харківська стратегія «декоративного оновлення» веде до формування «молодого зеленого компоненту» урбогеосистеми, яка стане вразливою до кліматичних змін та потребуватиме постійного штучного поливу та догляду, що в умовах війни стає критичним ризиком.

Порівняльний аналіз представлених траєкторій показує, що Харків наразі перебуває на роздоріжжі. З одного боку, спостерігається інерційна «інфраструктурна» траєкторія (схожа на ранні етапи забудови міст Східної Європи), що веде до фрагментації. З іншого — воєнні руйнування та подальше відновлення створюють передумови для переходу на траєкторію *NbS*. Наша методологія аналізу *NDVI* та фрагментації покликана верифікувати, за якою саме траєкторією рухаються ключові зелені об'єкти міста — Сад Шевченка та Центральний парк.

Застосування в рамках урбогеосистемного підходу нашого розвинутого інструментарію *LiDAR*-сканування для створення міського 3D-кадастру (Kostrikov et al., 2020), який передбачатиме структурний сегмент дерев, дозволить муніципалітетам відстежувати не лише площу, а й об'єм фітомаси. Як зазначають деякі автори (Krainsiuk et al., 2024), використання *Sentinel-2* є лише першим кроком. У такому випадку перехід до *DAM* у Харкові потребує інтеграції ГІС-даних у реальні управлінські рішення, щоб уникнути ситуацій, коли паперові показники озеленення не відповідають реальному екологічному стану пошкоджених війною територій.

## Методика дослідження та дані

### Об'єкти дослідження та просторові межі аналізу

Об'єктами дослідження виступають дві ключові зелені зони центральної частини Харкова — Сад Шевченка та Центральний парк культури і відпочинку. Вибір саме цих територій обумовлений їхньою високою рекреаційною значущістю, активною реконструкцією у 2016–2024 рр., а також суттєвими трансформаціями рослинного покриву в умовах антропогенного та воєнного навантаження.

Для оперативного моніторингу та верифікації стану зелених насаджень у межах модельних ділянок — Саду Шевченка та Центрального парку (рис. 1, кольорова вкладка) — було використано аналітичний інструментарій платформи *EOSDA LandViewer* ([www.eos.com](http://www.eos.com)). Вибір супутникових даних місії *Sentinel-2A* з рівнем обробки *Level-2A* (атмосферно скоригований відбивний показник на рівні нижньої межі атмосфери, BOA) дозволив мінімізувати вплив аерозолів та хмарності, що є критичним для коректного розрахунку вегетаційних індексів та аналізу просторової фрагментації об'єктів.

Сад імені Т. Г. Шевченка є одним із найстаріших міських парків Харкова, розташованим у центральній частині міста поблизу університетського та адміністративного ядра цієї локації. У 2017–2021 рр. парк зазнав масштабної



Рисунок 1. Просторова локалізація ключових ділянок моніторингу зелених зон Харкова (1 – Сад Шевченка, 2 – Центральний парк) на мультиспектральному знімку Sentinel-2A від 15.05.2026. Візуалізація виконана у хмарному інтерфейсі EOSDA LandViewer (продукт Level-2A, природні кольори RGB 4-3-2) (авторська ілюстрація)

реконструкції, що включала перебудову фонтанного комплексу «Каскад», оновлення алей, розширення площ мощення та модернізацію прилеглої території Харківського зоопарку. Ці процеси супроводжувалися частковою зміною структури деревостану та появою нових декоративних насаджень.

Центральний парк культури і відпочинку є найбільшим рекреаційним парком центральної частини Харкова. Протягом останнього десятиліття його територія активно трансформувалася в напрямку рекреаційно-розважальної інфраструктури, що супроводжувалося будівництвом нових атракціонів, доріг, сервісних зон та локальним ущільненням штучних поверхонь. Одночасно периферійні ділянки парку частково зберегли ознаки природного деревостану, що дозволяє простежити контраст між інтенсивно урбанізованими та умовно природними сегментами урбогеосистеми.

Просторові межі ключових ділянок дослідження формувалися на основі поєднання:

- офіційних меж паркових територій;
- векторних шарів *OpenStreetMap*;
- супутникової візуалізації *Google Earth Pro*;
- ручного уточнення меж у середовищі ГІС-платформи *QGIS*.

Для забезпечення коректності просторових розрахунків усі дані були приведені до єдиної системи координат *WGS 84 / UTM Zone 37N*.

#### **Джерела даних та їх характеристика**

Базовими часовими зрізами для аналізу було обрано 2016 та 2024 рр., а не 2016 та 2026 рр., що зумовлено низкою методологічних та емпіричних причин. По-перше, 2016 р. є одним із перших років повноцінного функціонування місії *Sentinel-2*, що забезпечує порівнювані супутникові дані з просторовою роздільною здатністю 10 м. По-друге, 2024 р. є останнім часовим зрізом, для якого на момент проведення дослідження був доступний завершений річний цикл супутникових спостережень із достатньою кількістю безхмарних сцен для коректного сезонного порівняння.

Використання 2026 р. як кінцевої дати аналізу могло б призвести до методологічної нестабільності результатів, оскільки поточний рік ще не має завершеного вегетаційного циклу та характеризується фрагментарністю супутникових даних. Крім того, після 2022 р. на території Харкова та області суттєво посилився вплив воєнних чинників, які створюють короткочасні аномалії рослинного покриву, пов'язані з порушенням догляду за насадженнями, локальними руйнуваннями та феноменом «військового дичавіння». У зв'язку з цим 2024 р. розглядається як найбільш репрезентативний етап для фіксації вже сформованих тенденцій трансформації міських зелених зон, але ще без надмірного впливу неповних або нестабільних часових даних.

Таким чином, інтервал 2016–2024 рр. дозволяє одночасно охопити період активної реконструкції парків Харкова, початковий етап повномасштабної війни та ранні повоєнні

зміни міського ландшафту в межах єдиного методологічно узгодженого ряду спостережень.

Емпіричну базу дослідження склали мультиспектральні дані місії *Sentinel-2A* (рівень обробки *Level-2A*, дані наземного відбиття *BOA – Bottom of Atmosphere*), отримані з репозиторію Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE, 2026). Для проведення ретроспективного просторово-часового аналізу центральної частини Харкова було обрано часові зрізи в межах тайлу *T36UYA* за 21.06.2016 р. та 29.06.2024 р. Синхронізація дат у межах одного вегетаційного підперіоду (червень) дозволила мінімізувати похибки, зумовлені фенологічною варіативністю рослинності. Якість обраних сцен верифікована за показником хмарності, що не перевищував 10% для досліджуваних локацій.

Просторова роздільна здатність 10 м для каналів *Bo4 (Red) та Bo8 (NIR)* забезпечує достатню деталізацію для дослідження паркових територій міста (Drusch et al., 2012; ESA, 2015; Li et al., 2020). Додатково для ретроспективного аналізу використовувалися архівні дані *Landsat 7/8/9* із просторовою роздільною здатністю 15–30 м.

Для просторової верифікації трансформаційних процесів використовувалися:

- історичні зображення *Google Earth Pro*;
- дані *OpenStreetMap*;
- відкриті муніципальні картографічні матеріали;
- публічні дані щодо реконструкції міських об'єктів.

Векторні шари меж парків, транспортної інфраструктури та елементів забудови були отримані через плагін *QuickOSM* у середовищі *QGIS*. Додатково використовувалися цифрові шари дорожньої мережі, відкритих площ та рекреаційної інфраструктури для виконання операцій просторового оверлею.

### Методика ГІС-аналізу

Геоінформаційна обробка даних виконувалася у програмному середовищі *QGIS 3.44 Solothurn* із використанням стандартних інструментів растрового та векторного аналізу (QGIS Development Team, 2026). Межі парків було отримано з бази даних *OpenStreetMap* за допомогою плагіну *QuickOSM* і збережено у форматі *GeoPackage*. Загальна методика дослідження включала декілька послідовних етапів.

*Етап 1. Підготовка супутникових даних:* На першому етапі здійснювався підбір безхмарних супутникових сцен *Sentinel-2* (рис. 1, кольорова вкладка) для вегетаційного періоду (вибірка із часового проміжку «травень–серпень») різних років дослідження. Знімки проходили:

- атмосферну корекцію;
- обрізку за маскою паркових територій;
- приведення до єдиної проєкції.

Обрізка растрів виконувалася інструментом: *Raster → Extraction → Clip Raster by Mask Layer*.

*Етап 2. Розрахунок індексу NDVI:* Оцінка стану рослинного покриття здійснювалася шляхом розрахунку нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI:

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}, \quad (1)$$

де:

- *B08* — ближній інфрачервоний канал *Sentinel-2*;
- *B04* — червоний канал.

Розрахунок виконувався в *QGIS Raster Calculator* за відповідним формалізованим виразом, який є аналогом академічної формули (1):

$$("B08@1" - "B04@1") / ("B08@1" + "B04@1"), \quad (2)$$

де:

- "*B08@1*": Канал 8 (*Near-Infrared* — ближній інфрачервоний діапазон). Рослинність дуже сильно відбиває світло в цьому спектрі завдяки внутрішній структурі клітин листка;
- "*B04@1*": Канал 4 (*Red* — червоний діапазон). Хлорофіл активно поглинає видиме червоне світло для фотосинтезу;
- *@1*: Це технічний індекс *QGIS*, який вказує на перший шар усередині завантаженого растрового файлу.

Розрахункові значення класифікувалися за такими інтервалами:

- $<0,1$  — штучні поверхні або вода;
- $0,1-0,2$  — відкритий ґрунт;
- $0,2-0,4$  — розріджена рослинність;
- $0,4-0,6$  — помірна вегетація;
- $0,6$  — густа деревна рослинність.

