

О. Г. Тищенко¹, П. В. Півовар², Н. М. Цидик¹

¹Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

²Поліській національний університет, бульв. Старий, 7, Житомир, 10008, Україна

Оцінка впливу наслідків природних пожеж на лісові екосистеми за даними космічного знімання і таксаційного обстеження лісових насаджень

Ключові слова:

структура рослинності,
лісові пожежі,
дистанційне зондування Землі,
геоінформаційні технології,
NDVI,
NBR,
deltaNBR

Представлено структурні особливості рослинних угруповань у зоні забруднення радіонуклідами, які зазнали впливу масштабних лісових пожеж. З використанням даних космічного знімання Sentinel 2, а також даних лісовпорядкування визначено категорії та класи рослинності. Наведено приклади тематичних карт, що показують ступінь впливу пожеж на хвойні, листяні, мішані лісові екосистеми та ділянки з мозаїчним рослинним покривом. На територіях, що постраждали від пожежі, рослинність була поділена за ступенем пошкодження лісу на такі категорії: сильно вигорілий ліс (згарище), вигорілий з невеликими ділянками вегетуючих дерев (рідколісся), пожежа в підстилці (низові пожежі в лісі) — сильна пожежа, середня пожежа, слабка пожежа. Розглянуто статистичні показники NDVI, NBR та deltaNBR для визначених категорій пожеж у рослинних угрупованнях.

Вступ

Важливим етапом у створенні інформаційної основи в оцінці наслідків пожежі на лісові екосистеми був збір та накопичення первинних даних космічного знімання і наземних обстежень деревної рослинності на ділянках, пройдених пожежею в зоні відчуження та території природного заповідника «Древлянський», що розташовані на забрудненій радіонуклідами території. Наступним завданням було відпрацювання технології геоінформаційного аналізу з використанням комплексу даних дистанційного зондування, а також даних про структуру лісових екосистем та характерні для них лісорослинні умови. Такі інформаційні матеріали дали змогу провести класифікацію даних та картографувати наслідки лісових пожеж, що відбувалися у визначені для дослідження періоди, починаючи з 2015 р. Створені

тематичні карти використовувалися як картографічні моделі, що відображають структуру, стан та зміну природних екосистем під дією несприятливих зовнішніх факторів. Вивчення ушкоджених ділянок лісу та оцінка впливу лісових пожеж на рослинність за територією дослідження було проведено з використанням даних космічного знімання супутника Sentinel 2. Підготовку картографічних даних — створення контрастних кольорових синтезованих зображень за комбінацією спектральних діапазонів супутника; розрахунок вегетаційних індексів; систематизацію вхідної інформації, а також формування похідних інформаційних шарів та їхній аналіз — проведено з використанням пакета ArcGIS та інших картографічних програмних додатків.

У рамках укладеної в червні 2023 р. угоди про співробітництво між Інститутом проблем безпеки атомних електростанцій НАН України та Поліським національним університетом, яка передбачала вза-

ємний обмін даними спостережень і результатами наукових досліджень у сфері впливу лісових пожеж та інших факторів на стан забруднених радіонуклідами екосистем Українського Полісся, отримано дані супутника Sentinel 2 за 2015–2017 рр. Ця інформація, а також та, що доступна через Sentinel Hub за проектом Copernicus, організованим за ініціативи Європейського агентства, дала змогу аналізувати стан та виявляти зміни рослинного покриву під впливом негативних явищ у навколишньому середовищі.

Характеристика вхідних даних космічного знімання

Дані супутникових каналів різних спектральних діапазонів являють собою чорно-біле растрове зображення у форматі geo-tiff, яке було використано з метою створити комбінацію каналів і, таким чином, отримати контрастне кольорове зображення, а також провести розрахунок вегетаційних індексів. Отримані після обробки даних картографічні шари містять ознаки для ідентифікації структури, стану та змін на підстильній поверхні Землі. Точність карти структури та стану рослинності визначається просторовим розрізненням вхідних даних дистанційного зондування. На цей час оптимальним джерелом інформації за доступністю та просторовим розрізненням є дані супутника Sentinel 2, запущеного на орбіту з 2015 р. Він має 13 каналів у спек-

трах видимого та інфрачервоного діапазонів електромагнітного випромінювання, що надходить від поверхні Землі. Характеристики каналів супутника наведено в табл. 1. Інформаційні продукти супутника — це шари даних, геоприв'язані та сформовані в географічній проекції UTM/WGS84 projection. Практичний досвід застосування даних космічного знімання показав, що аналіз рослинного покриву найбільш ефективно проводити з використанням червоного (RED), ближнього інфрачервоного (NIR) або видимого і ближнього інфрачервоного (VNIR) та короткого інфрачервоного (SWIR) діапазонів супутника Sentinel 2 [1, 2, 3].

