Ukrainian Journal of Remote Sensing
journal homepage: www.ujrs.org.ua

https://doi.org/10.36023/ujrs.2026.13.3.317

УДК 528.8:630.266

Побудова та валідація прецизійних карт стану лісосмуг, пошкоджених внаслідок воєнних дій, за даними дистанційного зондування Землі

А. Р. Лисенко, https://orcid.org/0000-0003-2923-8648
С. І. Голубов*, https://orcid.org/0000-0003-3711-598X
А. А. Андреєв, https://orcid.org/0000-0002-6485-449X

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

Полезахисні лісові смуги виконують важливі загальноекологічні функції, серед яких – стримування водно-вітрової ерозії, мінімізація негативного впливу суховіїв і пилових бур, регулювання водного режиму ґрунтів, збереження їхньої родючості, а також підтримка біорізноманіття. Протее, внаслідок активних воєнних дій, значна частина лісосмуг зазнала суттєвих пошкоджень або була повністю знищена. Враховуючи, що наземні дослідження в умовах воєнних дій є небезпечними або, в деяких випадках, неможливими, єдиним доступним інструментом для аналізу залишаються методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Раніше авторами було розроблено відповідну методику та геоінформаційний інструмент на базі хмарної платформи Google Earth Engine (GEE) для оцінювання стану лісосмуг. Метою цієї роботи є побудова та валідація прецизійних карт стану лісосмуг, пошкоджених внаслідок воєнних дій, за допомогою раніше розробленого авторами геоінформаційного інструменту в середовищі GEE. Практичну апробацію розробленої методики та геоінформаційного інструменту проведено на мережі лісосмуг між містами Гуляйполе та Пологи (Запорізька область). Побудовано 4 растрові карти стану лісосмуг: три окремі карти за індикаторами EVI, NDMI та S2REP, а також об'єднану карту стану лісосмуг, отриману шляхом злиття даних за всіма трьома розрахованими індексами. Валідацію результуючих карт виконано за допомогою рангової кореляції Кендалла (τ_b).

Для індексів EVI (τ_b(EVI) = 0.8909) та NDMI (τ_b(NDMI) = 0.7899) підтверджено високу точність моделювання та високий рівень статистичної значущості ($\rho < 0.0001$), що свідчить про валідність побудованих карт і стійку монотонну залежність між змодельованими та спостережуваними значеннями у межах виділених інтервалів відхилень (0–10%, 10–25%, 25–40% та >40%). Натомість для індексу S2REP виявлено помірний від'ємний зв'язок (τ_b(S2REP) = –0.4827), що зумовлено його фізичною природою як спектральної координати зсуву хвилі (у нм), а не амплітудного коефіцієнта відношення (як у випадку індексів EVI та NDMI). Це обгрунтовує необхідність додаткового масштабування або нелінійної нормалізації S2REP під час його злиття з іншими показниками. Напрями подальших досліджень передбачають апробацію інструменту на інших територіях, застосування даних надвисокої розрізненності (PlanetScope, БпЛА) та впровадження методів класифікації для автоматизованого виявлення меж лісосмуг.

Ключові слова: лісосмуги, валідація, оцінювання пошкоджень, ДЗЗ, Sentinel-2, EVI, NDMI, S2REP, Google Earth Engine.

© А. Р. Лисенко, С. І. Голубов, А. А. Андреєв. 2026

Вступ

Полезахисні лісові смуги виконують важливі загальноекологічні функції. Серед них можна виділити стримування водно-вітрової ерозії (Kędziora, 2015), мінімізацію негативного впливу суховіїв і пилових бур, а також регулювання водного режиму ґрунтів та збереження їхньої родючості (Kong et al., 2022; Wang et al., 2023; Lavrov et al., 2021). Крім того, в умовах інтенсивно змінених агроландшафтів ці насадження виступають осередками збереження та підтримки біорізноманіття (Popov et al., 2008). Проте, під час активних бойових дій лісосмуги зазнали суттєвих пошкоджень, а подекуди – повного знищення (Matsala et al., 2024; Myroniuk et al., 2024). Це зумовлено тим, що лісосмуги масово використовуються як укриття для розміщення особового складу та військової техніки, а також для зведення фортифікаційних споруд та артилерійських позицій. Тобто, пошкодження лісосмуг призводить до важких довготривалих наслідків для природи, економіки та населення сільськогосподарських територій.

Для оцінювання стану лісосмуг єдиним доступним джерелом даних залишаються методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Адже наземні дослідження є небезпечними або, в деяких випадках, неможливими через замінування територій, забруднення вибухонебезпечними предметами та ризик повторних обстрілів. Окрім того, наземні

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: S. I. 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/)

дослідження не дають змоги проводити масштабний та регулярний аналіз на відміну від методів ДЗЗ (Stankevich, Kozlova, 2024; Fassnacht et al., 2024).