*Етап 3. Аналіз динаміки рослинного покриття:* Для оцінки змін рослинного покриття використовувалася техніка мультитемпорального аналізу. Динаміка визначалася шляхом побудови *растра різниці* індексу між 2024 й 2016 рр.:

$$\Delta NDVI = NDVI_{2024} - NDVI_{2016}, \quad (3)$$

У *QGIS Rater Calculator* виразу (3) відповідає наступний запис:

$$("NDVI\_2024@1" - "NDVI\_2016@1"). \quad (4)$$

Отримані через (1)-(4) негативні значення  $\Delta NDVI$  ( $< -0,3$ ) інтерпретувалися як зони потенційної деградації рослинного покриття, втрати біомаси або заміни природних поверхонь інфраструктурними елементами.

*Етап 4. Просторовий оверлей та морфологічний аналіз:* Даний етап безпосередньо не впроваджувався в рамках поточного ГІС-аналізу, але його методика узагальнювалася, маючи на увазі подальші дослідження. Для аналізу чинників трансформації можуть бути

використані наступні інструменти просторового оверлею (QGIS Development Team, 2026):

- *Intersect*;
- *Union*;
- *Dissolve*;
- *Zonal Statistics*.

Це дозволить інтегрувати:

- растрові *NDVI*-дані;
- межі паркових зон;
- транспортну інфраструктуру;
- рекреаційні об'єкти;
- відкриті площі та ділянки мощення.

*Методичні обмеження дослідження:*

- Необхідно підкреслити, що попри достатньо високу ефективність методів ДЗЗ та ГПС, дослідження має низку обмежень. Просторова роздільна здатність *Sentinel-2* (10 м) не дозволяє точно ідентифікувати окремі декоративні дерева або вузькі лінійні елементи озеленення. У міських умовах також виникає проблема «змішаних пікселів», коли один піксель одночасно містить рослинність, тінь та штучні поверхні.
- Додатковим обмеженням може бути феномен «військового дичавіння», за якого зростання *NDVI* не завжди відповідає реальному покращенню екологічного стану території (Baumann & Kuemmerle, 2016). У таких випадках супутникові індекси можуть фіксувати лише збільшення біомаси без урахування доступності, безпечності та рекреаційної придатності територій.
- Перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція супутникових даних із *LiDAR*-моніторингом, аерофотозйомкою та методами GeoAI для високоточної інвентаризації «зеленого компоненту» урбогеосистеми Харкова.

*Можливі альтернативні та додаткові методики індексної оцінки:* Окрім індексу *NDVI*, який можна вважати базовим для оцінки вегетації Харкова, існує цілий спектр додаткових індексів для більш точного аналізу стану міського середовища, водного стресу та структурних змін урбанізованого ландшафту лише відповідно навіть до декількох літературних джерел (Xue & Su, 2017; Krainiuk et al., 2024; Zhang et al. 2024; Pichura & Potravka, 2025; Sokolenko et al., 2026). На цій підставі крім *NDVI* доцільними для використання в умовах Харкова можуть бути такі групи індексів:

**А. Індекси вологості та водного стресу.** Ці показники критично важливі для Харкова, оскільки місто стикається з аномальною спекою та зміною гідрологічного режиму через воєнні дії та реконструкції:

- *NDWI (Normalized Difference Water Index)*: Дозволяє ідентифікувати водні об'єкти та оцінити вміст вологи в рослинах.
- *NDMI (Normalized Difference Moisture Index)*: Використовується для визначення вмісту вологи саме в рослинному покриві та виявлення водного стресу.
- *NDMISTRESS*: Спеціалізований індекс для оцінки стресу рослинності, спричиненого дефіцитом вологи, що дозволяє відрізнити здорові зрошувані ділянки від деградованих.

**Б. Індекси антропогенного навантаження та ґрунту.** Оскільки в Харкові відбувається активна заміна зелених зон на мощення та забудову, важливо враховувати вплив штучних поверхонь.

- *NDBI (Normalized Difference Built-up Index)*: Допомогає чітко розмежувати забудовані території/замощення від рослинності.
- *BSI (Bare Soil Index)*: Індекс відкритого ґрунту, незамінний для виявлення зон деградації, де рослинність зникла внаслідок бойових дій або будівельних робіт.
- *LST (Land Surface Temperature)*: Показник температури поверхні, необхідний для моніторингу «ефекту теплового острова», що посилюється через збільшення площі гранітного мощення в парках міста.
- *SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)*: Ґрунтово-скоригований вегетаційний індекс, головна мета застосування - ізоляція й нівелювання оптичного сигналу відкритого ґрунту.

**В. Біофізичні та структурні індекси.** У дистанційному зондуванні наведений індекс (*EVI*) розглядається як покращений аналог *NDVI* саме через те, що він має лінійну кореляцію з біомасою та структурою крони. Коли *NDVI* «насичується» і перестає бачити різницю, *EVI* продовжує реагувати на збільшення шарів листя (структурні зміни).

- *EVI (Enhanced Vegetation Index)*: Для нівелювання ефекту спектрального насичення у щільних масивах міських лісопарків, а також для мінімізації впливу оголеного підстилаючого субстрату (що є характерним для урбанізованого середовища у зонах руйнувань), базовий аналіз *NDVI* має бути доповнено розрахунком покращеного вегетаційного індексу (*EVI*). Використання синього каналу (*Bo2*) у структурі *EVI* дозволить провести додаткову атмосферну фільтрацію сигналів аерозольного забруднення над міською агломерацією, забезпечивши вищу точність оцінки архітектоніки крон та реального об'єму біомаси

Використання цих індексів у поєднанні з алгоритмами *QGIS* дозволить у майбутньому дослідженню вийти за межі простих оцінок «зеленіше/сіріше» та надати об'єктивні дані про якісну трансформацію екосистеми Харкова.

## Результати та їх обговорення

### Загальна динаміка NDVI та просторової неоднорідності зелених зон Харкова

Аналіз просторового розподілу *NDVI* за супутниковими знімками *Sentinel-2* за 2016 та 2024 рр. засвідчив неоднозначний характер трансформації рослинного покриву досліджуваних зелених зон Харкова. Узагальнені статистичні показники наведено в таблиці 1. Отримані результати демонструють, що формальне зростання середніх значень *NDVI* не супроводжується пропорційним покращенням просторової структури міської рослинності, а навпаки — відображає посилення внутрішньої неоднорідності урбогеосистем.

Середнє значення *NDVI* збільшилося з 0,4222 у 2016 р. до 0,4396 у 2024 р., тобто на 0,0174 абсолютних одиниць або приблизно на 4,3%. Подібна тенденція на перший погляд може трактуватися як позитивна динаміка розвитку рослинного покриву та збільшення сумарної біомаси. Додатково це підтверджується зростанням медіанного значення *NDVI* з 0,4608 до 0,497, що свідчить про зміщення значної частини пікселів у бік більш високих показників вегетаційної активності.

Однак більш детальний аналіз статистичної структури вибірки демонструє, що така тенденція є значно складнішою та суперечливішою. Найбільш показовим є суттєве збільшення просторової варіабельності *NDVI*. Стандартне відхилення зросло з 0,1223 до 0,1609, тобто приблизно на 32%, а міжквартильний розмах (IQR) збільшився з 0,1392 до 0,2184. Це означає, що рослинний покрив досліджуваних парків став значно менш однорідним у просторовому відношенні.

**Таблиця 1. Описова статистика та результати статистичних тестів для *NDVI* зелених зон Харкова (2016-2024 рр.)**  
(складено за результатами авторських розрахунків)

| Показник                           | 2016   | 2024   | $\Delta$ (2024-2016) |
|------------------------------------|--------|--------|----------------------|
| n (пікселів)                       | 10 030 | 10 030 | —                    |
| Середнє значення <i>NDVI</i>       | 0,4222 | 0,4396 | +0,0174              |
| Медіана <i>NDVI</i>                | 0,4608 | 0,497  | +0,0362              |
| Мінімальне значення                | -0,025 | -0,017 | +0,008               |
| Максимальне значення               | 0,657  | 0,677  | +0,02                |
| Стандартне відхилення ( $\sigma$ ) | 0,1223 | 0,1609 | +0,0386              |
| Міжквартильний розмах (IQR)        | 0,1392 | 0,2184 | +0,0792              |

З урбогеосистемної точки зору таке зростання дисперсії є принципово важливим результатом, оскільки воно відображає процес фрагментації зеленої інфраструктури міста. У структурі паркових територій одночасно посилюються дві протилежні тенденції: локальне зростання вегетаційної активності в окремих зонах та деградація або повне зникнення рослинності в інших ділянках. У результаті міський ландшафт набуває мозаїчного характеру, де ділянки щільної деревної рослинності чергуються з просторами

інтенсивного мощення, новою рекреаційною інфраструктурою або деградованими зонами.

Особливо важливим є те, що максимальні значення *NDVI* також дещо збільшилися (з 0,657 до 0,677), що може свідчити про локальне ущільнення або активний розвиток рослинності на окремих ділянках парків. Одночасно мінімальні значення залишаються близькими до нульових або від'ємних, що характерно для штучних поверхонь, відкритого ґрунту, бетонованих зон чи водних об'єктів. Таким чином, у межах тих самих паркових територій спостерігається одночасне співіснування ділянок із високою біомасою та зон майже повної відсутності рослинного покриву.

Отримані результати підтверджують, що середні значення *NDVI* не можуть розглядатися як самодостатній показник екологічного стану міських зелених зон. Формальне «позеленіння» території може супроводжуватися деградацією просторової цілісності рослинного покриву, скороченням площ старовікових деревостанів та посиленням ландшафтної фрагментації. Подібний ефект особливо характерний для реконструйованих міських парків, де частина зрілих дерев замінюється декоративними молодими насадженнями або інфраструктурними елементами благоустрою.

#### **Статистична перевірка змін *NDVI* та зональний аналіз трансформації рослинного покриву**

Результати статистичної перевірки (табл. 2) засвідчили, що розподіли значень *NDVI* для 2016 та 2024 рр. не відповідають нормальному закону розподілу. Критерій Шапіро–Вілکا показав статистично значущі відхилення від нормальності для обох часових зрізів ( $p < 0,001$ ), що обумовило застосування непараметричних методів аналізу. Використання критерію Манна–Вітні підтвердило статистично значущу різницю між розподілами *NDVI* 2016 та 2024 рр. ( $p = 1,53 \times 10^{-113}$ ). Отже, зафіксовані зміни рослинного покриву не є випадковими та відображають реальні процеси трансформації міського середовища.

