

## ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ПОЖЕЖНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОБ'ЄКТИ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ ПІВДНЯ УКРАЇНИ У ВОЄННИЙ ПЕРІОД

### REMOTE MONITORING OF FIRE LOAD ON PROTECTED AREAS OF SOUTHERN UKRAINE DURING WARTIME

**Магась Наталія Іванівна**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, nataly.magas@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-1465>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.23>

**Анотація.** Дослідження присвячене кількісній оцінці пожежного навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду півдня України у воєнний період із використанням даних дистанційного зондування Землі. Метою роботи є визначення просторово-часових змін пожежної активності, площі та тяжкості вигорання на 14 ключових природоохоронних територіях у 2022–2025 рр. порівняно з довоєнним періодом 2019–2021 рр. Методологія ґрунтується на інтеграції даних активних вогнищ NASA FIRMS VIIRS та індексу dNBR, розрахованого за мультиспектральними знімками Sentinel-2. Для зменшення впливу сезонної сенесценції степової рослинності та інших хибнопозитивних спектральних змін застосовано FIRMS-верифікацію dNBR-площ. Окремо проаналізовано співвідношення між загальною dNBR-визначеною площею та FIRMS-верифікованою площею вигорання, що дозволило оцінити ступінь відповідності спектрального сигналу фактам активного горіння. Установлено посилення пожежного навантаження насамперед для територій, пов'язаних із бойовими діями, тимчасовою окупацією або обмеженням доступу. Найбільші прирости FIRMS-верифікованої площі вигорання зафіксовано для Нижньодніпровського національного природного парку, біосферного заповідника «Асканія-Нова», Чорноморського біосферного заповідника та регіонального ландшафтного парку «Кінбурнська коса». Запропонований підхід є придатним для попередньої оцінки воєнних екологічних збитків, планування польових обстежень після деокупації та моніторингу важкодоступних природоохоронних територій України.

**Ключові слова:** пожежне навантаження; природно-заповідний фонд; дистанційне зондування Землі; FIRMS; dNBR; воєнний вплив на довкілля; степові екосистеми; південь України.

**Abstract.** The study provides a quantitative assessment of fire pressure on protected areas in southern Ukraine during wartime using remote sensing data. The aim is to evaluate spatial and temporal changes in fire activity, burned area and burn severity across 14 key protected areas in 2022–2025 compared with the pre-war baseline of 2019–2021. The methodology integrates NASA FIRMS VIIRS active fire detections with the differenced Normalized Burn Ratio derived from Sentinel-2 multispectral imagery. To reduce the influence of seasonal senescence in steppe vegetation and other false-positive spectral changes, dNBR-derived burned areas were verified using FIRMS-based spatial masks. The relationship between the total dNBR-derived area and the FIRMS-verified burned area was additionally analysed to assess the consistency between spectral disturbance and active fire detections. The results indicate an increase in fire pressure

primarily for protected areas affected by military operations, temporary occupation or restricted access. The largest increases in FIRMS-verified burned area were recorded for Nyzhnodniprovskiy National Nature Park, Askania-Nova Biosphere Reserve, Chornomorskiy Biosphere Reserve and Kinburnska Kosa Regional Landscape Park. The proposed approach is suitable for preliminary assessment of wartime environmental damage, planning post-deoccupation field verification and monitoring inaccessible protected areas in Ukraine.

**Keywords:** fire pressure; protected areas; remote sensing; FIRMS; dNBR; wartime environmental impact; steppe ecosystems; southern Ukraine.

## 1. ВСТУП

Природно-заповідний фонд півдня України охоплює значні за площею степові, прибережні, заплавні та водно-болотні екосистеми, частина яких має міжнародний охоронний статус у межах Смарагдової мережі, Рамсарської конвенції та програми UNESCO-MAB. Після початку повномасштабної війни ці території зазнали поєднаного впливу бойових дій, мінування, обмеження доступу, руйнування інфраструктури та неможливості оперативного реагування на пожежі. У таких умовах пожежі стають одним із ключових чинників трансформації природних екосистем, а їх моніторинг потребує методів, придатних для роботи з окупованими, замінованими та іншими важкодоступними територіями.

Дистанційне зондування Землі забезпечує просторово повну, повторювану та відтворювану основу для оцінки пожежного навантаження. Дані активних вогнищ NASA FIRMS VIIRS фіксують термальні аномалії та дають змогу оцінювати просторово-часову активність горіння, тоді як знімки Sentinel-2 L2A дозволяють розраховувати спектральні індекси пошкодження рослинного покриву, зокрема NBR і dNBR. Разом із тим пряме застосування dNBR у степових ландшафтах має методичні обмеження: сезонне висихання трав'яної рослинності, оголення ґрунту або зміна вологості поверхні можуть формувати сигнал, подібний до післяпожежного ураження<sup>1</sup>.

У міжнародній практиці dNBR, RdNBR і споріднені індекси широко використовуються для картографування площі та тяжкості пожежного ураження, однак їх інтерпретація залежить від типу рослинності, сезону знімання, передпожежного стану фітомаси та наявності наземної або незалежної дистанційної верифікації. Для дослідження воєнного впливу на природоохоронні території України особливо важливо поєднувати спектральні індикатори з даними активного горіння, оскільки наземний контроль на окупованих або замінованих ділянках часто неможливий, а екологічні наслідки війни мають комплексний і просторово неоднорідний характер<sup>2</sup>.

Сучасні оглядові та прикладні дослідження підтверджують, що картографування згарищ і оцінка тяжкості пожежного ураження дедалі частіше ґрунтуються на поєднанні оптичних і SWIR-каналів Sentinel-2, часових композитів, індексів NBR/dNBR/RdNBR та алгоритмів автоматизованого дешифрування. Водночас у працях останніх років наголошується, що універсальні порогові значення dNBR не завжди коректно переносяться між лісовими, степовими, напіваридними та прибережними

---

<sup>1</sup> NASA FIRMS. VIIRS active fire and thermal anomalies: Fire Information for Resource Management System. NASA, 2026. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/> (дата звернення: 15.05.2026); Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 143. P. 85–96. DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.008.

<sup>2</sup> Key C. H., Benson N. C. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service, 2006; Miller J. D., Thode A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio. *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 109(1). P. 66–80. DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.006; Parks S. A., Dillon G. K., Miller C. A new metric for quantifying burn severity: The relativized burn ratio. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6(3). P. 1827–1844. DOI: 10.3390/rs6031827.

екосистемами, оскільки спектральний сигнал залежить від структури рослинності, вологості ґрунту, передпожежної біомаси, сезону знімання та швидкості післяпожежного відновлення. Отже, для природоохоронних територій півдня України доцільним є не ізольоване використання dNBR, а його просторове обмеження незалежними даними активного горіння<sup>3</sup>.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із впливом війни та збройних конфліктів на пожежні режими. Роботи, виконані для України та інших конфліктних регіонів, показують, що бойові дії можуть змінювати просторову структуру й сезонність пожеж через додаткові джерела займання, неможливість оперативного гасіння, мінну небезпеку, обмеження доступу та накопичення горючої біомаси. Для природно-заповідного фонду це означає, що пожежне навантаження у воєнний період слід розглядати не лише як природно-кліматичне явище, а як результат взаємодії природної пожежної небезпеки, режиму землекористування та воєнного статусу території<sup>4</sup>.

Метою дослідження є кількісна оцінка пожежного навантаження на ключові об'єкти природно-заповідного фонду півдня України у воєнний період 2022–2025 рр. порівняно з довоєнним базовим періодом 2019–2021 рр. на основі інтеграції даних NASA FIRMS VIIRS та Sentinel-2 dNBR. Для досягнення мети сформовано базу активних вогнищ, виконано просторове поєднання термоточок із межами природоохоронних територій, розраховано площі та класи тяжкості вигорання, застосовано FIRMS-верифікацію dNBR-площ і проведено статистичне порівняння довоєнного та воєнного періодів.

Об'єктом дослідження є пожежне навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду півдня України в умовах воєнного впливу. Предметом дослідження є просторово-часові зміни активних вогнищ, площі та тяжкості вигорання, а також FIRMS-верифікованих dNBR-площ у довоєнний і воєнний періоди.

## **2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

### **2.1. Загальна схема дослідження**

Дослідження побудовано як порівняльний просторово-часовий аналіз пожежного навантаження у двох часових інтервалах: 2019–2021 рр., що прийнято як довоєнний базовий період, та 2022–2025 рр., що відображає умови повномасштабної війни. Одиницею детального аналізу був окремий об'єкт природно-заповідного фонду, для якого розраховувалися річні та періодичні показники кількості активних вогнищ, теплової інтенсивності пожеж, площі FIRMS-верифікованого вигорання та структури класів тяжкості пошкодження рослинного покриву.

Аналітична схема дослідження (рис. 1) репрезентує послідовність фактично виконаних операцій і поєднує п'ять взаємопов'язаних етапів: формування та фільтрацію бази активних вогнищ

---

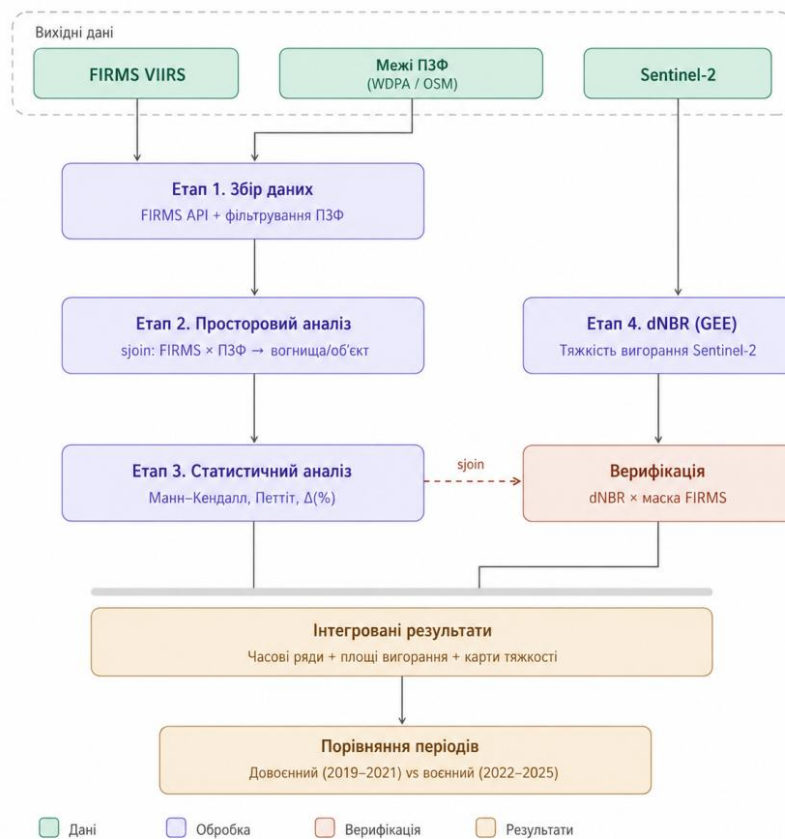
<sup>3</sup> Guiop-Servan R. E., Cotrina-Sanchez A., Puerta-Culqui J., Oliva-Cruz M., Barboza E. Remote Sensing for Wildfire Mapping: A Comprehensive Review of Advances, Platforms, and Algorithms. *Fire*. 2025. Vol. 8(8). Article 316. DOI: 10.3390/fire8080316; Gupta P., Shukla A. K., Shukla D. P. Sentinel-2 based burn severity mapping and assessing post-fire impacts on forests and buildings in the Mizoram, a north-eastern Himalayan region. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. Vol. 36. Article 101279. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101279; Llorens R., Sobrino J. A., Fernández C., Fernández-Alonso J. M., Vega J. A. Soil Burn Severity Assessment Using Sentinel-2 and Radiometric Measurements. *Fire*. 2024. Vol. 7(12). Article 487. DOI: 10.3390/fire7120487; Al-hasn R., Almuhammad R. Burned area determination using Sentinel-2 satellite images and the impact of fire on the availability of soil nutrients in Syria. *Journal of Forest Science*. 2022. Vol. 68(3). P. 96–106. DOI: 10.17221/122/2021-JFS; Chen L., Wei B., Jia X., Liu M., Zhao Y. Burned Area Mapping and Fire Severity Assessment of Forest–Grassland Ecosystems Using Time-Series Landsat Imagery (1985–2023): A Case Study of Daxing'anling Region, China. *Fire*. 2025. Vol. 8(9). Article 337. DOI: 10.3390/fire8090337.

