

УДК 004.93

П.В. Мікава, С.Ю. Дрозд

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ*

Мікава Поліна Віталіївна

Навчально-науковий фізико-технічний інститут Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
orcid: 0009-0002-6242-5218

geor.polina@gmail.com

Дрозд Софія Юріївна

Навчально-науковий фізико-технічний інститут Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
orcid: 0000-0002-5149-5520

sofi.drozd.13@gmail.com

Місцевість, яка стала ареною активних воєнних дій, зазнає значних пошкоджень у результаті бойових зіткнень та артилерійських обстрілів. Зокрема, ураження родючих земель робить їх непридатними для використання. Внаслідок цього виникає і стає все більш нагальним питання відновлення територій. Сьогодні розробляється багато проєктів по відновленню як інфраструктури, так і самої земної поверхні. Значна частина таких проєктів ініціюється іноземними партнерами та активно підтримується ними фінансово. Створення ефективного механізму відновлення потребує актуальної інформації щодо площі та ступеня пошкодження території. Через постійну загрозу обстрілів загальна безпекова ситуація в країні нестабільна, а більша частина пошкоджених територій розташована безпосередньо поруч з лінією фронту. З огляду на це актуальною є розробка методів аналізу земної поверхні, що базуються на інформації, отриманій віддалено. Одним з джерел такої інформації можуть бути дані місії Sentinel-2. У роботі розглянуто метод виявлення та аналізу пошкоджень території на основі розрахунків та порівнянь індексу рослинності NDVI. Інформація оцінюється протягом певного часового відрізка, розділеного на двотижневі періоди. Найпоширенішими серед пошкоджень виявилися воронки, утворені внаслідок обстрілів та вибухів, вигорілі поля та сліди військової техніки.

Ключові слова: аналіз супутникових даних, NDVI, оцінка пошкоджень, моніторинг земної поверхні.

* Роботу виконано в рамках проєкту 2020.02/0284 «Геопросторові моделі та інформаційні технології супутникового моніторингу проблем розумного міста» за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в межах конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених».
© П.В. МІКАВА, С.Ю. ДРОЗД, 2023

Вступ

Воєнні дії не тільки призводять до великої кількості жертв серед мирного населення та військових, а й страждає територія, на якій вони відбуваються. Купи металевих брухтів, заміновані території, пошкоджені внаслідок обстрілів будівлі — ось далеко не все, що має шкідливий вплив на екологію взагалі та на земну поверхню зокрема. Через те що воєнні дії на території України динамічно розвиваються від самого початку повномасштабного вторгнення російських військ 24 лютого 2022 року, з'явилася потреба в динамічному та ефективному оцінюванні ситуації не тільки на лініях зіткнення, а й на всій території України.

Сьогодні існує лише кілька робіт, присвячених оцінці втрат від цієї війни [1, 2]. У статті [1] запропоновано метод виявлення воронки як наслідок обстрілів з важкої зброї. У дослідженні авторам вдалося ідентифікувати значну кількість воронки у Донецькій області, більшість з яких розташована на сільськогосподарських угіддях. Це дозволяє не тільки оцінити масштаби пошкодження території, а й надати додаткову інформацію, необхідну для підготовки до її розмінування. Для проведення цього дослідження автори розглянули багато робіт, присвячених розпізнаванню кратерів на різних планетах, а також досвід аналізу територій інших країн, на яких відбувалися воєнні дії. Дослідження проводилося з використанням даних від початку російської агресії на території України в 2014 році. Було розглянуто особливості відображення воронки в залежності від пори року та виду зброї, робота якої призвела до їх утворення. Як супутникові зображення було використано дані Maxar's WorldView-2. Дослідження результатів та їх порівняння проводилися на двох моделях: U-net та Random forest, і було виявлено, що модель U-net надає кращі та більш точні результати, ніж модель Random forest. У статті [2] автори розробили алгоритм для оцінки та моніторингу пошкоджень території міста, яке досить щільно забудоване та заселене і внаслідок воєнних злочинів росії на території України зазнало значних руйнувань. У ній досліджено не тільки відкриті місцевості, а й пошкодження житлових будинків та інших споруд. Як дані було використано знімки Sentinel-2, що надаються агентством ESA. Особливо ефективно було ідентифіковано місця, пошкоджені внаслідок пожеж. Запропонований алгоритм включає використання, обробку та аналіз різних спектральних каналів обраних знімків.