Водночас розмір ефекту за критерієм Коена ( $|d| = 0,122$ ) відповідає малому ефекту, що свідчить про відносно помірний характер середньостатистичних змін у межах усієї досліджуваної території. Це підтверджує, що головні трансформації мають локальний і просторово неоднорідний характер, а тому середні значення *NDVI* не повністю відображають глибину структурних змін міських зелених зон.

**Таблиця 2. Результати статистичної перевірки значущості змін *NDVI***  
(складено за результатами авторських розрахунків)

| Тест               | Статистика         | p-value                 | Висновок                              |
|--------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| Шапіро–Вілк (2016) | $W = 0,8761$       | $6,95 \times 10^{-53}$  | Ненормальний розподіл                 |
| Шапіро–Вілк (2024) | $W = 0,8826$       | $5,95 \times 10^{-52}$  | Ненормальний розподіл                 |
| Mann-Whitney U     | $U = 41\ 013\ 402$ | $1,53 \times 10^{-113}$ | *** <b>Значуще</b><br>( $p < 0,001$ ) |
| Cohen's d          | $d = 0,122$        | —                       | Малий ефект                           |

Більш інформативним у цьому контексті є зональний аналіз растру різниці  $\Delta NDVI$  (табл. 3), який дозволяє оцінити просторовий розподіл процесів деградації та відновлення.

**Таблиця 3. Зональний аналіз  $\Delta NDVI$ : розподіл площ за категоріями змін вегетаційного покриття (складено за результатами авторських розрахунків)**

| Категорія змін                                     | Пікселів      | Частка (%) | Площа (га)   |
|----------------------------------------------------|---------------|------------|--------------|
| Значна втрата ( $\Delta NDVI < -0,2$ )             | 275           | 2,7        | 2,75         |
| Помірна втрата ( $-0,2 \leq \Delta NDVI < -0,05$ ) | 1 329         | 13,3       | 13,29        |
| Стабільно ( $-0,05 \leq \Delta NDVI \leq 0,05$ )   | 4 573         | 45,6       | 45,73        |
| Помірний приріст ( $0,05 < \Delta NDVI \leq 0,2$ ) | 3 818         | 38,1       | 38,18        |
| Значний приріст ( $\Delta NDVI > 0,2$ )            | 35            | 0,3        | 0,35         |
| <b>Разом</b>                                       | <b>10 030</b> | <b>100</b> | <b>100,3</b> |

Встановлено, що майже половина території досліджуваних парків (45,6%) залишалася відносно стабільною, демонструючи зміни  $NDVI$  в межах  $\pm 0,05$ . Водночас 38,1% площі характеризуються помірним приростом вегетаційної активності, що може бути пов'язано як із розвитком нових декоративних насаджень, так і з процесами спонтанної сукцесії. Разом із тим 16% території зазнали різного ступеня деградації рослинного покриття. Найбільш критичними є ділянки зі значною втратою  $NDVI$  ( $\Delta NDVI < -0,2$ ), площа яких становить 2,75 га. З урахуванням просторової роздільної здатності *Sentinel-2* такі зони відповідають реальним осередкам інтенсивного порушення рослинності, пов'язаним із реконструкцією паркової інфраструктури, розширенням площ мощення, пошкодженнями внаслідок воєнних дій або локальною деградацією деревостану.

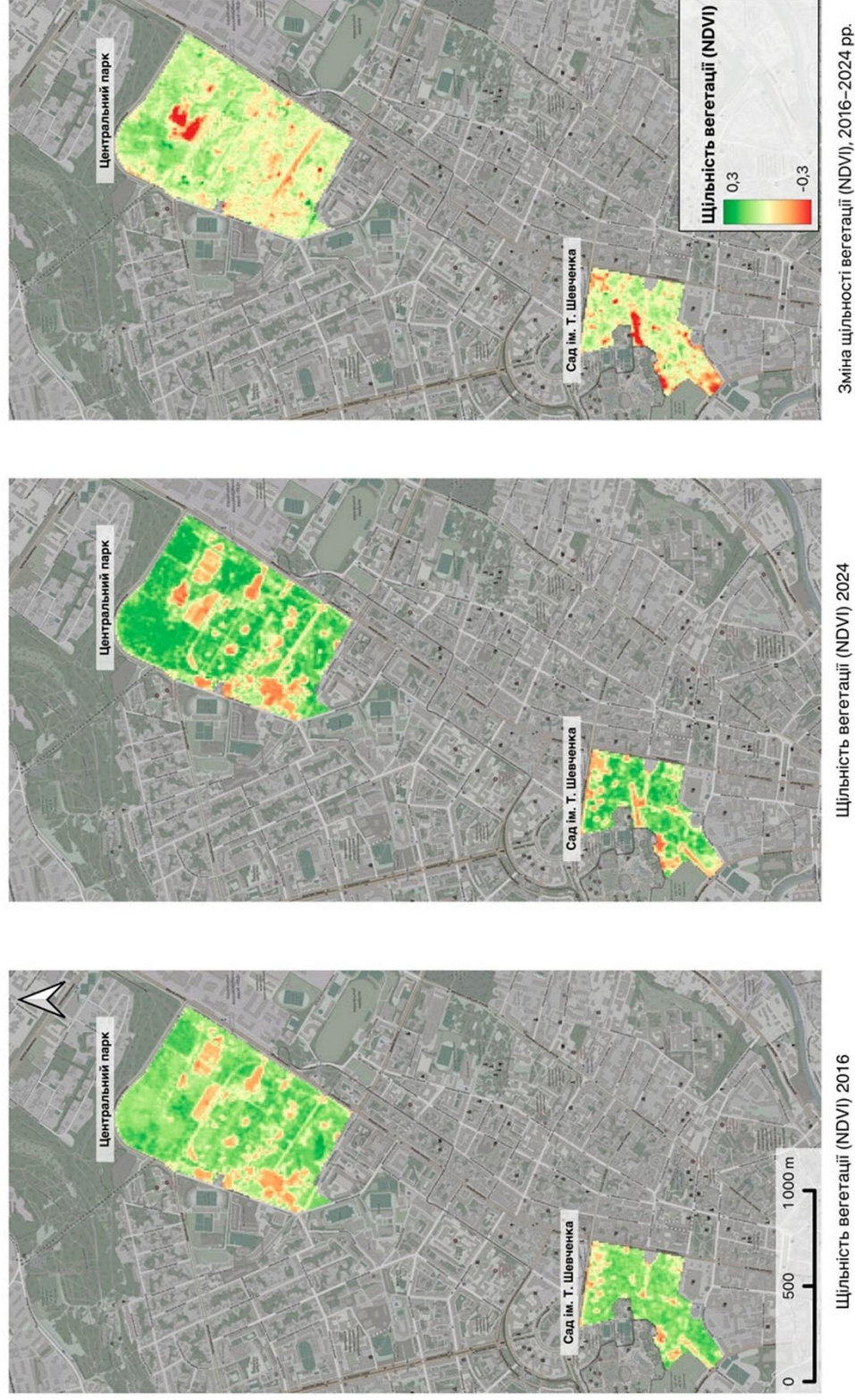
Таким чином, результати статистичного та зонального аналізу підтверджують, що трансформація зелених зон Харкова у 2016–2024 рр. має складний мозаїчний характер і поєднує одночасні процеси локального «позеленіння», фрагментації та деградації урбогеосистем.

### **Просторова структура трансформації рослинного покриття досліджуваних парків**

Просторовий аналіз растру різниці  $\Delta NDVI$  (рис. 2, кольорова вкладка) дозволив деталізувати характер трансформації рослинного покриття в межах Саду Шевченка та Центрального парку Харкова у 2016–2024 рр. Отримані результати підтверджують, що зміни мають виразно неоднорідний та локалізований характер, а середні статистичні показники не відображають повної картини урбогеосистемних перетворень.

Для Центрального парку характерною є диференціація території на дві функціонально відмінні зони. Периферійні ділянки переважно демонструють стабільні або позитивні значення  $\Delta NDVI$  ( $> +0,1$ ), що може бути пов'язано з природним розвитком деревостану, розширенням крон та частковим ефектом спонтанної сукцесії. Натомість центральна частина парку характеризується концентрацією виразних негативних

# Динаміка деревних насаджень Саду ім. Т. Шевченка та Центрального парку (2016–2024 рр.)



Джерела: Sentinel-2 L2A (ESA Copernicus), OpenStreetMap. Обробка: QGIS 3.44

Рисунок 2. Просторовий розподіл змін щільності рослинного покриття за даними NDVI у межах досліджуваних паркових територій Харкова у 2016-2024 рр. (авторська ілюстрація)

аномалій із показниками  $\Delta NDVI$  від  $-0,2$  до  $-0,53$ . Просторово ці осередки збігаються із зонами реконструкції паркової інфраструктури, розширенням пішохідних алей, встановленням комерційних об'єктів та атракціонів. Лінійна конфігурація окремих негативних аномалій свідчить про трансформацію території внаслідок прокладання нових заможених поверхонь або інженерних комунікацій.

У межах Саду Шевченка структура змін є більш мозаїчною. Найбільш інтенсивне зниження  $NDVI$  зафіксоване у центральних та північних частинах парку, тоді як периферійні ділянки характеризуються переважно стабільною або позитивною динамікою. Максимальні негативні значення  $\Delta NDVI$  (до  $-0,53$ ) просторово корелюють із зонами реконструкції 2017–2021 рр., де здійснювалася заміна старовікових дерев декоративними інтродуцентами – сакурами, магноліями та декоративними кленами. Це підтверджує, що молоді декоративні насадження у короткостроковій перспективі не компенсують втрату зрілих деревостанів через істотно меншу площу крони та нижчу сумарну фітомасу.

