ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 598.2:631.523.2:598.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.14

ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ НА ТЕРИТОРІЯХ МІСТ ПОКРОВСЬК, МИРНОГРАД І ЧАСІВ ЯР ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Артеменко Н.Ф. (orcid.org/0009-0004-9679-7612),
Присяжний В.І. (orcid.org/0000-0001-7825-9037),
Морозова Т.В. (orcid.org/0000-0003-4836-1035)
Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Василя Липківського, 35/2, 02000, Київ
erdu@urk.net

Окреслено і вивчено проблеми екологічних наслідків воєнних дій на територіях міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр із використанням даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю оперативного отримання достовірної інформації про зміни природних і антропогенних компонентів довкілля в умовах обмеженого доступу до територій активних бойових дій. Особливу увагу приділено промисловим містам Донецької області, де воєнний вплив поєднується з високим рівнем техногенного навантаження, пов'язаного з функціонуванням підприємств вугільної промисловості, транспортної інфраструктури та потенційними ризиками затоплення шахт.

Метою дослідження є оцінювання екологічних наслідків воєнних дій на територіях досліджуваних міст шляхом інтегрованого використання супутникових даних, спектральних індексів і геоінформаційних технологій. Інформаційну основу дослідження становлять багатоспектральні знімки Sentinel-2 MSI, радіолокаційні дані Sentinel-1 SAR, супутникові матеріали Landsat 8–9, дані NASA FIRMS щодо активних пожеж, а також відкриті геопросторові дані OpenStreetMap, Copernicus Land Monitoring Service, Humanitarian Data Exchange та ACLED. Для аналізу використано систему спектральних індексів NDVI, ΔNDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI та BSI, що забезпечують комплексний аналіз змін рослинного покриву, водних об'єктів, забудованих територій, згарищ і відкритих ґрунтів.

Запропоновано комплексну методику просторово-часового аналізу, яка поєднує попередню обробку супутникових даних, розрахунок спектральних індексів, інтеграцію растрових і векторних геопросторових даних, багаточасове порівняння та картографічне узагальнення результатів. Методика передбачає використання часових зрізів за 2021–2026 роки, що забезпечує порівняння довоєнного стану територій із сучасними змінами, спричиненими воєнними діями. Сформовано алгоритм обробки даних і систему взаємозв'язків між джерелами інформації, спектральними показниками та результатами просторового аналізу.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості оперативного виявлення територій із найбільш вираженими екологічними змінами, підтримці екологічного моніторингу, обґрунтуванні пріоритетів польових обстежень і післявоєнного відновлення, а також формуванні геопросторової доказової бази для прийняття управлінських рішень у сфері охорони довкілля. *Ключові слова:* дистанційне зондування Землі; воєнні дії; екологічні наслідки; геоінформаційний аналіз; Sentinel-2; Sentinel-1; Landsat; NASA FIRMS; спектральні індекси; Покровськ; Мирноград; Часів Яр; просторово-часовий аналіз.

Spatio-Temporal Geospatial Assessment of the Environmental Impacts of Warfare in Pokrovsk, Myrnohrad, and Chasiv Yar Using Earth Remote Sensing Data. Artemenko N., Prysiazhnyi V., Morozova T.

This study is devoted to assessing the environmental impacts of warfare in the cities of Pokrovsk, Myrnohrad, and Chasiv Yar using Earth remote sensing data and geospatial analysis. The relevance of the research is driven by the need for rapid and reliable information on changes in natural and anthropogenic environmental components under conditions of restricted access to active combat zones. Particular attention is paid to the industrial cities of the Donetsk region, where military impacts are compounded by a high level of technogenic pressure associated with coal mining, transport infrastructure, and the potential risks of mine flooding.

The aim of the study is to assess the environmental impacts of warfare in the selected urban areas through the integrated use of satellite imagery, spectral indices, and geospatial technologies. The information base includes Sentinel-2 MSI multispectral imagery, Sentinel-1 SAR radar data, Landsat 8–9 satellite imagery, NASA FIRMS active fire data, and open geospatial datasets from OpenStreetMap, the Copernicus Land Monitoring Service, the Humanitarian Data Exchange (HDX), and the Armed Conflict Location & Event Data Project (ACLED). A set of spectral indices, including NDVI, ΔNDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI, and BSI, was applied to comprehensively analyse changes in vegetation cover, water bodies, built-up areas, burned areas, and exposed soils.

© Артеменко Н.Ф., Присяжний В.І., Морозова Т.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

A comprehensive spatio-temporal assessment methodology is proposed that integrates satellite data preprocessing, spectral index calculation, raster and vector geospatial data integration, multi-temporal comparison, and cartographic visualization. The methodology is based on annual observation periods covering 2021–2026, enabling comparisons between pre-war environmental conditions and wartime changes. A workflow for data processing and an integrated framework linking data sources, spectral indicators, and geospatial analysis results were developed.

The proposed approach provides an effective tool for the rapid identification of areas experiencing the most significant environmental changes, supports environmental monitoring, facilitates the prioritization of field surveys and post-war recovery planning, and contributes to the development of a geospatial evidence base for environmental decision-making. *Key words:* Earth remote sensing; environmental impacts of warfare; geospatial analysis; satellite monitoring; Sentinel-2; Sentinel-1; Landsat 8–9; NASA FIRMS; spectral indices; Pokrovsk; Myrnohrad; Chasiv Yar; spatio-temporal analysis.

