

Андрій БАБУШКА¹, Любов БАБІЙ², Борис ЧЕТВЕРІКОВ³, Андрій СЕВРУККафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта liubov.v.babii@lpnu.ua, ¹ <https://orcid.org/0000-0002-2025-8733>,² <https://orcid.org/0000-0002-5772-4865>, ³ <https://orcid.org/0000-0001-8677-1735><https://doi.org/10.23939/istcscap2021.94.035>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ (НА ПРИКЛАДІ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ)

Дистанційне зондування Землі відіграє важливу роль у моніторингу та оцінюванні наслідків лісових пожеж. За допомогою різних методик опрацювання багатоспектральних космічних знімків можна визначати ризик поширення пожежі, виявляти гарячі точки та встановлювати теплові параметри, картографувати уражені території та оцінювати наслідки. Метою роботи є оцінка ступеня тяжкості, пов'язаного з післяпожежною фазою на прикладі лісів Чорнобильської зони відчуження. Задачами є визначення площ спалених територій за різночасовими космічними знімками, отриманими з супутника Sentinel-2 за допомогою нормалізованого коефіцієнта горіння (NBR) та методики контрольованої класифікації. Вхідними даними для дослідження слугували різночасові космічні знімки, отримані з супутника Sentinel-2 до та після пожежі. Знімки отримані з сервісу Copernicus Open Access Hub, і їхня просторова розрізненість становила 10 м для видимих та близького інфрачервоного каналів, та 20 м – для середніх інфрачервоних. Для автоматизованого підрахунку площі територій, пошкоджених пожежею, використано нормалізований індекс горіння (Normalized Burn Ratio (NBR)). Цей індекс призначений для ідентифікації ділянок, де відбувалось активне горіння. Для розрахунків цей індекс використовує близький та середній інфрачервоні канали. Додатково на досліджувану територію здійснено контрольовану класифікацію, при цьому були створені файли сигнатур для кожного класу. За результатами класифікації також обраховані площі територій, пошкоджених пожежею. Наукова новизна полягає в опрацюванні методики використання нормалізованого коефіцієнта горіння (NBR) та контрольованої класифікації для космічних знімків, отриманих до і після пожежі у Чорнобильській зоні відчуження. Практична значущість полягає у тому, що досліджені методи ГС-технологій можуть бути застосовані для виявлення зон та обрахунку площ пошкодженої пожежами рослинності. Ці результати можуть бути використані місцевими організаціями, органами самоврядування та МНС для моніторингу стану та планування відновлення лісових насаджень. Нормалізований індекс горіння дає можливість швидко та ефективно виявити та обчислити площі територій, пошкоджених пожежами, що дозволяє оперативніше оцінити наслідки таких пожеж та оцінити завдані збитки. Нормалізований індекс горіння дозволяє обчислити площу горілого лісу майже в 2 рази точніше, ніж контрольована класифікація. Сам процес обчислення також займає менше часу і не вимагає додаткових процедур (набору сигнатур). Контрольована класифікація в цьому випадку дає гіршу точність, сам процес є тривалішим, але дозволяє визначити площі декількох різних класів.

Ключові слова: Sentinel-2; дані дистанційного зондування; нормалізований індекс горіння; території, пошкоджені пожежею; Чорнобильська зона відчуження; різночасові знімки.

Вступ

Пожежа є одним із найвизначніших факторів порушення в більшості рослинних зон у всьому світі, таких як ліси та луки. Пожежі становлять виклик для управління екосистемами, оскільки вони можуть бути одночасно корисними та шкідливими. При цьому, нинішні оцінки масштабів та наслідків пожеж для рослинності у всьому світі все ще залишаються проблемою. Дистанційне зондування Землі відіграє важливу роль у моніторингу та оцінюванні наслідків лісових пожеж. За допомогою

різних методик опрацювання багатоспектральних космічних знімків можна визначати ризик поширення пожежі, виявляти гарячі точки і встановлювати теплові параметри, картографувати уражені території та оцінювати наслідки.

Визначенням наслідків надзвичайних ситуацій, зокрема пожеж, за космічними чи аерознімками, займається велика кількість вчених в Україні і та у світі. Проаналізуємо, на нашу думку, найвагомішіз робіт за цією тематикою за останні роки.

В статті [Бурштинська та ін. 2018] проведено дослідження лісової пожежі у штаті Арізона, США за космічними знімками. Для дослідження використано знімки, отримані з супутників Landsat 5 (30 травня 2011 р.; 15 червня 2011 р.) та Landsat 7 (7 червня 2011 р.) на ділянку лісу штату Арізона. Для визначення площ пожежі та її змін за період 30.05.2011–15.06.2011 рр. використано методи неконтрольованої та контрольованої класифікації.