Для розв'язання цієї задачі авторами було розроблено відповідну методику та спеціалізований геоінформаційний інструмент на її основі. Алгоритм методики полягає в порівняльному аналізі біофізичних індикаторів лісосмуг у періоди до та після пошкоджень за даними ДЗЗ. Це дає змогу виявляти зміни стану лісосмуг у часовій динаміці.

Проте, для практичного застосування розробленого інструменту необхідною умовою є валідація прецизійних карт стану лісосмуг, побудованих за його допомогою. Адже без перевірки точності неможливо гарантувати достовірність отриманих результатів. Отже, метою дослідження є побудова та валідація прецизійних карт стану лісосмуг, пошкоджених внаслідок воєнних дій, за допомогою раніше розробленого авторами геоінформаційного інструменту в середовищі Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

Методика

Розроблена авторами методика (Станкевич та ін., 2025) полягає у використанні даних ДЗЗ для порівняння стану лісосмуг до та після пошкоджень за різними біофізичними показниками. Загальна блок-схема алгоритму методики наведено на Рис. 1.

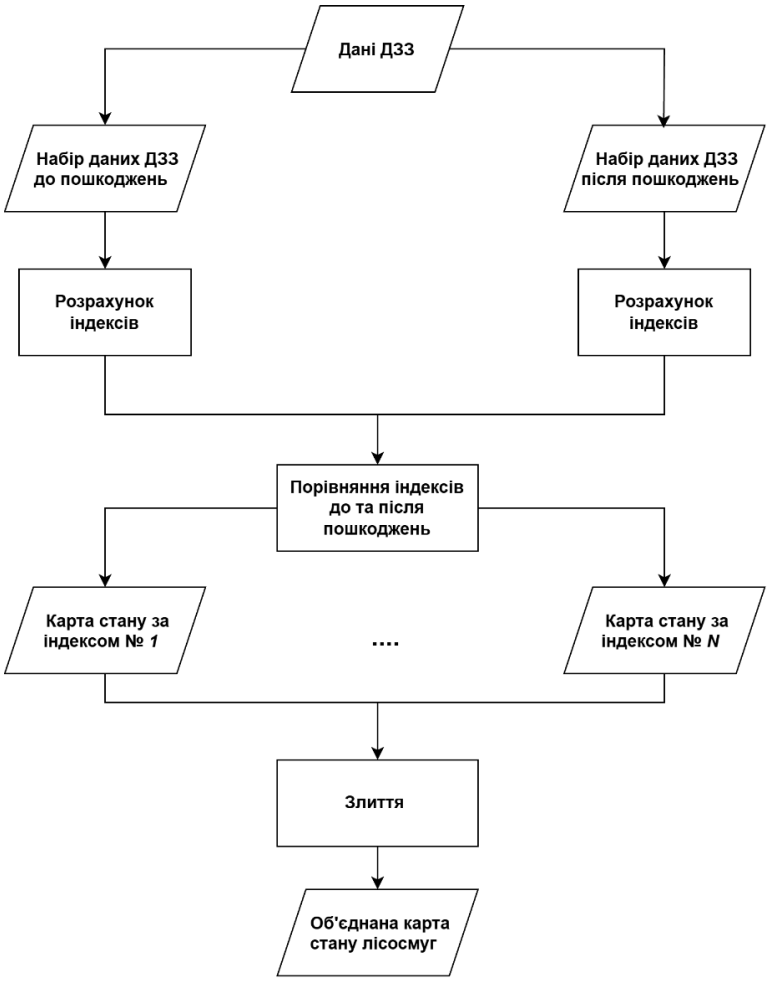


Рис. 1. Блок-схема алгоритму методики оцінювання стану лісосмуг

Алгоритм цієї методики складається з таких етапів.

Формування наборів даних ДЗЗ до та після пошкоджень. Відбираються дані для формування двох наборів даних – до та після пошкоджень лісосмуг. Окрім того, проводиться необхідне попереднє оброблення даних для підготовки до подальшого аналізу.

Розрахунок індексів. Для оцінювання окремих біофізичних параметрів лісосмуг розраховується комплекс відповідних спектральних або радіометричних індексів (зокрема, вегетаційні індекси для аналізу біомаси, вологості, вмісту хлорофілу або структури крони).

Порівняння індексів до та після пошкоджень. Проводиться попіксельне зіставлення часових станів та формуються окремі карти відносних змін за кожним з розрахованих індексів.

Злиття. На останньому етапі відбувається злиття отриманих показників за допомогою зваженої суми, де вагові коефіцієнти відображають вплив кожного з індексів. Результатом цього етапу є об'єднана карта стану лісосмуг.