Через воєнні дії частина територій України опинилася під окупацією, і значний відсоток цих територій становлять сільськогосподарські поля. Істотно постраждав агропромисловий комплекс України, а дефіцит продовольчих товарів виник не тільки на внутрішньому ринку, а й у Європі, куди українська продукція активно експортувалася впродовж останніх десятиліть. Для проведення заходів по відновленню пошкоджених внаслідок воєнних дій територій необхідна актуальна інформація про характер, ступінь та масштаби пошкоджень, але безпекова ситуація та можливості людських ресурсів не завжди дозволяють її отримати. Так, наприклад, у статті [3] розглядається метод дистанційного оцінювання території як один з найбезпечніших при дослідженні території воєнних дій та фіксації воєнних злочинів під час збройних конфліктів. Використовуючи такий підхід, можна отримати інформацію про актуальний стан території та досліджувати завдані пошкодження протягом певного часу, не ризикуючи життям людей. Моніторинг та аналіз земної поверхні за допомогою супутникових знімків є ефективним інструментом досягнення поставленої мети, тому розробка моделей машинного навчання, що дозволяють швидко та точно обробляти супутникові знімки, є досить актуальною темою сьогодення.

Уряд України за підтримки іноземних партнерів розробив проекти відновлення пошкоджених сільськогосподарських земель. Землевласники пошкоджених

територій мають змогу звернутися по допомогу й отримати кошти на відновлення своїх угідь для продовження сільськогосподарської діяльності. Наразі немає загальної і точної інформації про площу постраждалих земель та тип пошкоджень, яких вони зазнали. Всі подані заявки на компенсації потребують перевірки та уточнення, що не завжди можливо зробити фізично з низки причин, таких як нестача людських ресурсів, наближеність території до зони бойових дій, окупація тощо. Однак поставлену задачу можна вирішити за допомогою інформації, отриманої зі супутників [4, 5]. Застосовуючи моделі машинного навчання на супутникових даних, можна ідентифікувати зміни землекористування та земного покриття [6]. Безперервність та об'єктивність отримання потрібної інформації є беззаперечною перевагою у використанні даного підходу. Наприклад, у статті [7] розглянуто методи оцінки стану сільськогосподарської діяльності на конфліктних територіях Сирії та Іраку, що знаходяться під контролем угруповання ІДІЛ. Оцінюючи стан території, що обробляється, можна зробити висновки про обсяги вироблення сільськогосподарської продукції та подальший прибуток від її імпорту.

У роботі [8] запропоновано оцінювати пошкодження, використовуючи оптичні зображення та дані SAR. У роботі також досліджено ефективність використання даних Sentinel-1 та Sentinel-2 для оцінки пошкоджень будівель у місті Києві, Україна, на фоні триваючого конфлікту з росією. Застосована методологія передбачає використання співвідношення інтенсивності SAR та аналіз текстури для даних Sentinel-1 та Sentinel-2 відповідно, додатково уточнених за допомогою маски забудованої території, створеної на основі даних OpenStreetMap та World Settlement Footprint. Через відсутність можливості отримати наземні дані в зоні конфлікту оцінку точності якісно здійснено за допомогою зображень високої роздільної здатності та кількісно — за допомогою карти оцінки пошкоджень Супутникового центру ООН (UNOSAT). Результати цієї оцінки вказують на концентрацію пошкоджень у північно-західній частині Києва з правильною на 58 % класифікацією пошкоджених будівель у порівнянні з картою UNOSAT. Підкреслено потенціал зображень середньої роздільної здатності для швидкого картографування пошкоджень після катастрофи.

У статті [9] запропоновано фреймворк для оцінки руйнувань під час війни та подальшого його використання при усуненні пошкоджень. Під час дослідження використано SR-зображення (Surface Reflectance) з OLI (Operational Land Imager) Landsat-8 та декілька алгоритмів Random forest. Як основні змінні використано кілька індексів, таких як NDVI, MNDWI, NDBI та BSI. Досліджувану територією було обрано кілька міст Київської області. Весь процес дослідження відбувався у чотири етапи для даних Sentinel-1 та Sentinel-2.

З урахуванням досвіду інших дослідників у цій галузі супутникові дані з високою та середньою роздільною здатністю можна успішно використовувати для проведення аналізу часових рядів індексів вегетації [10, 9], дослідження деградації земель [12], моніторингу землекористування [13], побудови прогнозу врожайності, відслідковування пожеж, повеней [11], посух тощо. Наразі супутникові місії Landsat-8 (роздільна здатність — 30 м) та Sentinel-2 (роздільна здатність — 10 м) надають знімки території України у відкритому доступі.