Вступ. Повномасштабна збройна агресія Російської Федерації проти України спричинила масштабні зміни природного та антропогенного середовища, наслідки яких виходять далеко за межі безпосередньої зони бойових дій. Руйнування промислових підприємств, транспортної та комунальної інфраструктури, виникнення пожеж, забруднення ґрунтів продуктами вибухів і горіння, пошкодження водогосподарських систем, деградація рослинного покриву та трансформація структури землекористування формують комплекс взаємопов'язаних екологічних ризиків, що потребують системного дослідження [1].

Вибір Покровська, Мирнограда і Часового Яру зумовлений поєднанням інтенсивних бойових дій, високої концентрації об'єктів вугільної промисловості, значного антропогенного навантаження та різного ступеня трансформації міського середовища, що робить ці території репрезентативними для дослідження екологічних наслідків війни у промислових регіонах України.

Особливої уваги потребують території Донецької області, де бойові дії відбуваються в межах одного з найбільших індустріальних районів Європи. Міста Покровськ, Мирноград і Часів Яр характеризуються високою концентрацією підприємств вугільної промисловості, транспортної інфраструктури, енергетичних об'єктів та урбанізованих територій. У цьому регіоні воєнний вплив поєднується з історично сформованим техногенним навантаженням, зокрема ризиками затоплення шахт, забруднення поверхневих і підземних вод, просідання земної поверхні та накопичення токсичних речовин. Після початку повномасштабної війни ці ризики суттєво посилилися через пошкодження шахтної, енергетичної та водогосподарської інфраструктури [2].

За таких умов традиційні методи польового екологічного моніторингу є суттєво обмеженими, тому дедалі більшого значення набувають дистанційне зондування Землі, геоінформаційні технології та інтегровані підходи до просторового аналізу екологічних змін [3, 7, 8]. Це зумовлює необхідність використання технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які забезпечують оперативне отримання об'єктивної просторової інформації незалежно від доступності території дослідження. Сучасні супутникові системи дають змогу здійснювати багаторічний моніторинг екологічних змін, аналізувати просторову структуру земного покриву, виявляти згарища, оцінювати стан рослинності, водних об'єктів і забудованих територій, а також відстежувати наслідки бойових дій у часовій динаміці [1].

Проведений аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що дослідження екологічних наслідків війни в Україні активно розвиваються за кількома напрямами. У працях українських учених Герасимчук Л. О. [9], Кононенка В. П. [10], Кучера В. О. [11], Трегуба О. А. [12], Балюка С. А. [13] розглянуто вплив бойових дій на ґрунтовий покрив, природні екосистеми, промислові території та окремі компоненти довкілля. Войтюк Д. і Гроза Д. [14] обґрунтовують необхідність моніторингу лісових екосистем, які зазнали пожеж, механічних пошкоджень та мінного забруднення. У роботах Нікітченко І., Прокопенка Н., Шведчикової І. [14] і Цимбалюк К. [15] основну увагу приділено проблемам післявоєнного відновлення водних екосистем та управління водними ресурсами.

Паралельно активно розвиваються дослідження, що базуються на використанні технологій дистанційного зондування Землі. Найбільшого поширення набули багатоспектральні дані Sentinel-2 для аналізу рослинності, відкритих ґрунтів, водних поверхонь і згарищ, радіолокаційні дані Sentinel-1 для виявлення структурних змін земної поверхні незалежно від погодних умов, архівні матеріали Landsat для аналізу довгострокових змін земного покриву, а також дані NASA FIRMS для моніторингу активних пожеж і термальних аномалій. Комплексне використання цих інформаційних ресурсів забезпечує більш повне виявлення екологічних змін та дедалі ширше застосовується у міжнародних дослідженнях воєнного впливу на довкілля [4, 7].

Незважаючи на активний розвиток супутникового моніторингу та створення міжнародних платформ (Copernicus EMS, Joint Research Centre, NASA FIRMS), більшість досліджень зосереджена на документуванні окремих типів пошкоджень або загальному аналізі екологічних наслідків війни. Комплексні методики просторово-часового аналізу, що інтегрують багатоспектральні, радіолокаційні й термальні супутникові дані із системою спектральних індексів для оцінювання екологічних змін на промислово урбанізованих територіях, висвітлено недостатньо. Особливо це стосується міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр, де воєнний

вплив поєднується зі значним техногенним навантаженням вугільного регіону [5].

Незважаючи на значний розвиток супутникового моніторингу та створення міжнародних інформаційних платформ для картографування воєнних пошкоджень, більшість досліджень зосереджена на документуванні окремих типів руйнувань або загальному оцінюванні територій. Водночас комплексні методики просторово-часового аналізу, що інтегрують багатоспектральні, радіолокаційні та термальні супутникові дані із системою спектральних індексів для промислових територій Донбасу, залишаються недостатньо розробленими [6-8].

У зв'язку з цим **метою дослідження** є оцінювання екологічних наслідків воєнних дій на територіях міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр із використанням даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу. Для досягнення поставленої мети передбачено обґрунтувати інформаційну базу дослідження, сформувати систему спектральних індексів для аналізу рослинного покриву, водних об'єктів, згарищ, забудованих територій та відкритих ґрунтів, розробити методику просторово-часового аналізу екологічних змін і визначити підходи до інтерпретації отриманих результатів.

Матеріали та методи дослідження.

