



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.2.281>

УДК 528.8:528.8.04(477)

Дистанційне оцінювання стану лісосмуг після воєнних дій

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

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

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

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

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

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

Полезахисні лісові смуги є важливим елементом сталого землекористування, виконуючи такі загальноекологічні функції, як захист від ерозії ґрунтів, збереження водного балансу, пом'якшення впливу суховіїв і пилових бур, а також підтримка біорізноманіття. Проте, війна в Україні призвела до суттєвих пошкоджень лісосмуг або навіть до їхнього повного знищення. Оскільки наземні дослідження є небезпечними внаслідок воєнних дій, а також не дають змоги оперативно оцінити великі території, необхідно використовувати дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Отже, метою цієї статті є оцінювання стану лісосмуг після воєнних дій на основі даних ДЗЗ. Запропонований підхід має забезпечувати інформацію про стан лісосмуг, зокрема про рівень їхніх пошкоджень, що може бути використано для планування повосенного відновлення. Стан лісосмуг оцінюється на основі супутникових знімків Sentinel-2 за трьома біофізичними індикаторами та відповідними спектральними індексами – біомаса (EVI), вміст хлорофілу (S2REP) та вміст води (NDMI). Також на основі поєднання цих індексів створено об'єднану карту стану лісосмуг. У рамках експерименту оцінено стан лісосмуг між селом Клинове (Бахмутський район) і Вугледарською ТЕЦ, які опинилися в зоні активних воєнних дій у травні–серпні 2022 року. Згідно з отриманою об'єднаною картою стану лісосмуг, 96.61% території дослідження зазнали пошкоджень, зафіксованих щонайменше в одному з індикаторів. Основна частина цих пошкоджень належить до низького та середнього рівнів, тоді як найбільший відсоток високого рівня пошкоджень (15.99%) виявлено за індексом NDMI. Візуальна валідація отриманих карт за знімками високого просторового розрізнення із середовища Google Earth підтвердила відповідність визначених пошкоджень їхньому реальному стану, що свідчить про достовірність отриманих карт. Таким чином, згідно з отриманими результатами, переважна частина лісосмуг зазнала низького або середнього рівня пошкоджень, що свідчить про можливість їхнього повосенного відновлення. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на залучення радарних знімків, що дасть змогу отримати безперервний часовий ряд незалежно від погодних умов, а також на застосування методів класифікування для виявлення та картування лісосмуг, що дасть змогу масштабувати застосування розробленого підходу.

Ключові слова: лісосмуги, повосенне відновлення, оцінювання пошкоджень, ДЗЗ, Sentinel-2, EVI, NDMI, S2REP.

© Станкевич С. А., Козлова А. О., Андреев А. А., Голубов С. І., Лисенко А. Р. 2025

Вступ

Полезахисні лісові смуги є невід'ємним елементом сталого землекористування (Lavrov et al., 2021). Вони виконують важливі загальноекологічні функції, зокрема, захищають від суховіїв і пилових бур, покращують водний стан ґрунту й запобігають його ерозії (Kędziora, 2015), сприяють збереженню і покращенню родючості ґрунтів (Kong et al., 2022; Wang et al., 2023). Також лісосмуги є осередками розвитку дикої природи в аграрно-змінених ландшафтах, зберігаючи біорізноманіття (Porov et al., 2008).

Під час війни в Україні, передусім з початком повномасштабного вторгнення, лісосмуги часто використовуються як лінії оборони, для обладнання

позицій військ та пересування і маскування військової техніки. Внаслідок цього лісосмуги є об'єктом постійних ударів важкою зброєю.

Вищезазначене стало причиною катастрофічних пошкоджень, а місцями – і повного знищення мережі лісосмуг у зоні бойових дій (Matsala et al., 2024; Myroniuk et al., 2024). Така ситуація загрожує важкими довготривалими наслідками природі, економіці та населенню сільськогосподарських територій.