За даними радіометричних вимірювань NASA був складений перелік пожеж, унаслідок яких ушкоджено великі за площею ділянки лісу в період 2015–2022 рр. [4] для радіаційно забрудненої території зони відчуження та природного заповідника «Древлянський», розташованого в зоні безумовного відселення. У результаті були сформовані набори вхідних даних інформаційних продуктів супутника Sentinel 2, придатних для визначення контурів осередків пожеж і ушкодженого внаслідок впливу вогню рослинного покриву, також були зібрані дані, що характеризують рослинність до моменту пожежі.

Інформаційні продукти супутника Sentinel 2 розбиті на частини площею 100 км² і мають спеціальні позначення сцен — Tile. Чотири сцени супутникових даних забезпечують необхідну інформацію по

Таблиця 1. Параметри каналів у інформаційних продуктах супутника Sentinel 2

Номер каналу	Назва каналу	Центральна лінія спектрального діапазону, нм	Просторове розрізнення, м
B02	BLUE	490	10
B03	GREEN	560	10
B04	RED	665	10
B08	Near-infrared (NIR)	842	10
B05	Visible and Near Infrared (VNIR) Red edge	705	20
B06	Visible and Near Infrared (VNIR) (NIR)	740	20
B07	Visible and Near Infrared (VNIR)	783	20
B08A	Visible and Near Infrared (VNIR)	865	20
B11	short-wave infrared (SWIR)	1610	20
B12	short-wave infrared (SWIR)	2190	20
B01	Ultra Blue (Coastal and Aerosol)	443	60
B09	Short Wave Infrared (SWIR)	945	60
B10	Short Wave Infrared (SWIR)	1375	60

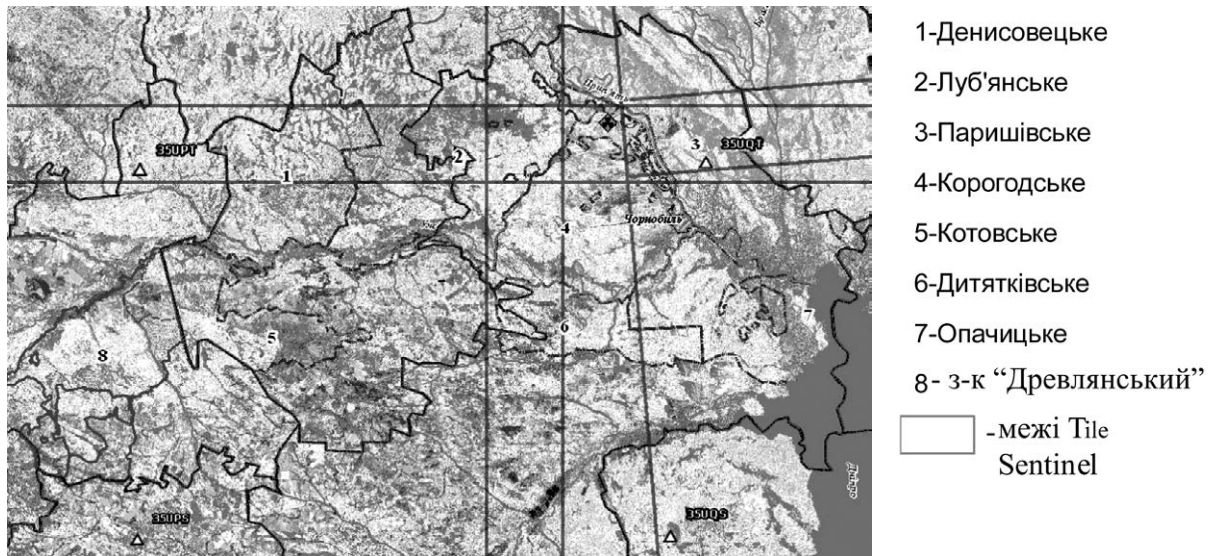


Рис. 1. Територія дослідження впливу пожеж на рослинність у зоні радіоактивного забруднення на мультиспектральному знімку Sentinel 2:
35UPT; 35UQT; 35UPS; 35UQS — позначення сцен даних космічного знімання

лісництвах зони відчуження та територію заповідника «Древлянський». На рис. 1 показано позначення відповідних сцен супутникових даних для території дослідження.

