
ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 504.054:502.175:528.8(477.42)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.2.1>

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОЖЕЖ НА РОСЛИННІСТЬ ЗАПОВІДНИКА «ДРЕВЛЯНСЬКИЙ» В УМОВАХ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Кірейцева Г.В.¹, Хоменко С.В.¹, Шомко О.М.², Гнітецький О.М.¹, Скорик М.А.¹

¹Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

²Пармський університет

Парко Ареа делле Шенце, 43124, Парма, Італія

gef_kgv@ztu.edu.ua, org_hsv@ztu.edu.ua, phd184231_gom@student.ztu.edu.ua,

phd184232_sma@student.ztu.edu.ua, ke_miyu@ztu.edu.ua

Стаття присвячена дослідженню стану рослинності природного заповідника «Древлянський» за допомогою індексу NDVI з використанням супутникових знімків Sentinel-2. Актуальність дослідження зумовлена значним впливом військових дій на екосистеми України, зокрема через пожежі, спричинені бойовими діями. За даними Державної служби України з надзвичайних ситуацій, у 2023 році лісові пожежі охопили в 3 рази більшу територію порівняно з 2022 роком, а площа постраждалих лісових земель склала 51 тис. га, що в 170 разів перевищує довоєнні показники. Щільність пожеж у прифронтових зонах виявилася у 49 разів вищою порівняно з іншими територіями України. Природний заповідник «Древлянський», розташований у Житомирській області, площею 30872,84 га, є унікальним природним комплексом Українського Полісся з 516 видами фауни та 973 видами флори. У роботі проаналізовано супутникові знімки за 2021–2023 роки для трьох сезонів: весна (квітень), літо (серпень) та осінь (жовтень), що дозволило охопити весь вегетаційний період від початку до завершення. Використання індексу NDVI, розрахованого за формулою $(NIR-RED)/(NIR+RED)$ з використанням червоного (Band 4) та ближнього інфрачервоного (Band 8) діапазонів, дозволило оцінити стан рослинного покриву та виявити зміни, спричинені пожежами та іншими наслідками військових дій. Результати показали значне зниження показників NDVI у 2022 році порівняно з 2021 роком: у квітні максимальне значення знизилося з $>0,3645$ до $>0,3511$, у серпні – з $>0,5777$ до $>0,5569$, у жовтні – з $>0,5446$ до $>0,5251$, що свідчить про погіршення стану рослинності після бойових дій. Внаслідок окупації та активних бойових дій на території заповідника у 2022 році було зафіксовано 22 пожежі, які охопили 2100 гектарів, знищивши лісові насадження та торфовища. Дослідження демонструє ефективність використання технологій дистанційного зондування Землі для моніторингу лісового покриву в умовах обмеженого фізичного доступу до постраждалих територій. Отримані результати є основою для розробки ефективних стратегій відновлення та реабілітації постраждалих екосистем, планування природоохоронних заходів та оцінки довгострокових екологічних наслідків військових дій на природно-заповідні території України. *Ключові слова:* дистанційний моніторинг, нормалізований різницевий вегетативний індекс, природоохоронні території, пожежі, екологічна безпека, зміна клімату.

Assessment of fire impact on vegetation in the Drevlyansky Nature Reserve under military action conditions. Kireitseva H., Khomenko S., Shomko O., Hnitskyi O., Skoryk M.

The article is dedicated to the study of vegetation conditions in the Drevlyansky Nature Reserve using the NDVI index derived from Sentinel-2 satellite imagery. The relevance of the study is determined by the significant impact of military operations on Ukrainian ecosystems, particularly through fires caused by combat activities. According to the State Emergency Service of Ukraine, in 2023 forest fires covered three times larger area compared to 2022, with the affected forest land area reaching 51 thousand hectares, which is 170 times higher than pre-war indicators. Fire density in frontline zones was 49 times higher compared to other territories of Ukraine. The Drevlyansky Nature Reserve, located in Zhytomyr Oblast and covering an area of 30,872.84 hectares, represents a unique natural complex of Ukrainian Polissya with 516 fauna species and 973 flora species. The study analyzed satellite images for 2021–2023 across three seasons: spring (April), summer (August), and autumn (October), which enabled comprehensive coverage of the entire vegetation period from beginning to end. The application of the NDVI index, calculated using the formula $(NIR-RED)/(NIR+RED)$ with red (Band 4) and near-infrared (Band 8) spectral ranges, allowed for the assessment of vegetation cover conditions and identification of changes caused by fires and other consequences of military operations. The results demonstrated a significant decrease in NDVI values in 2022 compared to 2021: in April, the maximum value declined from >0.3645 to >0.3511 , in August from >0.5777 to >0.5569 , and in October from >0.5446 to >0.5251 , indicating deterioration of vegetation conditions following combat activities. As a result of occupation and active combat operations on the reserve territory in 2022, 22 fires were recorded, affecting 2,100 hectares and destroying forest plantations and peatlands. The study demonstrates the effectiveness of Earth remote sensing technologies for monitoring forest cover under conditions of limited physical access to affected territories. The obtained results provide a foundation for developing effective strategies for restoration and rehabilitation of damaged ecosystems, planning conservation measures, and assessing long-term environmental consequences of military operations on nature conservation areas of Ukraine. *Key words:* remote monitoring, normalized difference vegetation index, protected areas, fires, environmental safety, climate change.