Використовуючи індекси, розраховані за супутниковими даними, зокрема вегетаційний індекс NDVI, можна виявити аномальні зміни ґрунтового покриття, що відбулися за короткий проміжок часу [14], та зафіксувати різке зниження темпів росту рослин або зменшення їхньої кількості. Ці аномалії зазвичай провокуються погодними явищами, такими як, наприклад, град [10, 15]. Проте для України зміни, спричинені воєнними діями, можна виявити, аналізуючи часові ряди індексів рослинності, зокрема NDVI [16]. Застосовуючи метод порівняння NDVI на фіксованій

території в конкретно заданий час, можна побудувати автоматичний розпізнавач, здатний попіксельно ідентифікувати воронки від вибухів бомб, пошкодження внаслідок артилерійських обстрілів, а також колії від гусениць танків та іншої військової техніки [17].

Метою даної роботи є розробка автоматичного інструменту для ідентифікації пошкоджених у результаті воєнних дій сільськогосподарських угідь з використанням супутникових даних для аналізу показника NDVI та оптичних спектральних каналів. Аналіз проводиться на рівні пікселів для отримання точної оцінки ступеня пошкоджень.

Таким чином, розроблений інструмент надає можливість точно оцінити наслідки війни для сільського господарства та може бути використаний для раціонального планування та розділення коштів бюджету, виділених на відновлення аграрного комплексу України.

Дані та матеріали

Для обрахунку вегетаційного індексу та аналізу спектральних каналів використано дані високої роздільної здатності (10 м) і мультиспектральні зображення досліджень Copernicus Land Monitoring та Harmonized Sentinel-2 MSI Level A2. Зображення колекції містять 16 спектральних каналів. Для дослідження розраховано вегетаційний індекс NDVI, а також чотири канали (червоний, зелений, синій та ближній інфрачервоний діапазон).

Через велику кількість хмар на супутникових знімках зображення було очищене від хмарності для отримання більш точних результатів.

Проект ACLED (Armed Conflict Locations and Events Data) використовувався як джерело відкритих даних, що допомогли визначити дати необхідних знімків до та після потенційно можливих пошкоджень полів. Це дозволило, порівнюючи значення вегетаційних індексів, визначити уражені території. В рамках проекту ACLED збирається повна інформація (дата, місце, тип) про випадки політичного насилля та протестів по всьому світу. Не стала винятком і територія України, на якій сьогодні ведуться активні бойові дії. Починаючи з 24 лютого 2022 року часовий проміжок був розділений на періоди по два тижні, для кожного з яких визначалися пошкоджені ділянки. Як контури полів використовувалися полігони розмежування ділянок, розроблені компанією Sinergise для України в рамках ініціативи EO4UA.

Таким чином, використовуючи дату та місце розташування, надані проектом ACLED, для експерименту було обрано найближчі часові проміжки до ворожих атак та після них.

Методологія ідентифікації пошкоджень на основі порівняння розподілу індексу NDVI

Метод виявлення полів, пошкоджених унаслідок воєнних дій на території України, базується на попіксельному порівнянні значень індексу NDVI протягом найвужчого інтервалу часу до та після удару. NDVI — це загальнозживаний індекс рослинності, який розраховується за ближнім інфрачервоним (NIR) та інфрачервоним (RED) діапазонами супутникових спостережень наступним чином:

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

Після показників вегетаційного індексу відповідно до та після воєнних дій на конкретній території в регіональному масштабі розраховується відносна різниця NDVI у відсотках за формулою

$$dNDVI_t = \frac{NDVI_{t+1} - NDVI_t}{NDVI_t} * 100\% ,$$

де $dNDVI_t$ — відносна відсоткова різниця NDVI в точці t ; $NDVI_t$ — значення NDVI до потенційного пошкодження території в точці t ; $NDVI_{t+1}$ — значення NDVI після потенційного пошкодження території в точці t .

Для розрахунку NDVI лише в межах посівів сільськогосподарських культур використовувалася карта класифікації ґрунтового покриття 2022 року. Наступним кроком є встановлення гранично допустимого (порогового) значення відносної різниці NDVI з метою відсіювання нормальних змін рослинного покриття та виявлення аномалій. Щоб відкинути зміни значення NDVI, не пов'язані з воєнними діями, за допомогою контурів векторного поля було встановлено порогове значення в межах поля для кількості пікселів з великим зниженням NDVI не менше 60 % від розміру поля. Отримані раніше векторні контури полів було зменшено на 2 пікселя по периметру всередині, щоб уникнути фіксації змін NDVI на територіях між полями.