Роботи [Hall, et al., 2021; Boschetti, et al., 2019; Ramo et al., 2021] висвітлюють проблематику визначення невеликих ділянок пожеж. Для подібного роду досліджень не підходить використання безкоштовних супутникових знімків середнього просторового розрізнення типу Landsat або Sentinel. Автори пропонують альтернативний підхід для визначення територій, пошкоджених пожежами, який дозволяє перевірити два широкодоступні продукти для знаходження загальної випаленої зони – MCD64A1 та FireCCI51. Зазначається, що ці ресурси так само дають доволі великі похибки досліджень.

В роботах [Rasul, et al., 2021; Ertugrul, et al., 2019; Lasko, 2019] автори визначають динаміку збільшення спалених великих ділянок лісу за певні проміжки часу за допомогою даних дистанційного зондування з ресурсу MCD64A1 500 м. Аналізуються основні фактори, що спричиняють збільшення пожеж у досліджуваних регіонах. Однак, в роботах не проводиться аналіз отриманих кількісних характеристик спалених територій.

Дослідження [Ling, et al., 2015; Padilla, et al., 2015] ґрунтуються на визначенні пошкоджених ділянок за допомогою супутника MODIS. Порівнюються та оцінюються два різні підходи визначення спалених територій: MCD45 та SPM. На основі отриманих результатів зазначається, що підхід SPM більш ефективний для зменшення впливу невисокої роздільної здатності зображень MODIS при картографуванні спаленої ділянки.

В статтях [DaCamara, et al., 2018; Bowman, 2018; Giglio, et al., 2018] описано методологію розмежування спалених ділянок, що використовують чутливу до вогню (V, W) систему індексу, визначену в ближньому/середньому ІЧ-діапазоні. Дані дослідження передбачають більш чітке визначення групи пікселів спалених територій на знімках.

У роботах [Lasaponara and Tucci, 2019; Lanorte, et al., 2015; Stroppiana, et al., 2015]

описана методика визначення спалених територій за допомогою вегетаційних індексів за оптичними знімками та радіолокаційними космічними зображеннями з супутника Sentinel-1. Запропонований тут підхід полягає в тому, що: усереднене за часом співвідношення поляризації VH Sentinel-1 добре використовувати при картографуванні спаленої території, що дає досить точний результат; використання просторової статистики Гетіса–Орда в поєднанні з ISODATA (класифікації без навчання) належним чином охоплює різноманітні рівні класифікації тяжкості пошкоджених територій.

Статті [Pereira, et al., 2018; Kumar & Roy, 2018; Pleniou & Koutsias, 2013] присвячені аналізу спектральних показників при ідентифікації спаленої площі на супутникових знімках OLI / Landsat-8. Індеси для зображень до та після пожежі були розраховані з використанням каналів червоного та ближнього інфрачервоного діапазону: NDVI, MSAVI, SAVI та GEMI, а також діапазонів ближнього та короткохвильового інфрачервоного діапазону: NBR, BAIMmod та MIRBImod. Також була розрахована різниця між індексом до і після пожежі: dNDVI, dMSAVI, dSAVI, dGEMI, dNBR, dBAIMmod та dMIRBImod. З цих індексів автори створили шість різних композицій (RGB), які згодом були сегментовані та класифіковані неконтрольованим способом, а після цього здійснено виділення зони інтересів. Результати цієї класифікації були підтверджені за допомогою контрольних даних, отриманих за допомогою візуальної інтерпретації зображення. Методи продемонстрували хорошу якість класифікації, найкращими методами були індекси dNBR, NBRpost-fire та dMIRBImod у композиті RGB.

Дослідження [Filipponi, 2018; Quintano, et al., 2018] присвячені визначенню спалених територій за допомогою знімків супутника Sentinel-2. Раніше для картографування спалених ділянок в основному використовувались оптичні знімки з високою просторовою розрізненістю. Новий давач MSI на борту супутників Sentinel-2 несе більше спектральної інформації, записаної в спектральній області червоного краю, що відкриває шлях до розвитку нових індексів для картографування спаленої площі. У цих дослідженнях представлений нещодавно розроблений індекс спаленої площі для Sentinel-2 (BAIS2) на основі спектральних каналів Sentinel-2 для виявлення

обгорілих ділянок з просторовою розрізненістю 20 м та конструкція процесора, розроблена для виконання післяпожежного відображення з використанням даних Sentinel-2. Новий індекс протестований на різних дослідженнях в Італії на пожежі 2017 року, і результати показують хорошу ефективність індексу та висвітлюють критичні проблеми, пов'язані з опрацюванням даних Sentinel-2.