<sup>4</sup> Rodriguez-Jimenez F., Novo A., Hall J. V. Influence of wildfires on the conflict (2006–2022) in eastern Ukraine using remote sensing techniques (MODIS and Sentinel-2 images). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. Vol. 35. Article 101240. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101240; Kganyago M., Tshigoli P., Shikwambana L. Geospatial analysis of the fire incidents and burned areas induced by Russia-Ukraine war in 2022 using MODIS and VIIRS data. *Applied Geomatics*. 2025. Vol. 17. P. 519–533. DOI: 10.1007/s12518-025-00634-6; Matsala M., Odruzhenko A., Hinchuk T. et al. War drives forest fire risks and highlights the need for more ecologically-sound forest management in post-war Ukraine. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 4131. DOI: 10.1038/s41598-024-54811-5.

NASA FIRMS VIIRS; просторове поєднання термоточок із межами об'єктів природно-заповідного фонду; розрахунок NBR і dNBR за знімками Sentinel-2 у Google Earth Engine; FIRMS-верифікацію dNBR-площ для відсіювання хибнопозитивних змін рослинності; статистичне узагальнення та картографічне подання результатів. Така послідовність забезпечує перехід від реєстрації факту активного горіння до оцінки площі, тяжкості та просторової диференціації пожежного впливу на об'єкти ПЗФ.<sup>5</sup>

Усі аналітичні операції виконано авторкою спеціально для цього дослідження. Робочі алгоритми обробки, проміжні таблиці та картографічні заготовки розглядалися як технічні інструменти обробки даних, а не як самостійні джерела. Тому в тексті описано методичний зміст виконаних процедур: підготовку бази активних вогнищ, просторове накладання на межі об'єктів природно-заповідного фонду, розрахунок NBR і dNBR, формування FIRMS-маски активного горіння, статистичну агрегацію та картографічне узагальнення результатів.

У межах цієї схеми FIRMS-блок забезпечив розрахунок річної кількості термоточок, показників FRP та кількості пожежних днів; Sentinel-2-блок — оцінку спектрального пошкодження рослинного покриву; блок верифікації — відбір тих dNBR-пікселів, які просторово збігалися із зоною активного горіння. Отриманий показник FIRMS-верифікованої площі вигорання використано як основний результативний індикатор, оскільки він поєднує інформацію про факт пожежі та просторову площу післяпожежного пошкодження.



**Рисунок 1.** Загальна аналітична схема дослідження пожежного навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду  
*Джерело: власна розробка авторки.*

<sup>5</sup> Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

## 2.2. Район дослідження та об'єкти природно-заповідного фонду

Район дослідження охоплює Миколаївську, Херсонську, Запорізьку та Одеську області. Для детального аналізу відібрано 14 ключових об'єктів природно-заповідного фонду, які репрезентують різні природоохоронні категорії, екосистемні типи та умови воєнного впливу. До вибірки включено біосферні заповідники, національні природні парки, регіональні ландшафтні парки і природний заповідник.

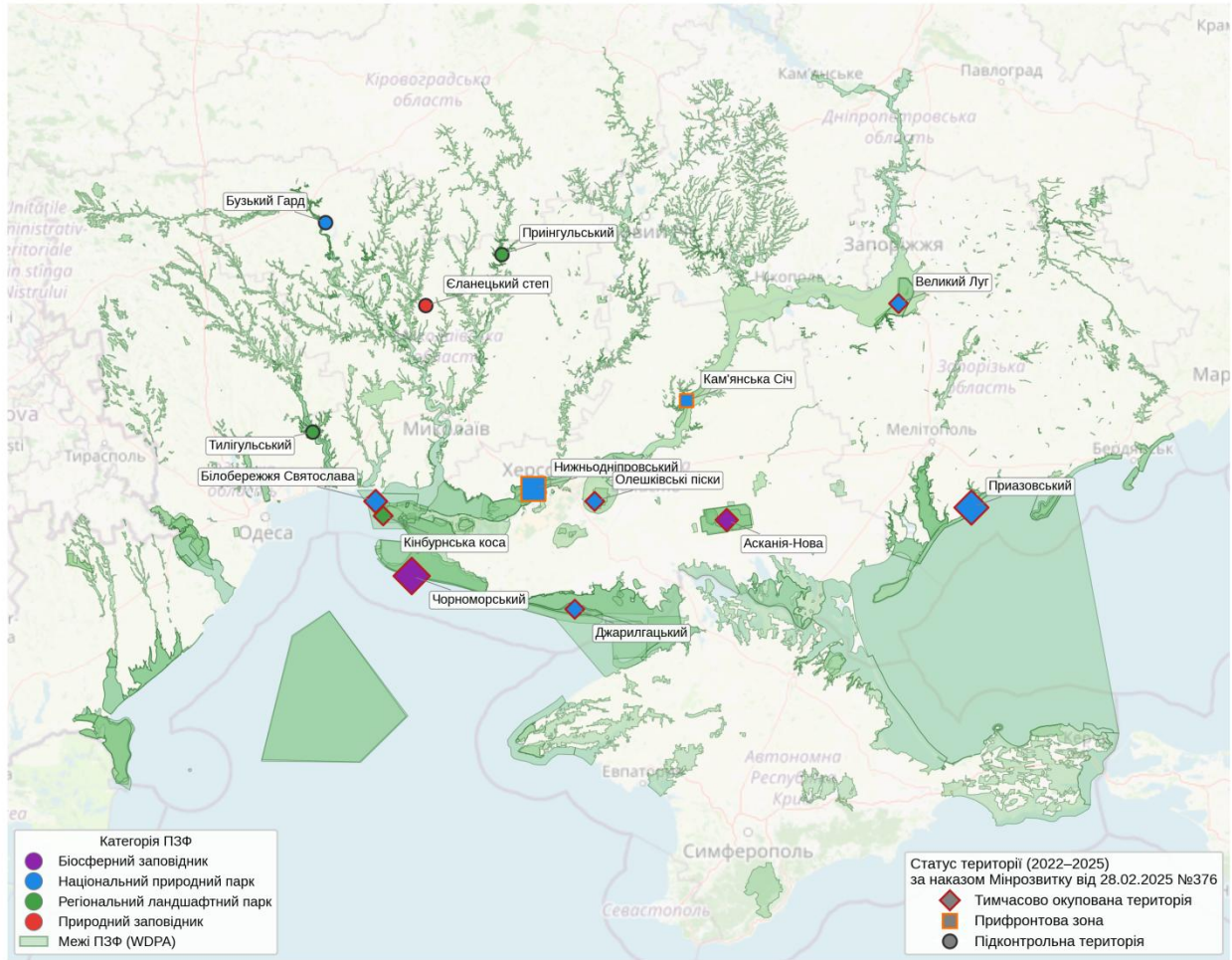
Відбір об'єктів здійснювався з урахуванням площі, природоохоронної значущості, наявності степових, заплавних, прибережних або водно-болотних екосистем, а також статусу території у 2022–2025 рр. Такий підхід дав змогу порівняти території, що перебували у зоні бойових дій, тимчасовій окупації, прифронтовій зоні або на підконтрольній території. Воєнний статус розглядався не як формальний адміністративний показник, а як інтерпретаційна ознака, що відображає можливість доступу, гасіння пожеж і проведення наземної перевірки; структура вибірки за категоріями, площею, екосистемним типом і доступністю деталізує цей підхід (табл. 1), а просторовий розподіл об'єктів показує їх прив'язку до основних зон воєнного впливу на півдні України (рис. 2).

**Таблиця 1**

Об'єкти природно-заповідного фонду, включені до дослідження

Об'єкт	Категорія	Площа, га	Переважаючий тип екосистем	Воєнний статус / доступність
Чорноморський	БЗ	89 129	прибережні та водно-болотні комплекси	тимчасово окупований, висока бойова активність
Нижньодніпровський	НПП	80 180	заплавно-дельтові комплекси нижнього Дніпра	прифронтовий / зона бойових дій
Приазовський	НПП	78 127	прибережні комплекси Азовського моря	тимчасово окупований, тилловий
Білобережжя Святослава	НПП	35 223	піщані, лісові та прибережні біотопи	тимчасово окупований, висока бойова активність
Асканія-Нова	БЗ	33 308	цілинний степ	тимчасово окупований, тилловий
Тилігульський	РЛП	21 236	лиманні, степові та прибережні біотопи	підконтрольний
Кінбурнська коса	РЛП	17 892	піщано-лісові та прибережні біотопи	тимчасово окупований, висока бойова активність
Великий Луг	НПП	16 756	заплавні комплекси Дніпра	тимчасово окупований, висока бойова активність
Кам'янська Січ	НПП	12 261	степові та прибережні комплекси колишнього Каховського водосховища	прифронтовий / зона бойових дій
Олешківські піски	НПП	11 667	піщані ари та соснові насадження	тимчасово окупований, висока бойова активність
Джарилгацький	НПП	10 300	острівні та прибережні комплекси	тимчасово окупований, тилловий
Бузький Гард	НПП	6 140	каньйонно-степові комплекси Південного Бугу	підконтрольний
Приінгульський	РЛП	3 153	степові та заплавні комплекси	підконтрольний
Сланецький степ	ПЗ	3 010	цілинний степ	підконтрольний

*Джерело: узагальнено авторкою за відкритими геопросторовими даними.*



**Рисунок 2.** Розташування ключових об'єктів природно-заповідного фонду півдня України та їх воєнний статус у 2022–2025 рр.

*Джерело: побудовано авторкою за відкритими геопросторовими даними.*

### 2.3. Вихідні дані

Вихідними даними слугували відкриті супутникові та геопросторові набори. Дані NASA FIRMS VIIRS використовувалися для ідентифікації активних вогнищ і розрахунку характеристик інтенсивності горіння; вони містять координати термальних аномалій, час спостереження, яскравісну температуру, рівень достовірності та FRP. Дані Sentinel-2 L2A застосовувалися для розрахунку NBR і dNBR на основі поверхневої відбивної здатності. Межі об'єктів природно-заповідного фонду отримано з WDPA та OpenStreetMap, а для виключення постійних водних поверхонь використано JRC Global Surface Water.<sup>67</sup>

<sup>6</sup> European Space Agency. Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document. Issue 1, Rev. 2. 2015. URL: [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook) (дата звернення: 15.05.2026); Copernicus. Sentinel-2 Collection 1 MSI Level-2A (L2A). Copernicus Sentinel Online, 2026. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/sentinel-data-access/sentinel-products/sentinel-2-data-products/collection-1-level-2a> (дата звернення: 15.05.2026).

<sup>7</sup> World Database on Protected Areas (WDPA). Protected Planet: The World Database on Protected Areas. UNEP-WCMC and IUCN, 2026. URL: <https://www.protectedplanet.net/> (дата звернення: 15.05.2026); OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap database. 2026. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата звернення: 15.05.2026); Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature. 2016. Vol. 540. P. 418–422. DOI: 10.1038/nature20584; European Commission Joint Research Centre. Global Surface Water Explorer, v1.4. 2026. URL: <https://global-surface-water.appspot.com/> (дата звернення: 15.05.2026).

Перед статистичною та картографічною агрегацією всі набори було приведено до єдиної логіки просторового аналізу. Межі об'єктів ПЗФ використовувалися як маски обробки; FIRMS-точки — як незалежний індикатор активного горіння; Sentinel-2 L2A — як основа для спектральної оцінки пошкодження рослинності; JRC Global Surface Water — як допоміжний шар для виключення постійних водних поверхонь із розрахунків dNBR. Така попередня уніфікація дала змогу зіставляти показники між об'єктами різної площі, екосистемного типу та воєнного статусу, а перелік джерел даних і змінних аналізу фіксує інформаційну основу подальших розрахунків (табл. 2).