Постановка проблеми. Військові дії в Україні, що розпочалися у 2014 році повномасштабне вторгнення росії у 2022 році, спричинили численні пожежі, які завдали значної шкоди навколишньому середовищу та екосистемам. Особливо загрозливою є ситуація з лісовими пожежами: якщо у 2021 році зареєстровано 660 пожеж на площі 0,3 тис. га, то у 2023 році їх кількість зросла до 1278 на площі 51 тис. га, що в 170 разів перевищує довоєнні показники. Щільність пожеж у прифронтових зонах виявилася у 49 разів вищою порівняно з іншими територіями. Природні заповідники зазнають особливо значних втрат, оскільки містять унікальні екосистеми з рідкісними видами, відновлення яких може виявитися незворотним процесом. Оцінка масштабів та характеру шкоди є складним завданням через обмежений доступ до постраждалих територій та брак даних моніторингу. Тому використання технологій дистанційного зондування, зокрема нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (NDVI) на основі супутникових знімків Sentinel-2, стає критично важливим інструментом для своєчасного моніторингу стану рослинності, виявлення змін у лісових екосистемах та розробки ефективних стратегій відновлення природних територій в умовах військових дій.

Актуальність дослідження. Згідно з різними експертними оцінками, від 20 до 30 % території України вже постраждали від військових дій наслідками яких є: забруднення ґрунтів важкими металами в результаті розриву снарядів та мін, забруднення повітря внаслідок вибухів та пожеж, лісові пожежі внаслідок загорянь після обстрілів, знищення природоохоронних територій, та як наслідок порушення міграційних шляхів тварин та знищення біорізноманіття, забруднення мінами та нерозірваними боєприпасами [1].

За даними Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2023 році лісові пожежі охопили в 3 рази більшу територію в порівнянні з 2022 роком. На рисунку 1 представлено інформація щодо кількості пожеж в Україні за 2021–2023 роки.

Аналізуючи дані рисунку, варто відмітити, що кількість пожеж у 2023 році на 21,5% більша від 2022 року та на 93,6% більша від 2021 року. Для порівняння: у 2022 році сталося 1052 лісових пожежі, а у 2021 році – 660. У 2023 році площа лісових земель, пройдена пожежами, склала 51 тис. га. Це в 3,2 рази більше від 2022 року та в 170 разів більше від 2021 року. Для порівняння: у 2022 році це було 15,8 тис. га, а у 2021 році – 0,3 тис. га. У 2023 році збитки через лісові пожежі склали близько 2,05 млрд грн. Це в 6,8 рази більше від 2022 року та в 975 разів більше від 2021 року. Для порівняння: у 2022 році збитки через лісові пожежі становили 302,4 млн грн, а у 2021 році – 2,1 млн грн [2].

Особливо небезпечними є пожежі на територіях природно-заповідного фонду, адже на цих територіях містяться рідкісні та унікальні екосистеми, які формувалися протягом тривалого часу та їх втрата може бути незворотною. Пожежі можуть призвести до загибелі цілих популяцій рідкісних видів, що перебувають під загрозою зникнення. Оскільки природно-заповідні території часто слугують генетичним резервуаром для багатьох видів то втрата цього генетичного різноманіття може мати довгострокові наслідки для еволюції та адаптації видів [3].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України в галузі екологічної безпеки та охорони навколишнього природного середовища. Робота узгоджується з Основними засадами (стратегією) державної екологічної політики України на період до 2030 року та Стратегією національної безпеки України, які передбачають необхідність оцінки екологічних наслідків військових дій та розробки заходів щодо відновлення постраждалих природних територій.