Виявлення пошкоджень методом розподілу спектральних значень

Порівняння супутникових даних до та після події дає хороші результати в моніторингу пошкоджень, але часто супутникові дані до події відсутні взагалі або закриті хмарами. Для таких випадків розроблено інший алгоритм, у якому використовується тільки одне зображення, а саме — його окремі спектральні канали.

Цей алгоритм працює на рівні кожного окремого поля в контурах, визначених компанією Sinergise. Спочатку розраховується показник NDVI в межах контуру поля для визначення стану рослинності згідно з формулою (1). У разі низької рослинності ($NDVI < 0,3$) для виявлення пошкоджених територій використовуються зелений та синій спектральні канали, в іншому разі — зелений канал та NIR-канали. Далі в межах кожного поля аналізується розподіл значень відповідних спектральних каналів і відкидаються ті з них, які не є середньостатистичними. Зокрема, для полів з високою рослинністю використовується розподіл

$$Damaged_{Hght_vegetaton} = \begin{cases} Value_{Green} \leq \mu - 2\sigma, \\ Value_{Blue} \leq \mu - 2\sigma, \end{cases}$$

а для полів з низькою рослинністю — розподіл

$$Damaged_{Low_vegetaton} = \begin{cases} Value_{Green} \geq \mu + 1,5\sigma, \\ Value_{NIR} \geq \mu + 1,5\sigma, \end{cases}$$

де μ — середнє значення каналу в межах поля; σ — стандартне відхилення значення каналу в межах поля.

Для підтвердження припущень щодо можливих пошкоджень територій було побудовано гістограми розподілу значень NDVI в кадастрових межах вибраних полів. Це було зроблено, щоб отримати оцінку дисперсії вегетаційного індексу та відхилень мінімальних значень NDVI від середнього значення в межах поля до та після пошкоджень.

Результати пошуку пошкоджених полів

За допомогою обрахунків відносної різниці NDVI вдалося ідентифікувати пошкодження внаслідок артилерійського вогню (рис. 1, *а*; збитки, виявлені на основі відносної різниці NDVI, Херсонська область, 9 травня 2022 року), а також сліди переміщення техніки, вигорілі поля та інші численні пошкодження (рис. 1, *б*; виявлені пошкоджені поля на основі спектральних каналів, Донецька область, 2 липня 2022 року).

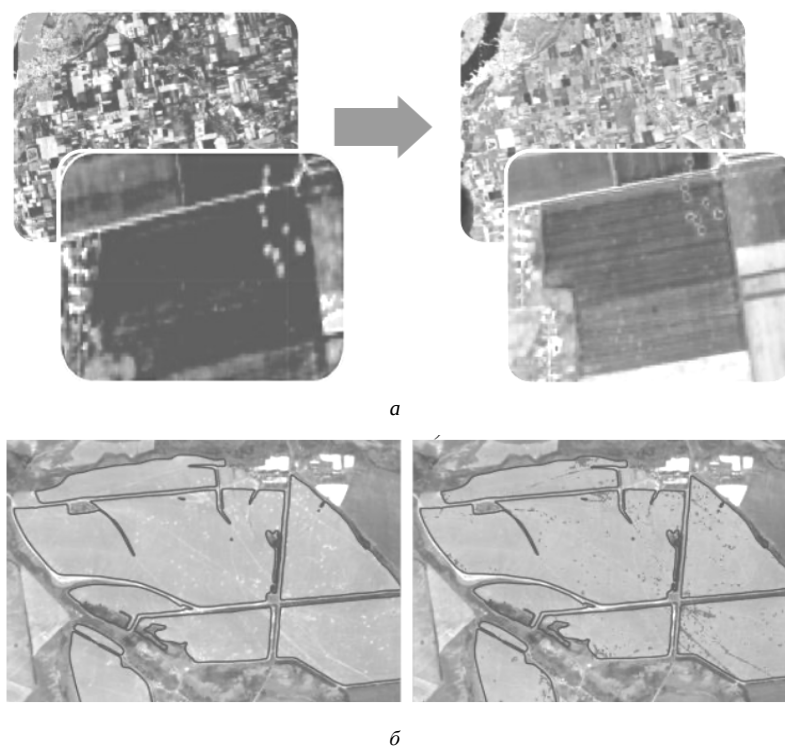


Рис. 1

Для оцінки розподілу значень NDVI на полях, що визначені як пошкоджені, побудовано гістограми, представлені на рис. 2.