Геоінформаційний інструмент

На основі представленої методики розроблено геоінформаційний інструмент (Андреєв та ін., 2025; Andreiev et al., 2026) на базі хмарної платформи для геопросторового аналізу GEE. Джерелом вхідних даних є багатоспектральні знімки Sentinel-2. Серед використаних біофізичних індикаторів та відповідних спектральних індексів обрано: Enhanced Vegetation Index (EVI) – покращений вегетаційний індекс (біомаса) (Zhao et al., 2024), Normalized Difference Moisture Index (NDMI) – нормалізований різницевий індекс вологості (вміст вологи) (Bhattacharya et al., 2024) та Sentinel-2 Red-Edge Position (S2REP) – позиція червоного краю Sentinel-2 (вміст хлорофілу) (Gao et al., 2024). Для забезпечення зручності роботи з інструментом розроблено графічний інтерфейс користувача (GUI), зображений на Рис. 2.

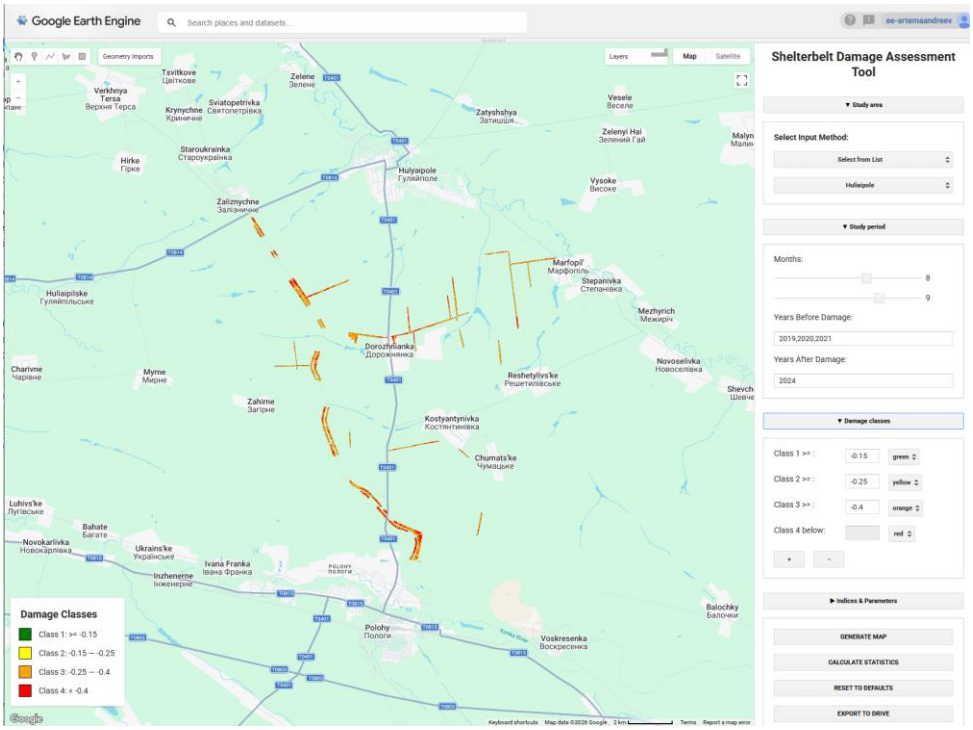


Рис. 2. Графічний інтерфейс користувача розробленого геоінформаційного інструменту

За допомогою графічного інтерфейсу користувач може задавати межі території дослідження шляхом завантаження або створення на інтерактивній карті GEE векторного шару лісосмуг. Також інструмент дає змогу задавати часові інтервали до та після пошкодження. Крім того, є можливість задавати вагові коефіцієнти для кожного спектрального індексу під час злиття даних та налаштування параметрів експорту підсумкових карт.

Для проведення дослідження обрано територію, що охоплює масив полезахисних лісосмуг, розташованих південніше міста Гуляйполе та північніше міста Пологи Запорізької області (рис. 3).

Вибірка об’єктів дослідження формувалась з урахуванням просторової розрізненності супутникових знімків Sentinel-2 (10 м). Відповідно, до аналізу було залучено лише ті лісосмуги, ширина яких становить не менше 30 м, а довжина перевищує 100 м, що дає змогу мінімізувати крайові ефекти та похибки змішаних пікселів. Ключовим критерієм відбору також була наявність просторових ознак ведення бойових дій (фортифікації, вирви тощо) та підтверджених ушкоджень деревного покриву безпосередньо в межах насаджень або на прилеглих до них територіях.