З практичної точки зору, дослідження вирішує актуальне завдання розробки ефективних методів дистанційного моніторингу природно-заповідних

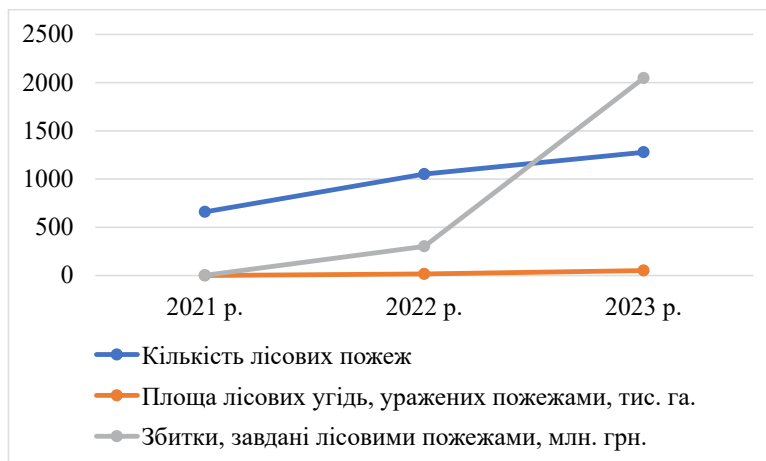


Рис. 1. Дані щодо лісових пожеж в Україні за 2021–2023 роки

територій в умовах обмеженого або відсутнього фізичного доступу через активні бойові дії, що є критично важливим для своєчасного виявлення та оцінки масштабів екологічних порушень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання впливу військових дій на природні екосистеми та методів їх моніторингу розглядаються у низці сучасних наукових досліджень. Зокрема, Роман Л.Ю. проаналізував екологічні загрози об'єктів природно-заповідного фонду України у воєнний період [1]. Спрягайло О.В., Безсмертна О.О., Гаврилюк М.Н. та інші здійснили оцінку впливу воєнних дій на стан природно-заповідних територій та біорізноманіття [2]. Кузик А.Д. та Товарянський В.І. дослідили вплив військових дій на лісові екосистеми та перспективи їх відновлення [4]. Удовенко І.О., Мамчур В.В. та Сержантова Ю.Ю. провели аналіз наслідків війни для природно-заповідного фонду [3]. Методологічні аспекти використання дистанційного зондування розглянуті у працях Zhukova M.V., Zatserkovnyu V.I., Trofimenko P.I., які обґрунтували створення регіональних центрів обробки просторових даних [5]. Однак комплексний аналіз стану рослинності природно-заповідних територій України в умовах активних військових дій з інтеграцією даних про викиди забруднюючих речовин під час пожеж залишається недостатньо вивченим, що обґрунтовує актуальність дослідження.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна. Незважаючи на наявність досліджень впливу військових дій на природні екосистеми, залишаються не вирішеними питання комплексної оцінки стану рослинності природно-заповідних територій в умовах активних бойових дій з використанням технологій дистанційного зондування. Не розроблено методики сезонного моніторингу лісових екосистем на основі індексу NDVI, яка дозволяла б виявляти кумулятивні ефекти тривалих військових дій та пожеж. Не розроблено інтегрований підхід до оцінки екологічних наслідків військових дій, який би поєднував дані дистанційного моніторингу з аналізом емісії забруднювачів для прогнозування тривалості процесів відновлення екосистем. Наукова значущість роботи полягає у внеску в розвиток методології дистанційного моніторингу природних екосистем в екстремальних умовах, розширенні наукових знань про вплив військових дій на лісові екосистеми та процеси їх відновлення, а також у формуванні методологічної бази для довгострокового екологічного моніторингу постраждалих від війни природних територій України.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Для дослідження була обрана територія природного заповідника «Древлянський», який знаходиться в Житомирській області, на південь і схід від смт Народичі, вздовж річки Уж та її правих при-

ток – Лозниця, Ослів, Звіздаль. Площа заповідника 30872,84 га та він охоплює землі державної та комунальної власності. Створений заповідник з метою збереження унікальних лісових і водно-болотних природних комплексів Українського Полісся, охорони реліктових та ендемічних рослин і тварин та відтворення і збагачення природних лісів регіону [6].

На даний час Древлянський природний заповідник перебуває у фазі збереження та відновлення біорізноманіття (516 видів фауни та 973 види флори), а тому представляє величезну цінність для дослідження природних процесів. Його особлива цінність полягає у тому, що в цих лісах не проводились комерційні рубки після аварії на Чорнобильській АЕС. Це дозволяє відслідковувати та досліджувати природні процеси, що відбуваються в умовах, де людський вплив на природу мінімальний. Така унікальна ситуація створює сприятливі умови для відновлення та розвитку різноманітних форм життя [7].

Розподіл біотопів заповідника за площею є специфічним: ліси – 54,68 % площі, і вона буде збільшуватися з часом за рахунок спонтанного та штучного заліснення перелогів; луки – 34,58 %, в т.ч. сіножаті – 14,66 %, пасовища – 19,92 %. Заповідник характеризується значною участю перелогів (7,87 %) та земель населених пунктів (2,75 %), відселених та покинутих внаслідок значного радіоактивного забруднення. Невелика частка площі заповідника представлена заболоченими землями та чагарниками – 0,05 та 0,07 % відповідно [8].