Враховуючи, що наземні дослідження лісосмуг після воєнних дій є дуже небезпечними (через мінування, забруднення іншими вибухонебезпечними предметами та ризик повторних ударів) та не дають змоги оперативно оцінити великі території,

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: С. І. Голубов: asdfielddspec3@gmail.com

© Publisher: Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine”. This is an Open Access article under the CC BY licenses (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

© Видавець: Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

необхідно застосовувати дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Окрім безпеки, серед переваг даних ДЗЗ є гнучкість, інформативність, об'єктивність, оперативність та можливість охоплення великих територій (Stankevich & Kozlova, 2024; Fassnacht et al., 2024).

Отже, метою статті є оцінювання стану лісосмуг після воєнних дій на основі даних ДЗЗ. Запропонований підхід має забезпечувати інформацію про стан лісосмуг, зокрема про рівень їхніх пошкоджень, що може бути використано для планування повосенного відновлення.

Метод

Джерелом вхідних даних для оцінювання стану лісосмуг було обрано супутникові знімки Sentinel-2 (Liu et al., 2022). Такий вибір зумовлений двома факторами. По-перше, в рамках роботи розглядалися виключно дані з відкритих джерел. По-друге, важливою властивістю вхідних даних є просторове розрізнення, оскільки лісосмуги зазвичай мають ширину не більше 30 метрів. З огляду на це, супутникові знімки Sentinel-2 є оптимальним джерелом вхідних даних, адже вони мають найвище просторове розрізнення (10 метрів) серед усіх супутникових знімків, що є у відкритому доступі.

Для оцінювання стану лісосмуг були обрані три біофізичні індикатори, а саме: біомаса, вміст хлорофілу та вміст води. Для визначення кожного з цих індикаторів було відібрано відповідний спектральний індекс, який розраховується на основі супутникових знімків Sentinel-2.

Для оцінювання фотосинтетично активної біомаси обрано Enhanced Vegetation Index (EVI) (Zhao et al., 2024). Цей індекс розраховується за такою формулою:

$$EVI = 2.5 \cdot \frac{\rho_8 - \rho_4}{\rho_8 + 6 \cdot \rho_4 + 7.5 \cdot \rho_2 + 1},$$

де ρ_2 , ρ_4 та ρ_8 – це спектральне відбиття у 2, 4 та 8 спектральних каналах супутника Sentinel-2, відповідно.

Вміст хлорофілу визначається за допомогою спектрального індексу Sentinel-2 Red-Edge Position (S2REP), бо згідно з (Gao et al., 2024) саме цей індекс є оптимальним при застосуванні до деревної рослинності. Формула розрахунку цього індексу наведена нижче:

$$S2REP = 705 + 35 \cdot \frac{\rho_4 + \rho_7 - \rho_5}{\rho_6 - \rho_5},$$

де ρ_5 , ρ_6 та ρ_7 – це спектральне відбиття у 5, 6 та 7 спектральних каналах супутника Sentinel-2, відповідно.

Для оцінювання вмісту води найбільш поширеним спектральним індексом є Normalized Difference Moisture Index (NDMI) (Bhattacharya et al., 2024), тому в рамках статті був використаний саме він. Для розрахунку індексу NDMI використовується така формула:

$$NDMI = \frac{\rho_8 - \rho_{11}}{\rho_8 + \rho_{11}},$$

де ρ_{11} – це спектральне відбиття в 11 спектральному каналі супутника Sentinel-2.

Таким чином, кожен із вказаних спектральних індексів буде використаний як основа для створення карти стану лісосмуг у вигляді геопросторового шару. Алгоритм побудови зазначених карт описується схемою (Рис. 1).