З метою аналізу пожеж та їхнього впливу на рослинний покрив за період 2015–2016 рр. були сформовані набори вхідних растрових та похідних від них інформаційних матеріалів у геопросторових базах даних формату *.gdb (рис. 2). Такий формат даних необхідний для проведення геопросторового аналізу за допомогою інструментарію ArcGIS.

На рис. 3 наведено проект складу бази даних у форматі *.gdb, яку необхідно наповнювати інформацією для проведення оцінки стану лісових екосистем, визначення запасів фітокомпонентів у лісових екосистемах та потенціалу відновлення деревостанів після ушкодження від пожежі.

Геоінформаційні методи для аналізу стану рослинного покриття та його динаміки на досліджуваній території

Підготовка та систематизація інформації про стан лісових екосистем та їхньої трансформації після пожежі проводилися з використанням методів геоінформаційного аналізу за підготовленим алгоритмом, що передбачав підготовку й аналіз растрових даних космічного знімання з подальшою конвертацією у формат дискретних цифрових даних, а також створення векторних картографічних шарів [6]. Метою

дослідження було визначення зміни у структурі рослинного покриття, виявлення осередків ушкодженої рослинності різного ступеня, а також ділянок із неушкодженими здоровими рослинами. Осередки вегетуючих деревостанів створюють сприятливі умови для відновлення лісових екосистем після ушкодження.

Алгоритм використання даних космічного знімання супутника Sentinel 2 з урахуванням часових термінів проходження пожеж має такі кроки:

1. Підготовка діапазонів спектральних даних супутника: растрового зображення комбінації каналів з метою визначення структури рослинного покриття до та після ушкодження. Технологія створення контрастного зображення комбінації каналів 11+08+04 передбачала використання інструментів пакета ArcGIS — Raster/Raster Processing/composite Bands.
2. Підготовка діапазонів спектральних даних супутника: розрахунок показників NDVI, NBR та deltaNBR із використанням каналів NIR, SWIR, RED у растровому форматі.
3. Визначення зони інтересу (AOI) за знімком комбінації каналів у векторному форматі *.shp.
4. Створення картографічного векторного шару рослинного покриття до факту пожежі.
5. Перетин растрового зображення розподілу показників вегетаційних індексів NDVI, NBR та deltaNBR за певну дату, шейп-файлів (*.shp) зони інтересу та шару рослинності.
6. Конвертація даних NDVI та deltaNBR з растрового формату у векторний точковий формат.

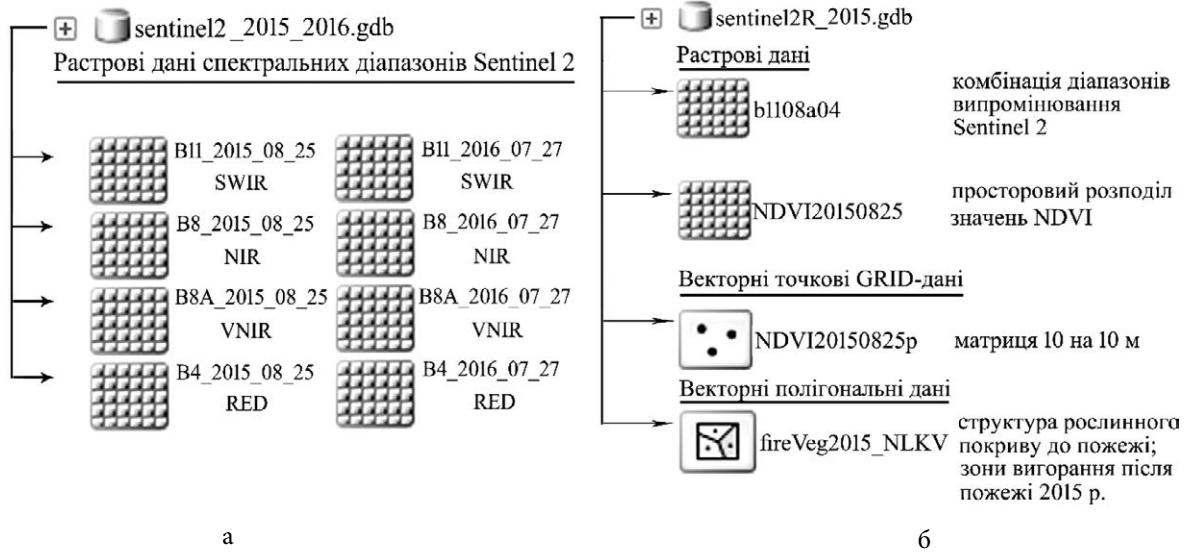


Рис. 2. Структура бази даних вхідної інформації супутника Sentinel 2 та похідних інформаційних матеріалів: а — первинні растрові дані; б — похідні інформаційні набори даних



Рис. 3. Набори інформаційних матеріалів для аналізу стану та трансформації лісових екосистем

7. Вибірка значень для NDVI, що характеризують зниження вмісту хлорофілу в рослинних клітинах і, як наслідок, падіння вегетативної активності рослин, або значення NBR і deltaNBR, що є параметрами низького вмісту вологи в рослинності та його зміни в часі.