**Таблиця 2**

Основні джерела даних і змінні аналізу

Джерело даних	Період / просторове охоплення	Призначення	Основні змінні
NASA FIRMS VIIRS S-NPP	2019–2025; активні термоточки	виявлення активного горіння та оцінка інтенсивності	дата, координати, bright_ti4, confidence, FRP, тип детекції
Sentinel-2 L2A	2019–2025; мультиспектральні знімки	розрахунок NBR, dNBR, площ і класів тяжкості вигорання	B8A, B12, NBRpre, NBRpost, dNBR
WDPA / OpenStreetMap	межі об'єктів ПЗФ	просторове обмеження аналізу та прив'язка пожеж до об'єктів	полігон, назва, площа, категорія
JRC Global Surface Water v1.4	глобальний шар водних поверхонь	маскування постійної води	occurrence, water mask
Підсумкові авторські таблиці	2019–2025; 14 об'єктів	статистична агрегація та візуалізація	n_fires, FRP, burned_ha, burned_firms_ha, класи dNBR

*Джерело: сформовано авторкою за відкритими супутниковими та геопросторовими даними.*

#### 2.4. Обробка даних FIRMS VIIRS

База активних вогнищ формувалася за даними NASA FIRMS VIIRS за 2019–2025 рр. Для зменшення кількості хибних спрацювань застосовано фільтрацію за типом детекції, яскравістю температурою та рівнем достовірності. До аналізу включалися точки, що відповідали рослинним пожежам, мали яскравісну температуру каналу I4 не нижче 320 K і рівень достовірності nominal або high. Подальша обробка включала просторовий перетин термоточок із межами об'єктів природно-заповідного фонду та агрегацію за роками, об'єктами й періодами. З огляду на просторову роздільну здатність VIIRS ці дані інтерпретувалися як індикатор активного горіння, а не як самостійна оцінка повної площі пожежі.

Для кожного об'єкта розраховано кількість вогнищ, сумарний, середній і максимальний FRP, а також кількість днів із зафіксованими пожежними подіями. Ці показники використано для аналізу частоти, теплової інтенсивності та сезонності пожежного навантаження. FRP розглядався як дистанційний індикатор потужності горіння, однак не використовувався для прямого встановлення причини займання.

#### 2.5. Розрахунок dNBR і FIRMS-верифікація площ вигорання

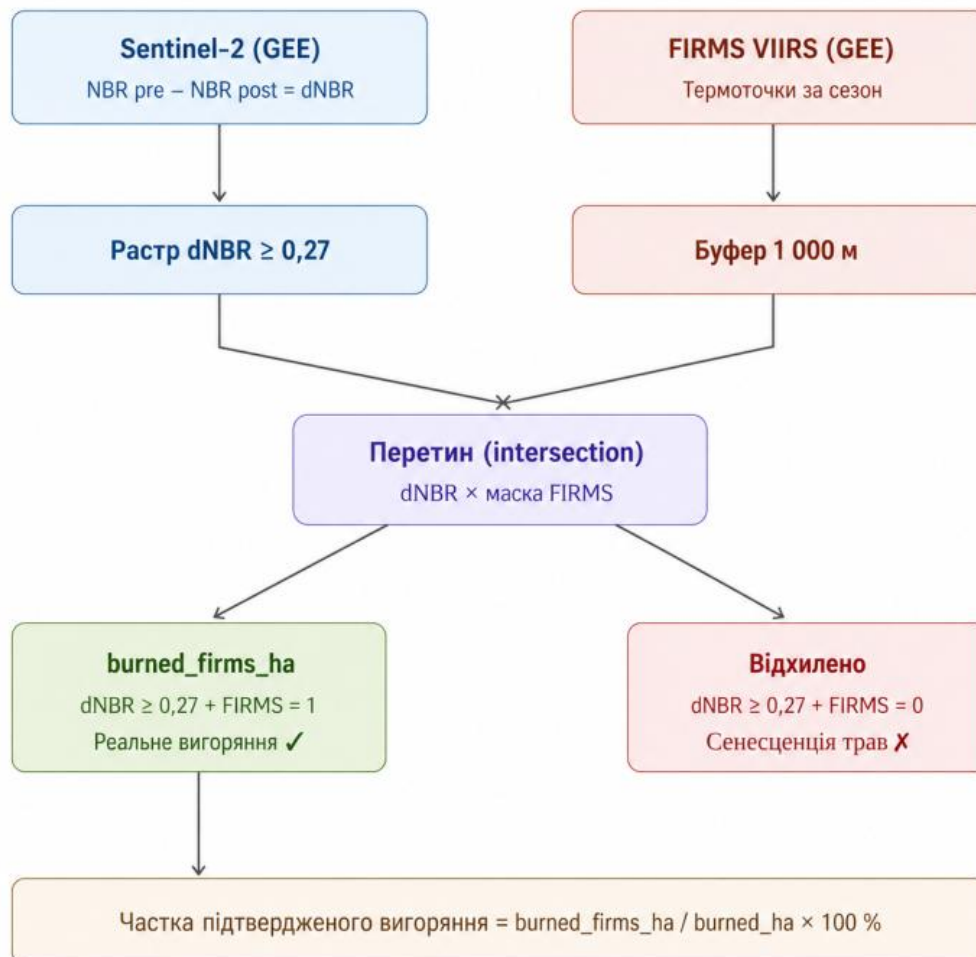
Для оцінки спектральної зміни рослинного покриву розраховано індекс NBR за каналами B8A і B12 Sentinel-2 (1). Індекс dNBR визначався як різниця між передпожежним і післяпожежним значенням NBR (2).

$$NBR = \frac{B8A - B12}{B8A + B12} \quad (1)$$

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad (2)$$

Критичним методичним етапом була FIRMS-верифікація результатів dNBR. Для кожного року та об'єкта створювався буфер навколо термоточок FIRMS; до верифікованої площі включалися лише ті пікселі, які одночасно мали dNBR не нижче 0,27 і просторово збігалися з буфером активного горіння. Поріг  $dNBR \geq 0,27$  використовувався як робочий індикатор середнього і вищого ступеня спектрального пошкодження, а не як універсальна межа для всіх типів рослинності. Такий підхід зменшує ризик ототожнення сезонної сенесценції степової рослинності з реальним вигоранням і робить оцінку консервативнішою.

Схема FIRMS-верифікації результатів dNBR (рис. 3) відображає не окремий зовнішній програмний продукт, а авторську послідовність просторової перевірки: dNBR-площі попередньо виділялися за спектральним порогом, після чого перетиналися з буферною зоною навколо термоточок FIRMS. Пікселі, що не мали просторового підтвердження активним горінням, не включалися до основного показника підтвердженого вигорання.



**Рисунок 3.** Схема FIRMS-верифікації результатів dNBR для відокремлення реального вигорання від хибнопозитивних площ

*Джерело: власна розробка авторки.*

## **2.6. Статистичний аналіз**

Статистичний аналіз спрямовувався на оцінку відмінностей між довоєнним і воєнним періодами, виявлення індикативних часових трендів і визначення об'єктів із найбільш виразним приростом пожежного навантаження. Розраховувалися описові статистики, абсолютні та відносні зміни, кратність зростання, а також показники трендів. Для перевірки монотонної зміни у часових рядах використано тест Манна–Кендалла, нахил Сена застосовано для оцінки швидкості зміни, тест Петтітта — для виявлення потенційної точки зламу, а непараметричний тест Манна–Уїтні / Вілкоксона — для порівняння довоєнного та воєнного періодів<sup>8</sup>.

Вибір непараметричних процедур зумовлений короткою довжиною часових рядів, нерівномірним розподілом показників пожежної активності та наявністю екстремальних значень у воєнний період. З огляду на сім річних спостережень статистичні результати інтерпретувалися обережно: вони використовувалися для підтримки просторово-часової інтерпретації, але не розглядалися як достатня підстава для категоричного доведення довгострокового тренду. Статистичні розрахунки виконано у Python на основі авторських таблиць річної та періодичної агрегації показників пожежної активності, площі вигорання, інтенсивності горіння та класів dNBR.

Підсумкові таблиці та графічні матеріали сформовано після агрегації річних показників для кожного об'єкта ПЗФ. Для порівняння довоєнного та воєнного періодів розраховувалися середньорічні значення, абсолютні й відносні зміни, кратність зростання, характеристики інтенсивності пожеж, частка FIRMS-верифікованої площі та структура класів тяжкості dNBR. Саме ці узагальнені показники використано для побудови рейтингів об'єктів, карт просторової диференціації та таблиць практичних пріоритетів.

## **3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

У результативному блоці поєднано регіональну, об'єктову та внутрішньооб'єктову оцінку пожежного навантаження. Регіональний рівень використано як фоновий контекст для виявлення загальної зміни пожежної активності у південній частині України; об'єктовий рівень — для порівняння 14 природоохоронних територій; внутрішньооб'єктовий рівень — для оцінки просторової локалізації та тяжкості пошкодження рослинного покриву. Така структура дозволяє розглядати пожежний режим не лише як сукупність окремих вогнищ, а як просторово організований наслідок поєднання природних умов, режиму доступу та воєнного впливу.

### **3.1. Загальна динаміка активних вогнищ**

За даними річної агрегації FIRMS у південному регіоні кількість активних вогнищ у 2019–2021 рр. становила 41 422 випадки, тоді як у 2022–2025 рр. — 64 001 випадок. Середня потужність радіаційного випромінювання пожежі також зросла: з 6,17 до 8,46 МВт, що відповідає збільшенню приблизно на 37,1 %. Річна динаміка кількості термоточок і показників FRP (табл. 3) використовується як фоновий регіональний контекст і не ототожнюється з пожежним навантаженням лише в межах 14 об'єктів ПЗФ.

Регіональні значення відображають загальне посилення пожежної активності, однак вони не пояснюють просторову неоднорідність змін. Тому подальший аналіз зосереджено на ключових

---

<sup>8</sup> Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 1945. Vol. 13(3). P. 245–259. DOI: 10.2307/1907187; Kendall M. G. Rank Correlation Methods. 4th ed. London: Griffin, 1975; Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63(324). P. 1379–1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934; Pettitt A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. 1979. Vol. 28(2). P. 126–135. DOI: 10.2307/2346729; Mann H. B., Whitney D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1947. Vol. 18(1). P. 50–60. DOI: 10.1214/aoms/1177730491.

об'єктах природно-заповідного фонду, де зміни можуть бути пов'язані з конкретними умовами воєнного впливу, режимом доступу та обмеженням можливостей оперативного реагування.

**Таблиця 3**

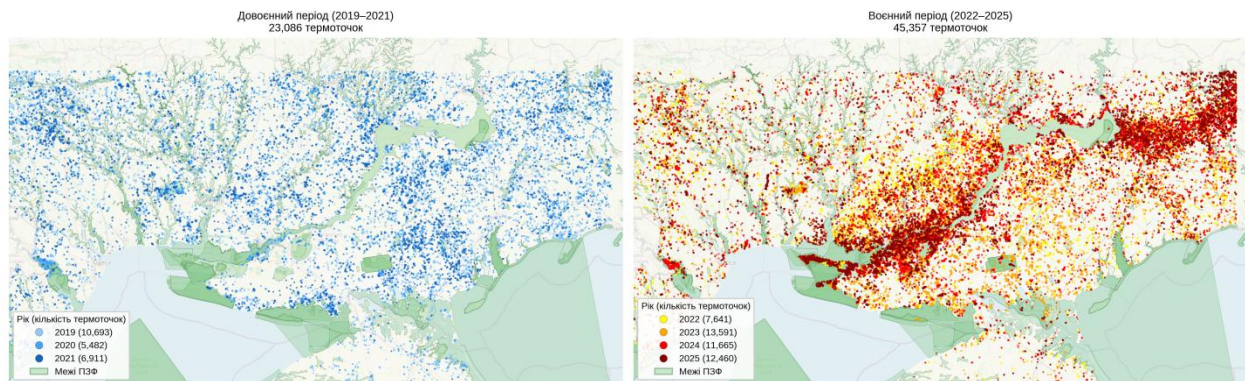
Річна динаміка активних вогнищ FIRMS у південному регіоні України

Рік	Період	Кількість термоточок	Сума FRP, МВт	Середній FRP, МВт	Максимальний FRP, МВт
2019	довоєнний	18 490	125 185,3	6,77	369,7
2020	довоєнний	10 958	62 964,2	5,75	251,2
2021	довоєнний	11 974	67 359,8	5,63	275,6
2022	воєнний	10 435	91 735,6	8,79	320,5
2023	воєнний	18 588	143 178,7	7,70	244,9
2024	воєнний	16 659	142 206,6	8,54	256,7
2025	воєнний	18 319	164 094,8	8,96	311,0

*Джерело: власні розрахунки авторки за даними NASA FIRMS VIIRS.*

### 3.2. Просторовий розподіл термоточок FIRMS

Картографування активних вогнищ свідчить про істотну зміну просторової концентрації пожеж у воєнний період. Найбільш виразне накопичення термоточок фіксується на територіях, пов'язаних із Кінбурнським півостровом, нижньодніпровськими заплавами, об'єктами Херсонської області та прибережними природоохоронними комплексами. Просторове зіставлення довоєнного і воєнного періодів (рис. 4) узгоджується з територіями, де у 2022–2025 рр. поєднувалися бойові дії, окупація, обмеження доступу та неможливість своєчасного гасіння. Водночас ці карти слід розглядати як індикатор просторової концентрації термальних аномалій, а не як пряме картографування повної площі вигорання.