Інформаційна база дослідження. Для забезпечення порівнянності результатів часові межі дослідження охоплюють 2021–2026 рр. Базовим (довоєнним) періодом обрано 2021 рік, який характеризує вихідний стан досліджуваних територій до початку повномасштабної збройної агресії рф проти України. Період 2022–2026 рр. використано для виявлення просторово-часових змін, пов'язаних із бойовими діями, руйнуванням міської інфраструктури, виникненням пожеж, порушенням ґрунтового покриву, деградацією рослинності, трансформацією водних об'єктів та іншими проявами воєнного впливу на довкілля.

Інформаційну основу дослідження становить комплекс відкритих супутникових і геопросторових даних різної фізичної природи. Основним джерелом є багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2 MSI Level-2A Surface Reflectance, які використовуються для розрахунку спектральних індексів NDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI та BSI. Радарні дані Sentinel-1 SAR застосовуються для аналізу структурних змін земної поверхні, руйнування забудови та інфраструктури незалежно від погодних умов. Для виявлення пожеж і термальних аномалій використовуються дані NASA FIRMS, сформовані на основі супутникових спостережень MODIS і VIIRS. Як додаткове джерело застосовуються матеріали Landsat 8-9, які забезпечують аналіз довгострокових змін земного покриву та температури земної поверхні.

Для просторової інтерпретації результатів використовуються відкриті векторні дані OpenStreetMap, Copernicus Land Monitoring Service, адміністративні межі територій, а також відкриті геопросторові бази даних щодо транспортної інфраструктури, промислових підприємств, шахтних майданчиків, териконів, водних об'єктів і зелених зон. Для просторово-часового зіставлення екологічних змін з інтенсивністю бойових дій використовуються відкриті дані ACLED. Вихідні супутникові та геопросторові дані, використані в дослідженні, наведено в таблиці 1.

Інформаційна база дослідження сформована за принципом інтеграції багатоджерельних супутникових та геопросторових даних, що забезпечує комплексний аналіз екологічних наслідків воєнних дій. Поєднання оптичних, радіолокаційних, термальних і векторних даних дає змогу підвищити достовірність інтерпретації результатів, мінімізувати обмеження окремих джерел інформації та забезпечити просторово-часове зіставлення змін різних компонентів довкілля.

Часові межі та просторовий дизайн дослідження. Просторово-часовий аналіз ґрунтується на порівнянні шести часових зрізів, що охоплюють довоєнний період, початкову фазу повномасштабної війни, етап накопичення змін та сучасний стан досліджуваних територій. Такий підхід забезпечує можливість простежити динаміку трансформації природного й антропогенного середовища та відокремити короткострокові зміни від довготривалих екологічних наслідків.

Часові зрізи супутникового моніторингу наведено в таблиці 2.

Для забезпечення коректності міжрічного порівняння супутникові знімки відбиралися переважно за однаковий фенологічний період (травень–вересень), що мінімізує вплив сезонної мінливості рослинного покриву, вологості ґрунту та водних об'єктів на значення спектральних індексів.

Система спектральних індексів. Для кількісного аналізу екологічних змін використовувалася система спектральних індексів, що характеризують стан рослинного покриву, водних об'єктів, згарищ, відкритих ґрунтів і забудованих територій. Комплексне застосування індексів забезпечує можливість аналізу різних компонентів довкілля та їх трансформації під впливом воєнних дій. Перелік спектральних індексів, їх формули та практичне призначення наведено в таблиці 3.

Методика просторово-часового аналізу. Запропонована методика передбачає послідовне поєднання багатоспектрального, радіолокаційного, термального та геоінформаційного аналізу, що забезпечує комплексне виявлення екологічних наслідків воєнних дій, їх просторово-часову інтерпретацію та картографування. Послідовність основних етапів обробки супутникових і геопросторових даних, а також формування результатів оцінювання екологічних наслідків воєнних дій наведено на рисунку 1.

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 1

Вихідні супутникові та геопросторові дані, використані в дослідженні

Джерело даних	Основні характеристики	Період	Роль у методиці
Sentinel-2 MSI Level-2A	Оптичні дані, 13 спектральних каналів, 10/20/60 м	2021–2026	Розрахунок NDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI, BSI; аналіз рослинності, водних об'єктів, згарищ, відкритих ґрунтів і забудови
Sentinel-1 SAR	C-band SAR, VV/VH, 10 м	2021–2026	Аналіз руйнувань забудови, змін шорсткості поверхні, деформацій та міської структури незалежно від погодних умов
Landsat 8–9 OLI/TIRS	Оптичні (30 м) і термальні канали	2021–2026	Аналіз довгострокових змін земного покриву, температури поверхні та верифікація результатів Sentinel-2
NASA FIRMS (MODIS/ VIIRS)	Точки активних пожеж і термальних аномалій	2021–2026	Виявлення осередків пожеж, аналіз згарищ та просторове зіставлення із зонами бойових дій
OpenStreetMap (OSM)	Векторні шари забудови, доріг, водних об'єктів, зелених зон, промислових територій	Актуальні дані	Просторова прив'язка результатів, аналіз інфраструктури та землекористування
Copernicus Land Monitoring Service	Тематичні шари земного покриву	Актуальні дані	Уточнення структури земного покриву та перевірка результатів класифікації
Адміністративні межі (HDX/OCHA)	Векторні полігони	Актуальні дані	Формування меж дослідження та картографування
Промислові об'єкти, шахти, терикони	Векторні геодані (OSM, відкриті бази даних)	Актуальні дані	Локалізація техногенних об'єктів і аналіз потенційних зон екологічного ризику
Дані про бойові дії (ACLED)	Просторово-часова база подій	2022–2026	Просторово-часове зіставлення екологічних змін з інтенсивністю бойових дій

