

ЕКОЛОГІЯ І МОНІТОРИНГ

УДК 630.43:630.561.24



<https://doi.org/10.33220/1026-3365.141.2022.95>

О. А. БОРСУК¹, С. Г. СИДОРЕНКО²

МОНІТОРИНГ ПОЖЕЖ У ПРИРОДНИХ КОМПЛЕКСАХ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ І ЗОНИ БЕЗУМОВНОГО (ОБОВ'ЯЗКОВОГО) ВІДСЕЛЕННЯ ПІД ВПЛИВОМ РОСІЙСЬКОЇ АГРЕСІЇ

¹Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник

²Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького

Оцінено кількість і площу пожеж на території Чорнобильської зони відчуження внаслідок ведення бойових дій. Визначено точність різних підходів до моніторингу ландшафтних пожеж засобами ДЗЗ. Показано, що сенсори MODIS спроможні виявити 46 % пожеж, а VIIRS – 69 %. Порівняння площі пожеж різними методами дає підстави вважати, що сервіс RDA від EFFIS фіксує 78 % площі пожеж та є найточнішим засобом моніторингу, але водночас поступається комбінації ручної ідентифікації та визначення площі згарич (MODIS&VIIRS + Sentinel-2 & Landsat 8,9). Упродовж окупації на території зони відчуження ЧАЕС зафіксовано пожежі в природних комплексах на площі близько 13 989,6 га, зокрема 3 489 га – у лісах. Визначено, що середні кількість і площа пожеж збільшилися, порівнюючи з аналогічним періодом минулих років (1994–2021 рр.). Так, кількість пожеж підвищилася від 7,65 до 48 випадків (більше ніж у 6 разів); площа пожеж збільшилася з 26,4 га до 13 989,6 га (у 529,9 разу).

К л ю ч о в і с л о в а : ландшафтні пожежі, лісові пожежі внаслідок війни, зона відчуження ЧАЕС.

Вступ. Уранці 24.02.2022 розпочалося повномасштабне вторгнення Російської Федерації в Україну, що супроводжується інтенсивними військовими діями. Війна негативно впливає на біологічне різноманіття й екосистеми загалом, що підтверджується наслідками десятків війн у країнах Азії, Африки, Близького Сходу та Європи (Dudley et al. 2002, Machlis & Hanson 2008). Територія зони відчуження (ЗВ) ЧАЕС не стала винятком. Унаслідок ведення бойових дій та окупації території (з 24.02.2022 до 01.04.2022), яку було звільнено силами ЗСУ, виявлено значні площі, пошкоджені вогнем. Такі пожежі на радіоактивно забруднених територіях спричиняють великі екологічні ризики не тільки через втрату біорізноманіття, але й через емісію та перенесення радіоактивних речовин із димом (Zibtsev et al. 2015, Borsuk 2019). У зв'язку із цим потрібен постійний моніторинг пожежної ситуації, який став неможливим через військові дії. Під час військових дій прямий доступ до зони впливу значно ускладнюється, а в поєднанні з розмитістю просторового та часового визначення наслідків вчасність і точність їхнього оцінювання стає викликом (Mendez & Valánszki 2021). Незважаючи на деокупацію, доступ для персоналу до території Чорнобильської ЗВ залишається обмеженим, зокрема через небезпеку замінування. Тому огляд пошкоджених вогнем територій і визначення їхніх меж у природі не є можливим. Оскільки з початком вегетаційного періоду наслідки пожеж на перелогах через 1–2 місяці стануть малопомітними, інформація, отримана із супутникових даних, залишається єдиним доступним джерелом моніторингу пожеж та їхніх наслідків.

Мета роботи – виявити можливості моніторингу пожеж засобами дистанційного зондування землі та оцінити кількість і площу пожеж за час окупації території зони відчуження ЧАЕС.