Рис. 3. Оглядова карта території дослідження (полезахисні лісосмуги між містами Гуляйполе та Пологи, Запорізька область). Червоним кольором виділено контури відібраних лісосмуг

З огляду на те, що активні бойові дії на досліджуваній території (зокрема, південніше Гуляйполя) тривали аж до лютого 2026 року, процес деградації лісосмуг мав довготривалий характер.

Враховуючи цю динаміку, часові ряди супутникових даних було розділено на два ключові проміжки:

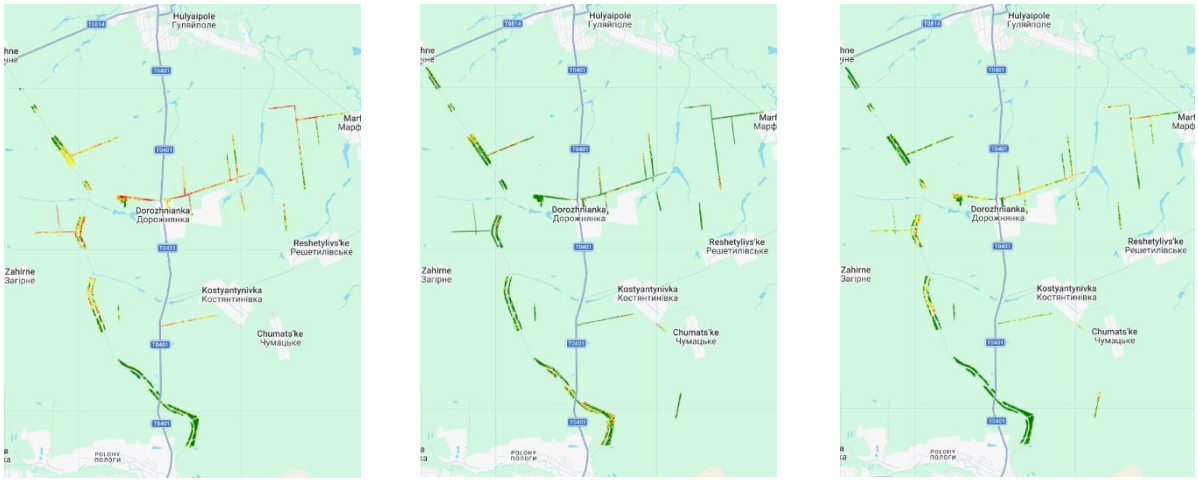
базовий період до пошкодження: 2019–2021 роки;

період оцінювання наслідків (після пошкодження): 2024 рік.

Для уникнення похибок, пов'язаних із сезонними фенологічними змінами та хмарністю, індекси розраховувались на основі композитних супутникових зображень, отриманих у період серпня–вересня кожного року.

Відповідно до методики було отримано 4 прецизійні карти стану лісосмуг, а саме:

1) карта стану за індексом NDMI (Рис. 4а);
2) карта стану за індексом S2REP (Рис. 4б);
3) карта стану за індексом EVI (Рис. 4в);
4) об'єднана карта стану лісосмуг (Рис. 5)



а *б* *в*

Рис. 4. Карти стану лісосмуг за спектральними індексами: *а* – NDMI; *б* – S2REP; *в* – EVI