Таблиця 2

Часові зрізи супутникового моніторингу, використані в дослідженні

Рік	Характеристика періоду	Мета аналізу
2021	довоєнний стан	формування базового стану територій
2022	початок повномасштабної війни	виявлення первинних екологічних змін
2023	накопичення воєнних впливів	аналіз розвитку деградаційних процесів
2024	період інтенсивних бойових дій	аналіз руйнувань, пожеж і втрати рослинності
2025	формування довготривалих наслідків	аналіз стійких екологічних змін
2026	актуальний стан	комплексне порівняння та картографування

Алгоритм, наведений на рис. 2, відображає повний цикл обробки даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій. На першому етапі формується інформаційна база дослідження, що включає багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2 MSI, радіолокаційні дані Sentinel-1 SAR, супутникові матеріали Landsat 8–9, інформацію NASA FIRMS про активні пожежі та відкриті геопросторові дані щодо адміністративних меж, транспортної інфраструктури, промислових об’єктів і бойових подій.

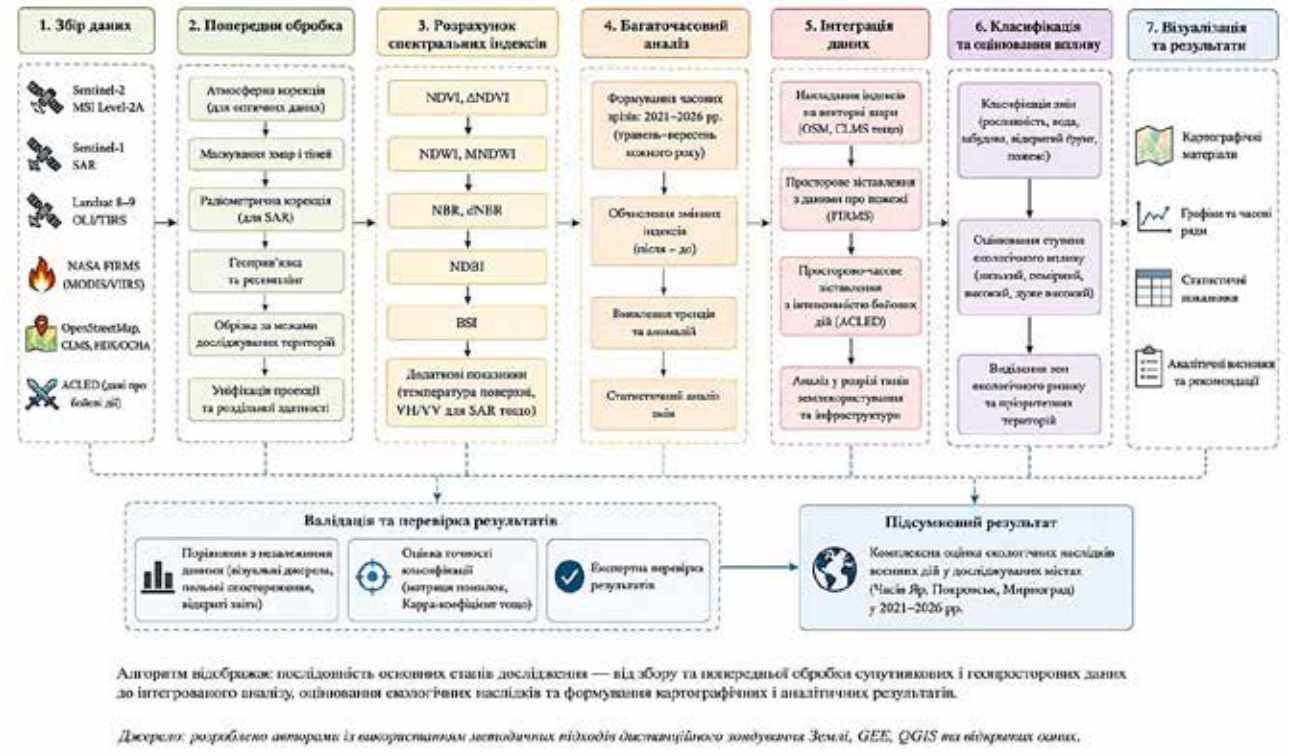
Другий етап передбачає попередню обробку даних, яка включає атмосферну та геометричну корекцію, маскування хмарності, приведення даних до єдиної проєкції, ресемплінг просторової роздільної здатності та обрізку растрових даних за межами досліджуваних територій. Це забезпечує коректність подальшого міжрічного порівняння супутникових знімків.