Матеріали й методи. Дослідження проведено протягом березня – квітня 2022 р. на території ЗВ ЧАЕС. У зв'язку з відсутністю доступу до досліджуваної території використано доступні засоби супутникового моніторингу пожеж і дані супутникової зйомки. Наразі дають можливість виявляти пожежі кількох глобальних і регіональних систем, які базуються на виявленні термальних аномалій (Mazzeo et al. 2022). Для виявлення пожеж використовують такі сенсори, як SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager), AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) та VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) (Mazzeo et al. 2022). Точність виявлення пожеж цими сенсорами є доволі високою. Наприклад, достовірність даних для виявлення

пожеж в Італії становила 69,1–94,9 % (Filizzola et al. 2017). У дослідженні використано дані систем, які застосовують сенсори MODIS та VIIRS. Сенсори MODIS із роздільною здатністю 1 км розміщено на супутниках Terra та Aqua. Термальні аномалії визначають згідно з алгоритмом MODIS MOD14/MYD14 Fire and Thermal Anomalies. Сенсори VIIRS мають роздільну здатність 375 м для виявлення термальних аномалій. Дані цих сенсорів обробляють згідно з алгоритмом VNP14IMG.

Використовувати супутникові дані для виявлення пожеж почали в 1980-х роках. Від того часу було значно вдосконалено обладнання та алгоритми виявлення загорянь, що дає змогу отримувати інформацію кілька разів на день (Wooster et al. 2021).

Для виявлення пожеж на території Чорнобильської ЗВ у період окупації використано системи Національного управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (NASA) Fire Information for Resource Management System (FIRMS) та Європейського космічного агентства (ESA) European Forest Fire Information System (EFFIS). Після виявлення пожеж проводили їхню верифікацію за допомогою супутникових даних Sentinel-2 та Landsat 8, 9. У разі відсутності супутникових даних поточні орієнтовні площі пожеж отримували з використанням модуля швидкого оцінювання збитків (RDA – Rapid Damage Assessment) системи EFFIS. Після закінчення горіння виконували пошук та оцифрування периметрів пожеж на знімках Sentinel-2 та Landsat 8, 9 (рис. 1).

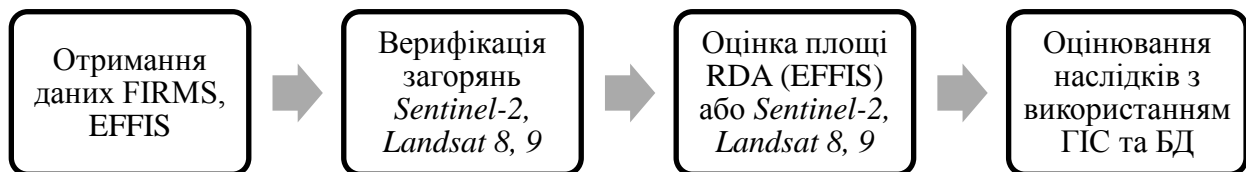


Рис. 1 – Схема отримання та обробки інформації щодо пожеж на території зони відчуження ЧАЕС

Для визначення контурів пожеж використовували знімки Sentinel-2 та Landsat 8, 9 у комбінації каналів SWIR–NIR–RED, що дає змогу візуально виявити території, пошкоджені вогнем, та оцифрувати їх засобами ГІС (рис. 2).