На території заповідника за останні роки було декілька серйозних пожеж. У 2020 році пожежа спалахнула через надзвичайно суху погоду та сильний вітер, що сприяло швидкому поширенню вогню. Пожежа охопила понад 6 тисяч гектарів території заповідника, включаючи найбільш радіоактивно забруднені ділянки. Також в результаті ракетно-бомбових ударів у 2022 році, вогнем було знищено понад 2100 гектарів лісових насаджень. Ці події підкреслюють важливість заходів з попередження пожеж та керування ними на таких унікальних територіях, особливо враховуючи радіаційні ризики та їх можливі наслідки [9].

Забезпечення якісного моніторингу пов'язане з двома основними проблемами: своєчасність отримання інформації та просторове охоплення території. Необхідність їх вирішення зумовила розвиток методів дистанційного моніторингу, серед яких особливе місце посідає супутниковий моніторинг, який останнім часом починає відігравати дедалі важливішу роль у виявленні небезпечних явищ та оцінюванні їх наслідків. Сьогодні вже величезна кількість штучних супутників Землі здійснюють безперервний моніторинг найрізноманітніших компонентів природного середовища. Причому, чим більше природних процесів вдається охопити, тим більш вузькоспеціалізованими стають супутники, що дає можливість поглибити розуміння взаємопов'язаності

природних процесів, складності формування небезпечних явищ, зокрема їх взаємозалежності з антропогенними процесами [10].

Супутникові дані високого просторового розділення, які надаються такими супутниками, як Landsat та Sentinel, виявляються надзвичайно корисними для деталізованого вивчення лісів на локальному рівні. Адже, вони дозволяють не лише оцінювати зміни в розподілі лісового покриву, але й виявляти втрату лісів через вирубку, зміни природних умов чи інші фактори, такі як військові дії. Це надає можливість розуміти, які саме ділянки потребують уваги для збереження природних ресурсів та здоров'я екосистем [10].

Супутникові дані дають змогу оцінити масштаби пожеж, їх шкідливий вплив, а також отримати вихідні дані для підрахунку збитків, заподіяних пожежами. Крім того, є можливість ідентифікувати пожежі, визначити райони активних бойових дій. Сучасні технології дистанційного зондування Землі дозволяють виконувати інфрачервоне (теплове), спектрозональне сканування і зйомку у видимому діапазоні. Їх поєднання дає змогу фіксувати пожежі та визначати їх параметри: випромінювану потужність, видимий вплив (задимлення), а також випалені землі (за обчисленим вегетаційним індексом). Саме за допомогою супутникових знімків стало можливим визначати відновлення рослинності за допомогою нормалізованого різницевого вегетативного індексу (NDVI) [11].

Використання нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (NDVI), розрахованого за допомогою супутникових знімків, є надзвичайно важливим інструментом для моніторингу стану лісової рослинності, оскільки супутникові знімки дозволяють охопити великі площі лісів, включаючи важкодоступні райони, що неможливо зробити традиційними наземними методами, супутники можуть надавати дані з високою часовою роздільною здатністю, дозволяючи проводити моніторинг змін у лісах протягом сезону та років, це, в свою чергу, дає можливість швидко виявляти аномалії та зміни у стані лісів. NDVI ефективний для моніторингу відновлення лісів після пожеж, вирубок, або інших порушень, дозволяючи оцінити швидкість та якість регенерації. Порівняно з наземними дослідженнями, супутниковий моніторинг є більш економічно ефективним, особливо для великих територій [12]. Отже, використання NDVI, розрахованого за допомогою супутникових знімків, є потужним, ефективним та багатостороннім інструментом для моніторингу стану рослинності.

Виклад основного матеріалу. Першим етапом дослідження є визначення необхідних дат та сезонів, оскільки рослинність має чіткі сезонні цикли росту, цвітіння та в'янення і NDVI значно варіюється залежно від сезону, відображаючи ці природні цикли. Для уникнення помилкових висновків про відновлення рослинності та для коректного аналізу

змін у часі необхідно порівнювати знімки, зроблені в один і той же сезон різних років.