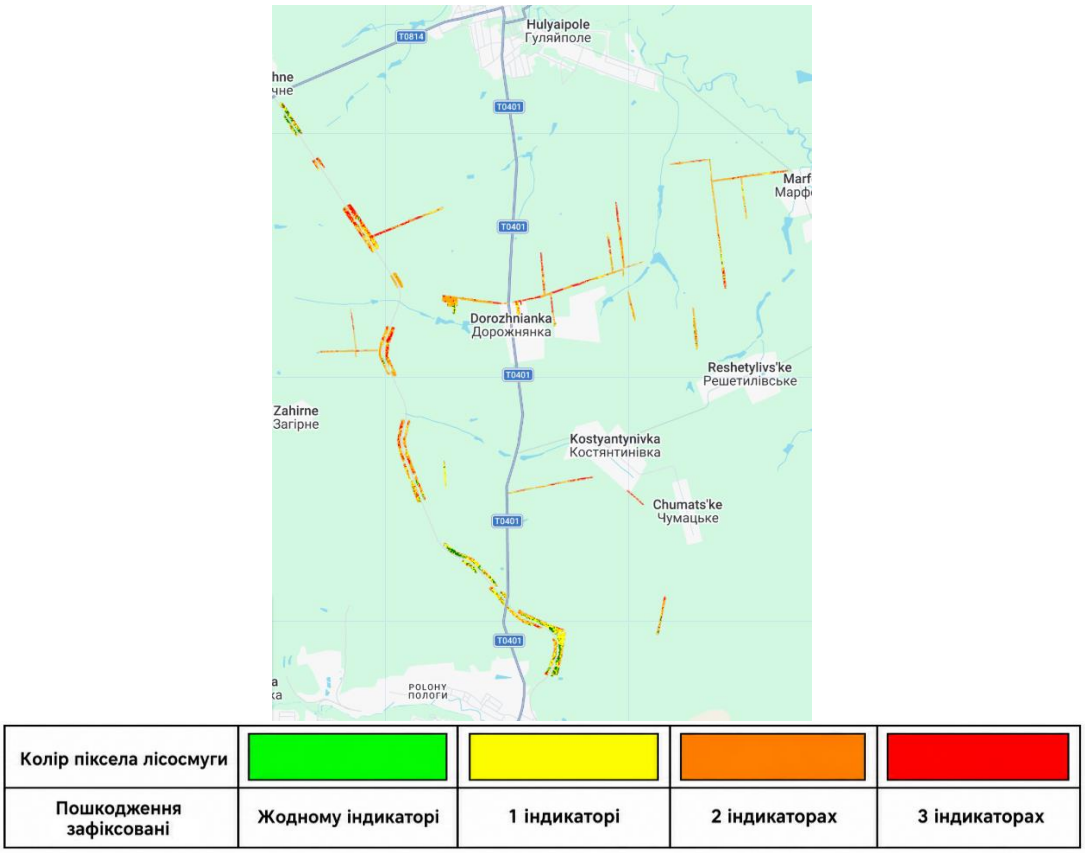


Рис. 5. Об'єднана карта стану лісосмуг

Об'єднана карта стану лісосмуг зображена на Рис. 5. Ця карта в кожному пікселі відображає кількість індикаторів, відповідно до яких було зафіксовано пошкодження. Отже, побудована карта має значення від 0 до 3, де 0 – пошкодження не зафіксовані в жодному з індикаторів, а 3 – пошкодження зафіксовані в 3 індикаторах.

Для отриманих рівнів пошкодження лісосмуг була розрахована відповідна відсоткова площа їх покриття відносно загальної площі оцінюваних лісосмуг. Результати зазначених розрахунків наведено в Табл. 1.

Таблиця 1. Розподіл площ лісосмуг за ступенем пошкодження

Карта стану	Розподіл площі за рівнем пошкоджень лісосмуг, %			
	Відсутній / Не зафіксовано за жодним з індикаторів	Низький / Зафіксовано за 1 індикатором	Середній / Зафіксовано за 2 індикаторами	Високий / Зафіксовано за 3 індикаторами
NDMI	2.3	10.3	21.7	65.7
S2REP	78.4	12.8	4.3	4.5
EVI	19.2	32.1	19.2	29.5
Об'єднана	0.1	2.7	65.5	31.7

Отже, відповідно до об'єднаної карти стану лісосмуг лише на **0.1%** площі території дослідження не зафіксовано пошкоджень в жодному індикаторі. Тоді як 31.7% площі території дослідження мають зафіксовані пошкодження відповідно до кожного з індикаторів, що свідчить про високу вірогідність присутності пошкоджень на цих ділянках.

Валідація

Для оцінювання точності створених карт лісосмуг було застосовано кореляційний аналіз. Побудовані карти стану лісосмуг мають характерний просторовий розподіл одночасно дифузних та жорстко впорядкованих класів, що частково перекриваються. Зважаючи на ранговий (порядковий) характер результуючих карт класифікації, як базовий математичний інструмент обрано рангову кореляцію Тау Кендалла (τ_b) (Kendall, 1938):

$$\tau_b = \frac{P - Q}{\sqrt{(P + Q + T_x)(P + Q + T_y)}}, \qquad (1)$$

де P – кількість узгоджених пар (пари в однаковому відносному порядку для обох змінних), Q – кількість неузгоджених пар (пари у зворотному відносному порядку для обох змінних), T_x – кількість узгоджених пар лише по змінній X, T_y – кількість узгоджених пар лише по змінній Y.

Цей метод дає змогу не лише оцінювати взаємозв'язок між структурами з монотонним розподілом класів, а й враховувати наявність зв'язаних рангів у дискретних наборах спостережуваних і змодельованих значень.

Враховуючи специфіку досліджуваної ділянки та безпекові ризики в межах зон ведення активних воєнних дій, отримати спостережувані дані безпосередньо наземними польовими методами неможливо. Тому еталонний набір даних формувався шляхом експертного візуального дешифрування оптичних супутникових знімків компанії Planet з надвисокою просторовою розрізненністю.