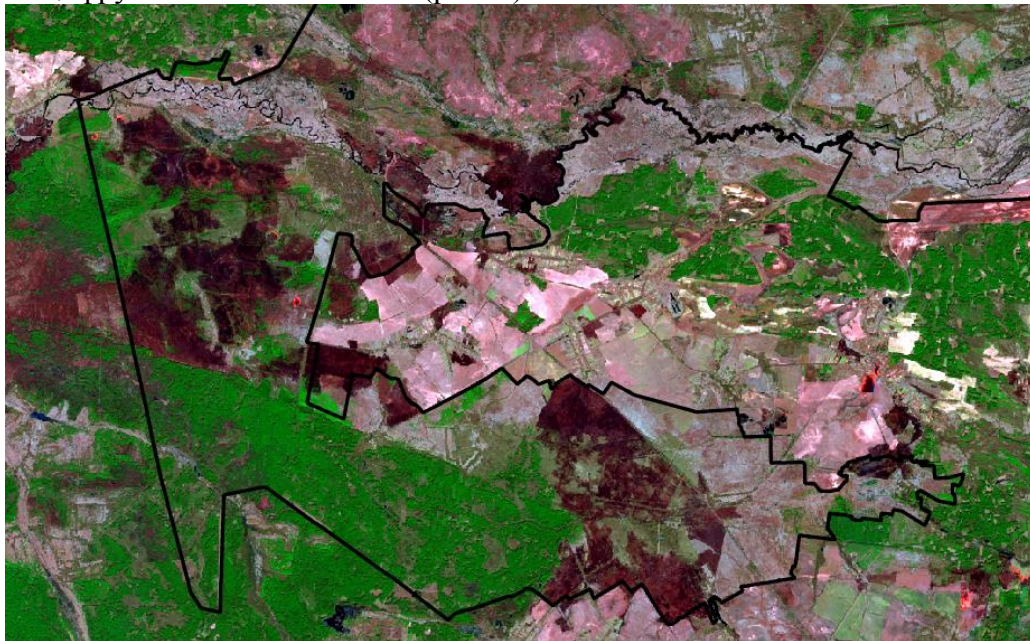


Рис. 2 – Знімок Sentinel-2 у комбінації каналів SWIR–NIR–RED для території Котовського лісництва зони відчуження ЧАЕС за 21.03.2021

Завершальним етапом моніторингу пожеж було оцінювання їхніх орієнтовних наслідків із використанням ГІС та шарів і баз даних із таксаційними характеристиками. Для цього за отриманими в процесі оцифрування контурами пожеж визначено їхні площі. Засобами ГІС

здійснено вибірку виділів, охоплених пожежами, їхнє обрізування до контуру пожежі з подальшим перерахуванням пройденої пожежею площі кожного окремого виділу, що дало змогу доволі точно категоризувати пошкоджені вогнем території. Для виконання цих завдань використано картографічні дані й таксаційні описи державного спеціалізованого підприємства «Північна Пуща», отримані під час проведення базового лісовпорядкування у 2016 р.

Результати та обговорення. В умовах відсутності доступу до території Чорнобильської ЗВта можливості здійснення патрулювання території й використання камер відеонагляду єдиним способом моніторингу пожежної ситуації залишаються супутникові дані. Водночас не всі активні пожежі можна виявити супутниковою зйомкою. Значний вплив на виявлення пожеж мають атмосферні явища, висока хмарність, значна задимленість (Wooster et al. 2021).

Нами проаналізовано кількість термальних аномалій, виявлених сенсорами MODIS та VIIRS на території ЗВ ЧАЕС. Оскільки більшість пожеж тривали менше ніж добу, враховуючи можливість початку пожеж за межами ЗВ та часту хмарність у весняні місяці, для аналізу було відібрано термальні аномалії як у самій ЗВ, так і в буферній зоні 1 км навколо неї. Це дало змогу оцінити можливість виявлення пожеж, які швидко згасали після поширення на територію ЗВ, та визначити дати їхнього виникнення. За побудованими контурами пожеж під час дослідження експертним шляхом визначено їхню кількість, виявлених тим чи іншим сенсором (табл. 1).

Таблиця 1

Особливості виявлення пожеж сенсорами MODIS та VIIRS на території Чорнобильської зони відчуження в період 24.02.2022–01.04.2022

Показник	Тип сенсора	
	MODIS	VIIRS
Кількість осередків пожеж, шт.	48	48
Кількість термальних аномалій, шт.	84	370
Кількість виявлених пожеж, шт.	22	33
Кількість пожеж, що не виявлені, шт.	26	15
Площа пожеж за RDA, га	10 866,3	–
Площа пожеж за даними Sentinel-2, Landsat 8, 9, га	13 989,2	

У процесі дослідження виділено 48 осередків пожеж на території Чорнобильської ЗВ. Засобами ГІС проаналізовано наявність термальних аномалій, виявлених сенсорами MODIS та VIIRS у межах визначених контурів кожної окремої пожежі. Сенсорами MODIS виявлено 46 % пожеж, а VIIRS – 69 %. Виявленими вважали пожежі, в межах контуру яких фіксували хоч одну термальну аномалію. Значний вплив на виявлення загорань має щільна хмарність, що зумовило виявлення лише частини пожеж системами моніторингу за досліджуваній період. Слід зазначити, що за допомогою супутникових даних виявляють найчастіше великі пожежі з тривалим горінням, а чим швидше пожежа згасає, тим меншою є ймовірність її виявлення (Filizzola et al. 2017). Це свідчить про те, що крім зазначених у таблиці 1 пожеж на території Чорнобильської ЗВ могли статися нетривалі пожежі невеликої інтенсивності, виявити які наявними засобами неможливо.