За об'єкт наших досліджень обрано Чорнобильську зону відчуження, на території якої відбувались потужні пожежі у 2020 році (рис. 1).



Рис. 1. Фрагмент космічного зображення, отриманого знімальною системою Sentinel-2, представленого в природних природних кольорах. Дата знімання: 12/04/2020

Чорнобильська зона відчуження – це заборонена для вільного доступу територія, що зазнала інтенсивного забруднення довгоживучими радіонуклідами внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Зона встановлена у 1986, після евакуації населення із 30-кілометрової зони навколо станції (рис. 2).

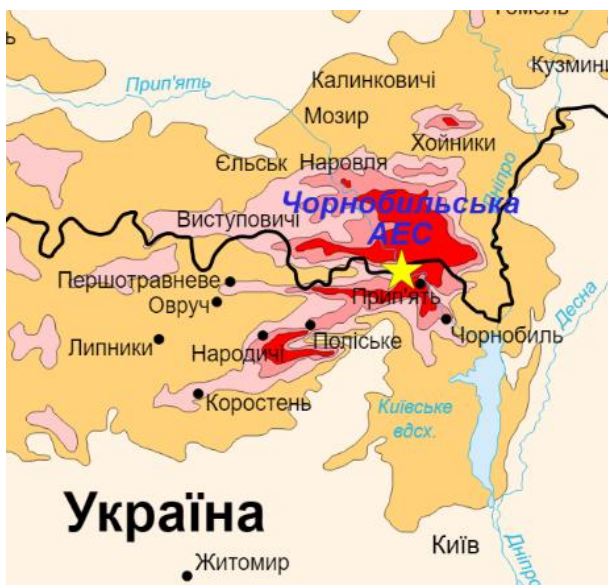


Рис. 2. Територія Чорнобильської зони відчуження

Зона відчуження непридатна для людської активності чи діяльності в секторі господарювання.

Мета і задачі дослідження

Метою цього дослідження є оцінка ступеня тяжкості, пов'язаного з післяпожежною фазою на прикладі лісів Чорнобильської зони відчуження. Задачами дослідження є визначення площ територій, пошкоджених пожежею за різночасовими космічними знімками, отриманими з супутника Sentinel-2 за допомогою нормалізованого коефіцієнта горіння (NBR) та методики контрольованої класифікації.

Методика виконання дослідження

Вхідними даними для дослідження слугували різночасові космічні знімки, отримані з супутника Sentinel-2 до та після пожежі. Знімки отримані з сервісу Copernicus Open Access Hub і їхня просторова розрізненість становила 10 м для видимих та близького інфрачервоного каналів, та 20 м – для середніх інфрачервоних каналів. Перший знімок, отриманий до пожеж в Чорнобильській зоні відчуження 7 квітня 2020 року, який синтезований у природних кольорах, подано на рис. 3, а другий, після пожеж 26 червня 2020 року, – на рис. 4.

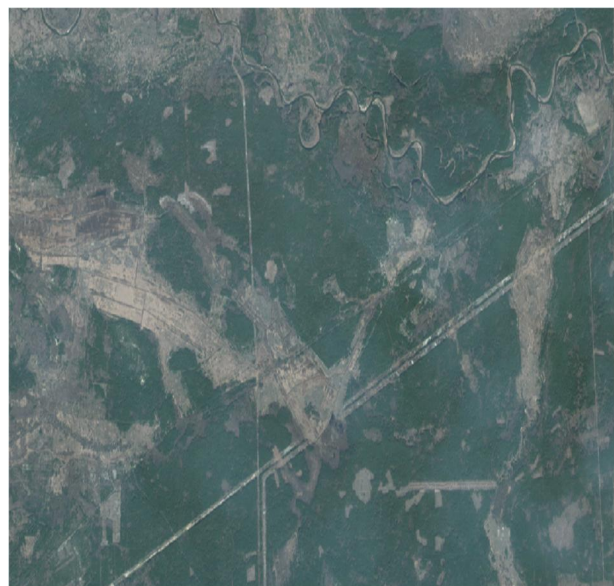


Рис. 3. Фрагмент космічного зображення, отриманого знімальною системою Sentinel-2, поданий в природних кольорах. Дата знімання: 07/04/2020