Задля мінімізації похибок, зумовлених суб'єктивним фактором під час візуального аналізу, до валідаційного набору включали лише ті точки, інтерпретація стану яких не викликала сумнівів протягом усього досліджуваного періоду (наприклад, абсолютно неушкоджені або повністю знищені лісосмуги). Просторове охоплення кожної з контрольних точок становило не менше 10 метрів, що відповідає просторовій розрізненності супутникових даних Sentinel-2, за якими були розраховані індекси NDMI, S2REP та EVI. Таким чином, критерії оцінювання точок відбору були спрощені до бінарного піксельного виявлення пошкоджених та непошкоджених ділянок лісосмуг, де до спостережуваного набору відбирали лише ті точки, що були узгоджені трьома експертами. Для підвищення надійності візуального аналізу дослідження було обмежено періодом максимальної вегетаційної активності деревної рослинності та інтенсивності воєнних дій (серпень – вересень 2024 року). Загалом для валідації було відібрано 98 контрольних точок. З них до еталонного набору без зафіксованих пошкоджень увійшло 38 точок, тоді як до набору із зафіксованими пошкодженнями було віднесено 60 точок. Відібрані контрольні точки зображені на Рис. 6.

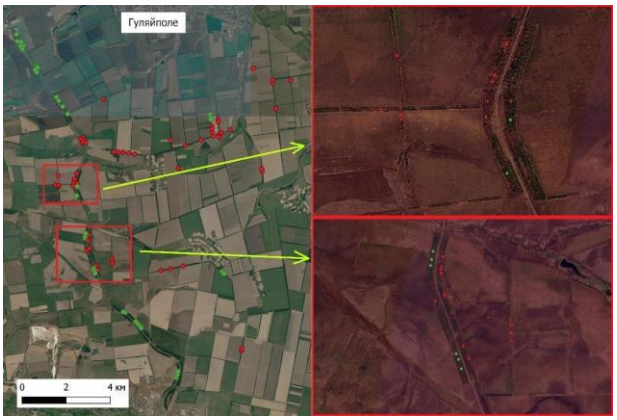


Рис. 6. Зображення просторового розташування відібраних контрольних точок

Дані набору спостережуваних значень були приведені до двох значень: відсутнім пошкодженням було присвоєно значення 0, а наявним пошкодженням було присвоєно значення 3. Дані з набору змодельованих значень залишилися без змін. Відповідні значення наборів були впорядковані попіксельно.

У результаті кореляційного аналізу наборів спостережуваних та змодельованих значень коефіцієнт кореляції Кендалла прийняв значення, наведені в Табл. 2.

Отже, відповідно до даних спектральних індексів, найбільше значення коефіцієнта кореляції Кендалла було за даними спектрального індекса EVI та досить високе за значеннями індекса NDMI. Щодо індексу S2REP, валідація показала, що цей індекс не

придатний для оцінювання стану лісосмуг у межах, використаних у дослідженні, відхилення від його максимального значення (понад 10% для легких пошкоджень, понад 25% для помірних пошкоджень та понад 40% для значних пошкоджень).

Таблиця 2. Коефіцієнт кореляції Кендалла спостережуваних та змодельованих наборів даних

Спектральний індекс	Коефіцієнт кореляції Кендалла, τ_b	Рівень значущості, p
NDMI	0.7899	< 0.0001
EVI	0.8909	< 0.0001
S2REP	-0.4827	< 0.0001

Загалом отримані результати показали високу узгодженість змодельованих значень із спостережуваними значеннями, що були отримані за супутниковими оптичними даними надвисокої розрізненності компанії Planet.

Висновки

Для практичного апробування та тестування розробленої методики та геоінформаційного інструменту для оцінювання стану лісосмуг обрано територію Запорізької області, що охоплює масив полезахисних лісосмуг між містами Гуляйполе та Пологи. Всього було побудовано 4 растрові карти стану лісосмуг: три окремі карти за індикаторами EVI, NDMI та S2REP, а також об'єднану карту стану лісосмуг, отриману шляхом злиття даних за всіма трьома розрахованими індексами.

Валідація побудованих карт була здійснена із застосуванням кореляційного аналізу на основі коефіцієнта рангової кореляції Кендалла (τ_b). Результати підтвердили високу точність моделювання для індексів EVI (τ_b(EVI) = 0.8909) та NDMI (τ_b(NDMI) = 0.7899) за високого рівня статистичної значущості ($p < 0.0001$). Це свідчить про високу валідність сформованих карт і чітку монотонну залежність змодельованих значень від спостережуваних у межах виділених інтервалів відхилень (0–10%, 10–25%, 25–40% та понад 40%).