Наступним кроком моніторингу пожеж на території ЗВ ЧАЕС було визначення їхніх периметрів та орієнтовних площ. У зв'язку із затримкою отримання супутникових даних Sentinel-2 та Landsat 8, 9 для поточного інформування можливе використання сервісу RDA від EFFIS, який надає периметри пожеж на основі даних MODIS із їхньою верифікацією. Водночас кращим варіантом є аналіз і порівняння супутникових знімків та оцифрування периметрів пожеж, оскільки RDA може не враховувати ділянки горіння під наметом лісу або давати хибні периметри на ділянках сухоостою, що може бути виявлено експертним шляхом. Проте експертне оцінювання периметра і площ пожеж потребує верифікації в натурі, за можливості з відвідуванням місця горіння чи використанням БПЛА. Порівняння площі пожеж різними шляхами свідчить, що сервіс RDA зафіксував близько 78 % площ пожеж на

території зони відчуження ЧАЕС. Таким чином, RDA «зменшує» реальні площі пожеж на 22,4 %.

Іншим важливим елементом моніторингу є спостереження за розвитком (поведінкою) пожежі задля оцінювання ризиків виникнення особливо великих неконтрольованих пожеж із частотою кілька разів на день (рис. 3).

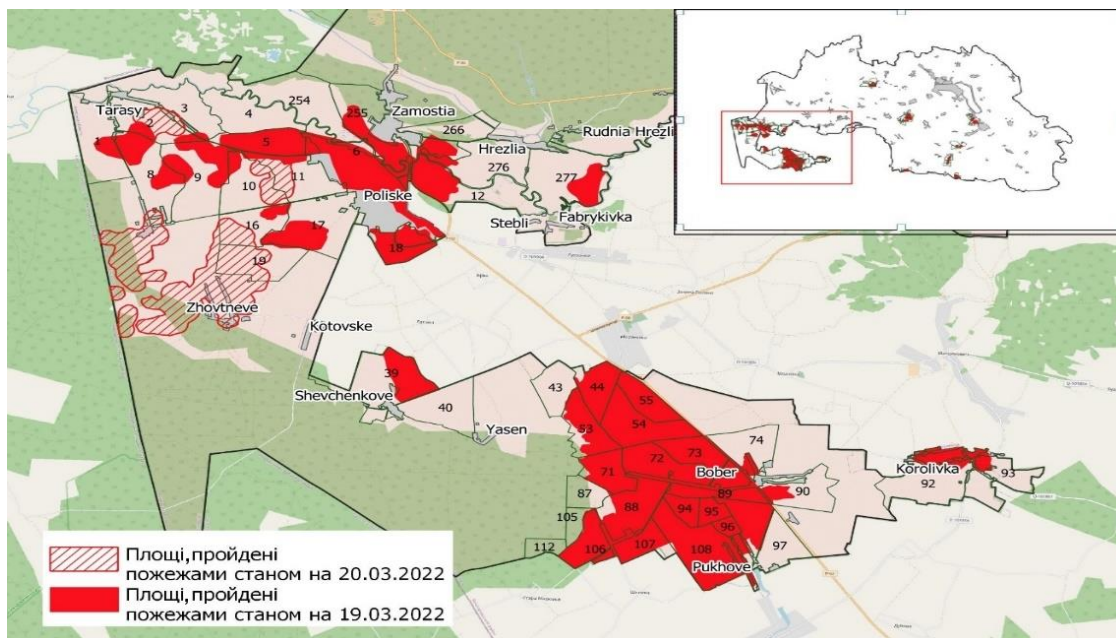


Рис. 3 – Поширення пожежі в природних комплексах Денисовицького і Котовського лісництв упродовж 19–20 березня 2022 р.

За час окупації на території Чорнобильської ЗВ зафіксовано пожежі в природних комплексах і покинутих селах на площі 13 989,59 га. У зв'язку з холодними та вологими погодними умовами пожежі, що виникали внаслідок обстрілів, зазвичай самозгасали. Слід зазначити, що ідентифікували лише великі пожежі, які фіксували супутниковою зйомкою (VIIRS, MODIS) та верифікували за допомогою Sentinel-2 та Landsat 8, 9. Найбільші кількість і площа пожеж були характерні для південно-західної частини зони відчуження ЧАЕС – Котовське лісництво (рис. 4).