В даному дослідженні були використані знімки зроблені в квітні, серпні та жовтні 2021–2023 роках. Вибір саме цих місяців зумовлений тим, що квітень це початок вегетаційного періоду в помірному кліматі України. Він відображає стан рослинності після зимового періоду та дозволяє оцінити швидкість відновлення рослинного покриву навесні, а отже є важливим для виявлення ранніх ознак пошкоджень або змін в екосистемі. У серпні відбувається пік вегетаційного періоду для більшості видів рослин та максимальна фотосинтетична активність рослинності, дозволяє оцінити стан рослинності в найбільш продуктивний період. Саме серпень є важливим для виявлення аномалій у розвитку рослин (наприклад, вплив посухи або пожеж). Жовтень є важливим для виявлення змін у сезонній динаміці рослинності та дозволяє оцінити тривалість вегетаційного періоду та стан рослинності перед входом у період спокою. Таким чином, обрані місяці охоплюють початок, пік та кінець вегетаційного періоду, що дає повну картину сезонної динаміки рослинності. Порівняння даних за ці місяці дозволить виявити відхилення від нормального циклу розвитку рослин. У контексті дослідження наслідків пожеж, ці місяці дозволяють оцінити по перше, весняне відновлення після пожеж попереднього року, по друге – максимальний вплив на рослинність у пік сезону та довгострокові наслідки та здатність до відновлення.

Наступним етапом є підготовка та завантаження різночасових супутникових знімків з Sentinel-2. Цей етап є важливим в контексті аналізу змін у земному покриві, оскільки він забезпечує нашу основну джерельну інформацію для подальших досліджень. За допомогою Copernicus Open Access Hub – онлайн-платформи, яка надає безкоштовний та відкритий доступ до супутникових даних, зібраних в рамках програми Copernicus Європейського космічного агентства (ESA) був виконаний пошук і вибір конкретних зображень з урахуванням потрібних дат та регіонів. Завантажені зображення зберігаються для подальшого аналізу та обробки, де вони стануть основою для дослідження змін у земному покриві на наступних етапах дослідження. Для аналізу використовувалися знімки з просторовою роздільною здатністю 10 та на яких було безхмарне небо над територією природного заповідника «Древлянський».

Після того, як всі необхідні знімки були знайдені вони були завантажені в програму QGIS для розрахунку Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). NDVI було розраховано з використанням (Sentinel-2) червоного (канал B4) та ближнього інфрачервоного (канал B8) діапазонів [13].

Розрахунок NDVI проводився на основі даних знімків супутника Sentinel-2, використовуючи формулу [1] [14, 15]:

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

де NIR – відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні спектра (Band 8),

RED – відбиття в червоному діапазоні спектра (Band 4).

Значення NDVI варіюється від -1 до +1. Значення близько 0 і нижче зазвичай відповідають неживим об'єктам (вода, гірські породи, будівлі). Значення від 0,2 до 0,8 зазвичай відповідають рослинності.

За допомогою калькулятора растрів в програмі QGIS були розраховані NDVI на території природного заповідника «Древлянський» протягом трьох сезонів (весна, літо, осінь) за 2021, 2022, 2023 роки (таблиця 1).

Аналізуючи отримані дані можна зробити висновок, по-перше, про сезонні зміни стану лісової рослинності природного заповідника «Древлянський». Найнижчі значення NDVI спостерігаються у квітні (весна), що вказує на початок вегетаційного періоду, найвищі значення NDVI зафіксовані в серпні (літо), що свідчить про пік фотосинтетичної активності. У жовтні (осінь) значення NDVI знижуються порівняно з серпнем, але залишаються вищими, ніж у квітні. Щодо річної динаміки то у квітні 2021 році максимальне значення становить >0,3645, а у 2022 році максимальне значення становить >0,3511, що вказує на незначне зниження максимального значення NDVI порівняно з 2021 роком. Аналізуючи дані за серпень 2021 року та за серпень 2022 року можна побачити, що максимальне значення NDVI у 2022 році (>0,5569) також нижче, ніж у 2021 році (>0,5777). Це свідчить про меншу

фотосинтетичну активність або меншу кількість біомаси на піку вегетаційного сезону. Осінні показники 2022 року (>0,5251) також нижчі порівняно з 2021 роком (>0,5446), що продовжує тенденцію, спостережену влітку.

На рисунках 2–4 представлені карти території заповідника з використанням індексу NDVI за квітень, серпень, жовтень 2021, 2022, 2023 років.