На третьому етапі здійснюється розрахунок спектральних індексів (NDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI, BSI), що характеризують стан рослинного покриву, водних об’єктів, згарищ, забудованих територій і відкритих ґрунтів. Для багаточасового

Таблиця 3

Спектральні індекси, використані у дослідженні

Індекс	Формула	Характеристика	Основне призначення
NDVI	$\frac{NIR - R_{red}}{IR + R_{red}}$	рослинний покрив	аналіз стану та деградації рослинності
ΔNDVI	$NDVI_{після} - NDVI_{до}$	зміна рослинності	кількісна оцінка втрати рослинного покриву
NDWI	$\frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	водні поверхні	виявлення водойм і зміни зволоження
MNDWI	$\frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$	урбанізовані водойми	уточнення меж водних об'єктів
NBR	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	згарища	виявлення пожеж
dNBR	$NBR_{після} - NBR_{до}$	ступінь пошкодження	оцінювання інтенсивності згарищ
NDBI	$\frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$	забудова	аналіз урбанізованих територій
BSI	$\frac{(SWIR + R_{red}) - (NIR + Blue)}{(SWIR + R_{red}) + (NIR + Blue)}$	відкритий ґрунт	виявлення порушених земель



Алгоритм відображає послідовність основних етапів дослідження — від збору та попередньої обробки супутникових і геопросторових даних до інтегрованого аналізу, оцінювання екологічних наслідків та формування картографічних і аналітичних результатів.

Джерело: розроблено авторами із використанням методичних підходів дистанційного зондування Землі, GEE, QGIS та відкритих даних.

Рис. 1. Алгоритм обробки супутникових та геопросторових даних для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій

Джерело: розроблено авторами; візуалізацію виконано із використанням інструментів генеративного штучного інтелекту OpenAI ChatGPT, остаточне наукове структурування та редакційне опрацювання здійснено авторами

аналізу використовуються однакові сезонні часові зрізи за 2021–2026 рр., що дає змогу мінімізувати вплив сезонної мінливості природних компонентів.

Наступним етапом є інтеграція отриманих результатів із векторними геопросторовими даними та просторово-часове зіставлення спектральних змін із розташуванням промислових об’єктів, транспортної інфраструктури, шахт, водних об’єктів і райо-

нів ведення бойових дій. На основі комплексного аналізу виконується класифікація змін компонентів довкілля, визначаються території з найбільшою інтенсивністю екологічних порушень і формуються тематичні картографічні матеріали.

Заключним етапом алгоритму є валідація отриманих результатів шляхом їх порівняння з незалежними джерелами інформації, відкритими супутниковими матеріалами та результатами інших досліджень. Такий підхід підвищує достовірність інтерпретації просторово-часових змін і забезпечує формування науково обґрунтованої інформаційної основи для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій та підтримки прийняття рішень щодо післявоєнного відновлення територій.

Концептуальну схему методики просторово-часового оцінювання екологічних наслідків воєнних дій наведено на рисунку 2.

Відповідність між використаними джерелами даних, розрахованими спектральними індексами та результатами просторового аналізу наведено в таблиці 4.

Комплексне використання багатоспектральних, радіолокаційних, термальних і векторних геопросторових даних забезпечує багаторівневий аналіз екологічних наслідків воєнних дій, підвищує достовірність інтерпретації результатів та дає змогу виявити просторові взаємозв'язки між руйнуванням інфраструктури, деградацією рослинності, трансформацією водних об'єктів, пожежами й техногенними ризиками.

Особливості досліджуваних територій. Об'єктами дослідження є міста **Покровськ, Мирноград і Часів Яр**, розташовані в Донецькій області. Вибір саме цих територій обумовлений поєднанням інтенсивного воєнного впливу та значного техногенного навантаження, характерного для вугільного регіону.

Часів Яр розглядається як репрезентативний приклад масштабного руйнування урбанізованого середовища, що підтверджується численними супутниковими спостереженнями та міжнародними картографічними матеріалами. **Покровськ** характеризується високою концентрацією транспортної, житлової та промислової інфраструктури, що робить його показовим для аналізу комплексного впливу бойових дій на міське середовище. **Мирноград** відзначається значним впливом вугільної промисло-