8. Формування бази даних похідних растрових та векторних даних для території дослідження.

9. Створення тематичних карт.

У результаті комбінування різних спектральних діапазонів каналів супутника Sentinel 2, зокрема 4, 8, 11 або 12, отримано контрастне зображення, де

осередки вигорання мали темний тон і контрастували із зеленим кольором здорової рослинності. Комбінація каналів створена інструментом Raster Processing/Composit Bands у наборі інструментів Data Management Tools пакета ArcGIS. Для визначення змін рослинного покриву під впливом небезпечних для навколишнього середовища факторів використовувався підхід, що передбачав спільний аналіз мультиспектральних космічних знімків та вегетаційних індексів, розрахованих для досліджуваних екосистем. Показники для диференціації рослинного покриву містилися на зображенні комбінації каналів супутникових даних. Дані були проаналізовані в різні вегетаційні періоди з урахуванням гами кольорів та текстури на знімку. Комбінація діапазонів RED + NIR + SWIR з урахуванням вегетаційного періоду та оцінки особливостей розташування в ландшафті дала можливість визначити в лісовому покриві: хвойний, листяний та мішаний деревостани, а також ділянки з трав'янистою або трав'янисто-чагарниковою рослинністю.

На спектральному зображенні ділянки з накопиченою після вигорання фітокомпонентів золою відображалися в темних відтінках фіолетового та темно-коричневого кольорів. Частково ушкодженим деревостанам властивий тьмянний тон. Здоровій рослинності відповідали яскраві відтінки від світло- до темно-зеленого кольору. Зів'яла трав'яниста рослинність відображалася в жовтій та помаранчевій гамі, поверхня з дуже рідким рослинним покривом мала світло-ліловий колір.

Оброблені супутникові дані стали основою для створення векторних шарів структури рослинного покриву та його змін. Технологія геоінформаційного аналізу передбачала низку оверлейних операцій, які виконувалися в середовищі картографічних програмних пакетів: ArcGIS та MapInfo. Картографічні шари рослинності перетиналися з іншими інформа-

ційними шарами, приєднуючи, таким чином, необхідні дані для проведення оцінки. Характеристика інформаційних матеріалів за даними дистанційного зондування, що використовувалися для аналізу структури рослинності, наведена в табл. 3.

Розрахунок вегетаційних індексів

Крім мультиспектральних знімків для аналізу стану рослинного покриву після лісових пожеж були розраховані показники NDVI, NBR та deltaNBR. Вегетаційні показники отримані засобами розширеного геопросторового аналізу (Spatial Analyst Tools) інструментом Map Algebra/Raster Calculator. Для розрахунку вегетаційних індексів використовували математичну комбінацію декількох спектральних діапазонів даних космічного знімання, що визначала різницю між здоровою рослинністю з високою відбивальною властивістю та ділянками, де вегетаційна активність була слабкою, тобто з ураженою рослинністю з нещільним покривом або мінеральними поверхнями. Використання вегетаційних індексів разом з даними наземних обстежень по лісництвах [5] дало змогу дослідити видовий склад, розподіл продуктивності та густоти рослинного покриву. Нормалізований вегетаційний індекс NDVI [1, 2] був розрахований за допомогою математичного виразу

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red), \quad (1)$$

де NIR — ближній інфрачервоний діапазон; Red — видимий червоний діапазон.

Класичний показник NDVI застосовувався для визначення виду і стану рослинності і мав діапазон змін від -1 до 1. Від'ємні значення дають водні та мінеральні поверхні, будівлі, хмари, сніг. Відкритий ґрунт із дуже зрідженою рослинністю відповідали значенням індексу 0,1–0,2. Рослинність має завжди

Таблиця 3. Інформаційні матеріали за даними дистанційного зондування для аналізу структури рослинності

Растрові шари	Канали	Показники	Використання в аналізі
Комбінація каналів	11; 08; 08a; 04 (SWIR; NIR; RED)	Колір та текстура	Структура та вид рослинності
Просторовий розподіл NDVI	NIR; RED	від -1 до 1	Вегетативна активність, стан та продуктивність рослин
Просторовий розподіл NBR; deltaNBR	SWIR; NIR	1) від -1 до 1; 2) від < = -800 до > 660	Вміст та зміни вологи у вегетативній масі рослин

Таблиця 4. Статистичні параметри показника NDVI за категоріями пожежі з різним ступенем впливу на рослинність у 2015 р.