**Рисунок 4.** Просторовий розподіл термоточок FIRMS у довоєнний і воєнний періоди

*Джерело: побудовано авторкою за відкритими супутниковими та геопросторовими даними.*

### 3.3. Зміна пожежного навантаження за об'єктами природно-заповідного фонду

Об'єктовий рівень аналізу показав нерівномірний характер змін. Частина територій, насамперед підконтрольні об'єкти степового та каньйонно-степового типу, не демонструвала синхронного зростання пожежного навантаження. Натомість для територій, пов'язаних із бойовими діями або окупацією, зафіксовано різке збільшення кількості вогнищ і FIRMS-верифікованої площі вигорання. Кількісне порівняння середньорічних FIRMS-верифікованих площ між періодами (табл. 4) підтверджує просторово вибіркочку, а не рівномірну зміну пожежного режиму.

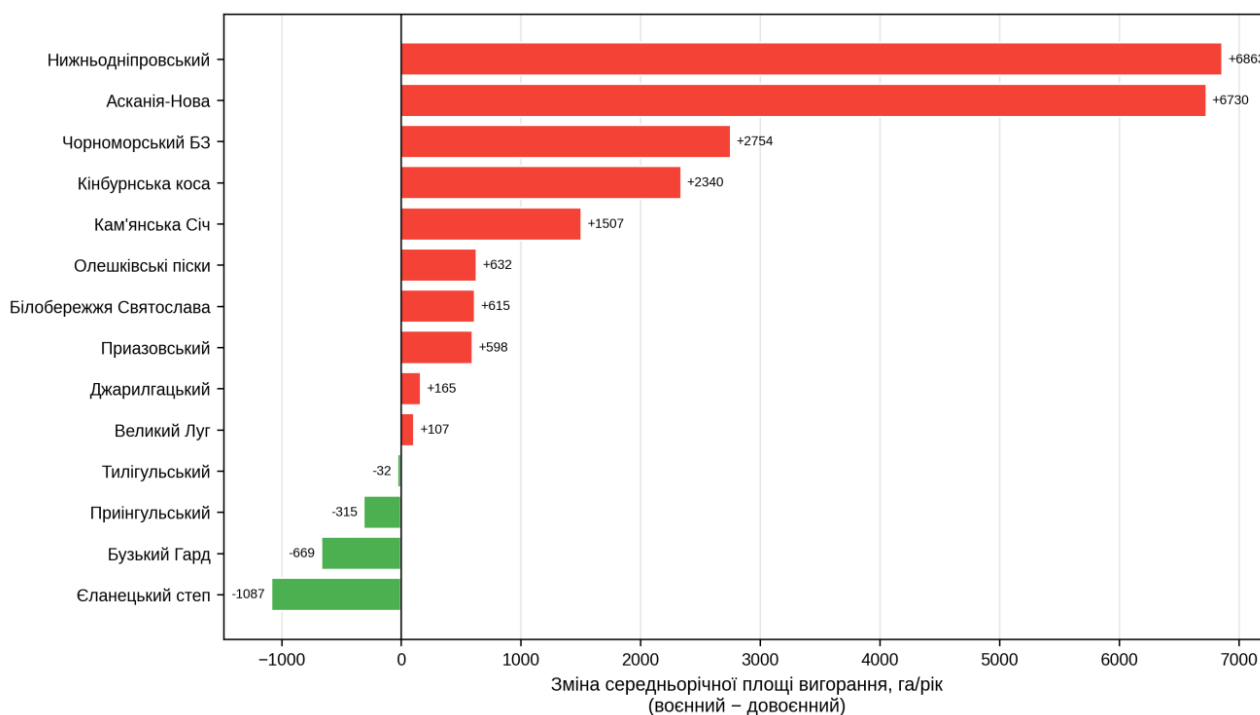
**Таблиця 4**

Порівняння FIRMS-верифікованої площі вигорання у довоєнний і воєнний періоди для ключових об'єктів

Об'єкт ПЗФ	Pre, га/рік	War, га/рік	Абсолютна зміна, га/рік	Кратність зміни
НПП Нижньодніпровський	2 534	9 398	6 863	3,7
БЗ Асканія-Нова	2 008	8 738	6 730	4,4
Чорноморський БЗ	383	3 137	2 754	8,2
РЛП Кінбурнська коса	21	2 361	2 340	112,8
НПП Кам'янська Січ	738	2 245	1 507	3,0
НПП Олешківські піски	36	667	632	18,7
НПП Білобережжя Святослава	2	616	615	352,9
НПП Приазовський	1 154	1 752	598	1,5
НПП Джарилгацький	85	250	165	2,9
НПП Великий Луг	431	539	107	1,2

*Джерело: власні розрахунки авторки.*

Найбільші абсолютні прирости встановлено для Нижньодніпровського національного природного парку та біосферного заповідника «Асканія-Нова». Для РЛП «Кінбурнська коса» та НПП «Білобережжя Святослава» важливим є не лише абсолютне зростання, а й різка зміна від майже відсутнього довоєнного верифікованого вигорання до значних воєнних площ. Рейтинг об'єктів за абсолютною зміною FIRMS-верифікованої площі (рис. 5) підкреслює якісне зміщення пожежного режиму, яке не може бути пояснене лише типовою міжрічною мінливістю.



**Рисунок 5.** Рейтинг об'єктів природно-заповідного фонду за зміною FIRMS-верифікованої площі вигорання між довоєнним і воєнним періодами

*Джерело: побудовано авторкою за відкритими супутниковими даними.*

### 3.4. Статистична перевірка змін пожежної активності

Статистичні тести дали змогу перевірити, чи мають зафіксовані зміни не лише описовий, а й статистично виражений характер. Тест Манна–Кендалла та нахил Сена були використані для

виявлення монотонних змін у річних рядах кількості вогнищ, тоді як тест Петтітта дозволяв оцінити можливу точку зміни. Непараметричне порівняння довоєнного та воєнного періодів застосовувалося як додаткова перевірка відмінностей між двома інтервалами. Узагальнені статистичні показники для ключових об'єктів ПЗФ (табл. 5) слід трактувати як індикативні через коротку довжину ряду, особливо для територій із малими довоєнними значеннями.

**Таблиця 5**

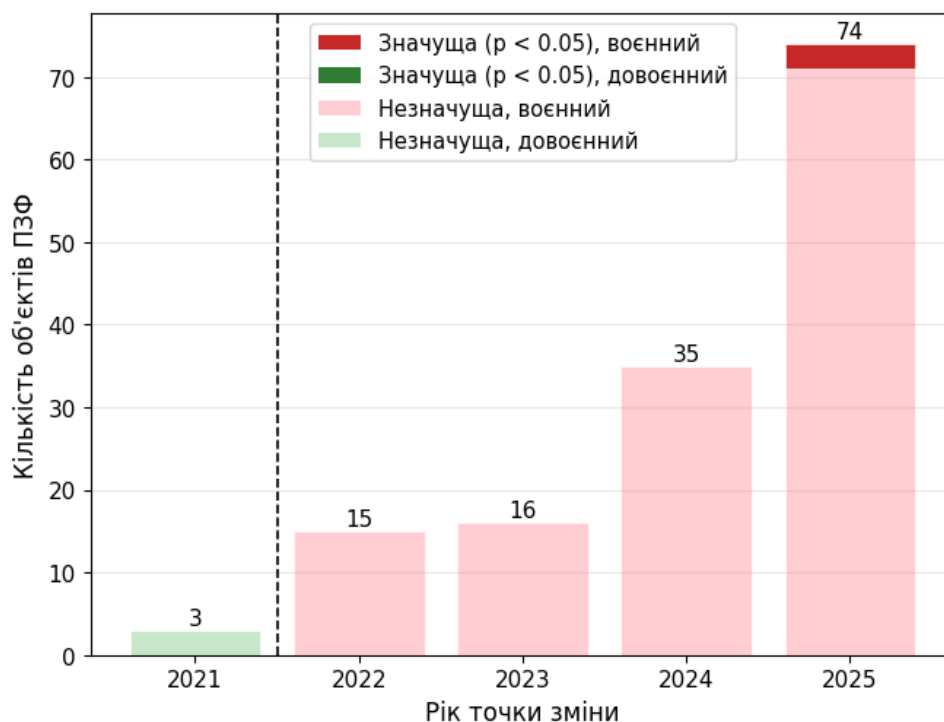
Статистичні показники зміни пожежної активності для ключових об'єктів ПЗФ

Об'єкт	Pre, вогн./рік	War, вогн./рік	$\Delta$ , вогн./рік	МК p	Sen slope	Pettitt рік	Wilcoxon p
РЛП Кінбурнська коса	0,0	148,8	148,8	0,099	32,50	2 025	0,044
НПП Білобережжя Святослава	0,0	130,2	130,2	0,099	29,75	2 025	0,044
Чорноморський БЗ	2,0	85,2	83,2	0,071	17,67	2 025	0,057
НПП Нижньодніпровський	48,0	131,0	83,0	1,000	4,33	2 024	0,857
БЗ Асканія-Нова	1,3	31,5	30,2	0,176	4,60	2 025	0,099
НПП Олешківські піски	0,7	30,2	29,5	0,051	4,75	2 025	0,050
НПП Кам'янська Січ	1,0	14,5	13,5	0,004	3,75	2 025	0,050
НПП Джарилгацький	0,0	12,8	12,8	0,367	0,00	2 025	0,270
НПП Великий Луг	0,7	4,5	3,8	0,099	1,50	2 025	0,199
РЛП Тилігульський	2,3	5,5	3,2	0,293	1,33	2 025	0,582

*Джерело: власні розрахунки авторки.*

Найбільші прирости середньорічної кількості активних вогнищ характерні для РЛП «Кінбурнська коса», НПП «Нижньодніпровський», НПП «Білобережжя Святослава» та Чорноморського біосферного заповідника. Навіть за обмеженої довжини часового ряду ці об'єкти формують узгоджену групу територій, для яких воєнний період супроводжувався зміщенням пожежної активності у бік вищих значень. Найбільш переконливою є не окрема р-оцінка, а збіг кількох ознак: зростання кількості термоточок, збільшення верифікованої площі вигорання та просторове тяжіння змін до зон обмеженого доступу.

Додаткове узагальнення років потенційної точки зміни за тестом Петтітта показує, що основна частина зміщень пожежного режиму припадає саме на воєнний період. Найбільша кількість об'єктів формує групу з точкою зміни у 2025 р. (рис. 6), що слід інтерпретувати не як остаточно встановлений перелом, а як індикатор посилення пожежної активності наприкінці аналізованого періоду. Довоєнний сигнал 2021 р. є статистично незначущим і відображає природну міжрічну мінливість. Отже, розподіл точок зміни узгоджується із загальним висновком про зміщення пожежного режиму в умовах війни, але потребує подальшої перевірки за довшим часовим рядом.



**Рисунок 6.** Розподіл точок зміни пожежного режиму за тестом Петтітта для об'єктів природно-заповідного фонду півдня України

Джерело: побудовано авторкою за результатами статистичної обробки даних NASA FIRMS VIIRS.

### 3.5. Інтенсивність і сезонність пожеж

Показник FRP дає змогу відокремити кількість зафіксованих вогнищ від їхньої теплової інтенсивності. У воєнний період для окремих територій спостерігалися не лише частіші, а й інтенсивніші пожежні події. Сукупність показників кількості вогнищ, FRP, пожежних днів, пікового місяця та річного розподілу подій (табл. 6) дозволяє оцінити інтенсивність і сезонність пожежного навантаження об'єкту. Водночас FRP не є прямим доказом причини займання, тому його доцільно інтерпретувати разом із просторовим положенням об'єкта, воєнним статусом території та сезонністю пожеж.