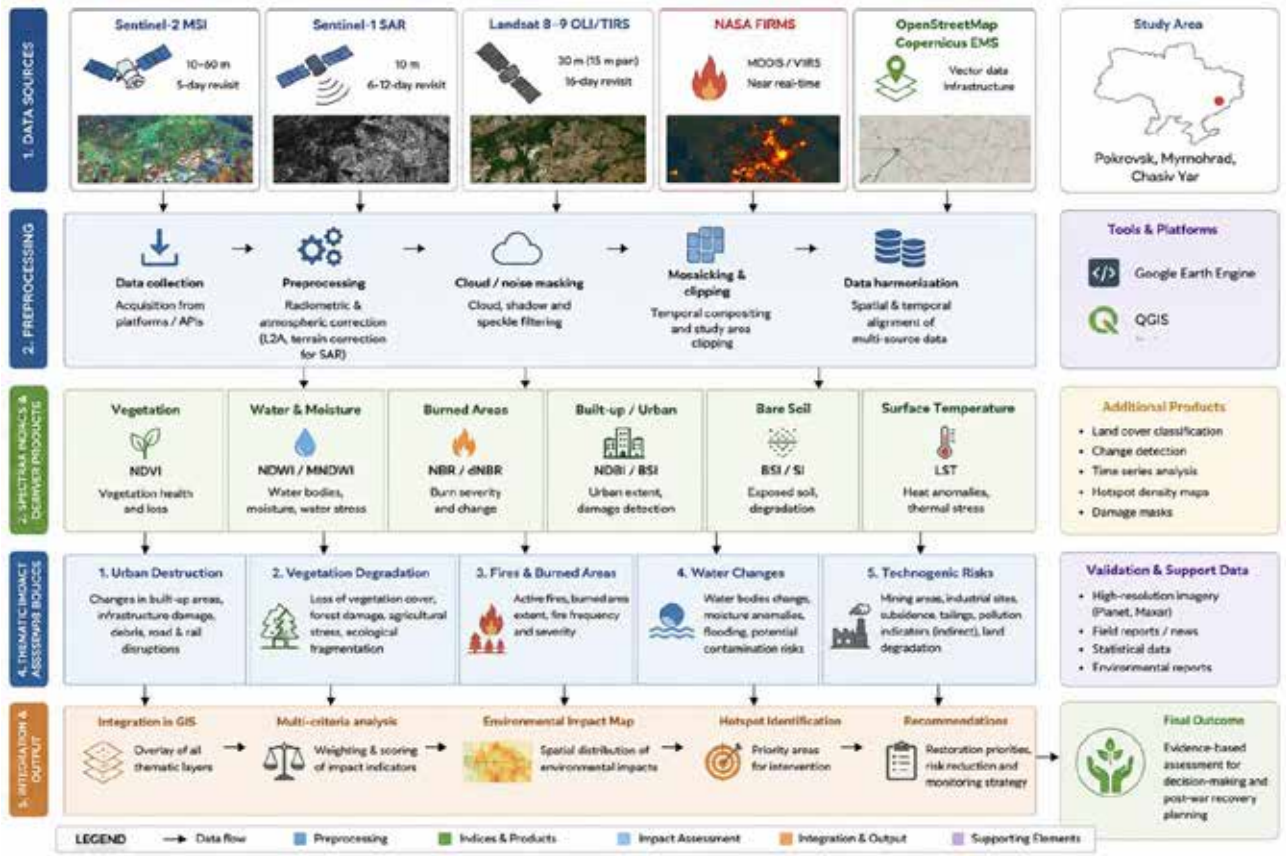


Рис. 2. Концептуальна схема методики оцінювання екологічних наслідків воєнних дій з а даними дистанційного зондування Землі

Джерело: розроблено авторами. Візуалізацію схеми виконано із використанням інструментів генеративного штучного інтелекту OpenAI ChatGPT; остаточне структурування, наукова інтерпретація та редакційне опрацювання здійснені авторами

Таблиця 4

Відповідність джерел даних, спектральних індексів та результатів просторового аналізу

Тематичний блок	Джерело даних	Спектральні індекси / показники	Аналітичний результат
Рослинний покрив	Sentinel-2 MSI	NDVI, ΔNDVI	Карти стану та деградації рослинності, визначення територій втрати зелених насаджень
Водні об'єкти	Sentinel-2 MSI	NDWI, MNDWI	Карти змін площі водойм, підтоплення або пересихання, аналіз водного стресу
Пожежі та згарища	Sentinel-2 MSI, NASA FIRMS	NBR, dNBR, термальні аномалії MODIS/VIIRS	Карти згарищ, локалізація осередків пожеж, оцінювання ступеня пошкодження територій
Урбанізовані території	Sentinel-2 MSI, Sentinel-1 SAR	NDBI, SAR-ознаки	Карти руйнування забудови, зміни міської структури та інфраструктури
Відкриті та порушені землі	Sentinel-2 MSI	BSI	Карти порушених земель, вирв, оголеного ґрунту та зон механічних пошкоджень
Техногенні об'єкти	OpenStreetMap, відкриті геодані	Просторове накладання (Overlay Analysis)	Локалізація шахт, териконів, промислових підприємств і зон потенційного екологічного ризику
Бойові дії	ACLED	Просторово-часове зіставлення	Встановлення взаємозв'язку між інтенсивністю бойових дій та змінами компонентів довкілля
Комплексне оцінювання	Усі використані джерела	Інтегральний геоінформаційний аналіз	Комплексні карти екологічних наслідків воєнних дій для міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр

вості, тому особливу увагу приділено аналізу потенційних ризиків, пов'язаних із шахтними водами, підтопленням, деформаціями земної поверхні та техногенною трансформацією територій.

Запропонована методика забезпечує комплексне оцінювання екологічних наслідків воєнних дій шляхом інтеграції супутникових, геоінформаційних і тематичних просторових даних. Використання багаточасових супутникових спостережень та системи спектральних індексів створює підґрунтя для виявлення просторово-часових закономірностей деградації компонентів довкілля, визначення територій із найбільшим рівнем антропогенно-воєнного навантаження та формування картографічної основи для прийняття рішень щодо екологічного моніторингу й післявоєнного відновлення.

Результати дослідження. ***Концептуальні засади оцінювання екологічних наслідків.*** Дослідження екологічних наслідків воєнних дій із використанням даних дистанційного зондування Землі є одним із найбільш перспективних напрямів сучасного екологічного моніторингу. Використання багатоспектральних, радіолокаційних та термальних супутникових даних забезпечує можливість просторово-часового аналізу територій, доступ до яких обмежений або неможливий через активні бойові дії. Крім документування масштабів руйнувань, результати такого аналізу формують наукову основу для визначення пріоритетних територій післявоєнного обстеження, планування природоохоронних заходів та розроблення стратегій екологічного відновлення.

Оцінювання екологічних наслідків воєнних дій доцільно здійснювати не за єдиним інтегральним показником, а за системою взаємопов'язаних тематичних блоків, кожний із яких характеризує окремий компонент трансформації довкілля.

