



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.3.290>

УДК 528.8:528.8.04(477)

Геоінформаційний інструмент для дистанційного оцінювання стану лісосмуг, пошкоджених внаслідок воєнних дій

Андрєєв А. А.¹, <https://orcid.org/0000-0002-6485-449X>

Лисенко А. Р.¹, <https://orcid.org/0000-0003-2923-8648>

Голубов С. І.^{1*}, <https://orcid.org/0000-0003-3711-598X>

Станкевич С. А.¹, <https://orcid.org/0000-0002-0889-5764>

Козлова А. О.¹, <https://orcid.org/0000-0001-5336-237X>

Артюшин Л. М.² <https://orcid.org/0000-0002-7488-7244>

¹ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

²Державний науково-дослідний інститут авіації, вул. Казарменна, 6В, м. Київ, 01135, Україна

Полезахисні лісові смуги вважаються ключовим елементом сталого землекористування, виконуючи такі функції, як запобігання ерозії ґрунтів, зменшення впливу суховіїв і пилових бур, покращення водного балансу, а також вони є осередками біорізноманіття в агроландшафтах. Проте під час бойових дій лісосмуги зазнають масштабних пошкоджень або навіть повного знищення, що створює серйозні довгострокові загрози для довкілля та сільськогосподарських територій. Враховуючи, що методи отримання наземних даних є небезпечними та мають певні обмеження в оперативності та масштабуванні, саме використання методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є найбільш доцільним. Оцінювання стану лісосмуг потребує використання великої кількості даних та значних розрахункових витрат, тому доречним є залучення хмарних платформ для геопросторового аналізу, зокрема Google Earth Engine (GEE). Отже, метою цієї роботи є розробка геоінформаційного інструменту для оцінювання стану лісосмуг після воєнних дій на основі платформи GEE. Основою такого інструменту є методика, алгоритм якої полягає в порівнянні станів лісосмуг до та після пошкодження на основі біофізичних індикаторів, інформація про які одержується з даних ДЗЗ. Методика є гнучкою, адже дає змогу змінювати використовувані спектральні індекси залежно від обраних біофізичних індикаторів. Розроблений геоінформаційний інструмент використовує супутникові знімки Sentinel-2, на основі яких оцінюються три біофізичні індикатори за відповідними спектральними індексами: біомаса (спектральний індекс – EVI), вміст хлорофілу (S2REP) та вміст вологи (NDMI).

Оскільки геоінформаційний інструмент базується на платформі GEE, то він, відповідно, використовує та надає користувачеві засоби GEE для введення, завантаження та візуалізації даних, а обробка є швидкою завдяки використанню комп'ютерних потужностей хмарних серверів Google. Розроблений геоінформаційний інструмент було протестовано на 2 територіях дослідження в межах Донецької області, які перебували в зоні активних бойових дій у 2022–2023 роках. Візуальний аналіз підтвердив ефективність розробленого інструменту, показавши відповідність між позначеними на картах зонами пошкоджень та фактичним станом лісосмуг. Таким чином, цей геоінформаційний інструмент може бути використаний для моніторингу стану лісосмуг у зонах бойових дій і планування їхнього відновлення. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на залучення додаткових джерел даних, застосування нових біофізичних індикаторів, а також на оцінювання впливу кожного з індикаторів для надання рекомендацій щодо експертних оцінок вагових коефіцієнтів спектральних індексів при побудові об'єднаної карти стану лісосмуг.

Ключові слова: лісосмуги, повосенне відновлення, оцінювання пошкоджень, дистанційне зондування Землі, Sentinel-2, EVI, NDMI, S2REP, Google Earth Engine

© Андрєєв А. А., Голубов С. І., Лисенко А. Р., Станкевич С. А., Козлова А. О., Артюшин Л. М. 2025

Вступ

Полезахисні лісові смуги є важливим елементом сталого землекористування, оскільки запобігають ерозії ґрунтів, зменшують вплив суховіїв і пилових бур, покращують водний баланс та сприяють збереженню родючості ґрунтів (Lavrov et al., 2021; Kędziora, 2015; Kong et al., 2022; Wang et al., 2023). Вони також виконують роль осередків біорізноманіття в агроландшафтах.

Під час бойових дій лісосмуги нерідко використовуються як лінії оборони, для обладнання позицій військ та пересування і маскування військової техніки. Внаслідок цього вони зазнають масштабних пошкоджень або навіть повного знищення (Matsala et al., 2024; Myroniuk et al., 2024), що створює серйозні довгострокові загрози для довкілля та сільськогосподарських територій.

Наземні дослідження лісосмуг є небезпечними або в деяких випадках неможливими через мінування,

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: S. Golubov / С. І. Голубов / asdfieldspec3@gmail.com

This is an Open Access article under the CC BY licenses (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

забруднення іншими вибухонебезпечними предметами та ризик повторних ударів. Тому доцільним є використання саме методів дистанційного зондування Землі, які забезпечують безпечну й оперативну оцінку стану лісосу́г (Stankevich et al., 2024). Використання супутникових і безпілотних даних дає змогу отримати об'єктивну інформацію, організувати комплексний аналіз та створити основу для екологічного моніторингу і прийняття управлінських рішень (Stankevich et al., 2016; Fassnacht et al., 2024).

Проте, оцінювання стану лісосу́г передбачає використання даних за тривалі періоди часу, адже важливо оцінити динаміку змін. Також в деяких випадках такий аналіз потребує значного використання обчислювальних ресурсів. Враховуючи це, доцільно використовувати хмарні платформи для геопросторового аналізу, зокрема Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017; Liu et al., 2017). Ця платформа надає доступ до масивів

геопросторових даних, можливість оброблення даних та інструменти для візуалізації, що робить її оптимальним рішенням для оцінювання стану лісосу́г.

Отже, метою роботи є розроблення геоінформаційного інструменту для оцінювання стану лісосу́г після воєнних дій на основі даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Платформою для програмної реалізації цього застосунку обрано GEE.