Рис. 4. Фрагмент космічного зображення, отриманого знімальною системою Sentinel-2, поданий в природних кольорах.
Дата знімання: 26/06/2020

Для досліджень вибрано одну з ділянок в Чорнобильській зоні, на якій активно горів ліс під час масштабних пожеж 2020-го року. Візуальну оцінку наслідків можна виконати за будь-якими зображеннями, зокрема в природних кольорах. Проте, для того, щоб отримати кількісну оцінку, зокрема, порахувати площу вигорілої території лісу, потрібно виконати оцифрування пошкоджених ділянок. Якщо масштаби пожеж є значними, то такий підхід вимагає значних затрат часу. Ускладнює процес ситуація, коли пожежа відбувалась на декількох ділянках, кожен з яких потрібно оцифрувати. Очевидно, що для швидкої і оперативної оцінки наслідків потрібен автоматизований підхід, який скоротить час отримання результатів визначення площ без вагомості втрати точності.

Результати

В цьому дослідженні на тестовій ділянці виконано оцифрування пошкоджених пожежею територій для отримання еталонних значень площ. Цей процес виконували за синтезованим зображенням каналів розрізнення 10 м (рис. 5). В результаті підрахунку площ всіх оцифрованих ділянок встановлено, що площа території, знищеної пожежами, становить 1223 га.

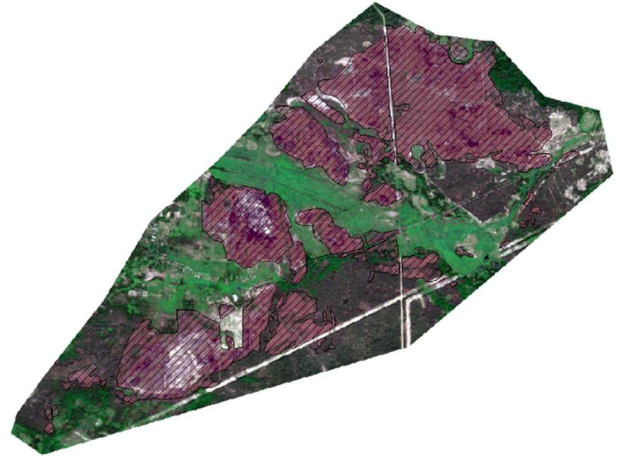


Рис. 5. Оцифровані ділянки після пожеж на досліджуваній території

Розрахунок площі з використанням нормалізованого індексу горіння

Для автоматизованого підрахунку площі територій, пошкоджених пожежею, використано нормалізований індекс горіння (Normalized Burn Ratio (NBR)). Цей індекс призначений для ідентифікації ділянок, де відбувалось активне горіння, і обчислюється за формулою:

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR), \quad (1)$$

де NIR – значення яскравості близького інфрачервоного спектрального каналу; $SWIR$ – значення яскравості середнього інфрачервоного спектрального каналу.

Для розрахунків цей індекс використовує близький та середній інфрачервоні канали.

На рис. 6 подано розраховані індекси за зображеннями до (а) та після (б) пожеж відповідно.

Для розрахунку площ побудовано різницеве зображення з отриманими індексами та здійснено перекласифікацію згідно з табл. 1.

Після розрахунку площ всіх класів (рівнів тяжкості) обчислено площу класів від низького до високого рівнів. Тобто класи об'єднали для отримання єдиного значення площі територій, пошкоджених пожежею. Площа вигорілої з різним ступенем тяжкості території становить 1141 га. Різниця еталонної та обчисленої площі становить 82 га, або 6,7 % від еталонної площі.