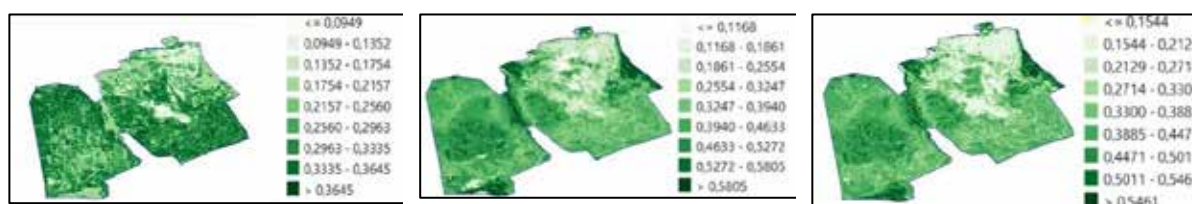
На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що за всі досліджувані місяці 2022 року спостерігається зниження максимальних значень NDVI порівняно з 2021 роком. Отже, 2022 рік характеризувався дещо нижчою фотосинтетичною активністю та меншою кількістю біомаси порівняно з 2021 роком. Причинами цього є пожежі, що були на території природного заповідника «Древлянський» восени 2022 року, спричинені бойовими діями. Внаслідок окупації ворожими військами декількох населених пунктів у Житомирській області, а також просування ворожих бойових машин піхоти до східних меж Древлянського заповідника, на його території розгорнулися активні бойові дії. В подальшому це призвело до масштабних пожеж – зафіксовано 22 пожежі за період з 24 лютого. Горіли не лише ліси, а й торфовища. Загальна площа згорілої території становить 2100 гектарів. Це спричинило пошкодження рослинного покриву, зокрема деревостанів, була знищена рослинність на великих територіях, що призводить до зниження NDVI. Найбільша різниця у показниках NDVI між 2021 та 2022 роками спостерігається у серпні та жовтні, що може відповідати кумулятивному ефекту тривалих бойових дій. Навіть якщо пожежі не охопили всю територію, дим та попіл можуть впливати на

Таблиця 1

Значення NDVI території природного заповідника «Древлянський»

Квітень 2021 р.	Квітень 2022 р.	Квітень 2023 р.	Серпень 2021 р.	Серпень 2022 р.	Серпень 2023 р.	Жовтень 2021 р.	Жовтень 2022 р.	Жовтень 2023 р.
<0,0949	<0,1202	<0,0665	<0,1306	<0,1551	<0,1168	<0,1249	<0,1425	<0,1544
0,0949-0,1352	0,1202-0,1547	0,0665-0,1277	0,1306-0,1974	0,1551-0,2151	0,1168-0,1861	0,1249-0,1876	0,1425-0,1997	0,1544-0,2129
0,1352-0,1754	0,1547-0,1892	0,1277-0,1889	0,1974-0,2642	0,2151-0,2752	0,1861-0,2554	0,1876-0,2503	0,1997-0,2568	0,2129-0,2714
0,1754-0,2157	0,1892-0,2237	0,1889-0,2501	0,2642-0,3311	0,2752-0,3352	0,2554-0,3247	0,2503-0,3130	0,2568-0,3140	0,2714-0,3300
0,2157-0,2560	0,2237-0,2582	0,2501-0,3112	0,3311-0,3979	0,3352-0,3953	0,3247-0,3940	0,3130-0,3757	0,3140-0,3712	0,3300-0,3885
0,2560-0,2963	0,2582-0,2927	0,3112-0,3724	0,3979-0,4647	0,3953-0,4553	0,3940-0,4633	0,3757-0,4385	0,3712-0,4284	0,3885-0,4471
0,2963-0,3335	0,2927-0,3246	0,3724-0,4289	0,4647-0,5263	0,4553-0,5108	0,4633-0,5272	0,4385-0,4963	0,4284-0,4811	0,4471-0,5011
0,3335-0,3645	0,3246-0,3511	0,4289-0,4760	0,5263-0,5777	0,5108-0,5569	0,5272-0,5805	0,4963-0,5446	0,4811-0,5251	0,5011-0,5461
>0,3645	>0,3511	>0,4760	>0,5777	>0,5569	>0,5805	>0,5446	>0,5251	>0,5461

Джерело: розроблено автором

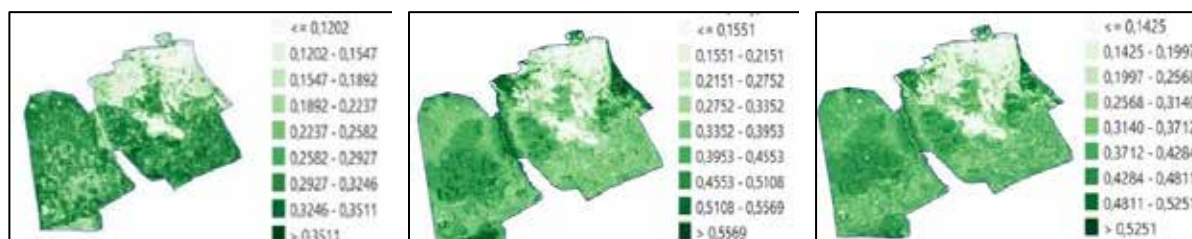


а) квітень

б) серпень

в) жовтень

Рис. 2. Карти території заповідника з використанням індексу NDVI за вегетаційний період 2021 року