Отримані результати також демонструють прояв так званого «парадоксу  $NDVI$ ». Попри загальне зростання середнього індексу для досліджуваних територій, просторовий аналіз фіксує значні локальні втрати рослинного покриву. Таким чином, інтегральні статистичні показники можуть маскувати деградаційні процеси на окремих ділянках, особливо у випадку урбанізованих паркових територій із високою просторовою неоднорідністю.

Водночас, безумовно, необхідно враховувати методологічні обмеження проведеного аналізу. Просторова роздільна здатність *Sentinel-2* (10 м/піксель) не дозволяє ідентифікувати зміни на рівні окремих дерев або дрібних елементів благоустрою. Тому кожен піксель відображає інтегральний спектральний сигнал від сукупності поверхонь. Крім того, зміни  $NDVI$  можуть бути зумовлені як антропогенними чинниками (реконструкція, воєнні пошкодження, порушення догляду), так і природними процесами — фенологічними відмінностями, кліматичними коливаннями та міжрічною варіабельністю погодних умов. Для більш точної інтерпретації таких процесів доцільним є залучення дендропланів, аерофотознімків або *LiDAR*-даних, а можливо й усього комплексного підходу в рамках траєкторії цифрового територіального управління (DAM), що базується на створенні «цифрових двійників» зелених зон, які дозволяють ефективно інтегрувати дані *LiDAR* для точної оцінки об'єму біомаси, долаючи обмеження традиційного  $NDVI$  (Lehner & Dorffner, 2020). Вище у тексті ми вже згадували, що саме такий підхід, реалізований у Відні, забезпечує перехід до тривимірного моделювання екосистемних функцій міста (Thaler et al., 2023).

Попри зазначені обмеження, результати дослідження формують достатню доказову базу для висновку про суттєву урбогеосистемну трансформацію обох парків у 2016–2024 рр.

Найбільш інтенсивні втрати рослинності просторово пов'язані із задокументованим антропогенним втручанням, тоді як локальне зростання NDVI часто відображає процеси вторинної сукцесії або нерівномірного відновлення рослинного покриву. Це підтверджує, що оцінка стану міських зелених зон повинна базуватися не лише на середніх значеннях вегетаційних індексів, а й на аналізі просторової структури та фрагментації урбогеосистем.

#### Динаміка додаткових спектральних індексів

У нашому дослідженні, крім базового індексу NDVI, використано ще три, вже охарактеризовані у методичній секції показники (EVI, SAVI, NDBI), щоб отримати комплексну оцінку стану зелених зон Харкова та подолати обмеження, властиві кожному окремому індексу (табл. 4).

**Таблиця 4. Зональний аналіз растрів різниць  $\Delta EVI$ ,  $\Delta SAVI$  та  $\Delta NDBI$  (2016-2024 рр.)**  
(складено за результатами авторських розрахунків)

| Індекс                    | Категорія змін                  | Пікселів | Частка (%) | Площа (га) | Умова                         |
|---------------------------|---------------------------------|----------|------------|------------|-------------------------------|
| <b>EVI</b><br>(n=10 460)  | Значна втрата                   | 516      | 4,9        | 5,16       | $\Delta < -0,2$               |
|                           | Помірна втрата                  | 238      | 2,3        | 2,38       | $-0,2 \leq \Delta < -0,05$    |
|                           | Стабільно                       | 9 476    | 90,6       | 94,76      | $-0,05 \leq \Delta \leq 0,05$ |
|                           | Помірний приріст                | 74       | 0,7        | 0,74       | $0,05 < \Delta \leq 0,2$      |
|                           | Значний приріст                 | 156      | 1,5        | 1,56       | $\Delta > 0,2$                |
| <b>SAVI</b><br>(n=10 461) | Значна втрата                   | 633      | 6,1        | 6,33       | $\Delta < -0,2$               |
|                           | Помірна втрата                  | 1 658    | 15,8       | 16,58      | $-0,2 \leq \Delta < -0,05$    |
|                           | Стабільно                       | 3 243    | 31         | 32,43      | $-0,05 \leq \Delta \leq 0,05$ |
|                           | Помірний приріст                | 4 383    | 41,9       | 43,83      | $0,05 < \Delta \leq 0,2$      |
|                           | Значний приріст                 | 544      | 5,2        | 5,44       | $\Delta > 0,2$                |
| <b>NDBI</b><br>(n=10 461) | Значне зростання забудованості  | 93       | 0,9        | 0,93       | $\Delta > 0,2$                |
|                           | Помірне зростання забудованості | 1 540    | 14,7       | 15,4       | $0,05 < \Delta \leq 0,2$      |
|                           | Стабільно                       | 6 304    | 60,3       | 63,04      | $-0,05 \leq \Delta \leq 0,05$ |
|                           | Помірне зниження забудованості  | 2 515    | 24         | 25,15      | $-0,2 \leq \Delta < -0,05$    |
|                           | Значне зниження забудованості   | 9        | 0,1        | 0,09       | $\Delta < -0,2$               |

Додаткові спектральні індекси (*EVI*, *SAVI*, *NDBI*) були також розраховані у середовищі *QGIS 3.44* із використанням інструмента *Raster Calculator* на основі спектральних каналів супутникових знімків *Sentinel-2* (*QGIS Development Team*, 2026).

Застосування додаткових спектральних індексів (5)–(7) дозволяє деталізувати зміни рослинного покриву, враховуючи вплив щільності біомаси, відкритого ґрунту та процесів урбанізації. На відміну від *NDVI*, який є інтегральним показником вегетаційної активності, *EVI* чутливіший до густої рослинності та атмосферних впливів, *SAVI* частково компенсує вплив оголеного ґрунту, а *NDBI* дозволяє оцінити зміну частки забудованих або заощених поверхонь.

Результати аналізу *EVI* демонструють переважання стабільних територій: 90,6% площі характеризуються мінімальними змінами індексу ( $\Delta EVI$  у межах  $\pm 0,05$ ). Водночас близько 7,2% території зазнали різного ступеня втрати рослинного покриву, причому значна деградація ( $\Delta EVI < -0,2$ ) охоплює 5,16 га. Просторово ці ділянки переважно відповідають зонам реконструкції та локального скорочення щільної деревної рослинності. Порівняно невелика частка територій із позитивною динамікою *EVI* свідчить, що суттєвого збільшення площ зрілого деревостану у досліджуваний період не відбулося.

Індекс *SAVI* виявив значно вищу динамічність змін. Лише 31% території залишилися стабільними, тоді як 47,1 % площі характеризуються позитивною динамікою, включаючи 5,2%зі значним приростом. Одночасно майже 22% території демонструють різні ступені деградації. Така контрастність пояснюється високою чутливістю *SAVI* до змін відкритого ґрунту, газонів та молодих насаджень. Отже, результати *SAVI* підтверджують активні процеси реконструкції паркового середовища, пов'язані як із формуванням нових декоративних композицій, так і з локальним порушенням ґрунтового-рослинного покриву.

Особливо важливими для інтерпретації урбогеосистемних трансформацій є результати аналізу *NDBI*. Помірне або значне зростання забудованості зафіксовано на 16,3% досліджуваної території (16,33 га), що підтверджує тенденцію до розширення інфраструктурних та заощених поверхонь у межах парків. Просторово ці зміни корелюють із ділянками реконструкції алеї, рекреаційних майданчиків та технічної інфраструктури. Водночас 24,1% території демонструють зниження значень *NDBI*, що може свідчити про локальне заростання відкритих поверхонь або процеси вторинної сукцесії, особливо на периферійних ділянках парків.

Сумісний аналіз растрів різниць усіх індексів (табл. 4) підтверджує складний і неоднозначний характер трансформації зелених зон Харкова. З одного боку, фіксуються процеси локального відновлення або збільшення рослинного покриву, а з іншого — зростання фрагментації, урбанізаційного навантаження та деградації зрілих деревостанів. Таким чином, результати спектрального аналізу свідчать, що сучасна трансформація досліджуваних парків має характер багатовекторної урбогеосистемної

перебудови, де процеси реконструкції, декоративного озеленення, вторинної сукцесії та антропогенного навантаження відбуваються одночасно й формують просторово неоднорідну структуру міського ландшафту.

*Індекс EVI: структурні зміни деревостану та ефект спектрального насичення*

Покращений вегетаційний індекс (*EVI*) використовувався для уточнення змін у межах густого деревного покриву, де традиційний *NDVI* може втрачати чутливість через ефект спектрального насичення. Розрахунок індексу здійснювався за формулою (Huete et al., 2002):

$$EVI = 2,5 * \frac{(B08-B04)}{(B08+6*B04-7,5*B02+1)}, \quad (5)$$

де *B02*, *B04* та *B08* — синій, червоний і ближній інфрачервоний канали *Sentinel-2* відповідно. Завдяки корекції атмосферного впливу та ґрунтового фону *EVI* є більш придатним для аналізу щільних паркових деревостанів.

Отримані результати свідчать про незначне загальне зниження індексу: середнє значення *EVI* зменшилось із 0,960 у 2016 р. до 0,929 у 2024 р. Незважаючи на статистичну значущість відмінностей, підтверджену критерієм Манна–Вітні ( $p < 0,001$ ), величина ефекту залишається малою ( $d = -0,121$ ), що вказує на відсутність масштабної деградації всього деревного покриву досліджуваних територій.

Разом із тим статистична структура вибірки виявила важливу особливість індексу *EVI*. Медіанне значення для обох часових зрізів дорівнює 1,000, а міжквартильний розмах практично відсутній ( $IQR = 0,000$ ), що свідчить про домінування насичених значень у межах щільної деревної рослинності. У таких умовах *EVI* досягає верхньої межі чутливості, а тому середні значення перестають адекватно відображати локальні зміни стану насаджень.