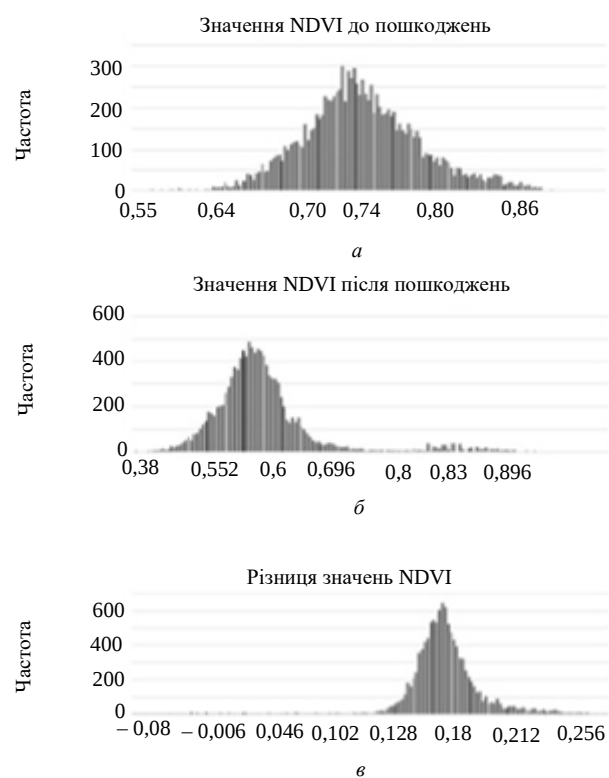


Рис. 2

На рис. 2, а представлено земну поверхню до потенційних пошкоджень (1–5 червня 2022 року), на рис. 2, б — після потенційних пошкоджень (6–8 червня 2022 року), на рис. 2, в — різницю між розподілами значень NDVI до та після ураження.

Відносна різниця мінімального та середнього значень NDVI в ураженій області (див. рис. 2, б) становить близько 25 % проти 17 % в межах того самого поля до пошкодження. Відносна медіана різниці між мінімальним значенням уражених та непошкоджених ділянок для зображення, на якому було зафіксовано пошкодження, становить у середньому 13 % (див. рис. 2, в).

Загалом подібна ситуація спостерігалася і для інших полів.

Для наглядного порівняння отриманих значень з відносною різницею NDVI на неуразеній ділянці побудовано гістограму відносної різниці NDVI найближчого сусіднього непошкодженого поля для тієї ж дати (рис. 3).

Як видно на рис. 3, найбільша різниця значення NDVI на непошкодженному полі не перевищує 0,07, а на пошкодженному — 0,26.

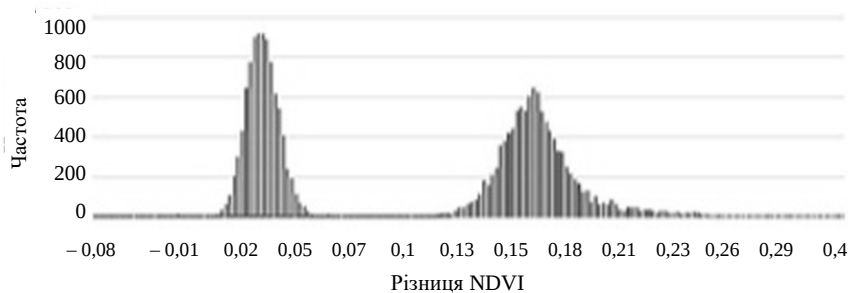


Рис. 3

Порівняння результатів автоматичного розпізнавання збитків з даними експертів

Для валідації методу автоматичного розпізнавання пошкоджених територій проведено візуальну перевірку вибраних ділянок. Вибір території та часового проміжку зроблено на основі даних з джерела ACLED. Для покращення верифікації обрано період 6–19 червня 2022 року та регіон Донецької області, що є районом активних бойових дій. За результатами порівняння автоматичного та ручного методів розпізнавання пошкоджень полів (рис. 4) можна зробити висновок, що метод, який базується на розрахунку відносної різниці значень NDVI, ідентифікує набагато більше полів, ніж можна побачити на триканальному супутниковому знімку (рис. 5) (на безхмарних композитах автоматично ідентифіковано 2143 поля проти 376 полів, візуально оцінених як пошкоджені).

Водночас результати ідентифікації збіглися лише для 193 полів, що становить близько 48 % від візуально визначених пошкоджених полів і 9 % — від кількості полів, визначених як пошкоджені за відносною різницею значень NDVI. Така велика відмінність у результатах може бути пояснена наявністю хмар, звичайними сезонними змінами значень NDVI, обробкою ґрунту, погодними умовами тощо, які могли вплинути на різко негативну відносну різницю значень NDVI. З іншого боку, метод візуального визначення пошкоджень людиною має свої неточності, коли деякі поля не визначаються пошкодженими або, навпаки, вцілілі ділянки позначаються як пошкоджені. Тому для отримання більш точних результатів розпізнавання уражених територій варто поєднати обидва методи, спочатку обчислюючи відносні різниці значень NDVI, а потім повторно верифікуючи позначені поля на супутниковому знімку RGB.