2. Методика

Програмна реалізація геоінформаційного інструменту для дистанційного оцінювання стану лісосу́г базується на методиці, розробленій та викладеній авторами у попередніх роботах (Stankevich et al., 2025a, Stankevich et al., 2025b). Блок-схема загального алгоритму розробленої методики показана на Рис. 1.

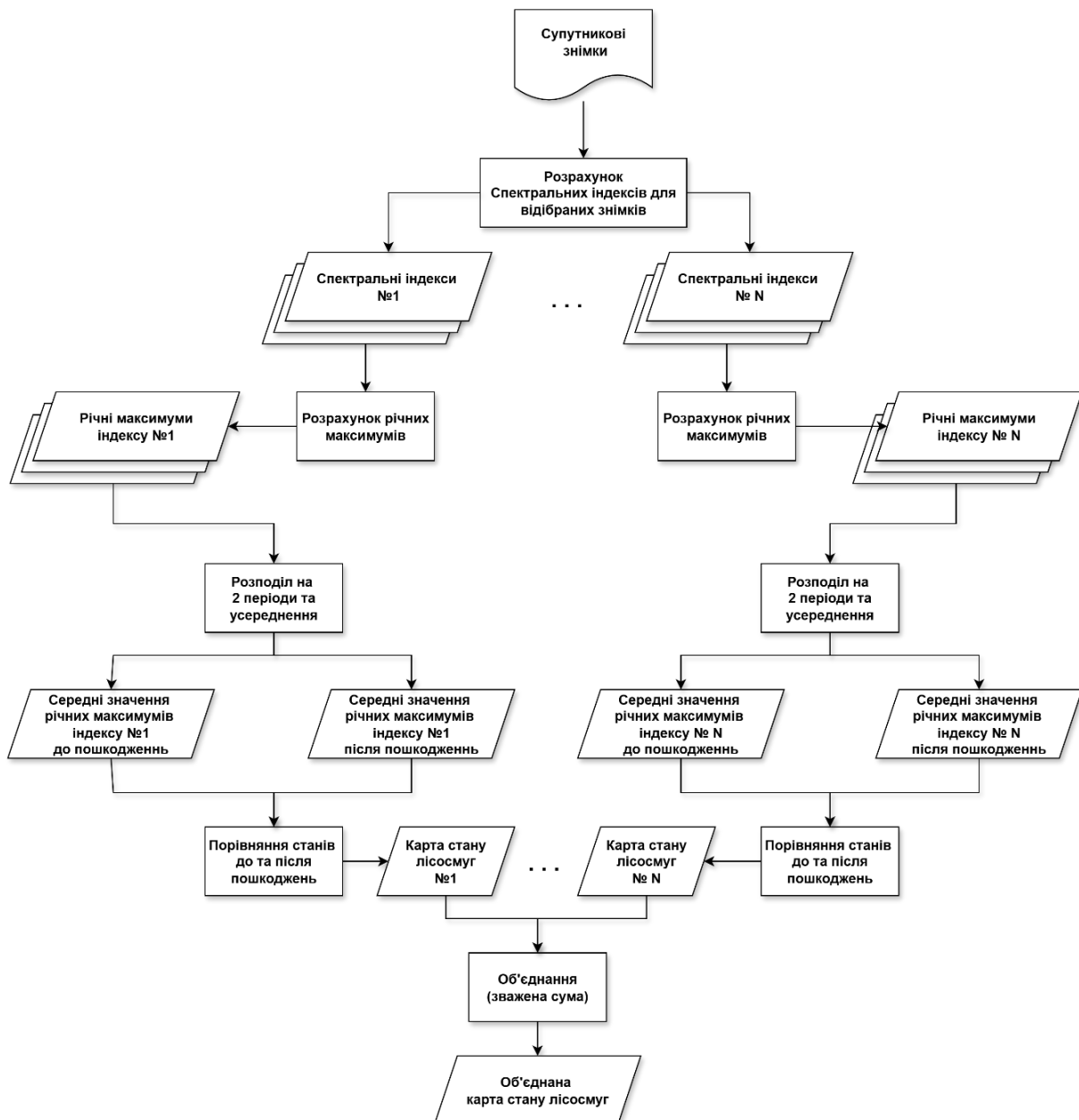


Рис. 1. Блок-схема алгоритму розробленої методики оцінювання стану лісосу́г

Вхідними даними є супутникові знімки, що охоплюють визначену територію дослідження та два періоди дослідження: до та після пошкоджень лісосууг. Варто зазначити, що аналіз виконується лише для вегетаційного періоду (з травня по вересень), аби зменшити вплив сезонних коливань спектральних характеристик та підвищити точність оцінки змін у стані рослинності.

Враховуючи те, що при розробленні цієї методики розглядалися дані виключно з відкритих джерел, були використані саме супутникові оптичні знімки Sentinel-2 (Gascon et al., 2017). Це зумовлено тим, що саме ці знімки мають найвищу просторову розрізненість серед усіх інших, що є у відкритому доступі. Проте, в рамках цієї методики також можна застосовувати як радарні знімки (Sentinel-1 (розрізненість 10 м) або ALOS-2 PALSAR-2 (до 3 м)), так і інші оптичні (PlanetScope (3 м) або Airbus Pleiades (0.5 м)).

Для кожного з відібраних знімків розраховуються спектральні індекси, що відповідають обраним біофізичним індикаторам. У попередніх роботах ми зосередилися на трьох ключових індикаторах: біомасі, вмісті хлорофілу та вмісті вологи, для яких розраховувалися спектральні індекси Enhanced Vegetation Index (EVI), Sentinel-2 Red-Edge Position (S2REP) і Normalized Difference Moisture Index (NDMI) відповідно. Проте, як і у випадку з вхідними даними, можуть бути застосовані інші індикатори і, відповідно, інші спектральні індекси, або у випадку з радарними даними – радарні індекси.

На наступному етапі для кожного спектрального індексу розраховується річний максимум у кожному пікселі протягом визначеного періоду дослідження. Таким чином, для кожного індексу буде отримано по одному геопросторовому шару за рік.