Натомість для індексу S2REP зафіксовано помірний від'ємний зв'язок (τ_b(S2REP) = –0.4827). Така розбіжність зумовлена специфікою фізичної природи індексу: якщо EVI та NDMI є амплітудними коефіцієнтами відношення, що лінійно реагують на кількісні зміни біомаси, то S2REP фіксує спектральну координату зсуву хвилі у нанометрах (нм). У звуженому робочому діапазоні зміни стану покривів S2REP демонструє мінімальні відсоткові варіації ранжирування порівняно з класичними нормалізованими індексами. Це обґрунтовує необхідність застосування специфічного масштабування або нелінійної нормалізації S2REP при його комплексуванні з іншими спектральними показниками.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на тестування розробленого геоінформаційного інструменту на інших територіях дослідження з іншими типами дерев. Окрім того, важливим напрямом також є інтеграція супутникових даних надвисокої просторової розрізненості (зокрема PlanetScope) та даних знімання з БпЛА. Також планується впровадити методи класифікації для виявлення та картування лісосмуг (Andreiev, Artiushyn, 2024).

Внесок авторів: підготовка тексту статті (вступ) – А. А. Андреєв; методологія – А. А. Андреєв та А. Р. Лисенко; проведення експериментів (дослідження) – А. А. Андреєв та С. І. Голубов; валідація – А. Р. Лисенко та С. І. Голубов; підготовка тексту статті (висновки) – А. Р. Лисенко та С. І. Голубов. 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 напрямами розвитку науки і техніки у 2025–2026 рр. у рамках проєкту «Розробка набору геоінформаційних інструментів для дистанційного оцінювання стану лісосмуг, пошкоджених внаслідок воєнних дій».
Розкриття інформації про ШІ: При формуванні тексту статті використовувалась мовна модель GPT-4 для коригування назви публікації, систематизації її плану та для пошуку і коригування граматичних, пунктуаційних, синтаксичних помилок.
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: writing – introduction – A. A. Andreiev; methodology – A. A. Andreiev and A. R. Lysenko; investigation (experiment) – A. A. Andreiev and S. I. Golubov; validation – A. R. Lysenko and S. I. Golubov; writing – conclusions – A. R. Lysenko and S. I. Golubov. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Funding: This research was 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».
AI Disclosure: During the preparation of the manuscript, the GPT-4 language model was used to adjust the title of the publication, systematize its outline, and to find and correct grammatical, punctuation, and syntactic errors.
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

Андреєв, А. А., Лисенко, А. Р., Голубов, С. І., Станкевич, С. А., Козлова, А. О., & Артюшин, Л. М. (2025). Геоінформаційний інструмент для дистанційного оцінювання стану лісосмуг, пошкоджених внаслідок воєнних дій. *Український*

журнал дистанційного зондування Землі, 12(3), 12–20. doi:10.36023/ujrs.2025.12.3.290.

Станкевич, С. А., Козлова, А. О., Андреєв, А. А., Голубов, С. І., & Лисенко, А. Р. (2025). Дистанційне оцінювання стану лісосмуг після воєнних дій. *Український журнал дистанційного зондування Землі,* 12(2), 4–9. doi:10.36023/ujrs.2025.12.2.281.

Andreiev, A., Artiushyn, L. (2024). Improvement of land cover classification accuracy by training sample clustering. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2, 66–72. doi:10.32620/reks.2024.2.06.

Andreiev, A., Lysenko, A., Golubov, S., Stankevich, S., Kozlova, A., & Artiushyn, L. (2026). Cloud-Based Geoinformation Tool for Assessment of Shelterbelts Damaged by Military Actions. *19th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5. doi:10.3997/2214-4609.202655046.

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. doi: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. doi: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. doi:10.1016/ j.ecolind.2024.112001.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. doi: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. doi:10.1515/igbp-2015-0016.

Kendall, M. G. (1938). A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30(1–2), 81–93. doi:10.1093/biomet/30.1-2.81.

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. doi: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. doi:10.2478/ffp-2021-0005.

Matsala, M., Odruzhenko, A., Sydorenko, S., & Sydorenko, S. (2024). War threatens 18% of protective plantations in eastern agroforestry region of Ukraine. *Forest Ecology and Management*, 578, 122361. doi: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. doi:10.1016/j.foreco.2024.122156.

Popov, M. A., Kussul, N. N., Stankevich, S. A., Kozlova, A. A., Shelestov, A. Y., Kravchenko, O. M., Korbakov, M. B., & Skakun, S. V. (2008). Web service for biodiversity estimation using remote sensing data. *International Journal of Digital Earth*, 1(4), 367–376. doi:10.1080/ 17538940802483745.

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.

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. doi: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. doi:10.1016/j.ecolind.2024.112553.

References

Andreiev, A., Artiushyn, L. (2024). Improvement of land cover classification accuracy by training sample clustering. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2, 66–72. doi:10.32620/reks.2024.2.06.