**Таблиця 6**

Інтенсивність, сезонність і річний розподіл пожежних вогнищ у ключових ПЗФ у воєнний період

Об'єкт ПЗФ	Вогнищ	FRP max, МВт	FRP сер., МВт	Днів	Пік	2022	2023	2024	2025
РЛП Кінбурнська коса	595	222,7	11,3	147	Сер	156	130	79	230
НПП Нижньодніпровський	524	176,5	12,7	142	Лют	70	43	40	371
НПП Білобережжя Святослава	521	222,7	11,6	137	Сер	126	119	71	205
Чорноморський БЗ	341	200,2	15,7	67	Тра	73	57	21	190
БЗ Асканія-Нова ім. Ф. Е. Фальц-Фейна	126	75,5	14,9	34	Вер	2	70	31	23
НПП Олешківські піски	121	80,5	17,6	25	Лип	4	31	67	19
НПП Кам'янська Січ	58	36,0	7,9	33	Лип	7	15	17	19
НПП Джарилгацький	51	21,8	8,5	8	Сер	0	48	0	3

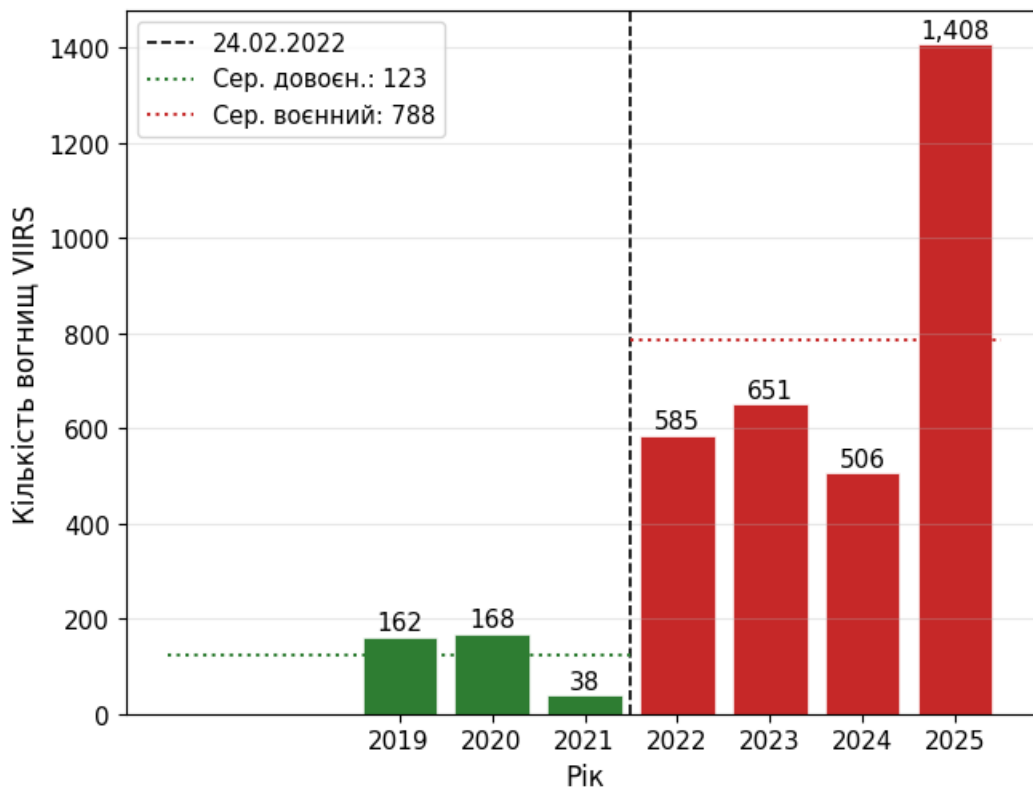
**Продовження таблиці 6**

РЛП Тилігульський	22	157,3	19,6	11	Сер	3	0	8	11
НПП Приазовський	22	20,7	7,9	17	Сер	4	8	7	3
НПП Великий Луг	18	195,5	31,2	11	Лип	0	4	6	8
ПЗ Єланецький степ	6	3,8	3,6	4	Січ	5	0	1	0
РЛП Приінгульський	4	13,8	9,8	3	Жов	0	2	1	1
НПП Бузький Гард	3	9,2	7,2	1	Лип	0	0	0	3

Примітка: FRP max — максимальна теплова потужність вогнища; FRP сер. — середня теплова потужність; Днів — кількість днів із пожежами у воєнний період; Пік — місяць з найбільшою кількістю вогнищ.

*Джерело: власні розрахунки авторки за даними NASA FIRMS VIIRS.*

Деталізація воєнного періоду за роками підтверджує неоднорідність пожежного навантаження між об'єктами. Найбільшу кількість вогнищ зафіксовано для РЛП «Кінбурнська коса», НПП «Нижньодніпровський», НПП «Білобережжя Святослава» та Чорноморського БЗ. Водночас підвищені значення FRP max для окремих територій свідчать про наявність інтенсивних пожежних епізодів, а узагальнена річна динаміка для національних об'єктів ПЗФ зони бойових дій (рис. 7) показує, що піки не були синхронними: для частини об'єктів максимум припадав на 2023–2024 рр., тоді як для РЛП «Кінбурнська коса» та НПП «Нижньодніпровський» найбільше зростання проявилось у 2025 р.



**Рисунок 7.** Динаміка пожежних вогнищ VIIRS у національних об'єктах природно-заповідного фонду зони бойових дій півдня України у 2019–2025 рр.

*Джерело: власні розрахунки авторки за даними NASA FIRMS VIIRS.*

### **3.6. FIRMS-верифікація dNBR і проблема хибнопозитивних площ**

Порівняння загальної dNBR-площі з FIRMS-верифікованою площею підтвердило методичну необхідність просторової перевірки результатів для степових і прибережних територій. У степовій зоні сезонне висихання трав'яної рослинності може суттєво збільшувати площу спектрально визначеного пошкодження. Тому найбільш інформативним показником у дослідженні є не вся площа  $dNBR \geq 0,27$ , а саме FIRMS-верифікована площа, де спектральна зміна збігається з активним горінням. Об'єктове співвідношення dNBR-площі та FIRMS-верифікованої площі (табл. 7) демонструє різний рівень надійності спектрального сигналу залежно від типу території.

**Таблиця 7**

Співвідношення загальної dNBR-площі та FIRMS-верифікованої площі вигорання за 2019–2025 рр.

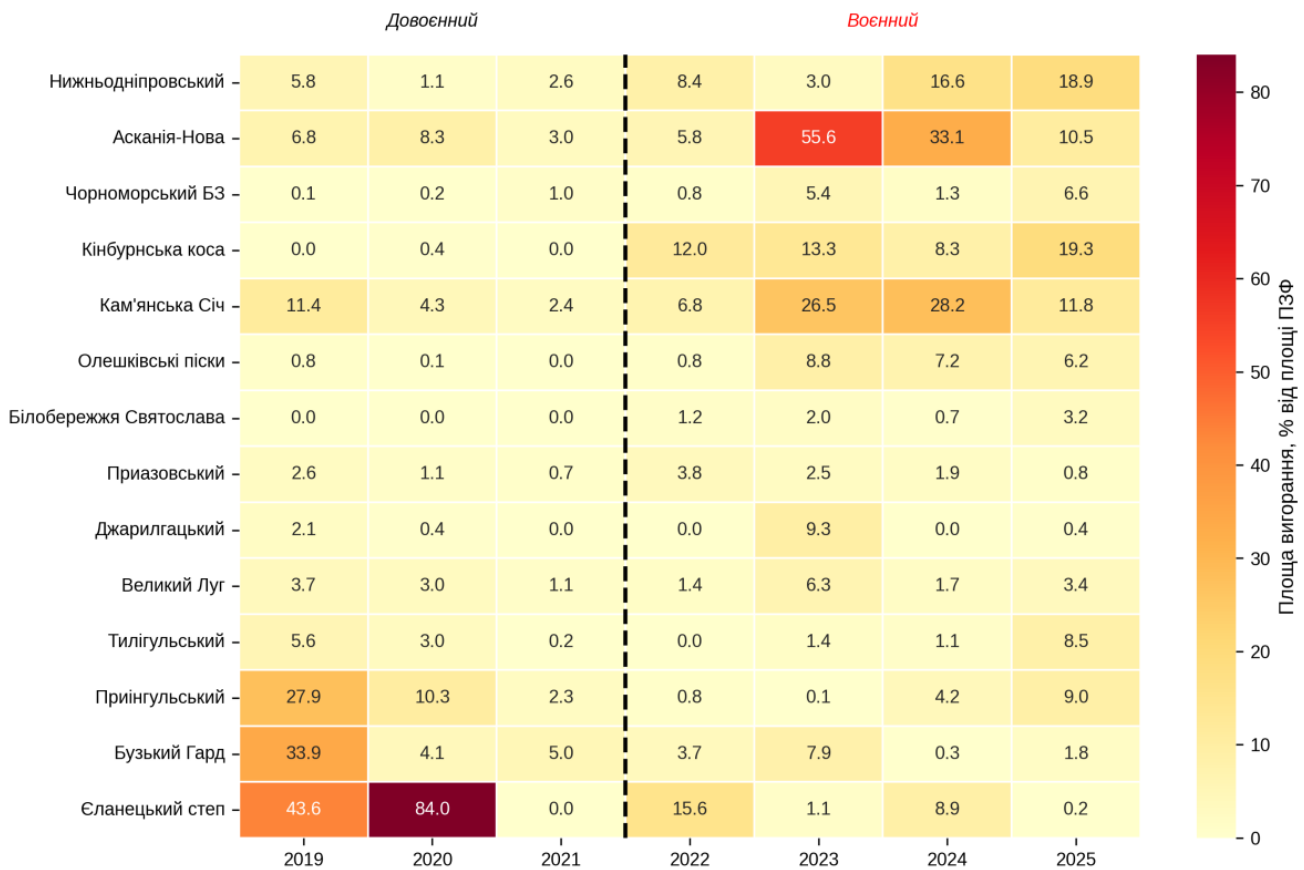
<b>Об'єкт</b>	<b>dNBR-площа, га</b>	<b>FIRMS-верифіковано, га</b>	<b>Частка верифікації, %</b>
РЛП Кінбурнська коса	14 560	9 507	65,3
НПП Білобережжя Святослава	4 896	2 471	50,5
НПП Кам'янська Січ	22 480	11 196	49,8
НПП Олешківські піски	5 720	2 776	48,5
НПП Нижньодніпровський	95 107	45 194	47,5
Чорноморський БЗ	33 758	13 694	40,6
НПП Великий Луг	9 482	3 447	36,4
БЗ Асканія-Нова	171 065	40 975	24,0
ПЗ Єланецький степ	20 244	4 616	22,8
НПП Приазовський	50 324	10 471	20,8
НПП Джарилгацький	6 244	1 254	20,1
РЛП Тилігульський	28 648	4 203	14,7
НПП Бузький Гард	34 175	3 489	10,2
РЛП Приінгульський	17 289	1 722	10,0

*Джерело: власні розрахунки авторки.*

Низька частка FIRMS-верифікованого сигналу для окремих степових територій свідчить про те, що спектральний метод без додаткової перевірки може значно завищувати площі реального вигорання. Натомість для лісово-чагарникових і піщано-лісових комплексів вища частка верифікації вказує на кращу відповідність dNBR реальному горінню. Отже, FIRMS-верифікація не лише зменшує хибнопозитивні площі, а й дозволяє порівнювати об'єкти з різними типами рослинності більш коректно.

Додатково річний розподіл частки FIRMS-верифікованого вигорання показує, що відповідність між спектрально визначеною dNBR-площею та підтвердженим активним горінням істотно змінювалася як між роками, так і між об'єктами (рис. 8). Найвищі частки в окремі роки фіксувалися не лише у воєнний період, а й у довоєнні роки для окремих степових територій, що підкреслює важливість річної, а не лише сумарної оцінки. Водночас для більшості великих природоохоронних об'єктів воєнного періоду підвищення частки FIRMS-верифікованого сигналу узгоджується з просторово-часовим посиленням пожежного навантаження.