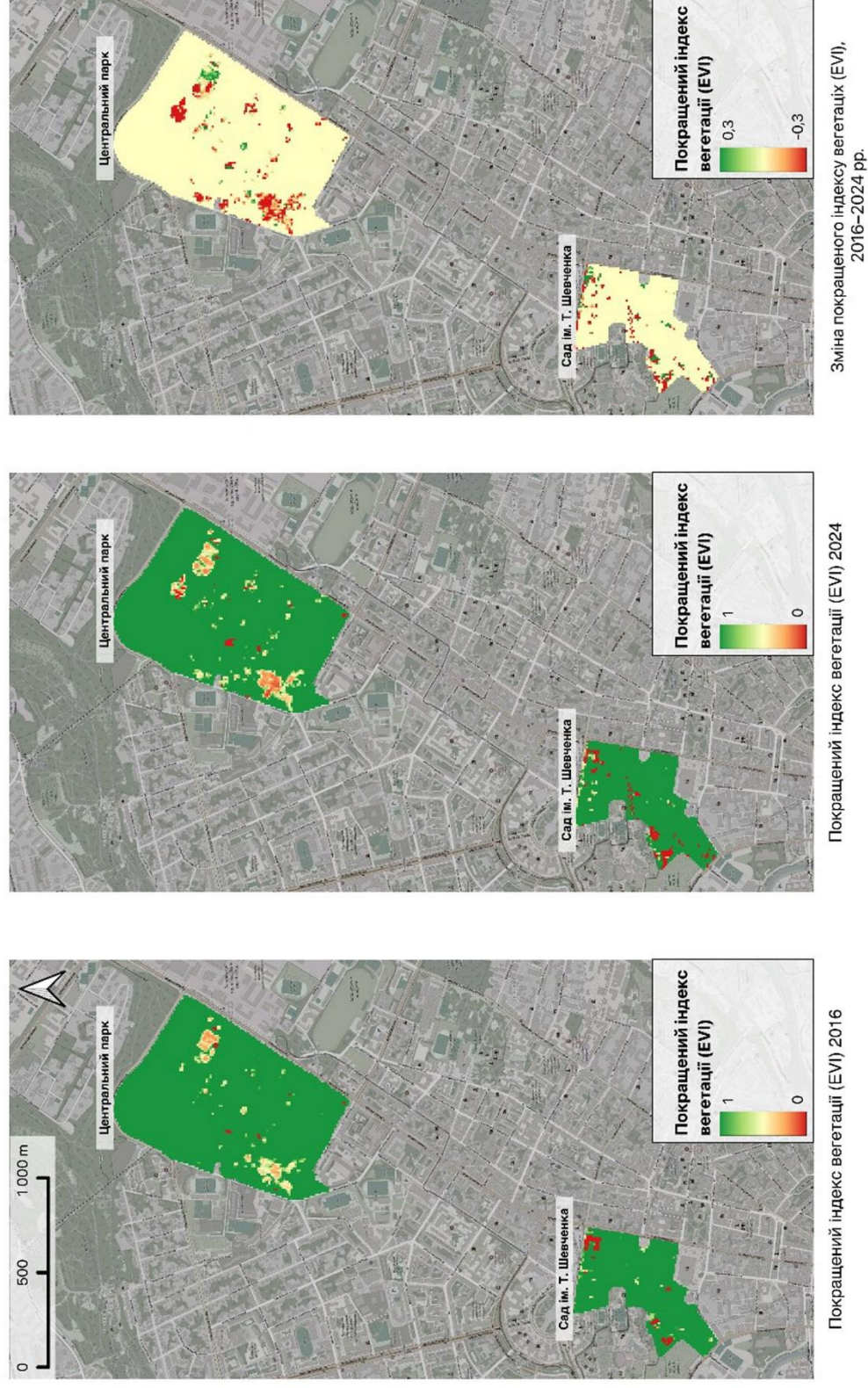
Фактично зафіксоване зниження середнього *EVI* формується не через рівномірне погіршення стану всієї зеленої маси, а внаслідок появи локальних осередків деградації, де частина пікселів виходить із насиченого стану. Просторово ці ділянки збігаються із зонами негативних аномалій  $\Delta NDVI$  та  $\Delta SAVI$ , що підтверджує їхній реальний характер і свідчить про локальні втрати щільного деревного покриву внаслідок реконструкційних або антропогенних процесів (рис. 3, кольорова вкладка).

Таким чином, *EVI* виявився менш інформативним для оцінки загальної динаміки паркових територій, проте ефективно підтвердив наявність локалізованих структурних змін у межах найбільш щільних деревостанів.

*Індекс SAVI: оцінка стану насаджень за умов впливу ґрунтового фону*

Індекс вегетації з корекцією ґрунту (*SAVI*) застосовувався для аналізу ділянок з неповним проективним покриттям, де вплив підстилаючого ґрунту та антропогенного

Динаміка покращеного індексу вегетації (EVI)  
Саду ім. Т. Шевченка та Центрального парку м. Харків (2016–2024 рр.)



Джерела: Sentinel-2 L2A (ESA/Copernicus), OpenStreetMap. Обробка: QGIS 3.44

Рисунок 3. Просторова диференціація змін індексу EVI у межах Саду Шевченка та Центрального парку Харкова у 2016-2024 рр.  
(авторська ілюстрація)

субстрату суттєво спотворює спектральні характеристики рослинності. Розрахунок індексу здійснювався за формулою (Huete, 1988):

$$SAVI = 2,5 * \frac{B08-B04}{B08+B04+L} * (1 + L), \quad (6)$$

де:  $L = 0,5$  — стандартний корекційний коефіцієнт, що мінімізує вплив відбивної здатності ґрунтового фону.

Аналіз динаміки виявив зростання середнього значення  $SAVI$  із 0,628 (2016 р.) до 0,651 (2024 р.) ( $\Delta = +0,023$ ). Статистична значущість цих змін підтверджена критерієм Манна–Вітні ( $p < 0,001$ ), хоча величина ефекту залишається помірною ( $d = +0,105$ ). Позитивна динаміка індексу корелює зі змінами  $NDVI$ , що вказує на загальну тенденцію до збільшення проєктивного покриття трав'янистого та чагарникового ярусів. Поряд із цим, істотне зростання стандартного відхилення (з 0,186 до 0,244) та міжквартильного розмаху (з 0,22 до 0,344) є кількісним індикатором посилення просторової гетерогенності (фрагментації) рослинного покриву.

Зональний аналіз  $\Delta SAVI$  (табл. 4) дозволив деталізувати структуру цих змін: 41,9% досліджуваної площі (43,83 га) демонструють помірний приріст індексу, 31% (32,43 га) залишаються стабільними, тоді як 21,9% (22,91 га) зазнали деградації різного ступеня, серед яких 6,33 га — значної ( $\Delta SAVI < -0,2$ ).

Просторова конфігурація похідної карти  $SAVI$  (рис. 4, кольорова вкладка) демонструє високу кореляцію з  $NDVI$ . Зокрема, виразні осередки деградації у північній частині Центрального парку та лінійні структури знижених значень індексу верифікуються в обох картографічних моделях. Це підтверджує, що  $SAVI$  є більш чутливим до локальних змін у розріджених та порушених насадженнях, ніж  $EVI$ , забезпечуючи надійну верифікацію антропогенних процесів трансформації міського ландшафту.

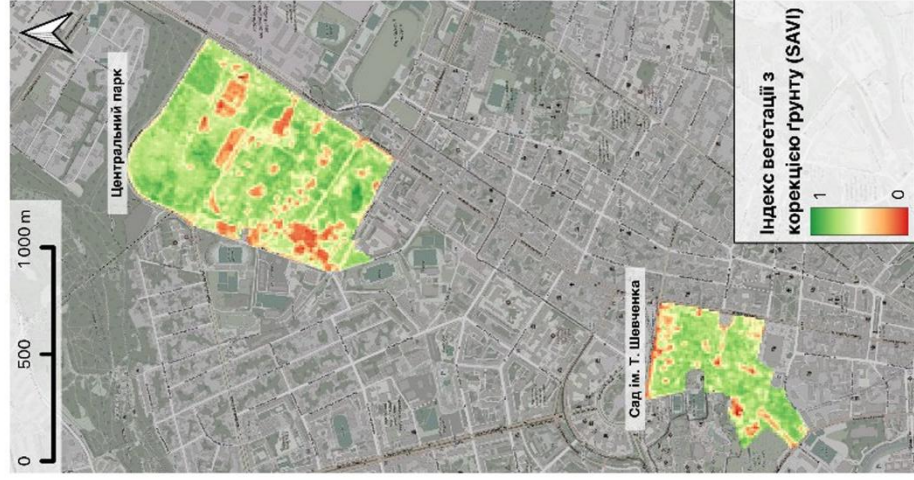
*Індекс NDBI: оцінка просторової динаміки штучних поверхонь*

Для оцінки просторової динаміки штучних поверхонь у межах досліджуваних паркових територій було використано нормалізований різницевий індекс забудованості (NDBI), який дозволяє ідентифікувати ділянки з переважанням інфраструктурних та заможених елементів. Індекс розраховувався за формулою (Ху, 2008):

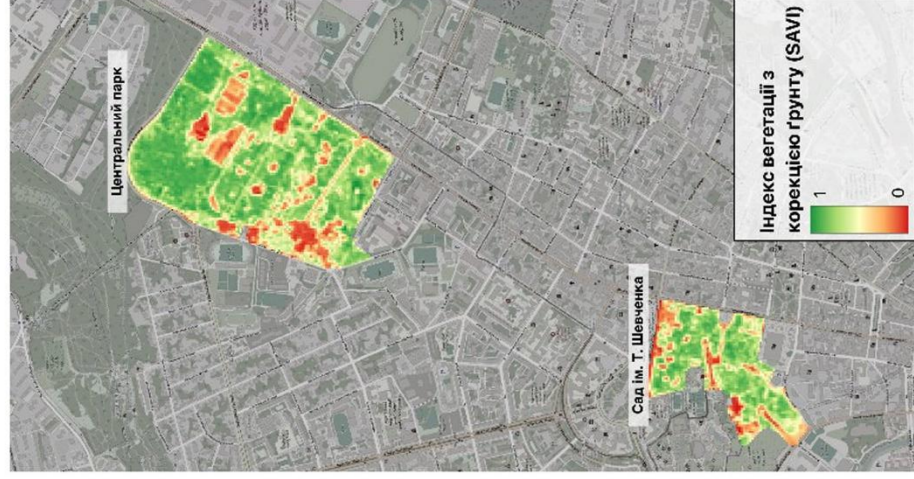
$$NDBI = \frac{B11-B08}{B11+B08}, \quad (7)$$