Отримані річні шари усереднюються для двох періодів: *до пошкоджень* та *після пошкоджень*. Роки для кожного вказаного періоду визначаються експертом.

Виконання описаних вище операцій можна подати в такий спосіб. Нехай $N = \{n_1, n_2, \dots\}$ – множина відібраних років до пошкодження лісосууг (наприклад, $N = \{2019, 2020, 2021\}$), а $D = \{d_1, d_2, \dots\}$ – множина відібраних років після пошкодження (наприклад, $D = \{2022, 2023, 2024\}$). При цьому $A = \{A_{x_i} \mid x_i \in N, i = \overline{1, |N|}\}$ – набір даних (знімків) до

пошкоджень, а $B = \{B_{x_i} \mid x_i \in D, i = \overline{1, |D|}\}$ – набір даних після пошкоджень. Тоді середнє значення індексу конкретного пікселя l набору, наприклад A , можна розрахувати за такою формулою:

$$I_c(A, l) = \frac{\sum_{x_i} \max(A_{x_i}(l))}{|N|}, l \in A_{x_i},$$

де $I_c(A, l)$ – середнє значення індексу $I = \{EVI, NDMI, S2REP\}$ за обраними роками набору A , $A_{x_i}(l)$ – відповідний піксель l знімка A_{x_i} , координати якого однакові для всіх знімків з набору A . Для набору B значення $I_c(B, l)$ розраховується аналогічно.

Наступним кроком піпксельно обчислюється відхилення значень набору B від набору A за такою формулою:

$$Map_I(A, B, l) = \frac{I_c(B, l) - I_c(A, l)}{I_c(A, l)},$$

Результатом цієї процедури є *карта стану лісосууг* Map_I , $I = \{EVI, NDMI, S2REP\}$ на основі відповідного індексу. Отримана карта є геопросторовим шаром, пікселі якого охоплюють всю територію дослідження. Невід’ємні значення цього шару відповідають пікселям, де пошкодження лісосууг зафіксовані не були, тоді, як від’ємні значення вказують на пошкодження та показують, наскільки зменшилося значення спектрального індексу після пошкодження.

Для створення об’єднаної карти стану лісосууг кожна отримана вище карта стану перетворюється в бінарний шар, де значення 1 відповідають пікселям l , де були зафіксовані пошкодження, а 0 – де пошкодження не були зафіксовані:

$$Bin_I(l) = \begin{cases} 0, & Map_I(A, B, l) \geq 0 \\ 1, & Map_I(A, B, l) < 0 \end{cases}$$

На відміну від попередніх робіт авторів (Stankevich et al., 2025a; Stankevich et al., 2025b), де була виконана звичайна піпксельна сума отриманих бінарних шарів, зараз виконується зважена сума, яка подається такою формулою:

$$FusedMap(A, B, L) = \sum_I \omega_I Bin_I(l),$$

де ω_I – ваговий коефіцієнт індексу I .

3. Архітектура розробленого геоінформаційного інструменту

Запропонований геоінформаційний інструмент було реалізовано як вебдодаток в платформі GEE, що поєднує в собі базу даних різних супутників та інструментарій, включаючи необхідні потужності для оброблення даних. Вхідними даними є оптичні знімки Sentinel-2 та векторний файл території дослідження у форматі Shapefile. При застосуванні вищеописаної методики здійснюється розрахунок спектральних індексів EVI, S2REP і NDMI, на основі яких оцінюється стан лісосууг. Нижче наведений детальний опис вхідних даних, блок-схема функціонування інструменту та опис вихідних даних.

3.1 Опис вхідних даних

Для оцінювання стану лісосууг використовувались дані супутникового сузір’я Sentinel-2. Вони є відкритими, безкоштовними, мають просторову розрізненість 10 м, достатню часову розрізненість 10 днів (5 у комбінованому режимі) та надають дані в спектральних діапазонах, які дають змогу розрахувати на їхній основі обрані спектральні індекси: EVI, NDMI та S2REP.

Територія вибирається за одним із найбільш вживаних способів подачі вхідних даних про межі території дослідження – файлом векторного формату “Шейпфайл” (Shapefile). Для коректної роботи

алгоритму вхідний шейпфайл має бути поданий у системі координат WGS 84 (EPSG:4326).

Оскільки методика базується на принципі виявлення змін (Change detection), то для порівняння стану лісосмуг використовуються дані “до пошкоджень” та “після пошкоджень”. Отже, вхідними даними слугують також відповідні проміжки часу цих двох періодів.

Окрім того, експертом задаються вагові коефіцієнти для кожного з індексів – це необхідно для об’єднання карт стану лісосмуг, адже для цього виконується зважена сума карт. Вагові коефіцієнти задаються зважаючи на ступінь впливу кожного з індикаторів.

3.2 Опис оброблення вхідних даних

Джерелом вхідних даних обрано хмарну платформу, що поєднує в собі базу даних різних супутників та інструментарій, включаючи необхідні потужності їх оброблення – Google Earth Engine (GEE). Оскільки дані Sentinel-2 в GEE вже попередньо оброблені (кориговані та калібровані), то вони обробляються за допомогою простої схеми, що наведена на Рис. 2.