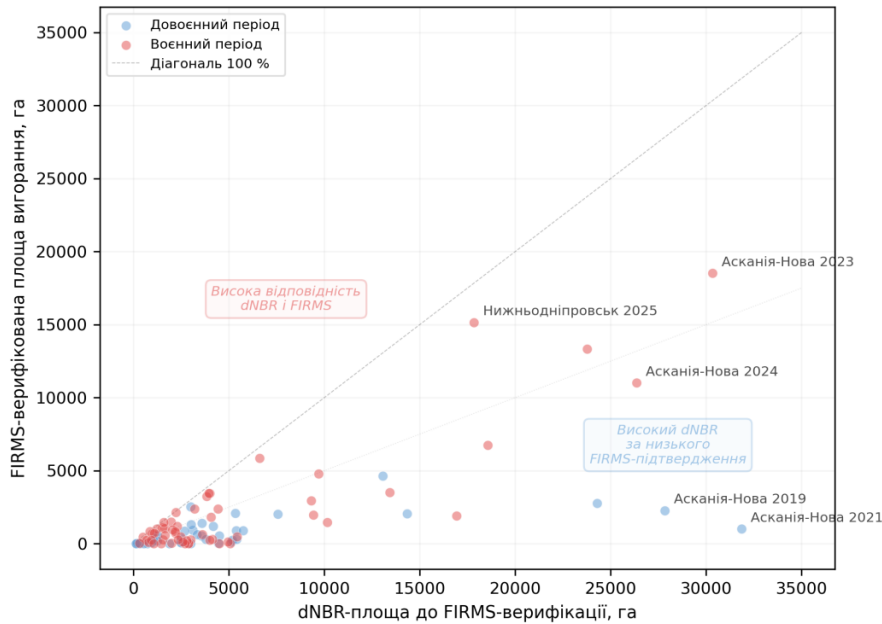
**CHAPTER 3. SAFETY, RISK MANAGEMENT, AND  
EMERGENCY RESPONSE**



**Рисунок 8.** Річна частка FIRMS-верифікованої площі вигорання в загальній dNBR-площі для об'єктів природно-заповідного фонду півдня України у 2019–2025 рр.

*Джерело:* побудовано авторкою за результатами власної обробки даних Sentinel-2 та NASA FIRMS VIIRS.

Для методичної інтерпретації результатів важливим є також пряме зіставлення загальної dNBR-визначеної площі та FIRMS-верифікованої площі вигорання (рис. 9). Точки, розташовані близько до діагоналі високої відповідності, відображають випадки, коли спектральний сигнал dNBR добре узгоджується з активним горінням. Натомість спостереження зі значною dNBR-площею за низького FIRMS-підтвердження вказують на ймовірне завищення спектрально визначених площ без додаткової перевірки. Такі відхилення можуть бути пов'язані не лише з реальною пожежною трансформацією рослинності, а й із сезонною сенесценцією, змінами вологості, оголенням ґрунту або іншими спектральними змінами поверхні. Тому в подальших кількісних порівняннях основним результативним показником використано саме FIRMS-верифіковану площу, тоді як загальна dNBR-площа розглядалася як допоміжний індикатор потенційного пошкодження рослинного покриву.

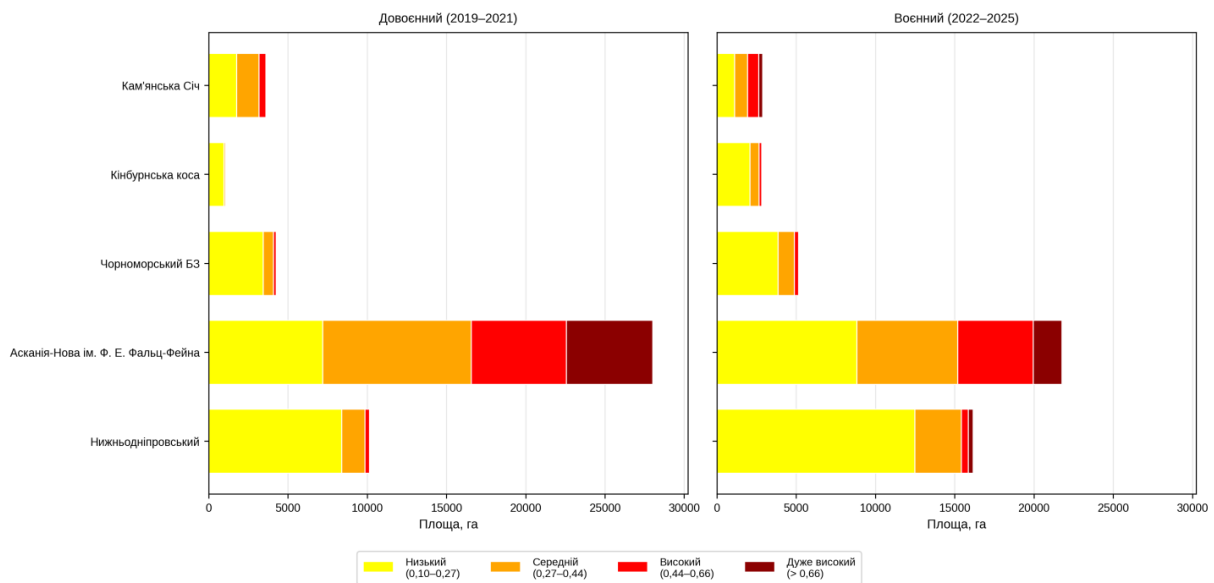


**Рисунок 9.** Співвідношення dNBR-визначеної та FIRMS-верифікованої площі вигорання для об’єктів природно-заповідного фонду півдня України у 2019–2025 рр.

Джерело: побудовано авторкою за результатами власної обробки даних Sentinel-2 та NASA FIRMS VIIRS.

### 3.7. Структура тяжкості вигорання

Аналіз класів тяжкості дозволяє перейти від оцінки площі до оцінки глибини пошкодження рослинного покриву. Для найбільш уражених територій у воєнний період зростає внесок середнього, високого та дуже високого класів dNBR. Розподіл площ за класами тяжкості для найбільш постраждалих об’єктів (рис. 10) має важливе екологічне значення, оскільки ділянки з високою тяжкістю пошкодження потребують першочергової польової перевірки, оцінки відновлення рослинності, аналізу стану ґрунтового покриву та визначення ризику повторного вигорання.

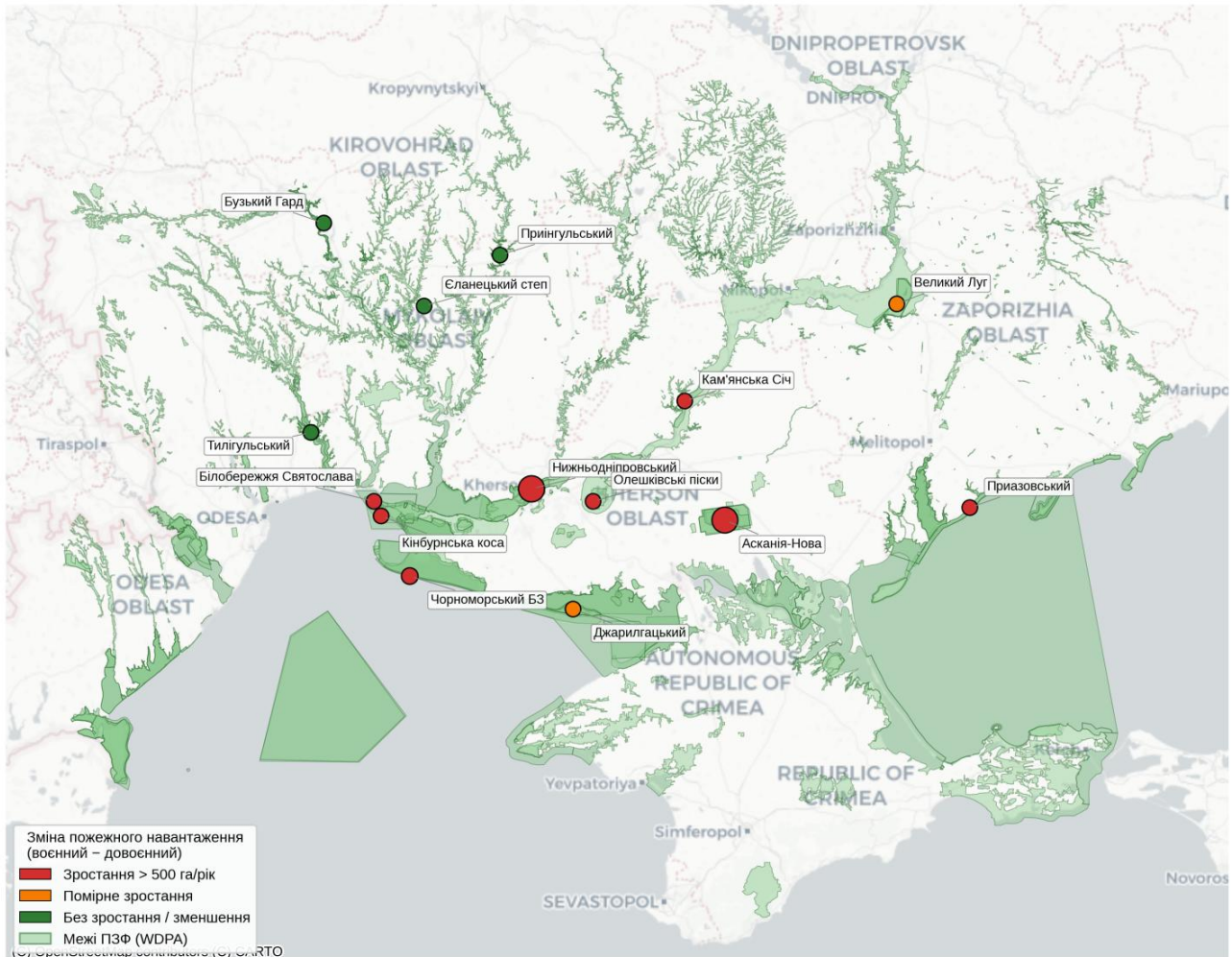


**Рисунок 10.** Розподіл площ за ступенем тяжкості вигорання у найбільш постраждалих об’єктах природно-заповідного фонду

Джерело: побудовано авторкою за результатами власних розрахунків.

### 3.8. Просторова диференціація зміни пожежного навантаження

Просторова карта зміни пожежного навантаження узагальнює результати об'єктового аналізу і вказує на виражену територіальну асиметрію (рис. 11). Найбільші прирости припадають на об'єкти, що перебували у зоні бойових дій, тимчасової окупації або поблизу лінії фронту. Підконтрольні об'єкти переважно демонстрували стабільні або нижчі значення, що підкреслює роль доступності територій, наявності управлінського контролю та можливості реагування на пожежі.

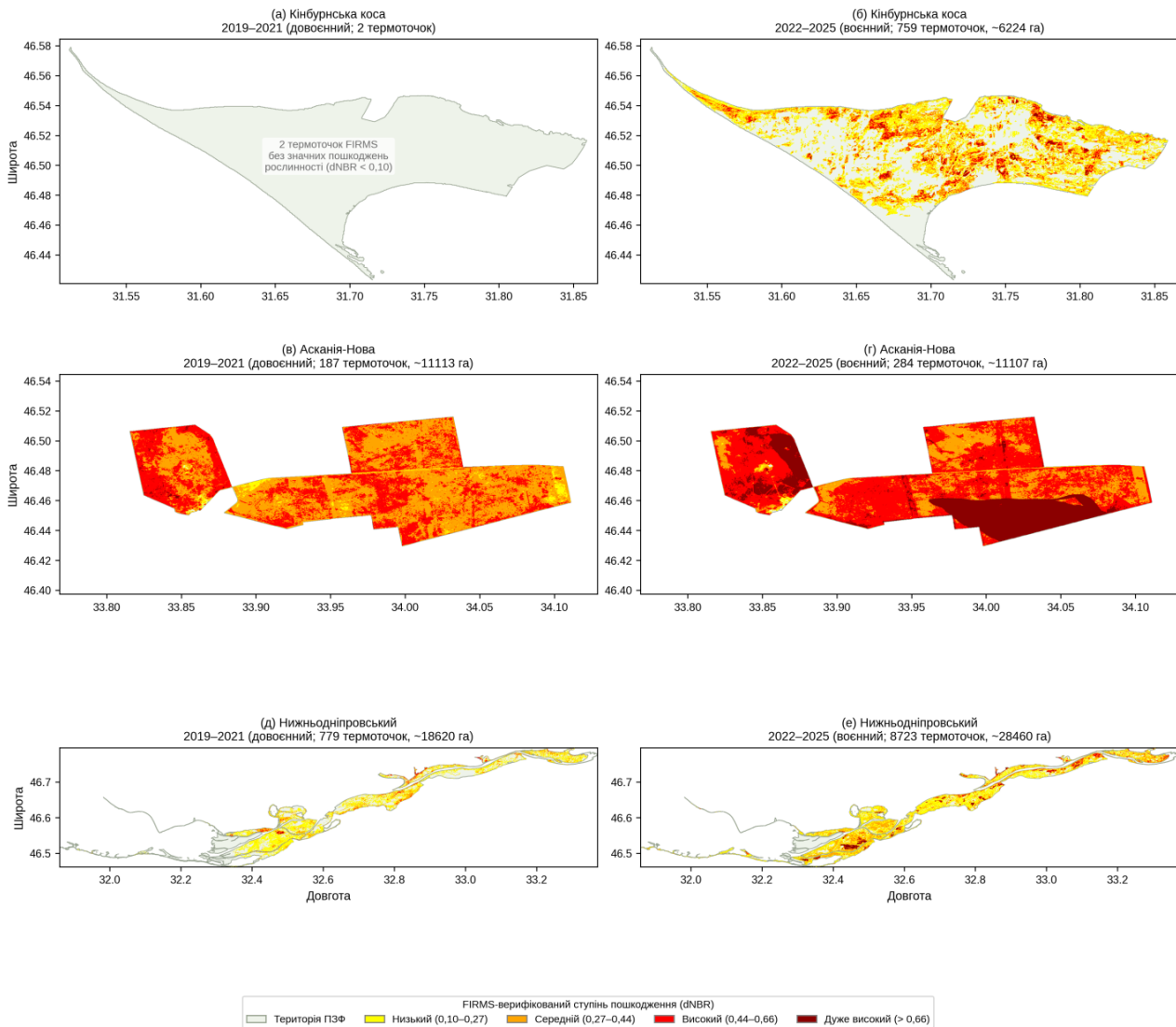


**Рисунок 11.** Просторова диференціація зміни пожежного навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду півдня України у воєнний період