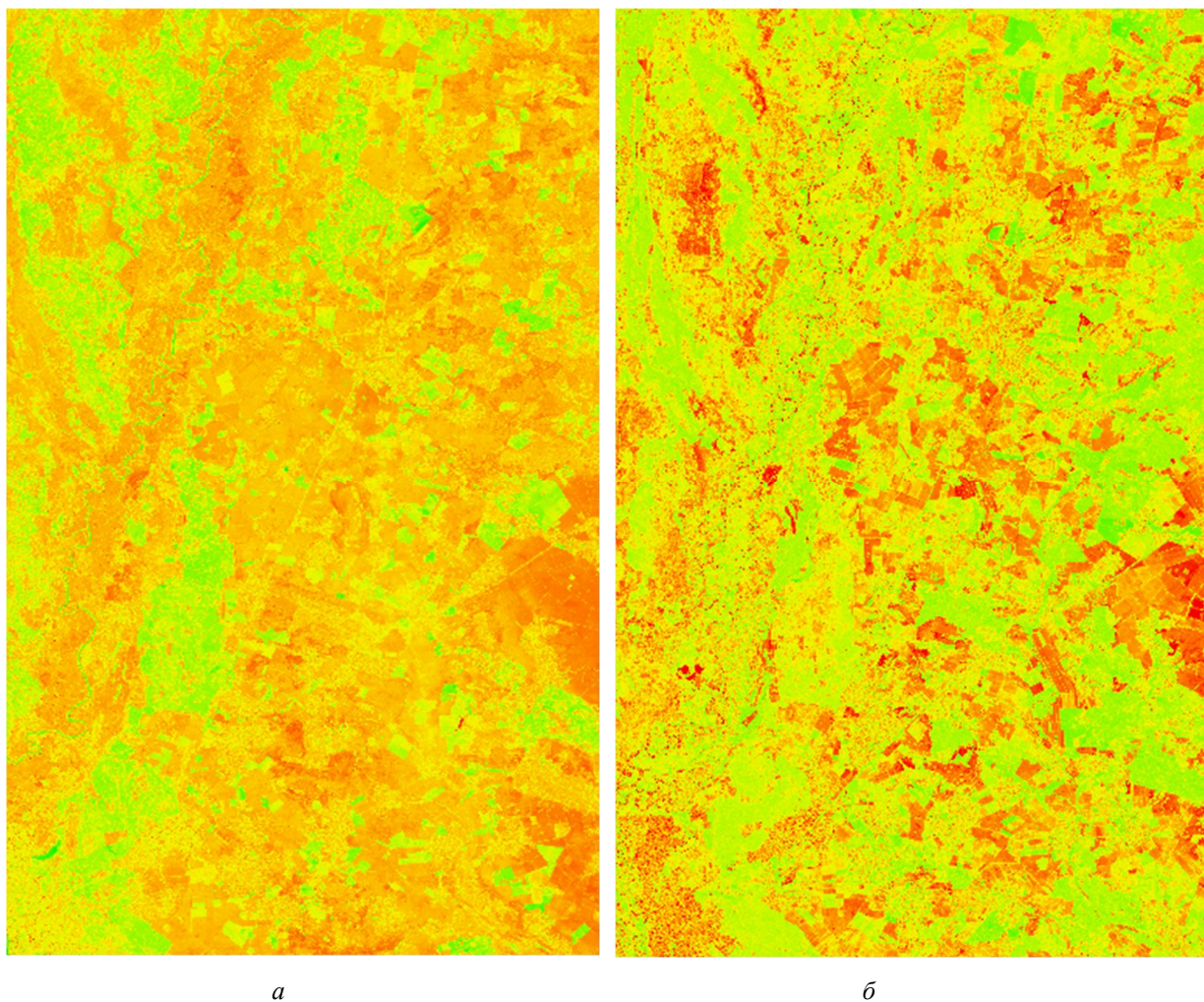





Рис. 6. Розраховані нормалізовані індекси горіння на фрагмент досліджуваної території до (а) та після (б) пожежі

Таблиця 1

Рівні тяжкості горіння, які застосовували для перекласифікації різницевого зображення

	Рівень тяжкості	Діапазон dNBR (масштабований до 10 ³)	Діапазон dNBR (не масштабований)
	Посилене відростання, високе (після пожежі)	-500 до -251	-0,500 до -0,251
	Посилене відростання, низьке (після пожежі)	-250 до -101	-0,250 до -0,101
	Негоріла територія	-100 до +99	-0,100 до +0,99
	Низька важкість	+100 до +269	+0,100 до +0,269
	Середнь-низька ступінь важкості	+270 до +439	+0,270 до +0,439
	Середнь-висока ступінь важкості	+440 до +659	+0,440 до 0,659
	Висока важкість	+660 до +1300	+0,660 до +1,300

Розрахунок площі з використанням методу контрольованої класифікації

Додатково на досліджувану територію здійснено контрольовану класифікацію. Такий метод вважається одним із найкращих автоматизованих

методів для отримання площ, проте не позбавлений недоліків. Зокрема, спостерігається сильна залежність між кількістю, розмірами і місцями вибору сигнатур, та отриманими площами. Крім того, для покращення результатів класифікації

часто застосовують пост-опрацювання результатів. Всі ці процедури ускладнюють процес класифікації, що призводить до більших затрат часу на виконання завдання. Перевагою є те, що такий підхід є універсальним і дає змогу визначати площі різнотипних об'єктів.