Наразі на основі аналізу даних супутникової зйомки (VIIRS, MODIS та їхньої верифікації за допомогою Sentinel-2 та Landsat 8, 9) пожежі охопили понад 8 178 га перелогів і 3 489 га лісів, а також болота, згарища минулих років і покинуті населені пункти (табл. 2). Такий розподіл площ є характерним для весняного періоду на території ЗВ ЧАЕС (Borsuk 2019). Як видно з таблиці 2, найбільша площа пожеж була характерна для перелогів та відкритих ландшафтів (з переважанням трав'яної рослинності), адже рано навесні та навіть взимку цей тип ландшафтів із наявністю горючих матеріалів (травостоїв) становить високу пожежну небезпеку (за належних погодних умов і наявності джерела вогню): травостої здатні висихати до пального стану за кілька годин. Таким чином, практично кожен обстріл потенційно здатен спричинити ландшафтну пожежу, а за сильних поривчастих вітрів, типових для лютого – квітня, такі пожежі швидко поширювалися на значні площі та перекидалися на лісові масиви.

За досліджуваний період на території ЗВ ЧАЕС збільшилися середня кількість та площа пожеж, як порівняти з аналогічним періодом минулих років (24 лютого – 1 квітня за період 1994–2021 рр.). Кількість пожеж збільшилася з 7,65 до 48 випадків (більш ніж у 6 разів); площа пожеж зросла з 26,4 га до 13 989,6 га (тобто збільшилася у 529,9 разу). З огляду на невисоку температуру повітря й доволі високу вологість у лютому – березні 2022 р.

причинами виникнення такої кількості пожеж стали бойові дії та умисні підпали, здійснені окупаційними військами.

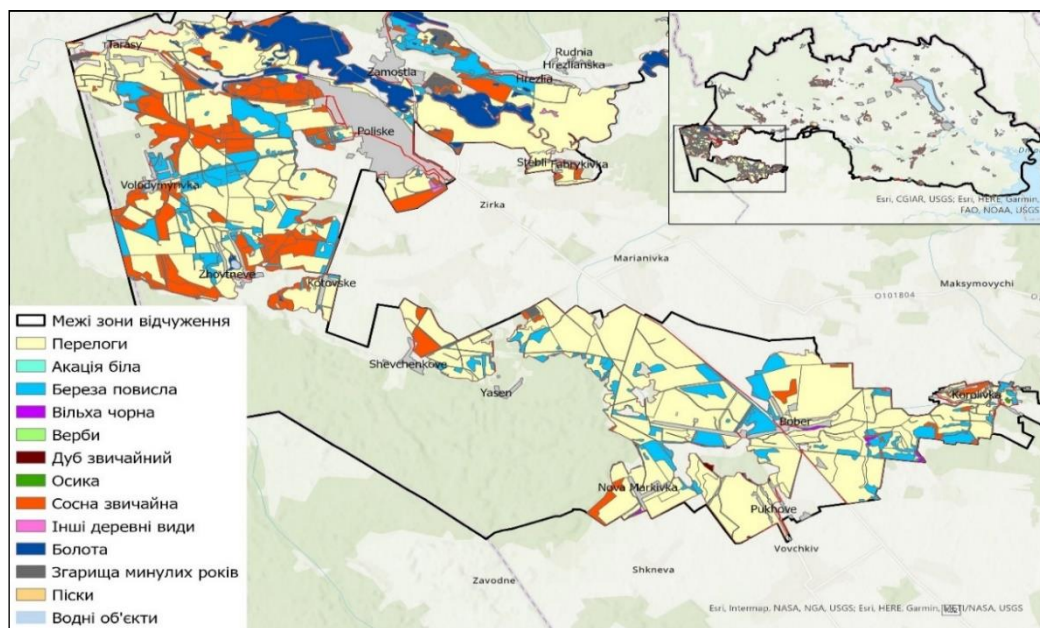


Рис. 4 – Пожежі на території Котовського лісництва за категоріями земель і видами дерев