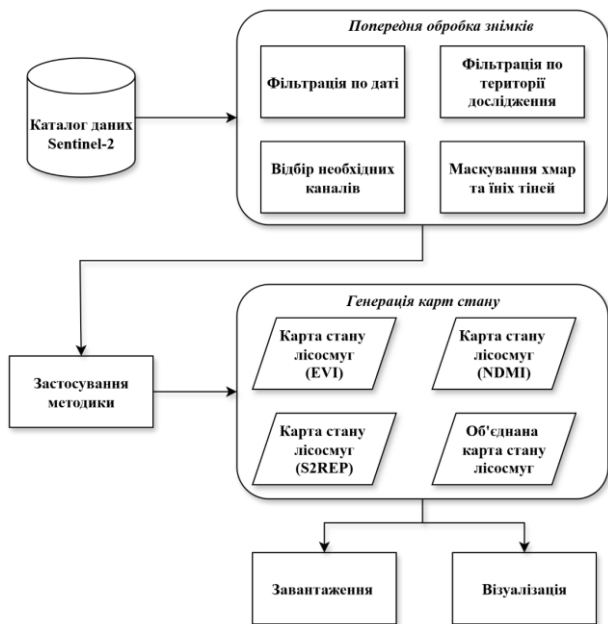


Рис. 2. Блок-схема функціонування геоінформаційного інструменту для дистанційного оцінювання стану лісосмуг

Перший етап – це попереднє оброблення супутникових даних Sentinel-2. Ця процедура включає такі кроки:

- 1) фільтрація за датою – обираються знімки за вказаний експертом період часу;
- 2) фільтрація за територією дослідження – обираються знімки, які охоплюють визначену територію дослідження;
- 3) відбір необхідних каналів – для розрахунку зазначених спектральних індексів обираються необхідні спектральні канали, а саме – канали B2, B4, B8, B11 і B12;
- 4) маскування хмар та їхніх тіней – маскуються хмари та їхні тіні за допомогою вбудованого шару “SCL (Scene classification layer)”.

3.3 Опис застосування методики

Після отримання оброблених даних розраховуються спектральні індекси EVI, NDMI та S2REP за такими формулами (Bhattacharya et al., 2024; Gao et al., 2024; Zhao et al., 2024):

$$EVI = 2.5 \cdot \frac{B8 - B4}{B8 + 6 \cdot B4 - 7.5 \cdot B2 + 1},$$

$$NDMI = \frac{B8 - B11}{B8 + B11},$$

$$S2REP = 705 + 35 \cdot \left(\frac{B4 + B7}{2} - B5 \right) / (B6 - B5),$$

де $Bx, x = \overline{1,12}$ – спектральний канал супутника Sentinel-2.

Далі, на основі отриманих карт, розраховується об’єднана карта стану лісосмуг. Для цього необхідно застосувати вагові коефіцієнти для кожного з індикаторів – ці дані надаються експертом на основі оцінки впливу кожного індикатора.

Як результат, буде отримано 4 геопросторові шари – 1) карта стану лісосмуг за EVI; 2) карта стану лісосмуг за NDMI; 3) карта стану лісосмуг за S2REP; та 4) об’єднана карта стану лісосмуг.

3.4. Завантаження та візуалізація

Отримані карти представлено у вигляді інтерактивної карти, яка доступна в GEE. Приклад такої візуалізації показаний на Рис. 3. Ця карта дає змогу здійснювати накладання різних шарів, масштабування, перегляд значень в кожному пікселі тощо.

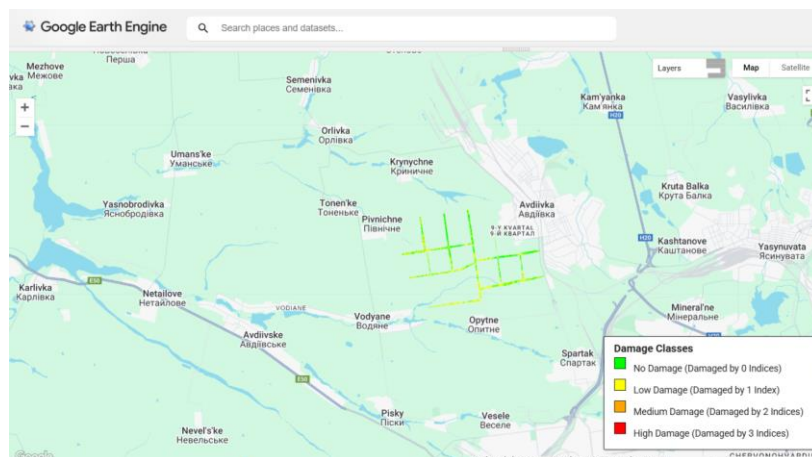


Рис. 3. Ілюстрація інтерактивної карти GEE

Окрім візуалізації, розраховані карти стану лісосмуг можуть бути завантажені через спеціальну панель в GEE (Рис. 4).

Task: Initiate image export

Task name (no spaces) *

ShelterBelts

Coordinate Reference System (CRS)

EPSG:4326

Scale (m/px)

10

DRIVE CLOUD STORAGE EE ASSET

Drive folder

Drive folder name or blank for root

Filename *

ShelterBelts

File format *

GEO_TIFF

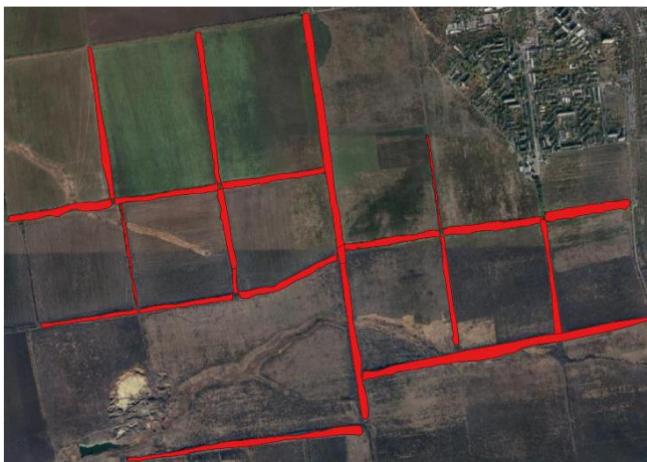
CANCEL RUN

Рис. 4. Ілюстрація діалогового вікна збереження шару в GEE

При завантаженні можна задати такі вихідні параметри: назва файлу, система координат та розмір пікселя. Після завершення процедури завантаження отримані карти стану лісосмуг з'являться на Google drive користувача.

4. Експеримент

У рамках експерименту для тестування розробленого геоінформаційного інструменту було обрано дві території дослідження. Обидві території знаходяться в Донецькій області, перша – поблизу населеного пункту Опитне (Stankevich et al., 2025b), біля Авдіївки, друга – біля населеного пункту Клинове (Stankevich et al., 2025a), східніше Бахмута. Обидві території опинились в зоні активних бойових дій, у 2022–2023 роках відповідно, та були значно пошкоджені важкою артилерією, термобаричними та керованими авіаційними боєприпасами. Для дослідження були обрані лісосмуги шириною 20 м і більше, оскільки супутникові дані Sentinel-2 мають просторову розрізненість 10 м. Вони показані на Рис. 5.