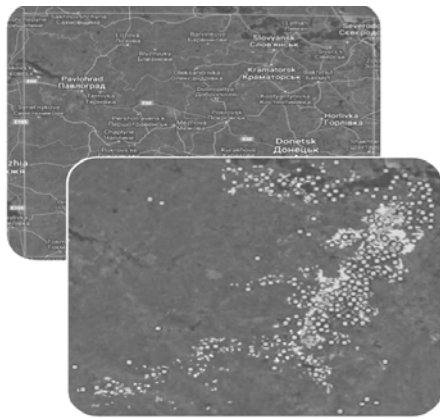


Рис. 4

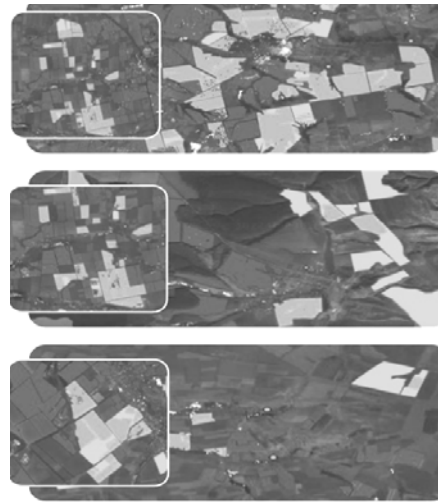


Рис. 5

Валідація пошкоджених ділянок експертами

Для перевірки точності ручного методу ідентифікації пошкоджених полів отримані результати порівняно з оперативними даними з джерела ACLED (рис. 6; візуалізація результатів ручного та автоматичного методів ідентифікації пошкоджених територій, 6–19 червня 2022 року). Для наочності вибрано 8-й період спостережень, що є періодом високих темпів росту біомаси під час літньої вегетації.

Як видно з рис. 6, пошкодження, виявлені методом супутникового моніторингу, збігаються з офіційними даними щодо атакованих територій. Особливо сильно пошкоджені ділянки виявлені поблизу Северодонецька, Донецька область (зліва), та біля Херсона, Херсонська область (справа). Таким чином, метод дозволяє оцінити пошкодження навіть на окупованих територіях. На рис. 7 (розмітка територій, визначених пошкодженими вручну та за допомогою автоматичного розпізнавання) наведено графік розподілу кількості пошкоджених полів відносно офіційних точок обстрілів за 8-й період бойових дій (відстань між пошкодженими полями та місцями проведення воєнних дій, 6–19 червня 2022 року).