Таблиця 2

Пожежі на території зони відчуження ЧАЕС за категоріями земель

Категорії земель		Д	Дт	Кр	Кт	Л	П	«Рудий ліс»	Площа, га
Вкриті лісом землі	Перелоги, галявини	938,1	227,9	388,2	6 075,2	525,2	23,3	–	8 177,90
	Березняки	237,9	96,8	19,4	1 111,0	280,7	62,2	–	1 808,00
	Вільшаники	11,4	3,4	12,0	21,7	0,2	–	–	48,70
	Дубняки	3,4	–	12,3	10,1	–	–	–	25,80
	Сосняки	135,9	44,4	137,8	1 206,3	14,6	2,3	–	1 541,30
	Інші деревні види	7,1	13,4	24,6	14,3	5,1	0,8	–	65,30
Незімкнені лісові культури		1,4	–	–	10,7	–	–	–	12,1
Згарища, загиблі насадження, зруби		55,6	–	–	16,1	–	–	–	71,6
Протипожежні розриви		–	12,5	–	–	–	–	–	12,5
Землі під лініями електромережі, газопроводами		1,7	22,9	6,0	54,4	3,3	–	–	88,4
Піски		0,4	–	–	–	–	–	–	0,4
Болота		616,3	2,1	1,8	77,5	37,2	5,3	–	740,1
Водні об'єкти		59,7	9,2	7,4	228,2	14,8	7,1	–	326,2
Покинуті населені пункти		115,9	62,5	31,6	641,7	141,5	–	–	993,2
Інфраструктура		–	–	0,6	–	–	–	–	0,6
Територія в межах ПТЛРВ «Рудий ліс»		–	–	–	–	–	–	77,2	77,2
Загалом		2 184,8	495,1	641,7	9 467,2	1 022,6	101,0	77,2	13 989,6

Примітка. Д – Денисовицьке л-во; Дт – Дитятківське л-во; Кр – Корогодське л-во; Кт – Котовське л-во; Л – Луб'янське л-во; П – Паришівське л-во; «Рудий ліс» – Територія в межах ПТЛРВ «Рудий ліс».

Зважаючи на доволі приблизне просторове розрізнення основних сенсорів, які використовують для ідентифікації термальних аномалій, більшість доступних продуктів орієнтуються на глобальний рівень використання (Woostler et al. 2021, EFFIS 2022, FIRMS 2022). Такі продукти дають змогу досліджувати основні часові та просторові тенденції розподілу пожеж, певною мірою даючи можливість визначити основні пожежні режими території. Більшість дослідників в Україні використовують дані ДЗЗ як допоміжний інструмент отримання інформації щодо історії лісових та інших пожеж (Zibtsev et al. 2015, Borsuk 2019). Водночас сучасні можливості дають змогу використовувати ці методи як самостійне джерело даних, отримання яких не залежить від регіональної політики, доступності території для наземних досліджень тощо. ДЗЗ почали активно використовувати для оцінювання наслідків конфліктів (Dudey et al 2022, Mende & Vonski 2021), попри це самі методики не є цілком випробуваними та мають загальний характер, що робить цю статтю доволі актуальною.

На основі даних моніторингу пожеж сформовано базу ландшафтних пожеж за час активних бойових дій та окупації Чорнобильської ЗВ. Ці дані буде використано для подальшого оцінювання економічних, екологічних та соціальних втрат унаслідок пожеж, що були спричинені агресією РФ на території ЗВ ЧАЕС, разом із втратами від невиконання природними комплексами екосистемних послуг.

Висновки. За відсутності доступу до досліджуваних територій використання супутникових даних є ефективним способом моніторингу пожеж, який надає можливість оцінити їхні наслідки та зберегти життя людей, які зазвичай оцінюють наслідки пожеж наземним способом. Використання методів ДЗЗ під час моніторингу пожеж є найдоступнішим та безкоштовним засобом, хоча й поступається точністю інформації, отриманій з БПЛА чи в результаті наземного оцінювання.

Визначено, що сенсори MODIS здатні виявити 46 % пожеж, а VIIRS – 69 %. Порівняння площ пожеж, отриманих різним шляхом, дає підстави вважати, що сервіс RDA від EFFIS фіксує близько 78 % площ пожеж та є найточнішим засобом для моніторингу пожеж, але водночас поступається комбінації ручної ідентифікації та визначення площ згаріщ у комплексі MODIS&VIIRS + Sentinel-2 & Landsat 8, 9.

За час окупації на території зони відчуження ЧАЕС зафіксовано пожежі в природних комплексах і покинутих селах на площі близько 13 989,6 га, зокрема 3 489 га – у лісах та 8178 га – на перелогах. Розподіл пожеж за категоріями охоплених вогнем земель є характерним для весняного періоду, проте великі кількість та площа пожеж є аномальними.