а)



б)

Рис. 5. Супутникові знімки територій дослідження:
а) Опитне, б) Клинове (червоним виділено лісосмуги, обрані для подальшого аналізу)

Для кожної ділянки сформовано два набори супутникових даних Sentinel-2: “до” та “після” пошкодження з урахуванням періоду пошкодження на цій території. Також варто зазначити, що при створенні об'єднаних карт стану лісосмуг вважалося, що всі індикатори рівнозначні, тому вони мали однакові вагові коефіцієнти. Виходячи з цього, об'єднана карта мала значення від 0 до 3, де 0 – пошкодження не зафіксовано за жодним з індикаторів, а 3 – пошкодження зафіксовано в кожному з індикаторів.

Так, поблизу Опитного значні пошкодження лісосмуг були зафіксовані в 2023 р., тому період до пошкодження охоплював 2019–2022 рр., а після – 2023–2024 рр. На ділянці біля Клинового пошкодження відбулися влітку 2022 р., тому період до пошкодження – 2019–2021 рр., а після пошкодження – 2022–2024 рр.

Згідно з розробленим алгоритмом, для кожної ділянки отримано чотири карти стану лісосмуг: по

одній на основі кожного з трьох спектральних індексів (EVI, S2REP, NDMI) та одну об'єднану карту (злиття індексних карт). На рис. 5 наведені карти стану лісосмуг для кожної ділянки. Кожну з індексних карт стану лісосмуг поділено на чотири рівні:

- пошкодження відсутні (значення індексу ≥ 0);
- низький рівень пошкодження (значення від -0.15 до 0);
- середній рівень пошкодження (від -0.3 до -0.15);
- високий рівень пошкодження (менше -0.3).

Об'єднану карту стану лісосмуг також розподілено на чотири категорії залежно від кількості індексів, які вказали на пошкодження:

- пошкодження не зафіксовано (жоден індикатор не виявив пошкодження);
- пошкодження зафіксовано за 1 індикатором;
- пошкодження зафіксовано за 2 індикаторами;
- пошкодження зафіксовано за 3 індикаторами.

Далі була розрахована відсоткова площа кожного рівня по відношенню до загальної площі оцінюваних лісосмуг та побудована карта стану лісосмуг поблизу Опитного (Рис. 6). Результати зазначених розрахунків наведені в Табл. 1.

Як показано в об'єднаній карті стану лісосмуг, 99.67% площі ділянки поблизу Опитного виявились

пошкодженими хоча б за одним індикатором. Найбільшу частку серед пошкоджених становили ділянки низького або середнього рівня, тоді як висока інтенсивність зафіксована на 19.90% площі за даними індексу NDMI та 2.42% – за даними індексу EVI.