Категорія пожежі	Розподіл площі ушкодження рослинних екосистем за показником NDVI, %			NDVI середнє
	до 0,2	від 0,2 до 0,3	більше 0,3	
Згарище: сильна пожежа	58,7	33,09	8,2	0,19
Сильна низова пожежа	13,4	31,42	55,2	0,32
Низова пожежа	3,1	15,11	81,8	0,40
Слабка низова пожежа	0,6	2,80	96,6	0,52
Низова + трав'яна пожежі	32,1	35,92	32,0	0,26
Трав'яна + низова пожежі	21,1	30,22	48,7	0,29
Трав'яна пожежа	7,5	19,77	72,7	0,36
Ліс листяний: неушкоджений	0,6	0,86	98,5	0,62
Ліс хвойний: неушкоджений	0,0	0,00	100,0	0,57

плюсові значення від 0,2 до 1. Показник здорової щільної рослинності має величину від 0,66 до 1; для нещільної рослинності цифра змінювалася від 0,2 до 0,5. Відмерлі рослини мали значення від -1 до 0, слабкі від 0,2 до 0,33. Слабо ураженим рослинам відповідали значення від 0,33 до 0,66.

На прикладі даних щодо пожежі 2015 р. відпрацьовувалася технологія оцінки впливу вогню пожежі на лісові екосистеми з використанням вегетаційних індексів. Один з етапів включав визначення просторового розподілу значень NDVI по лісових екосистемах на досліджуваній території, що представлені в растровому форматі. Такі дані були конвертовані у формат дискретних даних і через Query-запити до підготовлених інформаційних шарів отримано їхні статистичні характеристики. Перший шар містив значення NDVI, категорію ураженої пожежею екосистеми, її площу та кількість точок із значенням NDVI у матриці точкових значень з кроком 10 × 10 м. Другий визначав зведені статистичні характеристики категорій з різним ступенем впливу пожежі на лісові екосистеми: від неушкоджених ділянок до згарищ, що утворилися внаслідок верхових та сильних низових пожеж у лісі. Для статистичного аналізу визначено категорії пожежі, що мають різний ступінь впливу на рослинність. Загибель або сильне ушкодження дерев відбувається після проходження верхової та сильної низової пожеж у лісі. Цей найбільший ступінь ушкодження визначений категоріями: згарище та згарище з незначними за площею залишками живої деревної рослинності. За низової пожежі в лісі вигорають трав'янисті біоцено-

зи, низькорослі дерева та чагарникова рослинність, крона високих дерев не ушкоджується. Після впливу низової пожежі середнього та слабкого ступеня екосистема лісу має потенціал до відновлення вегетації. За наслідками низові лісові пожежі розбиті на категорії: сильна низова; низова (середній ступінь ушкодження); слабка низова. Вигорання на ділянках із мозаїчним рослинним покривом виділено в категорії: низова + трав'яна пожежі — з переважанням деревної рослинності; трав'яна + низова пожежі — з переважанням трав'янистої рослинності, окремо визначена трав'яна пожежа. Найбільша кількість низьких значень (до 0,2) показника NDVI припадає на категорії згарище та згарище з окремими невеликими ділянками деревостанів, що свідчить про високий відсоток загибелі дерев у лісових екосистемах. У табл. 4 наведено діапазони зміни значень NDVI в екосистемах з різним навантаженням від вогню пожежі.

Ще одним параметром для визначення ступеня пірогенного впливу на рослинність є показники NBR та deltaNBR. Нормалізований індекс випалювання (NBR) розраховується як різниця спектральної яскравості діапазонів короткого інфрачервоного (SWIR) та ближнього інфрачервоного випромінювання (NIR) [3, 6]. Індекс NBR є нормованою різницею значень спектральних діапазонів супутника, що визначає небезпеку зменшення в клітинах рослин вмісту вологи, і як наслідок є дуже чутливим до впливу вогню на рослинність. Індекс визначають за формулою