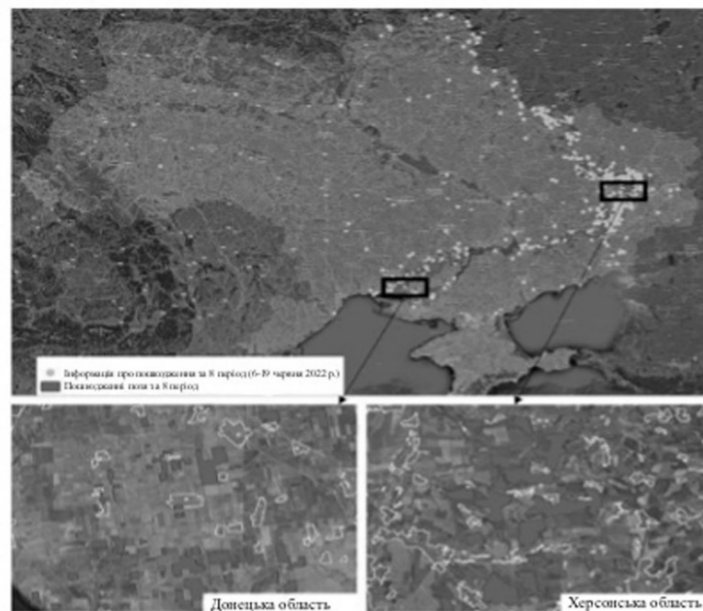


Рис. 6

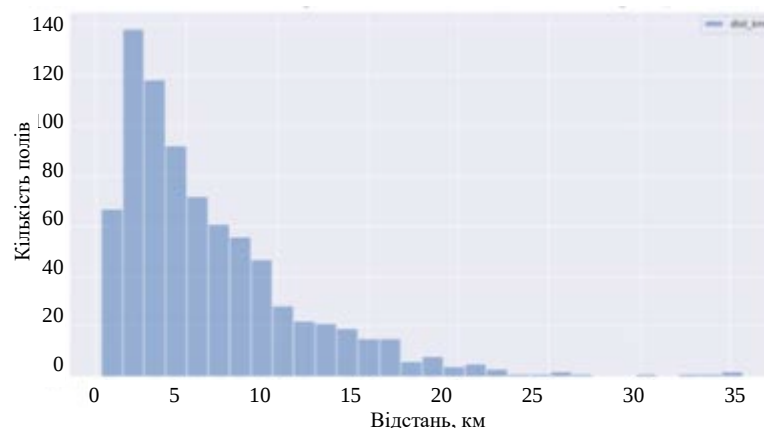


Рис. 7

Можна побачити, що в невеликому радіусі зон бойових дій відсоток ураження вищий. Більше половини пошкоджених полів знаходяться в 5-кілометровій зоні від офіційних районів обстрілів, а близько чверті — в 10-кілометровій. Крім того, за показниками виявлених пошкоджень можна ретроспективно оцінити масштаби атак. Отже, за отриманими оцінками найбільше постраждалих ділянок зафіксовано в 9-му періоді війни (01.06.2022–03.07.2022, 75,4 % у радіусі до 5 км) та в 11-му періоді (18.07.2022–31.07.2022, 64,6 % у радіусі до 5 км). За підсумками всіх періодів загальне пошкодження території України становить 54,3; 27,8; 9,3; 3,8; 4,8 % в радіусах до 5, 10, 15, 20 км відповідно.

Висновок

Будь-які воєнні та збройні конфлікти не лише несуть непоправні втрати людського ресурсу, а й значно впливають на стан навколишнього середовища. Використання різних методів віддаленого оцінювання земної поверхні може відігравати ключову роль у виробленні стратегії ведення війни, а також дозволяє оцінити збитки та непоправну шкоду екології. Крім того, під удар ставиться забезпечення продовольством людей у всьому світі. Саме з цієї причини увага міжнародних організацій прикута до питань відновлення постраждалих сільськогосподарських територій. Методи віддаленої оцінки та аналізу, які базуються на використанні супутникової інформації, є найбезпечнішими серед можливих для отримання потрібних даних.

У результаті проведеного дослідження розроблено метод ідентифікації пошкоджених сільськогосподарських територій, що були уражені внаслідок бойових дій. Запропонований метод дозволяє оцінити відносну різницю значень індексу NDVI до та після проведення воєнних дій на вибраній території та базується на використанні інформації зі спектральних каналів. Крім того, метод дозволяє виявити точкові ураження сільськогосподарських угідь, такі як воронки від бомб, сліди бойової техніки та наслідки пожеж.

Визначено пошкодження по всій Україні, включно з окупованими територіями, від 24 лютого до 25 вересня 2022 року. Результати валідації визначених територій співпадають з даними офіційних джерел про території бойових дій та пошкоджені території, розташовані переважно в радіусі до 5–10 км від зони бойових дій (до 75,4 % за 9-й період війни від 20 червня до 3 липня 2022 року). Також встановлено, що найбільше пошкоджень території України зазнали в 9- та 11-й періоди війни (червень-липень).

У подальшому доцільно перевірити запропонований метод на знімках в різні вегетаційні періоди та дослідити інформативність різних індексів для визначення пошкоджених агропромислових територій.

Таким чином, розроблений у даному дослідженні метод визначення пошкоджень сільськогосподарських угідь можна застосовувати для надання уряду країни більш точної та актуальної оцінки пошкоджених територій. Це дозволить уряду України та інших країн світу правильно розподіляти фінансові ресурси між постраждалими землевласниками для успішного та ефективного відновлення агропромислового комплексу України.