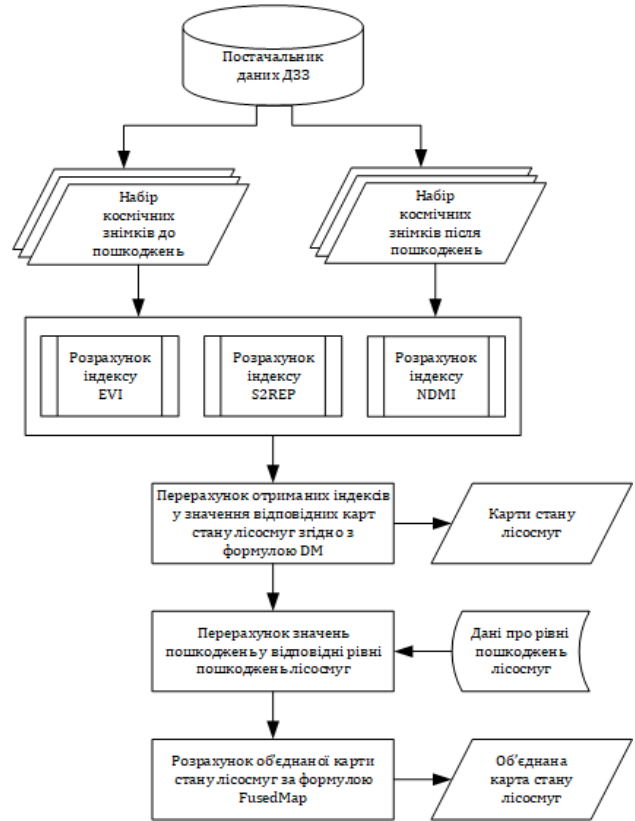


Рис. 1. Схема алгоритму отримання карт стану лісосмуг та об'єднаної карти стану лісосмуг відповідно до даних спектральних індексів EVI, S2REP та NDMI

На першому кроці формуються два набори супутникових знімків, а саме – до та після пошкодження. Серед вимог до кожного з наборів можна виділити 4 основні. Перша – повне охоплення території дослідження. Друга – відсутність хмарності в межах території дослідження. Третя – знімки мають бути отримані в рамках вегетаційного періоду (квітень – жовтень), адже саме в цей період рослинність є фотосинтетично активною, що робить оцінку репрезентативною. Четверта – рівень оброблення знімків має забезпечувати отримання значень спектрального відбиття земної поверхні, що необхідно для коректного розрахунку спектральних індексів. Для знімків Sentinel-2 – це рівень оброблення L2A (Gascon et al., 2017).

Другий крок передбачає розрахунок вищевказаних спектральних індексів для кожного із супутникових знімків, відібраних на першому кроці.

На третьому кроці для кожного року формується один геопросторовий шар – річний максимум у кожному пікселі. Його значення визначаються за таким принципом: у кожному пікселі обирається максимальне значення серед усіх наявних знімків за цей рік у тому самому пікселі.

Четвертий крок передбачає отримання двох геопросторових шарів – середні значення до та після пошкодження. Один з них міститиме усереднені значення шарів, отриманих на попередньому кроці, до пошкодження, а другий – усереднені значення відповідних шарів після пошкодження.

На останньому кроці порівнюються два отримані вище геопросторові шари. Результатом цієї процедури є *карта стану лісосмуг* на основі відповідного індексу. Таку карту можна отримати за формулою:

$$DM = \frac{I_{\text{after}} - I_{\text{before}}}{I_{\text{before}}},$$

де I_{before} та I_{after} – отримані на попередньому кроці шари, що відображають усереднене значення індексу до та після пошкодження, відповідно.

Отримана карта є геопросторовим шаром, піксели якої охоплюють всю територію дослідження. Невід'ємні значення цього шару відповідають пікселям, де пошкодження лісосмуг зафіксовано не було. Водночас, від'ємні значення вказують на пошкодження та показують, наскільки зменшилося значення спектрального індексу після пошкодження.