$$NBR = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR). \quad (2)$$

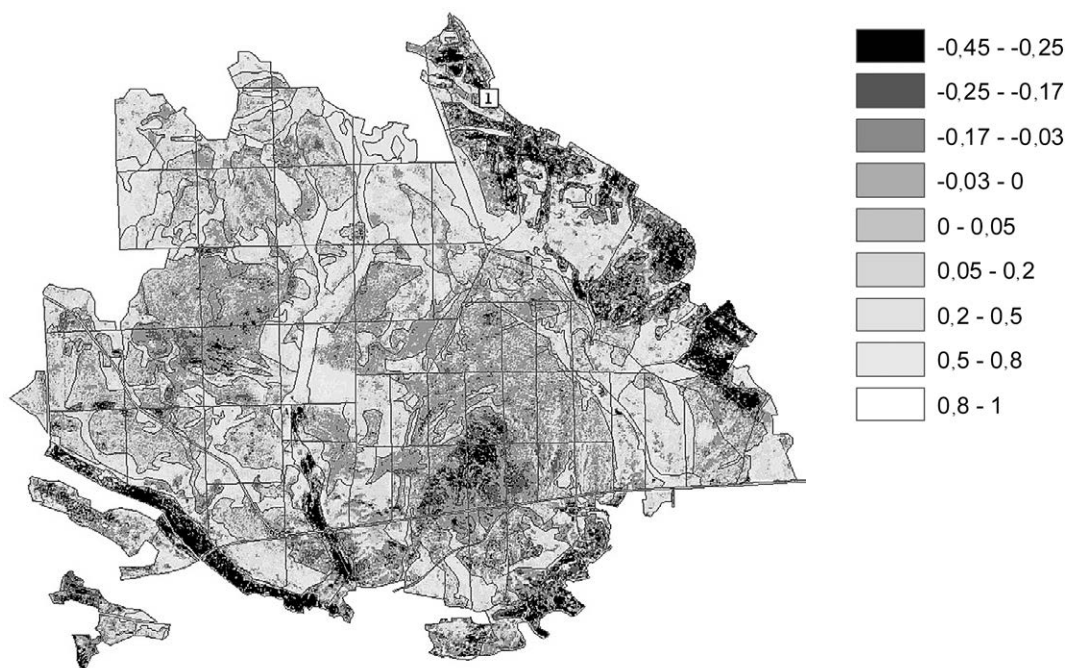


Рис. 4. Оцінка ушкодження екосистем після пожежі в серпні 2015 р. по Денисовецькому лісництву за класами показника NBR

Значення за шкалою NBR змінюються від -1 до 1 . Рослинності за активної вегетації властивий високий рівень віддзеркалення в ближньому інфрачервоному діапазоні спектра, вигорілі ділянки добре віддзеркалюють у короткохвильовому спектрі.

На рис. 4 показано результат аналізу супутникових даних з оцінкою пожежі у 2015 р. по Денисовецькому лісництву за показником NBR. Від'ємні значення NBR вказують на велику втрату вологи в клітинах рослин [3, 6]. Ділянки з низьким NBR корелюють із категорією

згарища за показником NDVI. Аналіз розподілу значень NBR за категоріями пожеж показав, що найбільш сухий рослинний покрив спостерігався на ділянках, де трав'яниста рослинність чергується з поодинокими деревами та на згарищах. Більше половини площі об'єктів у таких категоріях мали значення NBR до $-0,03$. Неушкоджені ділянки лісу, що розташовані поблизу зони вигорання, мали значення NBR від $0,2$ до $0,5$ (табл. 5).

На рис. 4 представлено приклад класифікації території після пожежі за показником NBR. Зміну

Таблиця 5. Статистичні параметри показника NBR за категоріями пожежі з різним ступенем впливу на рослинність у 2015 р.

Категорія пожежі	Площа екосистеми за класами NBR, %							
	до $-0,25$	$-0,25$ до $-0,17$	$-0,17$ до $-0,03$	$-0,03$ до 0	0 до $0,05$	$0,05$ до $0,2$	$0,2$ до $0,5$	$0,5$ до 1
Згарище: сильна пожежа	7,6	16,4	39,9	11,1	14,9	8,1	1,7	0,232
Сильна низова пожежа	4,1	5,9	23,6	8,4	15,7	34,3	7,9	0,031
Низова пожежа	0,2	1,2	12,5	6,0	12,9	46,6	20,7	0,013
Слабка низова пожежа	0,1	0,5	6,3	3,3	7,3	34,2	48,1	0,176
Низова + трав'яна пожежі	12,2	19,0	44,0	7,4	8,2	11,1	1,5	0,032
Трав'яна + низова пожежі	15,2	21,8	44,0	5,9	5,9	6,2	1,0	0,000
Трав'яна пожежа	5,7	13,7	57,8	7,5	7,7	6,8	0,8	0,000
Ліс листяний: неушкоджений	0,0	0,5	3,9	2,1	4,7	26,1	62,7	0,000
Ліс хвойний: неушкоджений	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	97,7	0,000