Перший блок охоплює **руйнування урбанізованого середовища**, що проявляється у зміні забудованих територій, пошкодженні промислових підприємств, транспортної інфраструктури, об'єктів енергетики та комунального господарства, появі зон завалів і порушенні просторової структури міського середовища. Для виявлення таких змін найбільш ефективним є поєднання багатоспектральних даних Sentinel-2 із радіолокаційними даними Sentinel-1, які забезпечують моніторинг незалежно від погодних умов та часу доби.

Другий блок характеризує **деградацію рослинного покриву**, що виникає внаслідок пожеж, вибухів, механічного порушення ґрунтів, облаштування фортифікаційних споруд, пересування важкої техніки та припинення господарського догляду за територіями. Для кількісного аналізу доцільно використовувати спектральні індекси рослинності (NDVI, EVI), які широко застосовуються для виявлення змін стану рослинного покриву за даними Sentinel-2.

Третій блок пов'язаний із **виявленням пожеж і згарищ**. Його основу становить аналіз індексів NBR та dNBR, що дають змогу визначати площі вигорілих територій, а також використання даних NASA FIRMS, сформованих на основі супутників MODIS і VIIRS, для реєстрації активних пожеж і термальних аномалій майже в реальному часі.

Четвертий блок стосується **змін водних об'єктів та водного стресу**. Для територій Покровська, Мирнограда та Часового Яру особливого значення набуває аналіз трансформації малих водойм, підтоплення територій, зміни вологості поверхні та потенційного впливу шахтних вод. Для цього можуть застосовуватися спектральні індекси NDWI, MNDWI та інші індикатори вологості у поєднанні з просторовим аналізом розташування шахт, водотоків і промислових майданчиків.

П'ятий блок характеризує **техногенні ризики**, пов'язані з функціонуванням вугільної промисловості. Незважаючи на те, що супутникові дані не забезпечують безпосереднього визначення хімічного складу ґрунтів чи вод, вони дають можливість виявляти непрямі ознаки техногенного впливу, зокрема зміну кольору водних об'єктів, локальні підтоплення, просідання земної поверхні, деградацію рослинності навколо промислових підприємств та інші просторові прояви порушення природних процесів.

Інформаційне забезпечення кожного тематичного блоку базується на комплексному використанні відкритих супутникових та геопросторових даних, характеристику яких наведено в таблиці 5.

Інформаційну основу дослідження формують відкриті супутникові дані різних типів, що взаємно доповнюють одне одного за спектральними та просторовими характеристиками. Багатоспектральні дані Sentinel-2 використовуються для аналізу рослинного покриву, водних об'єктів, згарищ і класифікації земного покриву. Радіолокаційні дані Sentinel-1 застосовуються для виявлення структурних змін забудови, просідання земної поверхні та інших трансформацій незалежно від хмарності. Архівні матеріали Landsat 8-9 забезпечують аналіз довгострокових змін земного покриву та температурних аномалій. Дані NASA FIRMS використовуються для реєстрації активних пожеж і термальних аномалій, а інформаційні ресурси OpenStreetMap і Copernicus Emergency Management Service – для просторового зіставлення пошкоджень із транспортною мережею, забудовою та іншими елементами інфраструктури.

Особливе значення для дослідження мають дані Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI), що містять 13 спектральних каналів із просторовим розрізненням 10, 20 та 60 м. Використання гармонізованої колекції Sentinel-2 Level-2A Surface Reflectance у середовищі Google Earth Engine забезпечує доступ до однорідних багаторічних часових рядів із періодичністю повторного знімання близько п'яти діб, що створює передумови для проведення просторово-часового аналізу екологічних змін.

Запропонована методика передбачає послідовне опрацювання багатоджерельних супутникових даних, розрахунок спектральних індексів, просторовий аналіз тематичних показників та інтеграцію отриманих результатів у єдину систему оцінювання екологічних наслідків воєнних дій. Такий підхід забезпечує комплексний аналіз трансформації природного й антропогенного середовища та формує інформаційну основу для визначення пріоритетних територій післявоєнного відновлення.

Висновки. У статті узагальнено сучасні підходи до оцінювання екологічних наслідків воєнних дій із використанням даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій і обґрунтовано доцільність їх застосування для дослідження територій міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр.

Сформовано комплексну інформаційну базу дослідження, яка інтегрує багатоспектральні дані Sentinel-2 MSI, радіолокаційні матеріали Sentinel-1 SAR, супутникові знімки Landsat 8–9, інформацію NASA FIRMS про активні пожежі, відкриті геопросторові дані та відомості про бойові події. Запропоноване поєднання різнорідних джерел забезпечує комплексний аналіз просторово-часових змін компонентів довкілля.

Обґрунтовано систему спектральних індексів (NDVI, ΔNDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI

Таблиця 5

Характеристика супутникових та геопросторових даних, використаних для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій

Джерело даних	Основне призначення
Sentinel-2 MSI	Аналіз рослинного покриву, водних об'єктів, згарищ, відкритих ґрунтів і класифікація земного покриву
Sentinel-1 SAR	Виявлення руйнувань, змін шорсткості поверхні, просідань та трансформації міської структури незалежно від хмарності
Landsat 8–9	Аналіз довгострокових змін земного покриву та температурних аномалій
NASA FIRMS	Моніторинг активних пожеж і термальних аномалій за даними MODIS та VIIRS
OpenStreetMap / Copernicus EMS	Просторове зіставлення пошкоджень із дорожньою мережею, забудовою та елементами інфраструктури

та BSI), яка охоплює основні компоненти природного й антропогенного середовища та створює основу для виявлення деградації рослинного покриву, трансформації водних об'єктів, згарищ, змін забудованих територій і порушених земель.