Додатково можна отримати *об'єднану карту стану лісосмуг*. Для цього кожна карта стану перетворюється в бінарний шар, де значення 1 відповідають пікселям, де були зафіксовані пошкодження, а 0 – де пошкодження не були зафіксовані. Далі отримані бінарні шари сумуються. Запропоноване об'єднання карт стану лісосмуг відбувається за формулою:

$$\text{FusedMap} = \sum_i^N B_i,$$

де B_i – бінарний шар на основі i -ї карти стану лісосмуг, N – загальна кількість вхідних карт стану лісосмуг.

Отже, об'єднана карта стану лісосмуг являє собою геопросторовий шар, значення пікселів якого відображають кількість індикаторів, згідно з якими було зафіксовано пошкодження. Тобто, значення пікселів варіюються від 0 до N , де 0 – це піксели, де пошкодження не були зафіксовані за жодним індикатором, а N – це піксели, де пошкодження зафіксовані за кожним з N індикаторів.

Експеримент

У рамках експерименту обрано територію дослідження (Рис. 2), яка охоплює лісосмуги між селом Клинове (Бахмутський район) і Вугледарською ТЕЦ. Ця місцевість опинилася в зоні активних воєнних дій у травні–серпні 2022 року. Тому, внаслідок застосування важкої артилерії, мінометів, керованих авіаційних та термобаричних боеприпасів, значна частина лісосмуг була знищена або зазнала пошкоджень різного ступеня. Для дослідження були обрані лише ті лісосмуги, ширина яких не менше 20 м. Інші лісосмуги не розглядалися через обмеженість просторового розрізнення супутникових знімків Sentinel-2, яке становить 10 м.

Відповідно до алгоритму розробленого методу було сформовано два набори супутникових даних, що охоплюють періоди до та після пошкоджень.

На обраній території дослідження пошкодження були зафіксовані в 2022 році, тому період до пошкоджень охоплює 2019–2021 роки, а період після пошкоджень – 2022–2024 роки. Таким чином, у рамках цього експерименту розглянуто 81 супутниковий знімок Sentinel-2, які відповідають зазначеним вимогам. Враховуючи великий обсяг даних, їх обробка потребує значних обчислювальних ресурсів. Тому для проведення експерименту було використано хмарну платформу для геопросторового аналізу даних Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).



Рис. 2. Супутниковий знімок території дослідження (червоним виділено лісосмуги, обрані для подальшого аналізу)

Згідно із запропонованим методом було отримано чотири карти стану лісосмуг: по одній для кожного з трьох обраних спектральних індексів (EVI, S2REP та NDMI), а також одна об'єднана карта на основі трьох вказаних індексів. Отримані карти візуалізовано на Рис. 3.

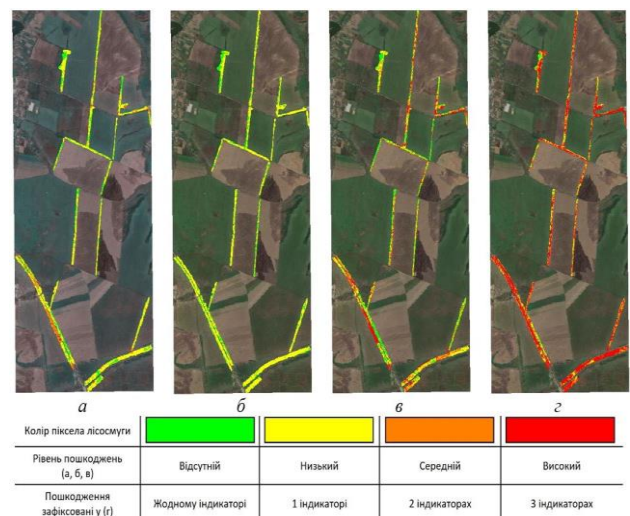


Рис. 3. Карты стану лісосмуг, розташованих біля села Клинове, відповідно до: EVI (а); S2REP (б); NDMI (в); об'єднаної карти (г)

Окрім об'єднаної карти, кожна з отриманих карт була класифікована на чотири рівні пошкоджень:

- 1) пошкодження відсутні (значення більше або дорівнює 0);
- 2) низький рівень пошкоджень (від -0.15 до 0);
- 3) середній рівень пошкоджень (від -0.15 до -0.3);
- 4) високий рівень пошкоджень (менше -0.3).