*Джерело: побудовано авторкою за результатами власних розрахунків.*

### 3.9. Просторова локалізація FIRMS-верифікованого пошкодження рослинності

Карти FIRMS-верифікованого dNBR деталізують просторову структуру пошкодження у межах окремих об'єктів (рис. 12). Для РЛП «Кінбурнська коса» характерним є перехід від майже відсутнього довоєнного підтверженого сигналу до масштабного воєнного ураження. У БЗ «Асканія-Нова» помітне розширення ділянок високого і дуже високого ступеня пошкодження, тоді як у НПП «Нижньодніпровський» ураження тяжіє до заплавно-дельтових комплексів. Ці результати мають безпосереднє значення для планування післявоєнної польової верифікації, оскільки дозволяють локалізувати ділянки першочергового обстеження.



**Рисунок 12.** Карти FIRMS-верифікованого ступеня пошкодження рослинності за dNBR для РЛП «Кінбурнська коса», БЗ «Асканія-Нова» та НПП «Нижньодніпровський» у довоєнний і воєнний періоди

*Джерело: побудовано авторкою за відкритими супутниковими даними.*

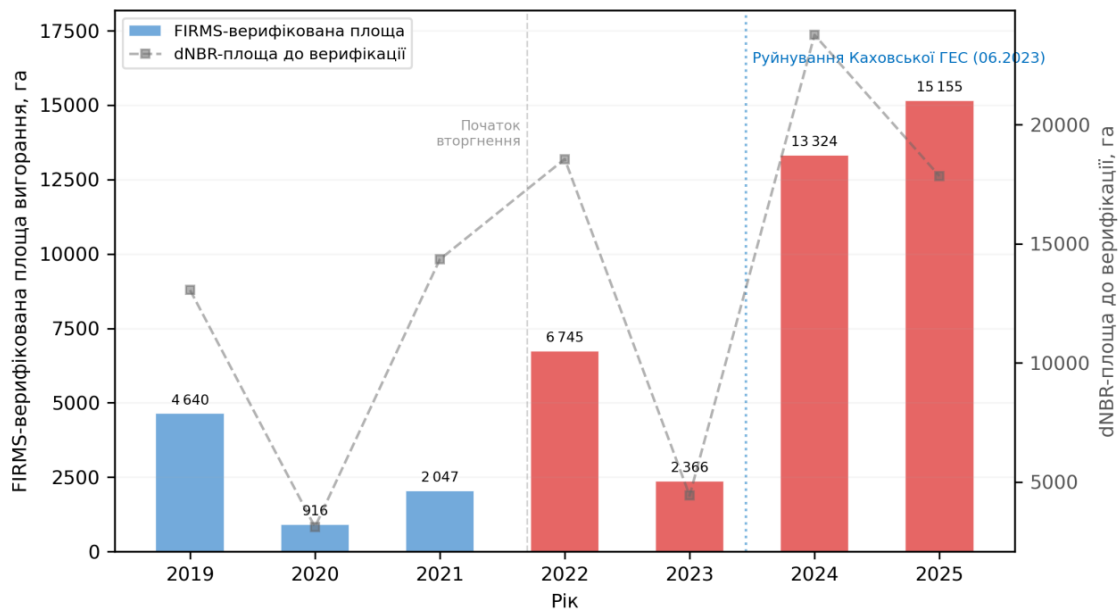
### 3.10. Каскадний вплив війни на прикладі НПП «Нижньодніпровський»

НПП «Нижньодніпровський» є показовим прикладом того, що воєнний вплив на пожежний режим може мати не лише прямий, а й каскадний характер. Після початку повномасштабної війни територія зазнала зростання пожежної активності, а після руйнування Каховської ГЕС у 2023 р. відбулися гідрологічні зміни, що змінили умови накопичення горючої біомаси. Динаміка FIRMS-верифікованої та загальної dNBR-площі для цього об'єкта (рис. 13) узгоджується з припущенням, що подальше осушення окремих заплавних ділянок могло сприяти збільшенню площ вигорання у 2024–2025 рр.; така інтерпретація потребує подальшої польової перевірки.

Сучасні дослідження наслідків руйнування Каховської ГЕС підтверджують, що ця подія спричинила не лише короточасне затоплення нижньої течії Дніпра, а й довготривалу перебудову гідрологічних, геоморфологічних, біогеохімічних і біотичних процесів у межах колишнього водосховища, дельтових комплексів та північно-західної частини Чорного моря. Для інтерпретації

пожежного режиму НПП «Нижньодніпровський» особливо важливими є два наслідки: по-перше, зміна водного режиму заплавних і прибережних біотопів; по-друге, швидке формування нової рослинності на осушених або перезволожених ділянках, що змінює просторовий розподіл горючої фітомаси.<sup>9</sup>

У цьому контексті зростання FIRMS-верифікованої площі вигорання у 2024–2025 рр. не варто пояснювати лише прямими воєнними джерелами займання. Імовірніше, воно відображає каскадну взаємодію кількох чинників: воєнної недоступності території, порушення системи протипожежного реагування, післяаварійної трансформації гідрологічного режиму, мозаїчного осушення заплавних ділянок і накопичення нової трав'яної та чагарникової біомаси. Тому НПП «Нижньодніпровський» доцільно розглядати як окремих приклад комбінованого воєнно-гідрологічного впливу на пожежний режим природоохоронної території.



**Рисунок 13.** Динаміка FIRMS-верифікованої та загальної dNBR-площі вигорання у НПП «Нижньодніпровський» у 2019–2025 рр.

*Джерело: побудовано авторкою за результатами власних розрахунків.*

### 3.11. Синтез результатів

Сукупність отриманих результатів свідчить про зміну пожежного режиму природно-заповідного фонду півдня України у воєнний період. Ця зміна проявляється у зростанні кількості активних вогнищ, збільшенні FIRMS-верифікованих площ вигорання, підвищенні середньої теплової потужності пожеж і розширенні ділянок із середнім, високим та дуже високим ступенем пошкодження рослинності. Найбільш переконливими є результати, де збігаються кілька незалежних

<sup>9</sup> Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N., Oreshchenko A., Constantinescu G., Afanasyev S., Koken M., Osadchyi V., Rhoads B., Tockner K., Monaghan M. T., Schröder B., Nabyvanets J., Wolter C., Lietytska O., van de Koppel J., Magas N., Jähnig S. C., Lakisova V., Trokhymenko G., Venohr M., Komorin V., Stepanenko S., Khilchevskiy V., Domisch S., Blettler M., Gleick P., De Meester L., Grossart H.-P. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387(6739). P. 1181–1186. DOI: 10.1126/science.adn8655; Jiang D., Khokhlov V., Tuchkovenko Y. et al. The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. Article 185. DOI: 10.1038/s43247-025-02153-z; Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., Gleick P. The destruction of the Kakhovka Dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48. P. 631–647. DOI: 10.1080/02508060.2023.2247679; United Nations Environment Programme. Rapid environmental assessment of Kakhovka Dam breach; Ukraine. Nairobi: UNEP, 2023. URL: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43696/Kakhovka\\_Dam\\_Breach\\_Ukraine\\_Assessment.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43696/Kakhovka_Dam_Breach_Ukraine_Assessment.pdf) (дата звернення: 15.05.2026).

ознак: FIRMS-активність, dNBR-пошкодження, просторова концентрація в межах об'єкта та зміна від довоєнного до воєнного періоду.

Додаткові статистичні та річні узагальнення підтверджують, що зміна пожежного режиму не була одномоментною і синхронною для всіх територій. Розподіл потенційних точок зміни за тестом Петтіта вказує на переважне зміщення у воєнний період, особливо наприкінці аналізованого інтервалу, однак ці результати мають індикативний характер через коротку довжину ряду. Річний розподіл вогнищ і частки FIRMS-верифікованого вигорання показує, що піки пожежної активності та відповідність між dNBR-сигналом і активним горінням істотно відрізнялися між об'єктами, що підкреслює необхідність об'єктового, а не лише регіонального аналізу.

Найбільш виразні зміни пов'язані з територіями, де природні фактори пожежної небезпеки поєдналися з воєнними чинниками: обмеженням доступу, відсутністю оперативного гасіння, окупацією, мінною небезпекою та гідрологічними порушеннями. Підконтрольні об'єкти не демонстрували аналогічного системного посилення пожежного навантаження, що підтверджує необхідність урахування воєнного статусу територій під час інтерпретації дистанційних даних.

Методично важливим результатом є підтвердження доцільності інтеграції FIRMS і dNBR. Для степових екосистем спектральна оцінка без верифікації може суттєво завищувати площі вигорання, тоді як FIRMS-маска дозволяє виокремити ділянки, де спектральна зміна має підтвердження активним горінням. Це робить запропонований підхід придатним для масштабування на інші природоохоронні території України, особливо у випадках обмеженого наземного доступу.

## **4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ**

### **4.1. Воєнний статус територій як чинник зміни пожежного режиму**

Отримані результати показують, що пожежне навантаження у воєнний період не розподілялося рівномірно між об'єктами природно-заповідного фонду. Найбільші прирости зосереджені на територіях, де природна пожежна небезпека поєдналася з воєнними обмеженнями: окупацією, мінною небезпекою, обстрілами та відсутністю можливості оперативного гасіння. Така закономірність важлива для оцінки воєнних екологічних збитків, оскільки вказує на необхідність просторового врахування не лише самого факту пожежі, а й режиму доступу до території. Вона також узгоджується з сучасними узагальненнями щодо екологічних наслідків війни в Україні, де пожежі, пошкодження рослинного покриву та порушення функціонування природоохоронних територій розглядаються як окремі компоненти воєнної деградації довкілля.<sup>10</sup>

Водночас на підконтрольних територіях окремі показники могли залишатися стабільними або зменшуватися. Це може бути пов'язано з кращим контролем пожеж, меншим прямим воєнним впливом, зміною господарської активності або обмеженням доступу населення до природних територій. Така неоднорідність не дозволяє пояснювати всі пожежі лише кліматичними або сезонними факторами. Отже, воєнний статус території доцільно розглядати як один із ключових інтерпретаційних чинників, який модифікує природну пожежну небезпеку через доступність, реагування та ймовірність антропогенних джерел займання.

---

<sup>10</sup> UNEP. The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review. Nairobi, 2022; Leal Filho W., Eustachio J. H. P. P., Fedoruk M., Lisovska T. War in Ukraine: an overview of environmental impacts and consequences for human health. *Frontiers in Sustainable Resource Management*. 2024. Vol. 3. DOI: 10.3389/fsrma.2024.1423444; Eklund L., Dinc P. Fires as collateral or means of war: challenges of environmental peacebuilding in the Kurdistan Region of Iraq. *Ecology and Society*. 2024. Vol. 29(3). Article 25. DOI: 10.5751/ES-15316-290325; Zibtsev S., Pasternak V., Vasylyshyn R., Myroniuk V., Sydorenko S., Soshenskyi O. Assessment of carbon emissions due to landscape fires in Ukraine during war in 2022. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2024. Vol. 15(1). P. 126–139. DOI: 10.31548/forest/1.2024.126.