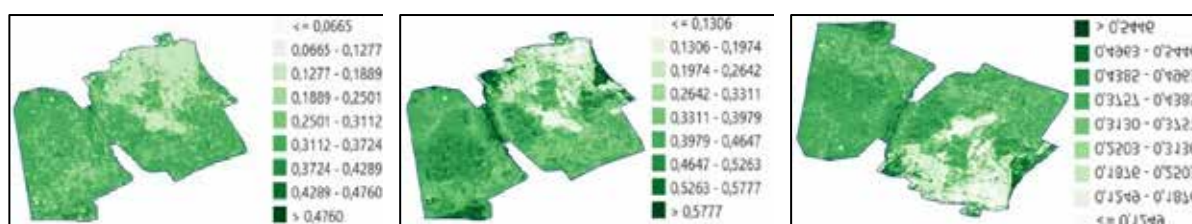


а) квітень

б) серпень

в) жовтень

Рис. 3. Карти території заповідника з використанням індексу NDVI за вегетаційний період 2022 року



а) квітень

б) серпень

в) жовтень

Рис. 4. Карти території заповідника з використанням індексу NDVI за вегетаційний період 2023 року

відбиття світла рослинами, змінюючи показники NDVI.

Вибухи, рух важкої техніки та інші наслідки бойових дій пошкодили верхній шар ґрунту, що негативно вплинуло на ріст рослин. За даними спостережень у 2022 році, забруднюючі речовини, що вивільнилися під час бойових дій та пожеж призвели до забруднення повітря, негативно впливаючи на рослинність. Для кількісної оцінки екологічного впливу пожеж на території заповідника було проведено аналіз викидів забруднюючих речовин, що утворюються під час горіння лісових масивів. Розрахунки здійснювалися на основі загальноприйнятих коефіцієнтів емісії для різних типів забруднювачів при лісових пожежах. Враховуючи, що загальна площа згорілої території становила 2100 гектарів, було визначено обсяги викидів основних забруднюючих речовин та їх потенційний вплив на рослинність заповідника. Особливу увагу приділено аналізу речовин, які можуть мати як безпосередній негативний вплив на фотосинтетичну активність рослин, так і довгостро-

ковий кумулятивний ефект на екосистему в цілому. Важливо зазначити, що деякі забруднювачі, зокрема важкі метали, здатні накопичуватися в ґрунті та проникати в кореневу систему рослин, спричиняючи системні порушення життєдіяльності. Результати розрахунків дозволяють оцінити не лише масштаби забруднення, але й спрогнозувати тривалість впливу різних забруднювачів на процеси відновлення рослинного покриву (таблиця 2).

Аналізуючи дані таблиці можна зробити висновок, що найбільша кількість викидів припадає на вуглецю діоксид (CO_2) – 1 496 880 тонн, значні викиди також спостерігаються для твердих речовин (11,340 т) та вуглецю оксиду (CO) (6,300 т). Присутні викиди важких металів (свинець, кадмій, ртуть), хоча й у малих кількостях. Високі викиди CO_2 та твердих речовин суттєво впливають на стан рослинності в заповіднику, що відображається на значеннях NDVI. Викиди важких металів (свинець, кадмій, ртуть) накопичуються в ґрунті та рослинах, впливаючи на відновлення рослинності. Таким

Таблиця 2

Викиди забруднюючих речовин під час лісових пожеж та їх вплив на рослинність

Назва забруднюючої речовини	Коефіцієнт при лісових пожежах та інших насадженнях, т/га	Площа пожежі, га	Маса викиду, т	Негативний вплив на рослинність
Азоту діоксид	0,1	2100	210	пригнічення фотосинтезу
Аміак	0,02	2100	42	порушення азотного обміну
Ангідрид сірчистий	0,02	2100	42	пошкодження листя
Вуглецю діоксид	712,8	2100	1496880	-
Вуглецю оксид	3	2100	6300	кисневе голодування
Неметанові леткі органічні сполуки	0,3	2100	630	порушення росту
Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок недиференційованих за складом	5,4	2100	11340	блокування проростів
Свинцеві і його неорганічні сполуки (у перерахунку на свинець)	0,000097	2100	0.2037	пригнічення ферментів
Кадмію оксид (у перерахунку на кадмій)	0,000008	2100	0.0168	порушення фотосинтезу
Ртуті оксид (у перерахунку на ртуть)	0,000007	2100	0.0147	ураження кореневої системи

чином, вплив цих викидів може проявлятися не лише в короткостроковій перспективі, але й протягом кількох років після пожежі, що відобразатиметься в динаміці NDVI та загальному стані екосистеми заповідника.