де  $B11$  — канал короткохвильового інфрачервоного діапазону ( $SWIR$ , 1610 нм), а  $B08$  — ближній інфрачервоний канал *Sentinel-2*. Оскільки просторове розрізнення каналу  $B11$  становить 20 м, перед обчисленням індексу його було приведено до 10-метрової

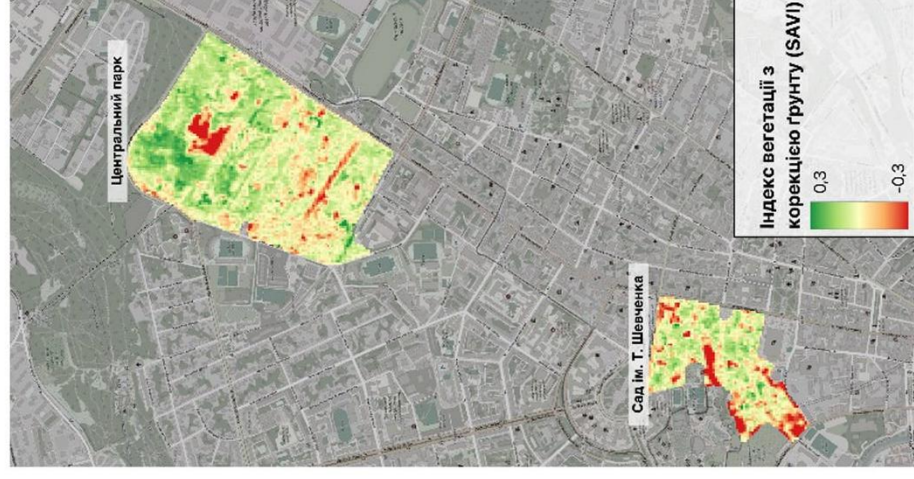
Динаміка індексу вегетації з корекцією ґрунту (SAVI)  
Саду ім. Т. Шевченка та Центрального парку м. Харків (2016–2024 рр.)



Індекс вегетації з корекцією ґрунту (SAVI) 2016



Індекс вегетації з корекцією ґрунту (SAVI) 2024



Зміна індексу вегетації з корекції ґрунту (SAVI), 2016–2024 рр.

Джерела: Sentinel-2 L2A (ESA/Copernicus), OpenStreetMap. Обробка: QGIS 3.44

Рисунок 4. Просторова диференціація змін індексу SAVI у межах Саду Шевченка та Центрального парку Харкова у 2016–2024 рр. (авторська ілюстрація)

роздільної здатності методом білінійної інтерполяції для забезпечення сумісності з іншими індексами.

На відміну від вегетаційних індексів, *NDBI* є індикатором інтенсивності антропогенно-трансформованих поверхонь: *позитивні значення* характерні для *асфальту, бетонних або гранітних покриттів*, тоді як *від'ємні значення* відповідають рослинності та відкритим ґрунтам. У межах досліджуваних парків середнє значення *NDBI* змінилося з  $-0,155$  у 2016 р. до  $-0,162$  у 2024 р. ( $\Delta = -0,007$ ). Незважаючи на незначну абсолютну величину змін, критерій Манна–Вітні підтвердив їх статистичну значущість ( $U = 60\ 058\ 714$ ;  $p = 2,13 \times 10^{-34}$ ), тоді як розмір ефекту за  $|d|$  Коена ( $-0,080$ ) відповідає малому ефекту.

Отримані похідні результати потребують обережної інтерпретації. Формальне зниження середнього значення *NDBI* може створювати враження загального скорочення частки штучних поверхонь, однак просторовий аналіз демонструє значну неоднорідність процесів трансформації (рис. 5, кольорова вкладка). Відповідно до зонального аналізу растру різниці  $\Delta NDBI$  (табл. 4), стабільними залишилися 60,3% території досліджуваних парків (63,04 га). Водночас 14,7% площі (15,4 га) характеризуються помірним зростанням забудованості, тоді як 24,0% (25,15 га) демонструють її зниження.

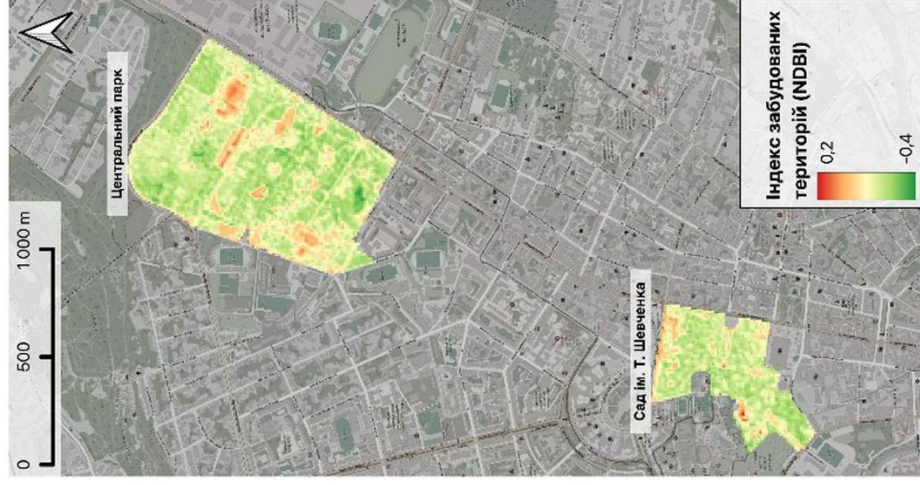
Картографічний аналіз показує, що зони підвищення *NDBI* мають локалізований характер і концентруються переважно у центральних та північних частинах Центрального парку, а також у межах окремих реконструйованих ділянок Саду Шевченка. Просторовий збіг цих осередків із ділянками негативних значень  $\Delta NDVI$  та  $\Delta SAVI$  свідчить про взаємопов'язаний характер процесів: зростання частки штучних поверхонь супроводжується локальною деградацією рослинного покриву. Лінійна конфігурація окремих аномалій *NDBI* дозволяє пов'язувати їх із прокладанням нових алей, інженерних мереж або облаштуванням рекреаційної інфраструктури.

Таким чином, результати аналізу *NDBI* підтверджують, що трансформація зеленої інфраструктури досліджуваних парків у 2016–2024 рр. мала не лише біофізичний, але й виразний *урбогеосистемний характер*. Просторове поєднання зон деградації рослинності та зростання інтенсивності забудованих поверхонь вказує на структурну перебудову паркових ландшафтів під впливом реконструкційних процесів і антропогенного навантаження.

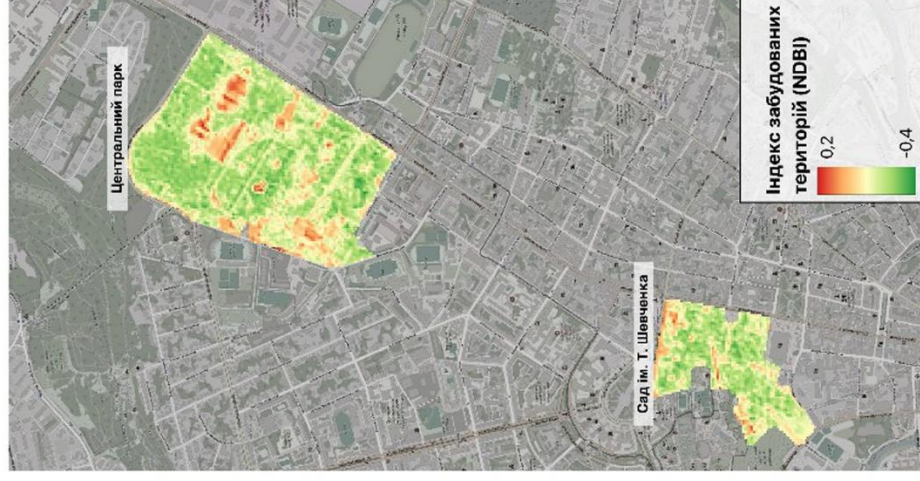
#### *Інтегральна оцінка трансформації зеленої інфраструктури досліджуваних парків*

Комплексний аналіз спектральних індексів *NDVI*, *EVI*, *SAVI* та *NDBI* дозволив виявити багатовекторний характер трансформації зеленої інфраструктури Саду Шевченка та Центрального парку Харкова у 2016–2024 рр. Незважаючи на те, що для всіх індексів статистичні відмінності між часовими зрізами виявилися достовірними (критерій Манна–Вітні,  $p < 0,001$ ), величина ефекту залишалася низькою ( $|d| < 0,15$ ). Це

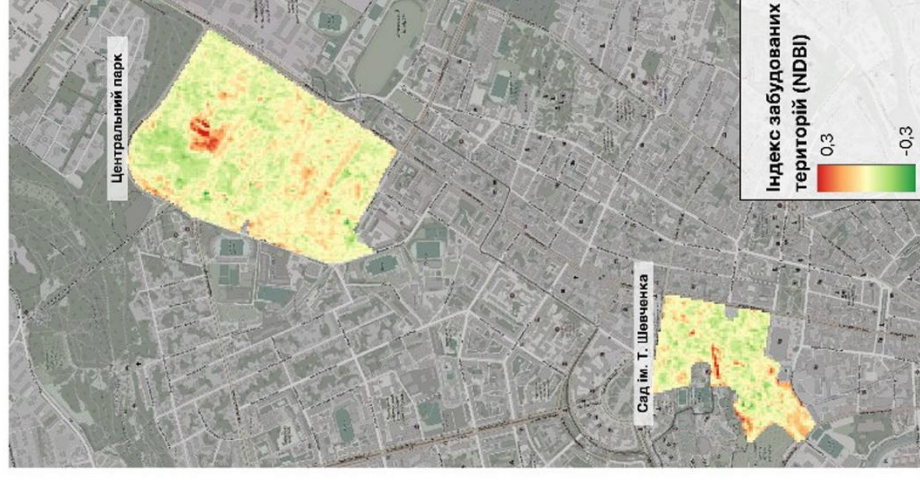
Динаміка індексу забудованих територій (NDBI)  
Саду ім. Т. Шевченка та Центрального парку м. Харків (2016–2024 рр.)