вмісту вологи в рослинах на поверхні Землі до та після ушкодження виявляє масштабований коефіцієнт випалювання deltaNBR , отриманий як різниця стану рослинності до пожежі NBR_1 та після пожежі NBR_2 . Він розраховується за даними двох послідовних часових термінів з використанням формули

$$\text{deltaNBR} = \text{NBR}_1 - \text{NBR}_2. \quad (3)$$

Розподіл показника deltaNBR показано на прикладі аналізу пожежі в заповіднику «Древлянський». За показником deltaNBR проведено оцінку зміни стану вологості рослинності в Мотійківському відділенні заповідника після пожежі 2020 р. Рослинний покрив території заповідника розділений на 4 категорії: ліс неушкоджений; частково вигорілий ліс (рідколісся); сильно вигорілий ліс (згарище); луки. Значення показника менш ніж -100 свідчить про зростання вмісту вологи, тобто відповідає ділянкам відновлення процесу вегетації. Критичними для стану вегетації є значення вище 440 . На таких ділянках рослинність має помірно-високе та високе зниження вмісту вологи. За визначеними категоріями рослинного покриву отримано розподіл показника deltaNBR та проведено статистичний аналіз даних. Більшість площі об'єктів, де зберігся здоровий деревостан, припадає на значення deltaNBR від -100 до 100 , що свідчить про незначні зміни вмісту вологи в рослинах, тобто екосистема зберегла стійкий стан.

На рис. 5 наведено розподіл площі екосистем із різним ступенем ушкодження за класами зміни вмісту вологи в рослинах (dNBR) після пожежі.

Перевірка факту пожежі за даними наземного обстеження по лісництвах

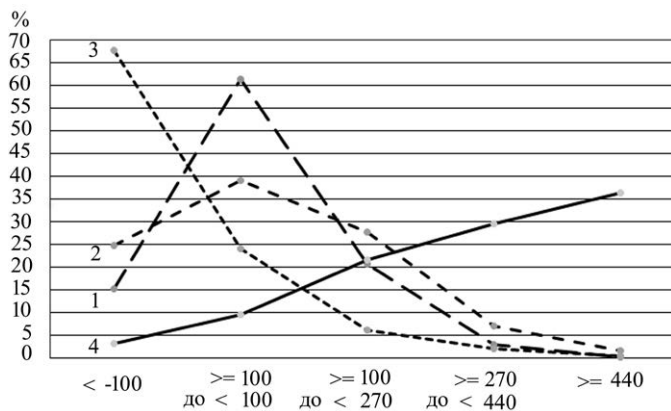


Рис. 5. Розподіл площі екосистем за величиною параметра dNBR : 1 — ліс неушкоджений; 2 — ліс частково ушкоджений (рідколісся); 3 — ділянки з трав'янистою рослинністю; 4 — ліс сильно вигорілий

За даними таксаційних обстежень 2016 р. проведено аналіз площ, пройдених пожежею в лісництвах зони відчуження [5]. Наземні обстеження проводили через 5 років з метою оцінки обсягів здорових та ушкоджених деревостанів у лісництвах. У таких обстеженнях стан трав'янистих біоценозів не оцінювався.

Для виконання послідовності запитів і проведення розрахунків площі ушкоджених лісових екосистем по кварталах лісництв за наземними даними необхідно було підготувати інформаційні таблиці. Підготовка включала створення структури інформаційної таблиці з полями для ідентифікації та атрибутивними даними. Ідентифікаційне поле (NLKVVYD) складалося з номерів лісництва, кварталу і виділу, воно використовувалося для приєднання інформації з інших картографічних шарів та агрегації даних (рис. 6). Наступним кроком було проведено заповнення таблиці атрибутивними даними та відповідну кодифікацію. Атрибутивні дані забезпечили відображення сутності об'єктів у тематичному аналізі. Вони містили оцінку ушкоджених деревостанів відповідно до документації таксаційних обстежень [5]. Така підготовка даних дала змогу за допомогою послідовності запитів розрахувати площу ушкоджених лісових екосистем по кварталах лісництв. На рис. 6 позначено цифрами: 1 — вхідні дані таксаційних обстежень осередків пожежі в лісництвах за виділами; 2 — агреговані дані за кварталами; 3 — картографічний шар просторового розподілу осередків пожежі та їхньої площі у кварталах лісництв, створений за даними Sentinel 2.