Головні висновки. Використання індексу NDVI, розрахованого за допомогою супутникових знімків Sentinel-2, виявилось ефективним методом моніторингу стану рослинності на територіях природно-заповідного фонду, особливо в умовах обмеженого доступу через військові дії. Аналіз NDVI за 2021–2023 роки показав значне зниження показників у 2022 році, що свідчить про негативний вплив бойових дій та пожеж на рослинний покрив заповідника «Древлянський». Найбільш виражені зміни спостерігалися в літній та осінній періоди, вказуючи на кумулятивний ефект тривалих воєнних дій. Пожежі, спричинені військовими діями, призвели до значних викидів забруднюючих речовин, зокрема вуглецю діоксиду, твердих речовин та вуглецю оксиду, що негативно вплинуло на екосистему заповідника.

Сезонна динаміка NDVI дозволила оцінити не лише загальний стан рослинності, але й особливості її відновлення після пошкоджень. Комбінування даних NDVI з інформацією про викиди забруднюючих речовин забезпечило комплексну оцінку впливу пожеж на екосистему та дало можливість прогнозувати довгострокові наслідки для біорізноманіття. Така інтегрована оцінка поглибила розуміння взаємозв'язку між забрудненням та здатністю екосистеми до регенерації.

Перспективи використання результатів дослідження. Метод дистанційного зондування з використанням NDVI виявився особливо цінним для моніторингу екологічного стану територій, постраждалих від військових дій, через обмежений фізичний доступ. Отримані результати можуть слугувати основою для розробки ефективних стратегій відновлення та збереження природних комплексів заповідника, а також оцінки довгострокових екологічних наслідків військових дій на території природно-заповідного фонду.

Література

1. Роман Л.Ю. Аналіз екологічних загроз об'єктів ПЗФ України у воєнний період. Екологічні науки. 2022. 3 (42). С. 84-88. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.13>
2. Спрягайло О.В., Безсмертна О.О., Гаврилюк М.Н., Ілюха О.В., Осипенко В.В., Спрягайло О.А., Шевчик В.Л. Перші кроки до оцінки впливу воєнних дій на стан об'єктів природно-заповідного фонду та їхнє біорізноманіття. Екологічні науки. 2023. № 6 (51). С. 142-147. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.23>
3. Кузик А.Д., Товарянський В.І. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми України та їх післявоєнне відновлення. Вісник ЛДУБЖД. 2023. 27. С. 16-22. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.02>
4. Удовенко І.О., Мамчур В.В., Сержантова Ю.Ю. Об'єкти природно-заповідного фонду: аналіз наслідків українсько-російської війни. Український журнал природничих наук. 2023. № 5. С. 126-139. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.14>

5. Zhukova M.V., Zatserkovnyy V.I., Trofimenko P.I., Trofimenko N.V. Regional centers of protection and spatial data processing as a way to improve agriculture efficiency. 17th International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects. 2018. Vol. 2018, No. 1. P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801839>
6. H. Jones, R. Vaughan Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications. 2010. OUP Oxford. URL: <https://books.google.it/books?id=sTmcAQAAQBAJ> (дата звернення: 21.09.2025)
7. Van Leeuwen W.J.D. et al. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 100, No. 1. P. 67-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.002>
8. Pettorelli N. et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology & Evolution. 2005. Vol. 20, No. 9. P. 503-510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
9. Мартиненко В.В., Конішук В.В. Типологічна характеристика вкритих лісовою рослинністю деревостанів природного заповідника «Древлянский». Агроекологічний журнал. 2020. № 3. С. 33-40. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2020.211524>
10. Ustymenko V. Vascular plants diversity in forests of nature reserve «Drevlyansky». Наукові горизонти. 2019. № 7. С. 75-79. DOI: [10.33249/2663-2144-2019-80-7-75-79](https://doi.org/10.33249/2663-2144-2019-80-7-75-79)
11. Фурдичко О.І., Кучма Т.Л., Ільєнко Т.В. Оцінювання екосистемних послуг лісів за даними дистанційного зондування Землі. Агроекологічний журнал. 2019. № 4. С. 6-16. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2019.189436>
12. Пацева І.Г., Барабаш О.В., Мельник-Шамрай В.В., Пацев І.С. Екологічна оцінка впливу пожеж у природних екосистемах на стан екологічної безпеки Житомирської області. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2023. № 3. С. 59-65. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-8>
13. Kshetri T. Ndpi, ndbi & ndwi calculation using landsat 7, 8. GeoWorld. 2018. No. 2. P. 32-34.
14. Andini W.T., Nurlina N., Ridwan I. Monitoring Vegetation Change Using Forest Cover Density Model. Ecological Engineering & Environmental Technology. 2024. Vol. 25, No. 9. P. 370-379. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/190928>
15. Susila K.D., Trigunasih N.M., Saifulloh M. Monitoring Agricultural Drought in Savanna Ecosystems Using the Vegetation Health Index – Implications of Climate Change. Ecological Engineering & Environmental Technology. 2024. Vol. 25, No. 9. P. 54-67. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/190108>

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025