Для здійснення класифікації необхідно створити файли сигнатур для кожного класу. Враховуючи те, що на досліджуваній території переважає ліс з окремими відкритими ділянками лугової рослинності, сигнатури вибирали для трьох класів – вигорілий ліс, дороги (які присутні на знімку) та інші об'єкти. Останній клас складається як із здорового (не пошкодженого) лісу так і з лугової рослинності. Оскільки основною метою класифікації було отримати площу вигорілого лісу, то класифікувати окремо ці групи було недоцільно. Суттєво вплинути на точність класифікації таке розділення не повинно.

Сигнатури вибирали в декількох місцях для отримання кращих результатів класифікації. Розмір сигнатур становив не менше 10×10 пікселів. Приклад вибору сигнатур для класу вигорілого лісу подано на рис. 7.



Рис. 7. Приклад вибору сигнатур для класу вигорілого лісу

Аналогічні дії виконали для класів доріг та інших об'єктів. Після збереження файлів сигнатур здійснено контрольовану класифікацію знімку на ділянку досліджень. Результати класифікації подано на рис. 8.

Порівнюючи результати класифікації з оцифрованими ділянками, можна зробити висновок, що присутнє деяке перетікання пікселів між класом “дороги” та іншими “об’єктами”, що для наших досліджень не було суттєвим. Площа вигорілого лісу згідно з класифікацією становить 1076 га.

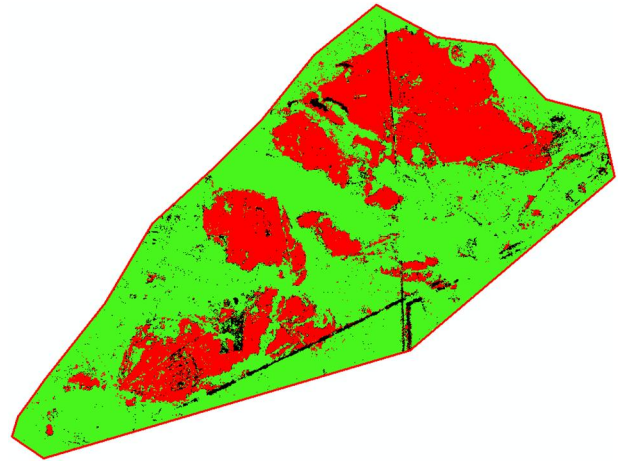


Рис. 8. Класифіковане зображення досліджуваної ділянки

Результати класифікації можна дещо покращити, якщо застосувати інструмент MajorityFilter. Він дозволяє позбутись окремих вкраплень пікселів одного класу всередині іншого. Опрацьоване таким чином зображення подано на рис. 9. Площа вигорілого лісу після такого опрацювання становила 1082 га.

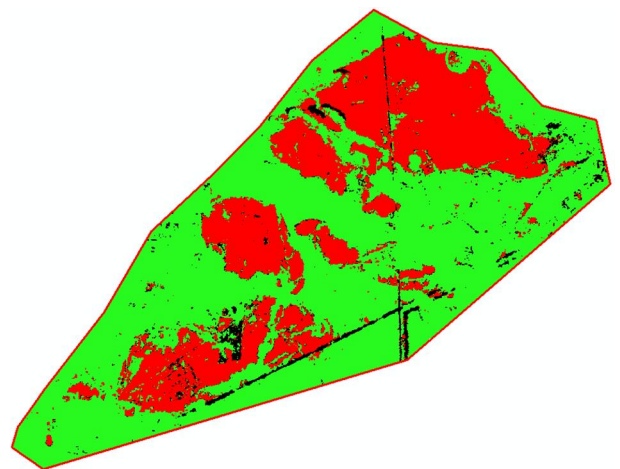


Рис. 9. Класифіковане зображення досліджуваної ділянки після застосування інструменту MajorityFilter

У табл. 2 подано площі вигорілого лісу, обчислені за нормалізованим індексом горіння та контрольованою класифікацією. Також подано їхні різниці з еталонною площею.

З табл. 2 можна зробити висновок, що нормалізований індекс горіння дозволяє обчислити площу горілого лісу майже в 2 рази точніше, ніж контрольована класифікація. Сам процес обчислення також займає менше часу і не вимагає

додаткових процедур (набору сигнатур). Результати контрольованої класифікації можуть дещо змінитись, якщо класифікувати зображення з іншим набором каналів. Покращити результати

класифікації можна за рахунок пост-опрацювання даних. Також при використанні цього методу інформацію можна отримати одразу про декілька класів, а не тільки про вигорілий ліс.