Аналогічно до вищезазначеної класифікації об'єднана карта стану лісосмуг також була розподілена на 4 рівні:

- 1) пошкодження не зафіксовано за жодним індикатором;
- 2) пошкодження зафіксовані лише за 1 індикатором;
- 3) пошкодження зафіксовані за 2 індикаторами;
- 4) пошкодження зафіксовані за 3 індикаторами.

Для отриманих рівнів пошкоджень лісосмуг була розрахована відповідна відсоткова площа їх покриття по відношенню до загальної площі оцінюваних лісосмуг. Результати зазначених розрахунків наведено в Табл. 1.

Таблиця 1. Розподіл площ отриманих карт відповідно до рівнів пошкоджень лісосмуг

Карта стану	Розподіл площі за рівнем пошкоджень лісосмуг, %			
	Відсутній / Зафіксовано за 0 індикаторами	Низький / Зафіксовано за 1 індикатором	Середній / Зафіксовано за 2 індикаторами	Високий / Зафіксовано за 3 індикаторами
EVI	23.15	63.6	12.81	0.53
S2REP	24.33	75.67	0	0
NDMI	23.26	32.94	27.81	15.99
Об'єднана	3.39	14.01	32.53	50.07

Отже, відповідно до об'єднаної карти пошкоджень, принаймні, 96.61% площі території дослідження зазнали пошкоджень, які були зафіксовані щонайменше за одним індикатором. За допомогою даних залучених спектральних індексів можна стверджувати, що переважна частина пошкоджень були віднесені до низького та середнього рівнів, тоді як найбільший відсоток високого рівня пошкоджень (15.99%) було зафіксовано за даними індексу NDMI.

Валідація отриманих карт стану лісосмуг проведена на основі супутникових знімків високого просторового розрізнення із супутників Maxar Technologies (WorldView) та Airbus Defence and Space (Pleiades), доступних у платформі Google Earth. Візуальне порівняння показало високу відповідність між визначеними на картах ділянками пошкоджень і реальним станом лісосмуг.

Висновки

У цьому дослідженні виконано дистанційне оцінювання стану лісосмуг у районах ведення воєнних дій на основі даних ДЗЗ. Для аналізу порівнювався стан лісосмуг до та після пошкодження на основі таких біофізичних індикаторів, як біомаса, вміст хлорофілу та вміст вологи. Для кожного індикатора розраховано спектральний індекс на основі супутникових знімків Sentinel-2, а саме EVI, S2REP і NDMI, відповідно.

У рамках експерименту обрано територію дослідження, що охоплює лісосмуги між селом Клинове та Вугледарською ТЕЦ, які зазнали впливу бойових дій у 2022 році. Отримані результати показали, що переважна частина лісосмуг зазнала низького або середнього рівня пошкоджень, що свідчить про можливість їхнього повоєнного відновлення. Проведена візуальна валідація підтвердила достовірність отриманих результатів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення розробленого підходу за рахунок залучення радарних знімків, що дасть змогу отримати безперервний часовий ряд незалежно від погодних умов, зокрема хмарності. Окрім того, надалі варто застосувати методи класифікування для виявлення та картування лісосмуг, що сприятиме масштабуванню підходу на інші регіони. Також, враховуючи, що просторове розрізнення супутникових знімків Sentinel-2 (10 м) не дає змоги точно оцінити стан вузьких лісосмуг, ширина яких менше 10–15 м, в подальших дослідженнях планується використати знімки з вищим просторовим розрізненням, наприклад PlanetScope (3 м).