Кількість пожеж у ЗВ ЧАЕС проти аналогічного періоду (24 лютого – 1 квітня 1994–2021 рр.) збільшилася від 7,65 до 48 випадків (більш ніж у 6 разів); площа пожеж зросла з 26,4 га до 13 989,6 га (збільшилася у 529,9 разу). Ці дані свідчать про значне погіршення пожежної ситуації, спричинене військовими діями.

Зважаючи на достатню точність (особливо для великих та особливо великих пожеж), дистанційний моніторинг за допомогою сервісів EFFIS або за допомогою ручної ідентифікації, описаної у статті, дає змогу здійснювати пожежний моніторинг у зоні бойових дій чи територій, забруднених боєприпасами, без ризику для життя та здоров'я залученого персоналу.

ПОСИЛАННЯ – REFERENCES

Borsuk, O. A. 2019. Comprehensive assessment of the fire hazard of forests in the exclusion zone. PhD thesis. Kyiv, 222 p. (in Ukrainian).

Dudley, J., Ginsberg, J., Plumpton, J., Hart, A., Campos, L. 2002. Effects of war and civil strife on wildlife and wildlife habitats. *Conserv. Biol.*, 16 (2): 319–329.

European Forest Fire Information System EFFIS. 2022. [Electronic resource]. Available at: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/> (accessed 12.04.2022).

Filizzola, C., Corrado, R., Marchese, F., Mazzeo, G., Paciello, R., Pergola, N., Tramutoli, V. 2017. RST-FIRES, an exportable algorithm for early-fire detection and monitoring: Description, implementation, and field validation in the case of the MSG-SEVIRI sensor. *Remote Sens. Environ.*, 192: e2–e25. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.019>

FIRMS, FIRMS Global Fire Map. 2022. [Electronic resource]. Available at: <http://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/firemap/> (accessed 12.04.2022).

Machlis, G. E. and Hanson, T. 2008. Warfare ecology. *BioScience*, 58: 729–736.

Mazzeo, G., De Santis, F., Falconieri, A., Filizzola, C., Lacava, T., Lanorte, A., Marchese, F., Nolè, G., Pergola, N., Pietrapertosa, C. et al. 2022. Integrated satellite system for fire detection and prioritization. *Remote Sens.*, 14: 335. <https://doi.org/10.3390/rs14020335>

Mendez, F. and Valánszki, I. 2021. Environmental armed conflict assessment using satellite imagery. *Journal of Environmental Geography*, 13: 1–14. <https://doi.org/10.2478/jengeo-2020-0007>

Wooster, M. J., Roberts, G. J., Giglio, L., Roy, D. P., Freeborn, P. H., Boschetti, L., Justice, C., Ichoku, C., Schroeder, W., Davies, D., et al. 2021. Satellite remote sensing of active fires: History and current status, applications and future requirements. *Remote Sens. Environ.*, 267: 112694. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112694>

Zibtsev S. V., Goldammer J. G., Robinson S., Borsuk O. A. 2015. Fires in nuclear forests: silent threats to the environment and human security. *Unasylva*, 243/244(66): 40–51.

Borsuk O. A.¹, Sydorenko S. H.²

MONITORING OF WILDFIRES IN NATURAL COMPLEXES OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE AND COMPULSORY RESETTLEMENT ZONE UNDER THE INFLUENCE OF RUSSIAN AGGRESSION

¹*Chernobyl Radiation and Ecological Biosphere Reserve*

²*Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky*

The study estimated the number and total area of wildfires within the Chernobyl Exclusion Zone that occurred due to the hostility and occupation of the territory. The accuracy of different approaches to landscape fire monitoring by remote sensing methods and relevant services (FIRMS and EFFIS) was assessed. The findings showed that MODIS sensors can detect 46% of the fires, while VIIRS 69%. Having compared the burnt area in different ways, we suggest that the RDA (Rapid Damage Assessment) service by EFFIS captures about 78% of the fire area. At the same time, a combination of manual identification with MODIS & VIIRS + Sentinel-2 & Landsat 8,9 still has the highest accuracy. During the occupation, fires were recorded in an area of about 13,989.2 hectares, including 3,489 hectares of forested landscapes. It was found that the average fire number and burnt area increased compared to the same period of previous years (from 24 February to 1 April for the years 1994–2021). Thus, the number of fires increased more than 6 times; the burnt area increased 529.9 times.

Key words: landscape fires, forest fires caused by war, Chernobyl Exclusion Zone.

E-mail: serhii88sido@gmail.com

Одержано редколегією 30.04.2022