Таблиця 2

Підсумкова таблиця різниць площ вигорілого лісу, обчислених за нормалізованим індексом горіння та контрольованою класифікацією

	Обчислена площа, га	Еталонна площа, га	Різниця, га	Різниця, %
<i>Нормалізований індекс горіння</i>	1141	1223	82	6,7
<i>Контрольована класифікація</i>	1082	1223	141	11,5

Наукова новизна та практична значущість

Наукова новизна полягає в опрацюванні методики використання нормалізованого коефіцієнта горіння (NBR) та контрольованої класифікації для космічних знімків, отриманих до і після пожежі у Чорнобильській зоні відчуження. Практична значущість полягає у тому, що досліджені методи ГС-технологій можуть бути застосовані для виявлення зон та обрахунку площ пошкодженої пожежами рослинності. Ці результати можуть бути використані місцевими організаціями, органами самоврядування і МНС для моніторингу стану та планування відновлення лісових насаджень.

Висновки

Використання дистанційних даних високої періодичності та наявність додаткових каналів знімальних систем значно розширює коло завдань, які можна вирішувати з їх використанням.

Нормалізований індекс горіння дає змогу швидко й ефективно виявити та обчислити площі територій, пошкоджених пожежами, що дозволяє оперативно оцінити наслідки таких пожеж і оцінити завдані збитки.

Встановлено, що на досліджуваній ділянці точність обчислення площ з використанням нормалізованого індексу горіння становить 6,7 % від еталонної площі, що є достатнім для такого типу завдань.

Контрольована класифікація в цьому випадку дає гіршу точність (11,5 %), сам процес є тривалішим, але дозволяє визначити площі декількох різних класів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бурштинська Х., Денис Ю., Поліщук Б., Тимчишин М. Моніторинг лісових пожеж за космічними знінками середнього розрізнення (на прикладі штату Арізона, США) *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 2018, 1(35), С. 179–184.
- Boschetti, L., Roy, D. P., Giglio, L., Huang, H., Zubkova, M. & Humber, M. L. (2019). Global validation of the collection 6 MODIS burned area product. *Remote Sensing Environments*, Vol. 235, 111490. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111490>.
- Bowman, D. (2018). Wildfire science is at a loss for comprehensive data. *Nature*. 560:7. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05840-4>.
- DaCamara, C., Libonati, R., Pinto, M. & Hurduc, A. (2018). Near- and Middle-Infrared Monitoring of Burned Areas from Space. *Satellite Information Classification and Interpretation*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82444>.
- Ertugrul, M., Ozel, H. B., Varol, T., Cetin, M. & Sevik, H. (2019). Investigation of the relationship between burned areas and climate factors in large forest fires in the Canakkale region. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191 (12), 737. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7946-6>.
- Filippini, F. (2018). BAIS2: Burned Area Index for Sentinel-2. *Proceedings*, 2 (7), 364. <https://doi.org/10.3390/eers-2-05177>.
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Humber, M. L. & Justice, CO. (2018). The collection 6 MODIS burned