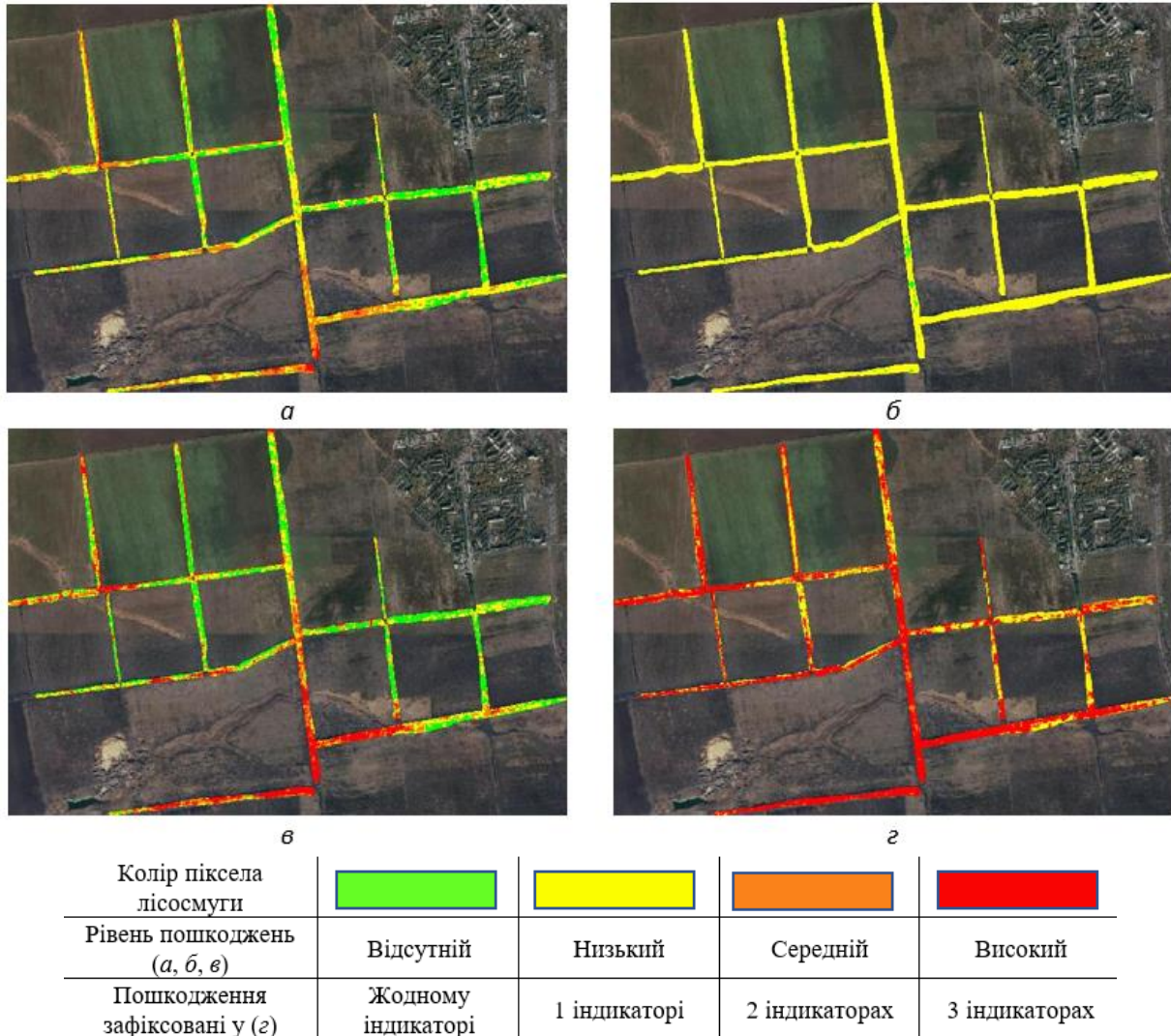


Рис. 6. Карти стану лісосмуг, розташованих біля села Опитне, відповідно до: EVI (а); S2REP (б); NDMI (в); об'єднаної карти (z)

Таблиця 1. Розподіл площі лісосмуг поблизу Опитного за рівнями пошкоджень (відповідно до чотирьох карт стану)

Карта стану	Без пошкоджень (0)	Низький (1)	Середній (2)	Високий (3)
EVI	27.16 %	48.81 %	21.61 %	2.42 %
S2REP	3.28 %	96.72 %	0 %	0 %
NDMI	33.06 %	28.03 %	19.01 %	19.90 %
Об'єднана (fusion)	0.33 %	19.89 %	22.75 %	57.03 %

Також була розрахована відсоткова площа кожного рівня відносно до загальної площі оцінюваних лісосмуг. Були побудовані карти стану лісосмуг поблизу Клинового (Рис. 7). Відповідно до об'єднаної карти, 96.61% площі ділянки поблизу Клинового зазнали пошкоджень щонайменше за

одним індикатором (Табл. 2).

Переважає частина пошкоджень мала низький або середній рівень, тоді як найбільша частка ділянок з високим рівнем пошкоджень (15.99%) зафіксована за даними індексу NDMI.

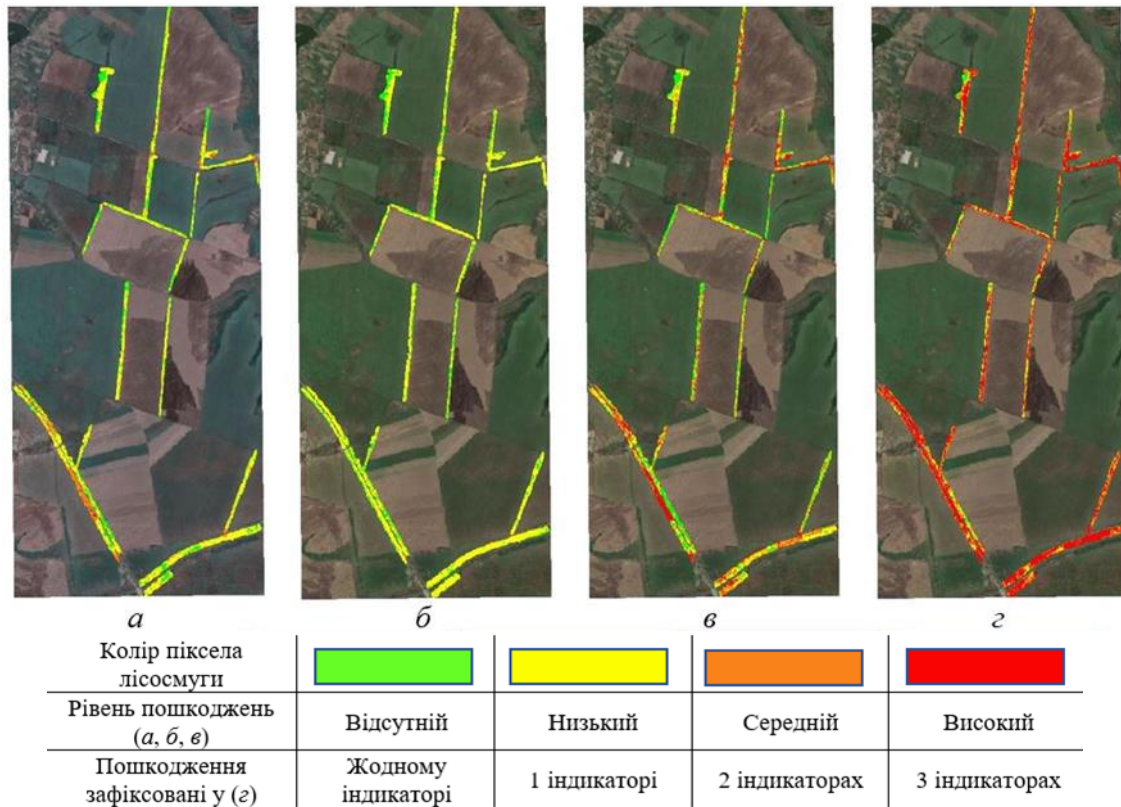


Рис. 7. Карти стану лісосмуг, розташованих біля села Клинове, відповідно до: EVI (а); S2REP (б); NDMI (в); об'єднаної карти (з)

Таблиця 2. Розподіл площі лісосмуг поблизу Клинового за рівнями пошкоджень (відповідно до чотирьох карт стану)

Карта стану	Без пошкоджень (0)	Низький (1)	Середній (2)	Високий (3)
EVI	23.15 %	63.60 %	12.81 %	0.53 %
S2REP	24.33 %	75.67 %	0 %	0 %
NDMI	23.26 %	32.94 %	27.81 %	15.99 %
Об'єднана (fusion)	3.39 %	14.01 %	32.53 %	50.07 %

Перевірка достовірності створених карт стану лісосмуг здійснювалася за допомогою супутникових знімків із високою просторовою розрізненістю, отриманих із супутників Maxar Technologies (WorldView) та Airbus Defence and Space (Pleiades), доступних через платформу Google Earth. Візуальний аналіз підтвердив відповідність між позначеними на картах зонами пошкоджень та фактичним станом лісосмуг.