Крім того, запропонований підхід може бути адаптований для дистанційного оцінювання стану інших лінійних рослинних об'єктів, зокрема прибережних насаджень, санітарно-захисної зелені, насаджень уздовж меліоративних каналів, зелених коридорів у містах тощо.

Author Contributions: Conceptualization – S. A. Stankevich and A. O. Kozlova; methodology – S. A. Stankevich and A. A. Andreiev; formal analysis – A. O. Kozlova and A. A. Andreiev; 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

Внесок авторів: Концептуалізація – С. А. Станкевич та А. О. Козлова; методологія – С. А. Станкевич та А. А. Андреев; формальний аналіз – А. О. Козлова та А. А. Андреев; дослідження – А. А. Андреев, С. І. Голубов та А. Р. Лисенко; оброблення даних – А. А. Андреев, С. І. Голубов та А. Р. Лисенко; підготовка тексту статті: авторський рукопис – А. А. Андреев, 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 проєкту “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

Literature/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>.
- Kozlova, A., Stankevich, S., Svideniuk, M., & Andreiev, A. (2021). Quantitative Assessment of Forest Disturbance with C-Band SAR Data for Decision Making Support in Forest Management. In *Lecture notes on data engineering and communications technologies*, 77, 548–562. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82014-5_37.
- 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., 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. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122361>.
- Myroniuk, V., Weinreich, A., Von Dosky, V., Melnychenko, V., Shamrai, A., Matsala, M., Gregory, M. J., Bell, D. 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>.
- 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. <https://doi.org/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. <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>.

REMOTE ASSESSMENT OF SHELTERBELT CONDITIONS AFTER MILITARY ACTIONS

S. A. Stankevich (<https://orcid.org/0000-0002-0889-5764>), A. O. Kozlova (<https://orcid.org/0000-0001-5336-237X>), A. A. Andreiev (<https://orcid.org/0000-0002-6485-449X>), S. I. Golubov (<https://orcid.org/0000-0003-3711-598X>), A. R. Lysenko (<https://orcid.org/0000-0003-2923-8648>)

State Institution “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 are an essential element for sustainable land use, providing ecological functions such as soil erosion prevention, maintaining water balance, mitigating the effects of dry winds and dust storms, and supporting biodiversity. However, the war in Ukraine caused significant damage, or even destruction, to the shelterbelts. Since ground-based surveys are dangerous due to military actions and cannot effectively assess large territories, remote sensing is the only viable option. Thus, the aim of this study is the remote assessment of shelterbelt conditions after military actions. The given approach should provide information about shelterbelt conditions, including their damage level, which can be used for post-war restoration. In this paper, the shelterbelt conditions assessment is performed based on the three spectral indices evaluated upon the Sentinel-2 satellite's data, namely biomass (EVI), chlorophyll content (S2REP) and moisture content (NDMI). Additionally, a fused map of shelterbelt conditions is created using these indices. The condition of shelterbelts located between the village Klynove (Bakhmut rayon) and Vuhledar's thermal power plant was remotely assessed in our experiment. From May

to August 2022, this territory was in the zone of active military actions. Concerning the fused map of shelterbelt conditions, 96.61% of the study area has taken damage, as stated by at least one indicator. Most of these damages correspond to low or medium damage levels, and NDMI gave the highest percentage of high damage level (15.99%). Using high-resolution imagery from Google Earth, visual validation of the obtained maps confirmed the correspondence between the identified damage and its actual state. This indicates the reliability of the obtained maps. Since most damage levels are low or medium, these shelterbelts can be considered for post-war restoration. Further research may include satellite radar data, which will enable the retrieval of continuous time-series data despite the weather conditions, and classification methods for shelterbelt detection and mapping for the developed approach scaling.

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

*Рукопис статті отримано 07.04.2025
Надходження остаточної версії: 16.05.2025
Публікація статті: 30.06.2025*