Розроблено методику просторово-часового аналізу, що поєднує попередню обробку супутникових даних, розрахунок спектральних індексів, інтеграцію растрової та векторної інформації, просторове зіставлення з техногенними об'єктами й районами бойових дій, а також картографічне узагальнення результатів. Запропонований алгоритм забезпечує відтворюваність дослідження та може бути адаптований для інших територій, що зазнали воєнного впливу.

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні комплексного підходу до оцінювання екологічних наслідків воєнних дій на промислових територіях шляхом інтегрованого використання багатоспектральних, радіолокаційних і термальних супутникових даних у поєднанні із системою спектральних індексів та геоінформаційним аналізом. На відміну від більшості існуючих підходів, запропонована методика враховує одночасно природні, урбанізовані та техногенно трансформовані компоненти довкілля.

Практичне значення запропонованої методики – у формуванні науково обґрунтованої інформаційної основи для екологічного моніторингу територій, визначення пріоритетних ділянок для польових обстежень, підтримки прийняття управлінських рішень щодо післявоєнного відновлення та створення геопросторової доказової бази для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій.

Література

1. United Nations Environment Programme. The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review Nairobi : UNEP, 2022. 54 p. URL: https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine-preliminary-review (дата звернення: 08.07.2026).
2. Conflict and Environment Observatory (CEOBS). Ukraine URL: https://ceobs.org/countries/ukraine/ (дата звернення: 08.07.2026).
3. Conflict and Environment Observatory (CEOBS), Zoï Environment Network. Assessing Environmental Damage in Ukraine 2024. URL: https://ceobs.org/paper-assessing-environmental-damage-in-ukraine/ (дата звернення: 08.07.2026).
4. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O., Bubalo N., Hryhorczuk A., Erickson T. B. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. Journal of Occupational Medicine and Toxicology. 2024. Vol. 19. Art. 1. DOI: https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y.
5. Conflict and Environment Observatory (CEOBS), Zoï Environment Network. The Environmental Consequences of the War against Ukraine: Preliminary Twelve-Month Assessment (February 2022 – February 2023). Summary and Recommendations 2024. URL: https://ceobs.org/the-environmental-consequences-of-the-war-against-ukraine-preliminary-12-month-assessment-summary-and-recommendations/ (дата звернення: 08.07.2026).
6. Copernicus Emergency Management Service. Emergency Management Service : Service Overview European Union, 2025. URL: https://mapping.emergency.copernicus.eu/documents/40/CopernicusEMS-Service_Overview_Brochure.pdf (дата звернення: 08.07.2026).
7. Deininger K., Ayalew Ali D., Kussul N., Shelestov A., Shumilo L., Lemoine G. Using free remotely sensed data to assess war-induced damage to agricultural cultivation: Evidence from Ukraine. Journal of Development Economics. 2026. Vol. 179. Art. 103661. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2025.103661.
8. Герасимчук Л. О. Військові дії як чинник утворення відходів. Таврійський науковий вісник. 2023. № 133. С. 305–312. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.41.
9. Кононенко В. П., Новікова Л. В. Вплив регіональних збройних конфліктів на міжнародну екологічну безпеку. Альманах міжнародного права. 2020. № 24. С. 214–221. DOI: https://doi.org/10.32841/ILA.2020.24.25.
10. Кучер В. О., Євхутич І. М., Парасюк В. М. Забезпечення екологічної безпеки на території окупованого Донбасу. Юридичний науковий електронний журнал. 2021. № 9. С. 115–118. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0374/2021-9/27.
11. Кучер А. В. Методика оцінювання збитків, завданих збройною агресією земельному фонду та ґрунтам: проблеми та напрями вдосконалення. Journal of Innovations and Sustainability. 2022. Т. 6, № 2. Ст. 10. DOI: https://doi.org/10.51599/is.2022.06.02.10.
12. Трегуб О. А. Правове забезпечення екологічного відновлення міст на постконфліктних територіях. Вісник Луганського державного університету внутрішніх справ імені Е. О. Дідоренка. 2020. № 4 (92). С. 273–285. DOI: https://doi.org/10.33766/2524-0323.92.273-285.
13. Балюк С. А., Кучер А. В., Солоха М. О., Соловей В. Б. Оцінювання впливу збройної агресії РФ на ґрунтовий покрив України. Український географічний журнал. 2024. № 1 (125). С. 7–18. DOI: https://doi.org/10.15407/UGZ2024.01.007
14. Нікітченко І. В., Прокопенко Н. Ю., Шведчикова І. О. Вплив військових конфліктів на навколишнє середовище та екологію Луганськ : Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, 2015. С. 253–255. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/84593128.pdf (дата звернення: 08.07.2026).
15. Цимбалюк К. В. Вплив військового конфлікту на екологічний стан водних ресурсів України. Екологічна безпека держави : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів. 2024. Вип. 18. С. 10. DOI: https://doi.org/10.18372/2786-8168.18.18537.

Дата першого надходження статті до видання: 01.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026