Індекс забудованих територій (NDBI) 2016



Індекс забудованих територій (NDBI) 2024



Зміна індексу забудованих територій (NDBI),  
2016–2024 рр.

Джерела: Sentinel-2 L2A (ESA/Copernicus), OpenStreetMap. Обробка: OGIS 3.44

Рисунок 5. Просторові зміни індексу забудованості NDBI у межах Саду Шевченка та Центрального парку Харкова у 2016-2024 рр. (авторська ілюстрація)

свідчить про відносно помірний рівень змін у масштабі всієї досліджуваної території, однак не заперечує наявності локальних осередків суттєвої деградації.

Особливо показовим є різноспрямований характер динаміки окремих індексів. Зростання середніх значень *NDVI* та *SAVI* вказує на певне збільшення загального рослинного покриву, насамперед за рахунок трав'янистої та чагарникової рослинності. Водночас зниження *EVI* свідчить про погіршення структурного стану деревного ярусу, оскільки саме цей індекс є більш чутливим до щільності та вертикальної організації деревостану. Така невідповідність підтверджує, що формальне «позеленіння» території не обов'язково означає покращення екологічної якості паркових екосистем.

Просторовий збіг осередків негативних значень  $\Delta NDVI$ ,  $\Delta EVI$  та  $\Delta SAVI$  з зонами підвищення  $\Delta NDBI$  демонструє системний характер антропогенної трансформації паркових урбогеосистем. Найбільш виразно ця закономірність проявляється у центральних і північних секторах Центрального парку, де деградація деревного покриву супроводжується збільшенням площ заощення та інфраструктурного освоєння території. Виявлена просторова кореляція підтверджує, що зафіксовані зміни не є випадковими або суто кліматично зумовленими, а пов'язані з реконструкційними процесами, локальними воєнними пошкодженнями та загальним посиленням антропогенного навантаження.

У контексті урбогеосистемного підходу отримані результати свідчать про структурну перебудову паркових ландшафтів Харкова, за якої зростання декоративного та низькорослого озеленення частково компенсує втрати деревної фітомаси лише на рівні інтегральних спектральних показників. Таким чином, середнє зростання вегетаційних індексів маскує процеси локальної деградації зрілих деревостанів, що є критично важливим для оцінки екологічної стійкості міських зелених зон у період антропогенних і воєнних трансформацій.

### **Верифікація результатів просторових змін *NDVI* за даними карт глобального покриття Google Earth Pro**

Для підтвердження достовірності результатів дистанційного зондування проведено якісну верифікацію виявлених змін  $\Delta NDVI$  за допомогою аерофотознімків високої просторової роздільної здатності з платформи карт глобального покриття *Google Earth Pro*. Порівняння знімків 2016 та 2024 рр. дозволило оцінити фізичний характер змін у межах контрольних ділянок із негативними та стабільними значеннями  $\Delta NDVI$ . Для аналізу обрано чотири контрольні точки, що репрезентують різні типи ландшафтних трансформацій (табл. 5).

Подальший аналіз продемонстрував, що всі зони зі значним зниженням *NDVI* відповідають реальним антропогенним трансформаціям території. У Центральному парку деградація рослинного покриву просторово збігається з ділянками реконструкції алеї,

розширенням рекреаційної інфраструктури та облаштуванням нових заможених поверхонь. У точках CP-1 та CP-2 (Центральний парк) зафіксовано зменшення деревного покриву через будівництво паркінгів, розширення зон атракціонів та реконструкцію алеї. У Саду Шевченка найбільш інтенсивні від'ємні значення  $\Delta NDVI$  пов'язані з масштабною реконструкцією центральної осі парку, що супроводжувалась знесенням частини деревного покриву та збільшенням площі відкритого плиткового мощення. Точка SS-1 ілюструє вказану масштабну реконструкцію у Саду Шевченка, де природні елементи (водойма Каскад та дерева) були замінені на формальний канал і плиткове мощення. Водночас контрольна ділянка SS-C (Сад Шевченка) підтвердила відсутність фізичних змін, що свідчить про коректність методики та відсутність хибнопозитивних результатів.

**Таблиця 5. Результати верифікації зон деградації  $\Delta NDVI$  за даними Google Earth Pro**

| Точка | Локація                           | $\Delta NDVI$      | Стан 2016                   | Стан 2024                                             | Вірогідна причина                       |
|-------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| CP-1  | Центральний парк, північ          | $< -0,2$           | Суцільний деревний масив    | Парковка + нова забудова навколо рекреаційного центру | Реконструкція паркової інфраструктури   |
| CP-2  | Центральний парк, центр           | $-0,10 \dots -0,2$ | Вузькі алеї, щільний покрив | Розширені алеї, зона атракціонів збільшена            | Реконструкція алеї та рекреаційної зони |
| SS-1  | Сад Шевченка, центральна вісь     | $< -0,3$           | Каскад, дерева вздовж осі   | Лінійний канал, відкрита плиткова площа, фонтан       | Реконструкція 2019-2021 рр.             |
| SS-C  | Сад Шевченка, схід (вул. Сумська) | $\approx 0$        | Щільний деревний покрив     | Щільний деревний покрив - без змін                    | Стабільна ділянка - контроль            |

Отримані результати свідчать, що зафіксовані аномалії спектрального індексу  $NDVI$  мають переважно антропогенне походження та безпосередньо пов'язані з реконструкційними процесами і трансформацією паркової інфраструктури. Разом із тим *Google Earth Pro* виконує допоміжну функцію інтерпретації змін і не може замінити кількісний аналіз супутникових даних.

Верифікація засвідчила 100% відповідність від'ємних аномалій  $\Delta NDVI$  реальним ландшафтним перетворенням. Встановлено, що зафіксовані зміни є результатом муніципальних проєктів реконструкції, проведених у період 2016–2024 рр., що підтверджує, як вже вказано вище, переважання антропогенного чинника над кліматичним чи фенологічним у формуванні виявлених спектральних аномалій. Хоча якісний аналіз не дозволяє кількісно оцінити площу змін, він слугує надійним інструментом верифікації дистанційних даних.

### Реконструкція парків як фактор урбогеосистемної трансформації

Результати дослідження свідчать, що реконструкційні процеси у центральних парках Харкова мали неоднозначний екологічний ефект. З одного боку, модернізація інфраструктури сприяла покращенню рекреаційної привабливості територій, оновленню декоративного озеленення та формуванню нових громадських просторів. З іншого боку, просторовий аналіз низки індексів виявив істотне скорочення площ компактного деревостану та посилення антропогенної трансформації поверхні.

Особливо показовим є феномен так званого «парадоксу NDVI». Попри локальне зростання середніх значень індексу після реконструкції, фактична фітомаса зелених зон не відновилася до попереднього рівня. Молоді декоративні насадження — сакури, магнолії, катальпи, декоративні клени — мають значно меншу площу листової поверхні та об'єм крони порівняно зі старовіковими дубами, липами та ясенами, які були частково вилучені під час реконструкції.

Унаслідок цього формуються просторово фрагментовані ділянки з високою декоративною цінністю, але нижчим екосистемним потенціалом. Це проявляється у:

- зменшенні тіньового ефекту;
- локальному підвищенні температури поверхні;
- погіршенні водоутримуючої функції;
- зниженні стабільності мікроклімату.

Результати дослідження підтверджують, що урбаністичні реконструкції можуть призводити до прихованої деградації зеленої складової міської урбогеосистеми навіть за умов формального збільшення площ озеленення.

### Висновки

Проведене комплексне дослідження урбогеосистемної трансформації ключових зелених зон Харкова у період 2016–2024 років дозволяє зробити низку концептуальних та практичних висновків, які мають вагоме значення для сучасної урбаністики та екологічного моніторингу міст в умовах антропогенного та воєнного навантаження.

По-перше, застосування урбогеосистемного підходу в поєднанні з методами дистанційного зондування та ГІС-аналізом довело обмеженість традиційного моніторингу. Використання виключно агрегованих показників (зокрема, усереднених значень NDVI) є недостатнім для об'єктивної оцінки стану міського середовища. Виявлений у ході дослідження «парадокс NDVI», коли загальне зростання індексу на 4,3% маскує суттєву структурну деградацію та фрагментацію ландшафту (зростання стандартного відхилення на 32%), підтверджує, що в умовах щільної забудови кількісні індикатори потребують якісного розширення.

По-друге, розроблена нами методика інтегрованого використання мультиспектральних індексів (EVI, SAVI, NDVI) на базі даних Sentinel-2 (рівень L2A)

дозволила подолати ефекти спектрального насичення та впливу субстрату. Ми довели, що *EVI* є незамінним інструментом для виявлення структурних змін у зрілих деревостанах, де *NDVI* втрачає чутливість, тоді як *SAVI* став ключовим для моніторингу зон з порушеним проєктивним покриттям та будівельним сміттям. Результати верифікації за даними *Google Earth Pro* (100% відповідність виявлених аномалій реальним змінам) підтвердили високу достовірність обраного інструментарію.