P. Mikava, S. Drozd

A METHOD OF DETECTING DAMAGE TO THE EARTH'S SURFACE AS A CONSEQUENCE OF MILITARY ACTIONS USING SATELLITE DATA

Polina Mikava

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
geor.polina@gmail.com

Sophia Drozd

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
sofi.drozd.13@gmail.com

The area, which becomes an arena of active military operations, suffers significant damage because of combat clashes and artillery shelling. Damaging of agricultural lands makes them unusable. As a result, the issue of restoring territories arises and becomes increasingly urgent. Nowadays, many projects are being developed to restore both the infrastructure and the land cover itself. A significant part of such projects is initiated and receives active financial support from foreign partners. The creation of an effective recovery mechanism and process requires the availability of up-to-date information on the area and degree of damage to the territory. Due to the constant threat of shelling, the overall security situation in the country is unstable, and most of the damaged areas are in close proximity to the front line. Considering these points, the development of land cover analysis methods based on remotely sensed information is relevant. One of the sources of such information can be data from the Sentinel-2 mission. This paper describes the method of detecting and analyzing damage to the territory based on calculations and comparisons of the NDVI vegetation index. The information is evaluated during a certain time period, which is divided into two-week periods. The most common of the discovered damages were funnels from shelling and explosions, burnt fields, and traces of military equipment.

Keywords: satellite data, NDVI, damage assessment analysis, land surface monitoring.

ПОСИЛАННЯ

1. Duncan E.C., Skakun S., Kariryaa A., Prishchepov A.V. Detection and mapping of artillery craters with very high spatial resolution satellite imagery and deep learning. *Science of Remote Sensing*. 2023. Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100092>
2. Huang Q., Jin G., Xiong X., Ye H., Xie Y. Monitoring urban change in conflict from the perspective of optical and SAR satellites: the case of mariupol, a city in the conflict between RUS and UKR. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, N 12. 3096 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15123096>

3. Frank D.W. Witmer. Remote sensing of violent conflict: eyes from above. *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36, N 9. P. 2326–2352. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1035412>
4. Deininger K., Ali D.A., Kussul N., Shelestov A., Lemoine G., Yailymova H. Quantifying war induced crop losses in Ukraine in near real time to strengthen local and global food security. *Food Policy*. 2023. Vol. 115. P. 102418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102418>
5. Rawtani D., Gupta G., Khatri N., Rao P., Hussain C. Environmental damages due to war in Ukraine: a perspective. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 850. 157932 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932>
6. Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A., Yailymov B., Butko I. Land cover changes analysis based on deep machine learning technique. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. Vol. 48, N 5. P. 42–54. DOI: <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v48.i5.40>
7. Jaafar H.H., Woertz E. Agriculture as a funding source of ISIS: a GIS and remote sensing analysis. *Food Policy*. 2016. Vol. 64. P. 14–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2016.09.002>
8. Aimaiti Y., Sanon C., Koch M., Baise L., Moaveni B. War related building damage assessment in Kyiv, Ukraine, using Sentinel-1 radar and Sentinel-2 optical images. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, N 24. 6239 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14246239>
9. Ma Y., Lyu D., Sun K., Li S., Zhu B., Zhao R., Song K. Spatiotemporal analysis and war impact assessment of agricultural land in Ukraine using RS and GIS technology. *Land*. 2022. Vol. 11, N 10. 1810 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11101810>
10. Filippo S., Petris S., Borgogno-Mondino E. A methodological proposal to support estimation of damages from hailstorms based on copernicus sentinel 2 data times series. *International Conference on Computational Science and Its Applications*. 2020. P. 737–751. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58811-3_53
11. Ghazaryan G., Dubovyk O., Graw V., Kussul N., Schellberg J. Local-scale agricultural drought monitoring with satellite-based multi-sensor time-series. *GIScience & Remote Sensing*. 2020. Vol. 57, N 5. P. 704–718. DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1778332>
12. Kussul N., Kolotii A., Shelestov A., Yailymov B., Lavreniuk M. Land degradation estimation from global and national satellite-based datasets within the UN program. *9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. Romania : Bucharest. 2017. P. 383–386. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095109>
13. Defourny P., Bontemps S., Bellemans N., Cara C., Dedieu G., Guzzonato E., Hagolle O. et al. Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: Performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world. *Remote sensing of environment*. 2019. Vol. 221. P. 551–568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.007>
14. Kussul N., Drozd S., Yailymova H. Detection of war-damaged agricultural fields of Ukraine based on vegetation indices using Sentinel-2. *12th International Conference on Dependable Systems Services and Technologies (DESSERT'2022)*. Athens : IEEE, 2022. 103562 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT58054.2022.10018739>
15. Sosa L., Justel A., Molina I. Detection of crop hail damage with a machine learning algorithm using time series of remote sensing data. *Agronomy*. 2021. Vol. 11, N 10. 2078 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11102078>
16. Abdo H. Impacts of war in Syria on vegetation dynamics and erosion risks in Safita area. Syria : Tartous. *Regional Environmental Change*. 2018. Vol. 18, N 6. P. 1707–1719. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1280-3>
17. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 837. 155865 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>

Отримано 25.09.2023

Доопрацьовано 24.11.2023