#### **4.2. Методичне значення FIRMS-верифікації dNBR**

Поєднання dNBR і FIRMS має ключове методичне значення для степових і прибережних екосистем. dNBR є чутливим до зміни структури рослинного покриву й традиційно використовується для оцінки тяжкості пожежного ураження, однак у посушливих степових умовах він також реагує на сезонне висихання трав'яної рослинності, зміну вологості ґрунту та оголення поверхні. FIRMS, навпаки, фіксує активне горіння, але не дає повної площі та тяжкості пошкодження. Інтеграція цих джерел дає змогу обмежити площі dNBR тими ділянками, де було підтверджено активну термальну аномалію.<sup>11</sup> Співвідношення dNBR-визначеної та FIRMS-верифікованої площі додатково показує, що відхилення від діагоналі високої відповідності слід трактувати як ознаку можливої переоцінки спектрального сигналу, а не як автоматичне підтвердження реального вигорання.

Запропонований підхід не замінює польову верифікацію, але в умовах воєнного часу створює обґрунтовану основу для пріоритизації подальших обстежень. Його доцільно застосовувати передусім для територій, де доступ відсутній або небезпечний, а потреба у просторово детальній оцінці пошкоджень є високою. Найбільшу цінність методика має як інструмент попереднього дистанційного скринінгу: вона не встановлює остаточну екологічну шкоду, але визначає ділянки, де ймовірність реального пожежного ураження є найвищою.

#### **4.3. Каховський фактор у формуванні пожежного навантаження нижньодніпровських територій**

Результати для НПП «Нижньодніпровський» слід інтерпретувати з урахуванням сучасних досліджень Каховської катастрофи. Після руйнування греблі відбулася різка зміна водного балансу, оголення значних площ дна колишнього водосховища, перебудова руслово-заплавних процесів і запуск швидкої сукцесії нових рослинних угруповань. Польові та дистанційні дослідження засвідчують, що на території колишнього Каховського водосховища протягом першого року після осушення сформувалися різні типи нових біотопів, включно з вербово-тополевіми заростями, болотистими ділянками та площами з розрідженою рослинністю.<sup>12</sup>

Для пожежного моніторингу це має принципове значення: післягідрологічна трансформація території змінює не лише доступність води, а й паливну структуру ландшафту. Частина ділянок може тимчасово залишатися перезволоженою і менш пожежонебезпечною, тоді як інші — швидко переходити до стану сезонно сухих трав'яно-чагарникових комплексів. Саме тому поєднання dNBR і FIRMS є доцільним для таких територій: dNBR показує зміну спектрального стану рослинності, а FIRMS дає незалежне підтвердження факту активного горіння. Водночас інтерпретація результатів потребує обережності, оскільки частина спектральних змін після 2023 р. може бути пов'язана не з

---

<sup>11</sup> Key C. H., Benson N. C. Landscape Assessment. FIREMON. USDA Forest Service, 2006; Miller J. D., Thode A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape. *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 109(1). P. 66–80; Parks S. A., Dillon G. K., Miller C. A new metric for quantifying burn severity. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6(3). P. 1827–1844; NASA FIRMS. VIIRS active fire and thermal anomalies. NASA, 2026; Schroeder W. et al. The New VIIRS 375 m active fire detection data product. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 143. P. 85–96; Llorens R. et al. Soil Burn Severity Assessment Using Sentinel-2 and Radiometric Measurements. *Fire*. 2024. Vol. 7(12). Article 487; Al-hasn R., Almuhammad R. Burned area determination using Sentinel-2 satellite images. *Journal of Forest Science*. 2022. Vol. 68(3). P. 96–106; Chen L. et al. Burned Area Mapping and Fire Severity Assessment of Forest–Grassland Ecosystems Using Time-Series Landsat Imagery. *Fire*. 2025. Vol. 8(9). Article 337.

<sup>12</sup> Shumilova O. et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387(6739). P. 1181–1186; Jiang D. et al. The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. Article 185; Vyshnevskiy V. et al. The destruction of the Kakhovka Dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48. P. 631–647; UNEP. Rapid environmental assessment of Kakhovka Dam breach; Ukraine. Nairobi, 2023.

пожежами, а з осушенням, перезволоженням, замуленням, сукцесією або оголенням ґрунтово-сідиментаційних поверхонь.<sup>13</sup>

#### **4.4. Обмеження дослідження**

Основні обмеження пов'язані з просторовою роздільною здатністю FIRMS VIIRS, хмарністю знімків Sentinel-2, невизначеністю точних причин кожного займання та відсутністю повної наземної перевірки на окупованих або замінованих територіях. Буферна FIRMS-верифікація зменшує ризик хибнопозитивних площ, але не усуває всіх джерел невизначеності, зокрема можливих пропусків малих, короткотривалих або низькоінтенсивних пожеж. Крім того, застосований поріг  $dNBR \geq 0,27$  є робочим порогом для зіставлення об'єктів у межах цього дослідження; для інших регіонів і типів рослинності він потребуватиме калібрування.

Окремим статистичним обмеженням є коротка довжина річного ряду 2019–2025 рр. За такої кількості спостережень результати тестів Манна–Кендалла, Петтітта та непараметричного порівняння періодів слід розглядати не як остаточне доведення довгострокового тренду, а як індикативну оцінку напрямку та моменту зміщення пожежної активності. Надалі ці висновки потребуватимуть перевірки на довшому часовому ряді.

Інтерпретація FRP також потребує обережності. Підвищені значення можуть бути пов'язані з інтенсивнішим горінням або з особливостями джерела займання, але дистанційні дані самі по собі не дозволяють однозначно ідентифікувати конкретну причину кожної пожежі. Тому висновки щодо воєнного походження пожеж базуються не на одиничних термоточках, а на поєднанні просторово-часових закономірностей, статусу територій та характеру змін у порівнянні з довоєнним періодом.

#### **4.5. Практичне значення і можливості масштабування**

Результати мають практичне значення для оцінки воєнних екологічних збитків, планування польових обстежень після деокупації, визначення пріоритетів відновлення та розроблення систем оперативного моніторингу. Для територій із високою часткою важких класів  $dNBR$  першочерговими є польова перевірка стану рослинності, оцінка ґрунтового покриву, виявлення повторних пожеж і аналіз потенціалу природного відновлення. Для територій із низькою часткою FIRMS-верифікації доцільним є додатковий контроль хибнопозитивних  $dNBR$ -сигналів за допомогою часових рядів  $NDVI/NBR$ , візуальної інтерпретації знімків і, за можливості, наземної перевірки. Узагальнення напрямів використання результатів для післявоєнного відновлення (рис. 14) структурує ці практичні пріоритети за блоками моніторингу, верифікації та управлінського реагування.

Методика  $dNBR \times FIRMS$  є відтворюваною, оскільки базується на відкритих супутникових даних та може бути реалізована у Google Earth Engine і Python. Це дозволяє застосовувати її для інших степових, прибережних і важкодоступних природоохоронних територій України, а також для оперативного оновлення оцінок у разі появи нових даних FIRMS NRT. У прикладному вимірі методика може використовуватися як перший рівень дистанційної пріоритизації, після якого мають виконуватися цільові польові обстеження, оцінка біотичних втрат і розроблення заходів відновлення.

---

<sup>13</sup> Kuzemko A. A., Prylutskiy O., Kolomytsev G. et al. Initial stages of revegetation at the bottom of the drained Kakhovka Reservoir (Ukraine): synthesis of field surveys and remote sensing. *Ukrainian Botanical Journal*. 2025. Vol. 82(5). P. 488–505; Didukh Ya. P., Kuzemko A. A., Khodosovtsev O. Ye., Chusova O. O., Borsukevych L. M., Skobel N. O., Mikhailuk T. I., Moysiienko I. I. First year of floodplain forest restoration at the bottom of the former Kakhovka reservoir. *Chornomorski Botanical Journal*. 2024. Vol. 20(3). P. 305–326. DOI: 10.32999/ksu1990-553X/2024-20-3-5; Dzyba A., Kyriienko V. Recovery of Velykyi Luh through ecological restoration of the Kakhovka Reservoir. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2024. Vol. 15(1). P. 25–40. DOI: 10.31548/forest/1.2024.25.

Об'єкт ПЗФ	Статус території	Зміна площі вигорання (воєнний – довоєнний), га/рік	Щорічне вигорання у воєнний період, %	Пріоритет відновлення	Рекомендовані заходи
НПП Нижньодніпровський	Лінія фронту	+6,863	11.7	Критичний	Розмінування, відновлення гідрорежиму заплави
БЗ Асканія-Нова	Окупація	+6,730	26.2	Критичний	Оцінка ґрунту, протипожежні смуги, перезасівання
БЗ Чорноморський	Зона БД	+2,754	3.5	Високий	Моніторинг прибережних екосистем та орнітофауни
РЛП Кінбурнська коса	Лінія фронту	+2,340	13.2	Критичний	Розмінування, протипожежні розриви, лісовідновлення
НПП Кам'янська Січ	Прифронтна	+1,507	18.3	Високий	Контрольовані відпали, NDVI-моніторинг
НПП Олешківські піски	Окупація	+632	5.7	Критичний	Лісовідновлення (30–50 р.), фіксація пісків
НПП Білобережжя Святослава	Зона БД	+615	1.8	Високий	Оцінка лісових масивів, рекультивація
НПП Приазовський	Окупація	+598	2.2	Помірний	Моніторинг степу, контроль інвазивних видів
НПП Джарилгацький	Окупація	+165	2.4	Помірний	Оцінка островних екосистем після деокупації
НПП Великий Луг	Окупація	+107	3.2	Помірний	Моніторинг заплавних екосистем р. Дніпро
РЛП Тилігульський	Підконтрольна	-32	2.8	Стабільний	Штатний моніторинг
РЛП Приінгульський	Підконтрольна	-315	3.5	Стабільний	Штатний моніторинг, контрольовані відпали
НПП Бузький Гард	Підконтрольна	-669	3.5	Стабільний	Штатний моніторинг каньйонних екосистем
ПЗ Єланецький степ	Підконтрольна	-1,087	6.4	Стабільний	Штатний моніторинг, природне відновлення

**Рисунок 14.** Узагальнені напрями використання результатів дистанційного моніторингу для планування післявоєнного відновлення природно-заповідного фонду  
*Джерело: узагальнено авторкою за результатами дослідження.*

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено та апробовано інтегрований підхід до оцінки пожежного навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду півдня України, що поєднує дані активних вогнищ NASA FIRMS VIIRS, спектральну оцінку тяжкості вигорання за Sentinel-2 dNBR та FIRMS-верифікацію dNBR-визначених площ.

2. Установлено, що воєнний період 2022–2025 рр. характеризується посиленням пожежної активності насамперед для природоохоронних територій, пов'язаних із бойовими діями, тимчасовою окупацією або обмеженим доступом. Найбільші прирости FIRMS-верифікованої площі вигорання встановлено для НПП «Нижньодніпровський», БЗ «Асканія-Нова», Чорноморського БЗ та РЛП «Кінбурнська коса». Найбільша кількість пожежних вогнищ і пожежних днів у воєнний період характерна для РЛП «Кінбурнська коса», НПП «Нижньодніпровський», НПП «Білобережжя Святослава» та Чорноморського БЗ.

3. Показано, що зміни пожежного навантаження мають виразну просторову диференціацію: найбільше зростання пов'язане з територіями, що перебували у зоні бойових дій, тимчасової окупації або обмеженого доступу, тоді як підконтрольні об'єкти переважно не демонстрували аналогічного посилення. Індикативні статистичні узагальнення вказують на переважне зміщення потенційних точок зміни пожежного режиму у воєнний період.

4. Доведено методичну необхідність FIRMS-верифікації dNBR для степових, прибережних і заплавних екосистем, де сезонна сенеценція, зміна вологості рослинності та інші спектральні чинники можуть призводити до завищення площі dNBR-визначеного пошкодження. Співвідношення між загальною dNBR-площею та FIRMS-верифікованою площею підтверджує, що найбільш інформативним показником для цього дослідження є саме площа, де спектральний сигнал узгоджується з активним горінням.

5. На прикладі НПП «Нижньодніпровський» встановлено каскадний характер воєнного впливу, коли прямі пожежні наслідки поєднуються з гідрологічними змінами після руйнування Каховської ГЕС, осушенням заплавних ділянок і подальшим накопиченням горючої рослинної маси.

6. Показано придатність дистанційного зондування Землі як перспективного й практично необхідного інструменту попередньої оцінки екологічних наслідків війни для важкодоступних природоохоронних територій. Запропонований підхід рекомендовано використовувати для інших об'єктів природно-заповідного фонду України, оцінки воєнних екологічних збитків і планування післявоєнного відновлення з обов'язковим урахуванням обмежень короткого часового ряду та потреби у подальшій польовій верифікації.