*По-третє, аналіз рекреаційних об'єктів Харкова - Саду ім. Т. Г. Шевченка та Центрального парку - продемонстрував, що антропогенний вплив є домінуючим чинником.* Процеси реконструкцій останнього десятиліття, часто спрямовані на «європеїзацію» простору (мощення поверхонь, розширення транспортних мереж, заміна старовікових деревостанів декоративними інтродуцентами), призвели до глибинної трансформації екосистем. Вони часто виступають потужнішим чинником деградації, ніж безпосередня житлова забудова, що веде до зниження екологічної ефективності насаджень у питаннях депонування вуглецю та мікрокліматичного регулювання.

*По-четверте, воєнний контекст після 2022 року має кардинально змінити управління зеленими зонами.* До фізичних пошкоджень додалися явища «військового дичавіння» - спонтанної сукцесії на занедбаних територіях, що вимагає перегляду підходів до догляду за ними. Для ефективного управління в період післявоєнної відбудови необхідно здійснити перехід від площинного обліку до концепції цифрового територіального управління (*Digital Areal Management*), яка інтегрує дані *LiDAR*-сканування та 3D-моделювання міського довкілля.

На завершення, *стратегія відновлення Харкова має базуватися на принципах стійкості міських екосистем та відмові від надмірної урбанізації паркових зон на користь природних рішень (nature-based solutions).* Запропонована методологія моніторингу дозволяє органам міського самоврядування і планування не лише відновлювати знищені ділянки, а й формувати так званий *екологічний каркас міста*, здатний адаптуватися до викликів війни, кліматичних змін та соціально-економічних трансформацій, забезпечуючи високу якість життя містян у довгостроковій перспективі.

#### Funding

The authors received no financial support.

#### Фінансування

Автори не отримували фінансової підтримки.

#### Conflict of interest

The authors declared no potential conflicts of interest.

#### Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність будь-яких потенційних конфліктів інтересів.

## References | Список використаних джерел

- Baumann, M., & Kuemmerle, T. (2016). The impacts of warfare and armed conflict on land systems. *Journal of Land Use Science*, 11(6), 672–688. DOI: <https://doi.org/10.1080/1747423X.2016.1241317>
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2012). *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*. Washington: Island Press.
- Braubach, M., Egorov, A., & Mudu, P., Wolf, T., Thompson, C. W., & Martuzzi, M. (2017). Effects of urban green space on environmental health, equity and resilience. In Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (2017). *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas* (pp. 187–205). Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>
- CDSE. (2026). Welcome to Copernicus Data Space Ecosystem. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/>
- Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*. 120, 25–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Estoque, R., & Murayama, Y. (2017). Monitoring surface urban heat island formation in a tropical mountain city using Landsat data (1987–2015). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 133, 18–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.09.008>
- European Space Agency – ESA. (2015). Sentinel-2 User Handbook. URL: [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2 User Handbook](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2+User+Handbook)
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25(3). 295–309. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Huete, A., Didan, K., Miura T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 83(1–2), 195–213. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Kharkiv City Council (2026). Official portal of the Kharkiv City Council: On Approval of Land Management Projects for the Organization and Establishment of Boundaries of Recreational Territories of Kharkiv “Green Zones and Green Plantations”. [In Ukrainian]. [Харківська міська рада. Офіційний портал Харківської міської ради: Про затвердження проектів землеустрою з організації та встановлення меж території рекреаційного призначення м. Харкова „Зелені зони та зелені насадження”]. URL: <https://www.city.kharkov.ua>
- Kholoshyn, I. V., Syvyj, M. J., Mantulenko, S. V., Shevchenko, O. L., Sherick, D., & Mantulenko, K. M. (2023). Assessment of military destruction in Ukraine and its consequences using remote sensing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012132>
- Kostrikov S. Niemets L., Sehida K., Niemets K., & Morar, C. (2018). Geoinformation approach to the urban geographic system research (case studies of Kharkiv region). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series “Geology. Geography. Ecology”*. 49, 107–121. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09>
- Kostrikov, S., Pudlo, R., Bubnov, D., & Vasiliev, V. (2020). ELiT, multifunctional web-software for feature extraction from 3D LiDAR point clouds. *ISPRS International Journal of GeoInformation*. 9, 650–885. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110650>
- Kostrikov, S., & Seryogin, D. (2022). Urbogeosystemic approach to agglomeration study within the urban remote sensing frameworks. In A. Battisti, S. Baiani (Eds.), *Sustainable Development Dimensions and Urban Agglomeration* (pp. 251–273). IntechOpen, London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102482>
- Kostrikov, S., Kravchenko, K., Serohin, D., Bilianska, S., & Savchenko, A. (2023). The performance of the digital city projects in urban studies of the megalopolises (the case studies of Kharkiv and Dnipro cities). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University*,

- Series "Geology. Geography. Ecology. (59), 140–165. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-11>.
- Kostrikov, S., & Serohin, D. (2025). Urban change detection with airborne LiDAR for hostilities' impact estimation: a case study of Kharkiv. *European Journal of Remote Sensing*, 58(1). DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2025.2491750>
- Kowarik, I. (2011). Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 1974-1983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.022>
- Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V., Nikitchenko, O., & Sukhov, V. (2024). Ecosystem degradation in Kharkiv region during the war: satellite analysis. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 329–343. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410> [in Ukrainian] [Крайнюк, О., Буц, Ю., Барбашин, В., Нікітченко, О., Сухов, В. (2024). Деградація екосистем у Харківській області під час війни: супутниковий аналіз. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (61), 329–343.
- Kronenberg, J. (2015). Why not to green a city? Institutional barriers to preserving urban ecosystem services. *Ecosystem Services*, 12(C), 218–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.07.002>
- Lehner, H., Dorffner, L. (2020). Digital geoTwin Vienna: Towards a digital twin city as geodata hub. *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*. 88, 63–75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00101-4>
- Li, L., Zhou, X., Chen, L., Chen, L., Zhang, Y., & Liu, Y. (2020). Estimating urban vegetation biomass from Sentinel-2A image data. *Forests*, 11, 125. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11020125>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Morar, C., Lukic, T., Valjarevic, A., Niemets, L., Kostrikov, S., Sehida, K., Telebienieva, I., Kluchko, L., Kobylin, P., & Kravchenko, K. (2022). Spatiotemporal analysis of urban green areas using change detection: a case study of Kharkiv, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*. 10, 823129. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.823129>.
- Niemelä, J. (Ed.). (2011). *Urban Ecology: Patterns, Processes, and Applications*. Oxford University Press. URL: <https://global.oup.com/academic/product/urban-ecology-9780199563562>
- Nowak, D.J., & Greenfield, E.J. (2018). US Urban Forest Statistics, Values, and Projections. *Journal of Forestry*. 116, 164–177. DOI: <https://doi.org/10.1093/jofore/fvx004>
- Pan, Y., & Qu, Y. (2024). Cultural ecosystem services in land use/land cover change: A literature review and prospects for future research. In *Land*, 13(12). DOI: <https://doi.org/10.3390/land13122027>
- Pauleit, S., Hansen, R., Lorange Rall, E., Zölch, T., Andersson, E., Luz, A. C., Szaraz, L., Tosics, I., & Vierikko, K. (2017). Urban Landscapes and Green Infrastructure (28 June 2017). In Hank Shugart (ed.), *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science* (New York, NY, online edn, Oxford Academic). DOI: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.23>
- Pereira, P., Zhao, W., Symochko, L., Inacio, M., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2022). The Russian-Ukrainian armed conflict will push back the sustainable development goals. *Geography and Sustainability*, 3(3), 277–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.09.003>
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press.
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. *Remote Sensing*. 12, 2291. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
- Pichura, V., & Potravka, L. (2025). Impact of war on natural and climatic transformation of territories in the irrigation zone of Ukraine. *Discover Applied Science*, 7, 783. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07404-4>
- QGIS Development Team. (2026). *QGIS User Guide*. URL: <https://www.qgis.org/resources/hub/>
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309–317.

- Small, C. (2003). High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 88 (1–2), 170–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.008>
- Sokolenko, U., Honcharenko, Y., & Oleksiichenko, N. (2026). Satellite image classification for monitoring and distribution analysis of green spaces in Kharkiv, Ukraine. In O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos, I. Biletskyi, Y. Tsegelnyk, Y. (Eds.), *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1658. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-032-06829-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-032-06829-3_8)
- Thaler, S., Eitzinger, J., Formayer, H., Gützer Ch., Hörbinger, S., Masson V., Mursch-Radlgruber, E., Perny, K., Preiss, J., Pröll, T., Rauch, J. P., Sadriu, M., Schmidt, S., Schoetter, R., Szocska, D., Wittkowski, M., Trimmel, H., Wöß, D., & Weihs, P. (2023). Cooling potential of green spaces in the Vienna metropolitan area during extended periods of drought, EMS Annual Meeting 2023, Bratislava, Slovakia, 4–8 Sep 2023, EMS2023-343. DOI: <https://doi.org/10.5194/ems2023-343>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Wellmann, T., Lausch, A., Andersson, E., Knapp, S., Cortinovis, Ch., Jache, J., Scheuer S., Kremer S., Mascarenhas, A., Kraemer, R., Haase, A., Schug, F., & Haase, D. (2020). Remote sensing in urban planning: Contributions towards ecologically sound policies? *Landscape and Urban Planning*, 204, 103921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103921>
- Wu, W., Tan, W., Wang, R., & Chen, W. (2023). From quantity to quality: Effects of urban greenness on life satisfaction and social inequality. *Landscape and Urban Planning*, 238, 104843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104843>
- Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4269–4276. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>
- Xue, J., & Su, B., (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 17, 1353691. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Zhang, C., Xu, Z., & Yang, Y. (2024). Dynamic monitoring of ecological quality in Eastern Ukraine amidst the Russia-Ukraine conflict. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 90(7), 427–435. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.23-00085R2>
- Zhou, W., Huang, G., & Cadenasso, M. L. (2011). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 102, 54–63. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009>
- Zhukov, Y. M. (2023). Near-real time analysis of war and economic activity during Russia's invasion of Ukraine. *Journal of Comparative Economics*, 51(4), 1232–1243. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCE.2023.06.003>
-