- area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*. 217, 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>.
- Hall, J., Argueta, F. & Giglio, L. (2021). Validation of MCD64A1 and FireCCI51 cropland burned area mapping in Ukraine. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, No 102, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102443>.
- Kumar, S. S. & Roy, D. P. (2018). Global operational land imager Landsat-8 reflectance-based active fire detection algorithm. *International Journal of Digital Earth, Abingdon*, Vol. 11, No 2, 154–178. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1391341>.
- Lanorte A., Lasaponara R., Lovallo M., and Telesca, L. (2015). Fisher-Shannon information plane analysis of SPOT/VEGETATION normalized difference vegetation index (NDVI) time series to characterize vegetation recovery after fire disturbance. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 26, 441–446. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.008>.
- Lasaponara, R. and Tucci, B. (2019). Identification of Burned Areas and Severity Using SAR Sentinel-1. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 16. No. 6, 917–921. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2888641>.
- Lasko, K. (2019). Incorporating Sentinel-1 SAR imagery with the MODIS MCD64A1 burned area product to improve burn date estimates and reduce burn date uncertainty in wildland fire mapping Incorporating Sentinel-1 SAR imagery with the MODIS. *Geocarto International*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1608592>.
- Ling, F., Du, Y., Zhang, Y., Li, X. & Xiao, F. (2015). Burned-Area Mapping at the subpixel scale with MODIS Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. Vol. 12, no. 9, 1963–1967. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2441135>.
- Padilla, M., Stehman, S. V., Ramo, R., Corti, D., Hantson, S., Oliva, P. & Chuvieco, E. (2015). Comparing the accuracies of remote sensing global burned area products using stratified random sampling and estimation. *Remote sensing of environment*, 160, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.005>.
- Pereira. I. M. S. de Carvalho, E. V., Batista, A. C., Machado, I. E. S., Tavares, M. E. F. & Giongo, M. (2018). Identification of burned areas by special index in a cerrado region of the state of tocantins, Brazil. *Floresta*, 48(4), 553–562. <https://doi.org/10.5380/rf.v48i4.57362>.
- Pleniou, M. & Koutsias, N. (2013). Sensitivity of spectral reflectance values to different burn and vegetation ratios: A multi- scale approach applied in a fire affected area. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam*. Vol. 79, 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.016>.
- Quintano, C.; Fernandez-Manso, A.; Fernandez-Manso, O. (2018). Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 64, 221–225. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.014>.
- Ramo, R., Roteta, E., Bistinas, I., Van Wees, D., Bastarrika, A., Chuvieco, E. & Van der Werf, G. R. (2021). African burned area and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse resolution satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118 (9). <https://doi.org/10.1073/pnas.2011160118>, 2021.
- Rasul, A., Ibrahim, G. R. F., Hameed, H. M. & Tansey, K. (2021). A trend of increasing burned areas in Iraq from 2001 to 2019. *Environ. Dev. Sustain* 23, 5739–5755. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00842-7>.
- Stroppiana, D., Azar, R., Calò, F., Pepe, A., Imperatore, P., Boschetti, M. & Lanari, R. (2015). Integration of optical and SAR data for burned area mapping in Mediterranean Regions. *Remote Sensing*, 7(2), 1320–1345.

Andriy BABUSHKA¹, Lyubov BABIY², Borys CHETVERIKOV³, Andriy SEVRUK⁴

^{1,2,3,4}Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: liubov.v.babii@lpnu.ua, ¹ <https://orcid.org/0000-0002-2025-8733>,

² <https://orcid.org/0000-0002-5772-4865>, ³ <https://orcid.org/0000-0001-8677-1735>

RESEARCH OF FOREST FIRES USING REMOTE SENSING DATA (ON THE EXAMPLE OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE)

Earth Remote sensing and using the satellite images play an important role when monitoring the effects of forest fires and assessing damage. Applying different methods of multispectral space images processing, we can determine the risk of fire distribution, define hot spots and determine thermal parameters, mapping the damaged areas and assess

the consequences of fire. The purpose of the work is assessment the severity connected with the post-fire period on the example of the forests in the Chernobyl Exclusion Zone. The tasks of the study are to define the area of burned zones using space images of different time which were obtained from the Sentinel-2 satellite applying the method of a normalized burn ratio (NBR) and method of supervised classification. The input data for the study were space images taken from the Sentinel-2 satellite before and after the fire. Copernicus Open Access Hub service is a source of images. Spatial resolution is 10 m for visible and near infrared bands of images, and 20 m for medium infrared bands of images. We used method of Normalized Burn Ratio (NBR) and automatically calculated the area which were damaged with fire. Using this index we were able to identify areas of zones after active combustion. This index uses near and middle infrared bands for the calculations. In addition, a supervised classification was performed on the study area, and signature files were created for each class. According to the results of the classification, the areas of the territories damaged by the fire were also calculated. The scientific novelty relates to application of a method of using the normalized combustion coefficient (NBR) and supervised classification for space images obtained before and after the fire in the Chernobyl Exclusion Zone. The practical significance lies in the fact that the studied methods of GIS technologies can be used to identify territories and calculate the areas of vegetation damaged by fires. These results can be used by local organizations, local governments and the Ministry of Emergencies to monitor the condition and to plan reforestation. The normalized burned ratio (NBR) gives possibility efficiently and operatively to define and calculate the area which were damaged by fires, that gives possibility operatively assess the consequences of such fires and estimate the damage. The normalized burned ratio allows to calculate the area of burned forest almost 2 times more accurately than the supervised classification. The calculation process itself also takes less time and does not require additional procedures (set of signatures). Supervised classification in this case gives worse accuracy, the process itself is longer, but allows you to determine the area of several different classes.

Key words: Sentinel-2, Remote Sensing Data, NBR, burned area, Chernobyl Exclusion Zone, different time images

Надійшла 15.10.2021 р.