Andreiev, A., Lysenko, A., Golubov, S., Stankevich, S., Kozlova, A., & Artiushyn, L. (2025). Geoinformation tool for remote assessment of shelterbelts damaged by military actions. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 12(3), 12–20. doi:10.36023/ujrs.2025.12.3.290 (in Ukrainian).

Andreiev, A., Lysenko, A., Golubov, S., Stankevich, S., Kozlova, A., & Artiushyn, L. (2026). Cloud-Based Geoinformation Tool for Assessment of Shelterbelts Damaged by Military Actions. *19th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5. doi:10.3997/2214-4609.202655046.

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. doi: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. doi: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. doi:10.1016/ j.ecolind.2024.112001.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. doi: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. doi:10.1515/igbp-2015-0016.

Kendall, M. G. (1938). A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30(1–2), 81–93. doi:10.1093/biomet/30.1-2.81.

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. doi: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. doi:10.2478/ffp-2021-0005.

Matsala, M., Odruzhenko, A., Sydorenko, S., & Sydorenko, S. (2024). War threatens 18% of protective plantations in eastern agroforestry region of Ukraine. *Forest Ecology and Management*, 578, 122361. doi: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. doi:10.1016/j.foreco.2024.122156.

Popov, M. A., Kussul, N. N., Stankevich, S. A., Kozlova, A. A., Shelestov, A. Y., Kravchenko, O. M., Korbakov, M. B., & Skakun, S. V. (2008). Web service for biodiversity estimation using remote sensing data. *International Journal of Digital Earth*, 1(4), 367–376. doi:10.1080/ 17538940802483745.

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., Kozlova, A., Andreiev, A., Golubov, S., & Lysenko, A. (2025). 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

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. doi: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. doi:10.1016/j.ecolind.2024.112553.

CONSTRUCTION AND VALIDATION OF PRECISION CONDITION MAPS OF SHELTERBELTS DAMAGED BY MILITARY OPERATIONS USING REMOTE SENSING DATA

Lysenko A. R., https://orcid.org/0000-0003-2923-8648
Golubov S. I., https://orcid.org/0000-0003-3711-598X
Andreiev A. A., https://orcid.org/0000-0002-6485-449X
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

Shelterbelts perform important general ecological functions, among which are the mitigation of wind and water erosion, minimization of the negative impact of dry winds and dust storms, regulation of soil moisture regime, preservation of soil fertility, as well as biodiversity support. However, as a result of military actions, a significant part of the shelterbelts has suffered substantial damage or complete destruction. Given that ground-based surveys under conditions of military operations are dangerous or, in some cases, impossible, remote sensing methods remain the only available tools for analysis. Previously, the authors developed a corresponding methodology and a GIS tool based on the Google Earth Engine (GEE) cloud platform for assessing the condition of shelterbelts. Meanwhile, the purpose of this work is to construct and validate condition maps of shelterbelts damaged by military operations, using the GEE-based GIS tool previously developed by the authors. Practical testing of the developed methodology and GIS tool was conducted on a network of shelterbelts between the towns of Huliaipole and Polohy (Zaporizhzhia Region). Four raster maps of shelterbelt condition were constructed: three individual maps using the EVI, NDMI, and S2REP indices, as well as a fused shelterbelt condition map obtained by merging data across all three mentioned above indices. Validation of the obtained maps was performed using Kendall rank correlation (τ_b). High modeling accuracy and a high level of statistical significance ($p < 0.0001$) were confirmed for the EVI ($\tau_b(\mathrm{EVI}) = 0.8909$) and NDMI ($\tau_b(\mathrm{NDMI}) = 0.7899$) indices, indicating the validity of the obtained maps and a stable monotonic dependence between modeled and observed values within the identified deviation ranges (0–10%, 10–25%, 25–40%, and >40%). In contrast, a moderate negative correlation ($\tau_b(\mathrm{S2REP}) = -0.4827$) was revealed for the S2REP index, which is explained by its physical nature as a spectral wave shift coordinate (in nm), rather than an amplitude ratio coefficient (as in the case of the EVI and NDMI indices). This justifies the necessity for additional scaling or non-linear normalization of S2REP when merging it with other indicators. Directions for further research involve testing the tool in other study areas, applying ultra-high spatial resolution data (PlanetScope, UAVs), and implementing classification methods for automated detection of shelterbelt boundaries.

Keywords: shelterbelts, validation, damage assessment, remote sensing, Sentinel-2, EVI, NDMI, S2REP, Google Earth Engine.

Рукопис статті отримано 27.08.2026
Надходження остаточної версії: 31.08.2026
Публікація статті: 30.09.2026
Received 27.08.2026
Revised 31.08.2026
Accepted 30.09.2026