Висновки

У цій роботі викладено розроблений геоінформаційний інструмент оцінювання стану лісосмуг із залученням даних ДЗЗ шляхом створення геоінформаційного інструменту на базі платформи GEE. Цей інструмент базується на методиці порівняння стану лісосмуг до та після пошкоджень за спектральними індексами. Методика є гнучкою та може бути адаптована шляхом вибору інших біофізичних індикаторів і відповідних індексів.

Розроблений геоінформаційний інструмент використовує супутникові знімки Sentinel-2 як вхідні дані. Також в роботі описано процедуру попереднього оброблення даних, яка містить фільтрацію знімків за періодом дослідження та територією дослідження та маскування хмар. Після цього застосовується розроблена раніше методика з використанням трьох біофізичних індикаторів та відповідних спектральних індексів – біомаси (спектральний індекс – EVI), вмісту хлорофілу (S2REP) та вмісту вологи (NDMI). Вихідними даними є 4 карти стану лісосмуг – по одній за кожним індексом та об'єднана карта стану. Оскільки розроблений геоінформаційний інструмент базується на платформі GEE, він містить засоби GEE для введення, завантаження, візуалізації даних та, власне, оброблення даних за допомогою комп'ютерних потужностей хмарних серверів Google.

У рамках тестування розробленого інструменту обрано дві території дослідження в межах Донецької області, які перебували в зоні активних бойових дій в 2022–2023 роках, а саме – поблизу населеного

пункту Опитне (Авдіївський район) та біля Клинового (Бахмутський район). Візуальний аналіз засвідчив відповідність між позначеними на картах зонами пошкоджень та фактичним станом лісосмуг, що підтверджує ефективність розробленого інструменту.

Серед напрямів подальших досліджень можна відзначити такі: 1) застосування нових біофізичних індикаторів; 2) залучення додаткових джерел даних; 3) оцінювання впливу кожного з індикаторів для надання рекомендацій щодо експертних оцінок вагових коефіцієнтів спектральних індексів при побудові об'єднаної карти пошкоджень.

Внесок авторів: Концептуалізація – С. А. Станкевич та А. О. Козлова; методологія – С. А. Станкевич та А. А. Андрєєв; формальний аналіз – А. О. Козлова, А. А. Андрєєв та Л. М. Артющин; дослідження – А. А. Андрєєв, С. І. Голубов та А. Р. Лисенко; оброблення даних – А. А. Андрєєв, С. І. Голубов та А. Р. Лисенко; підготовка тексту статті: авторський рукопис – А. А. Андрєєв, С. І. Голубов та А. Р. Лисенко; рецензування та редагування – С. І. Голубов та А. Р. Лисенко; візуалізація – С. І. Голубов та А. Р. Лисенко. Всі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Фінансування: Це дослідження профінансоване грантом НАН України дослідницьким лабораторіям / групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки у 2025–2026 рр. у рамках проекту “Розробка набору геоінформаційних інструментів для дистанційного оцінювання стану лісосмуг, пошкоджених внаслідок воєнних дій”.

Доступність даних: Дані можуть бути надані авторами за обґрунтованим запитом.

Подяки: Автори вдячні Національній академії наук України за підтримку цього дослідження. Ми також вдячні рецензентам і редакторам за їхні цінні коментарі, рекомендації та увагу до роботи.

Конфлікти інтересів: Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів

Author Contributions: Conceptualization – S. A. Stankevich and A. O. Kozlova; methodology – S. A. Stankevich and A. A. Andreiev; formal analysis – A. O. Kozlova, A. A. Andreiev and L. M. Artiushyn; investigation – A. A. Andreiev, S. I. Golubov and A. R. Lysenko; data curation – A. A. Andreiev, S. I. Golubov and A. R. Lysenko; writing – original draft preparation – A. A. Andreiev, S. I. Golubov and A. R. Lysenko; writing – review and editing – S. I. Golubov and A. R. Lysenko; visualization – S. I. Golubov and A. R. Lysenko. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research funded by Grant of the National Academy of Sciences of Ukraine to research laboratories/groups of young scientists of the National Academy of Sciences of Ukraine for conducting research in priority areas of science and technology (2025–2026) for the project “Development of a geoinformation toolbox for remote assessment of shelterbelts damaged by military actions”.

Data Availability Statement: Data available on reasonable request from the authors.

Acknowledgments: The authors are grateful to the National Academy of Sciences of Ukraine for supporting this research. We are also grateful to the reviewers and editors for their valuable comments, recommendations, and attention to the work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest

Література / References

- Bhattacharya, O., Sinha, S., Mishra, V. N., Kumari, M., Hasher, F. F. B., Barman, J., & Zhran, M. (2024). Harnessing geospatial tools to map the forest fire: risk zonation in Pauri Garhwal, Uttarakhand. *Results in Engineering*, 103694. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103694>.
- Fassnacht, F. E., White, J. C., Wulder, M. A., & Næsset, E. (2023). Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions. *Forestry an International Journal of Forest Research*, 97(1), 11–37. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad024>.
- Gao, S., Yan, K., Liu, J., Pu, J., Zou, D., Qi, J., Mu, X., & Yan, G. (2024). Assessment of remote-sensed vegetation indices for estimating forest chlorophyll concentration. *Ecological Indicators*, 162, 112001. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112001>.
- Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., ... Fernandez, V. (2017). Copernicus Sentinel-2A calibration and products Validation status. *Remote Sensing*, 9(6), 584. <https://doi.org/10.3390/rs9060584>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Kędziora, A. (2015). The network of shelterbelts as an agroforestry system controlling the water resources and biodiversity in the agricultural landscape. *Papers on Global Change IGBP*, 22(1), 63–82. <https://doi.org/10.1515/igbp-2015-0016>.
- Kong, T., Liu, B., Henderson, M., Zhou, W., Su, Y., Wang, S., Wang, L., & Wang, G. (2022). Effects of shelterbelt transformation on soil aggregates characterization and erodibility in China Black soil farmland. *Agriculture*, 12(11), 1917. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111917>.
- Lavrov, V., Miroshnyk, N., Grabovska, T., Shupova, T. (2021). Forest shelter belts in organic agricultural landscape: structure of biodiversity and their ecological role. *Folia Forestalia Polonica*, 63(1), 48–64. <https://doi.org/10.2478/ffp-2021-0005>.
- Liu, Y., Li, H., Yuan, F., Shen, L., Wu, M., Li, W., Wang, A., Wu, J., & Guan, D. (2022). Estimating the impact of shelterbelt structure on corn yield at a large scale using Google Earth and Sentinel 2 data. *Environmental Research Letters*, 17(4), 044060. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac58ab>.
- Matsala, M., Odruzenko, A., Sydorenko, S., Sydorenko, S. (2024). War threatens 18 % of protective plantations in eastern agroforestry region of Ukraine. *Forest Ecology and Management*, 578, 122361. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122361>.
- Myroniuk, V., Weinreich, A., Von Dosky, V., Melnychenko, V., Shamrai, A., Matsala, M., ... Davis, R. (2024). Nationwide remote sensing framework for forest resource assessment in war-affected Ukraine. *Forest Ecology and Management*, 569, 122156. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122156>.
- Stankevich, S. A., Kozlova, A. A. (2024). Remote condition mapping and post-hostilities damage assessment of forest shelterbelts. In *Proceedings of the International Scientific, Theoretical and Applied Conference “Restoration of Ecosystems Damaged by Military Actions: Ukrainian and European Challenges” (REDMO-2024)*, 74–77. Kyiv: National Aviation University.
- Stankevich, S. A., Kharytonov, N. N., Dudar, T. V., Kozlova, A. A. (2016). Risk assessment of land degradation using satellite imagery and geospatial modelling in Ukraine. In *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/62403>.
- Stankevich, S., Kozlova, A., Andreiev, A., Golubov, S., Lysenko, A. (2025a). Remote assessment of shelterbelt conditions after military actions. *Ukrainian Journal of*

- Remote Sensing*, 12(2), 4–9. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.2.281>.
- Stankevich, S., Kozlova, A., Andreiev, A., Lysenko, A., Golubov, S. (2025b). Remote Assessment of Shelterbelts Damaged by Military Actions. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510130>.
- Wang, J., Patruno, L., Zhao, G., Tamura, Y. (2023). Windbreak effectiveness of shelterbelts with different characteristic parameters and arrangements by means of CFD simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 344, 109813. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109813>.
- Zhao, C., Pan, Y., Zhang, P. (2024). Development of a new indicator for identifying vegetation destruction events using remote sensing data. *Ecological Indicators*, 166, 112553. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112553>.

GEOINFORMATION TOOL FOR REMOTE ASSESSMENT OF SHELTERBELTS DAMAGED BY MILITARY ACTIONS

A. A. Andreiev¹, <https://orcid.org/0000-0002-6485-449X>

A. R. Lysenko¹, <https://orcid.org/0000-0003-2923-8648>

S. I. Golubov¹, <https://orcid.org/0000-0003-3711-598X>

S. A. Stankevich¹, <https://orcid.org/0000-0002-0889-5764>

A. O. Kozlova¹, <https://orcid.org/0000-0001-5336-237X>

L. M. Artiushyn², <https://orcid.org/0000-0002-7488-7244>

¹“Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine”, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

²State Research Institute of Aviation, Kazarmenna Str., 6-V, Kyiv, 01135, Ukraine

Field forest shelterbelts are considered as the key element of sustainable land use, performing functions such as preventing soil erosion, reducing the impact of dry winds and dust storms, improving the water balance, and serving as centres of biodiversity in agricultural landscapes.

However, forest shelterbelts suffer extensive damage or even destruction during military actions, which creates serious long-term threats to the environment and agricultural areas. Given that ground-based surveys for in-situ data retrieval are dangerous and have certain limitations in speed and scalability, the use of remote sensing (RS) methods is the most appropriate. Assessing the condition of the forest shelterbelts requires the use of a large amount of data and significant computational power, so it is suitable to involve cloud platforms for geospatial analysis, in particular Google Earth Engine (GEE). Therefore, this work aims to develop a geoinformation tool for assessing the condition of the forest shelterbelts after military actions based on the GEE platform. This tool is based on a methodology, the algorithm of which consists of comparing the condition of the forest shelterbelts before and after the damage based on the biophysical indicators, information about which is obtained from the remote sensing data. The methodology is flexible, as it allows changing the involved spectral indices depending on the selected biophysical indicators. The developed geoinformation tool involves Sentinel-2 satellite images to evaluate three biophysical indicators through their respective spectral indices: biomass (spectral index – EVI), chlorophyll content (S2REP) and moisture content (NDMI). Since the geoinformation tool is based on the GEE platform, it uses and provides users with GEE tools for entering, loading, and visualising data, and processing is fast due to the use of the computing powers of the Google Cloud servers. The developed geoinformation tool was tested in 2 study areas within the Donetsk region, which were in the zone of active military actions in 2022–2023 and suffered significant damage. Visual analysis confirmed the effectiveness of the developed tool, showing the correspondence between the damage zones marked on the maps and the actual condition of the forest shelterbelts. Therefore, this geoinformation tool can be used for monitoring the condition of forest shelterbelts located in combat zones and for planning their restoration. Further research can be aimed at applying additional data sources and biophysical indicators, as well as assessing the impact of each of the indicators to provide recommendations on expert estimates of the spectral index weighting coefficients when constructing a fused map of the shelterbelts condition.

Keywords: shelterbelts, post-war restoration, damage assessment, remote sensing, Sentinel-2, EVI, NDMI, S2REP, Google Earth Engine

Рукопис статті отримано 29.08.2025
Надходження остаточної версії: 15.09.2025
Публікація статті: 30.09.2025

Received 29.08.2025

Revised 15.09.2025

Accepted 30.09.2025