За даними таксаційних обстежень 2016 р. в лісництвах зони відчуження зазначено такі ступені ушкодження деревостанів: згарища з високим ступенем ушкодження від 70 до 100 %; низова пожежа сильно-

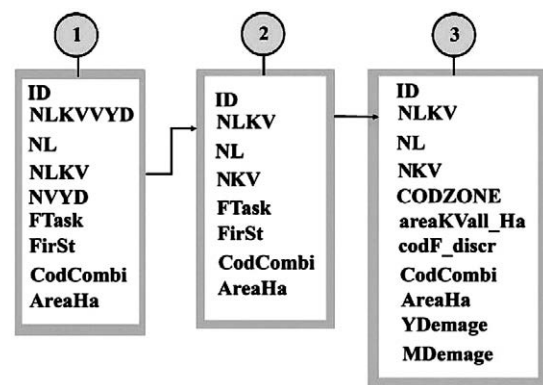


Рис. 6. Структура інформаційних таблиць, що містять дані щодо пірогенного ушкодження лісових екосистем за кварталами лісництв зони відчуження

го ступеня від 50 до 70 %; низова пожежа середнього ступеня від 20 до 50 %; низова пожежа слабого ступеня від 10 до 20 %.

Порівняльний аналіз наземних даних з даними дистанційного зондування показав, що факт пожежі у кварталах Денисовецького лісництва підтвердився в 98 % випадків. Загальна площа ушкоджених пожежею деревостанів у 2015 р. за кварталами разом із суміжними ділянками трав'янистої рослинності на галявинах становила 4 642 га, з них під деревостанами 4 033 га. Під згарищами визначено 3 233 га ділянок лісу. На рис. 7 показано картосхему розподілу осередків пожежі різного ступеня ушкодження, що утворилися в серпні 2015 р., складену за даними таксаційного обстеження [5]. Потенціал для відновлення деревостанів мають площі ділянок неушкодженого лісу, що позначені на діаграмі білим кольором.

По Луб'янському лісництву маємо збіг 90 % випадків пожежі за кварталами лісництв відповідно до даних наземного обстеження і космічного знімання. Площа лісів разом з трав'янистою рослинністю на галявинах, пройдена пожежею, 5 605 га. Деревна рослинність становила 4 446 га, з них: згарища 2491 га, низова пожежа сильного ступеня 236 га, середнього ступеня 916 га, слабого ступеня 803 га.

У Корогодському лісництві пожежа охоплювала 113,3 га, з них: згарища 70,5 га, низова пожежа сильного ступеня 25,1 га, середнього ступеня 13,2 га, слабого ступеня 4,5 га. Розбіжність розрахунків площ за супутниковими і наземними даними полягала в тому, що за мультиспектральним знімком невеликі відокремлені осередки низової пожежі в лісі визначаються погано і можуть не враховуватися у розрахунках.

Для категорії згарища розрахований запас фітокомпонентів малого діаметра, що повністю вигорає внаслідок сильної пожежі для типових видів насаджень сосни та берези. Загальна площа згарищ за таксаційним описом 2016 р. в зоні відчуження 6064 га. Розраховано, що насадження сосни на згарищі становило 90,9 %, берези 6,7 %, інші види насаджень 2,4 %. Запас деревини на згарищі отримано з використанням кількості запасу сухоюстю за таксаційним описом ушкоджених ділянок лісу [5]. Алгоритм розрахунку запасу кори, гілок, хвої або листя, а також підросту взято з монографії [7]. В алгоритмі використано залежність величини запасу фітокомпонентів малого діаметра від запасу деревини за віковими групами в насадженні. У табл. 6 наведено розраховану питому масу фітокомпонентів на вигорілих ділянках сосни та берези в зоні відчуження.

Створення тематичних карт для оцінки впливу пожеж на лісові екосистеми

Технологія геоінформаційного аналізу передбачала вивчення структури рослинності за растровими зображеннями в різні вегетаційні періоди і створення на їхній основі наборів векторних картографічних шарів. Наступним кроком була побудова тематичних карт з метою візуалізації результатів дослідження. Метою дослідження було проаналізувати ступінь ушкодження рослинного покриву на ділянках, що зазнали пірогенного впливу, та визначити потенціал для відновлення деревної рослинності. У 2015 р. в зоні відчуження та безумовного відселення утворилося декілька великих за площею осередків пожежі.

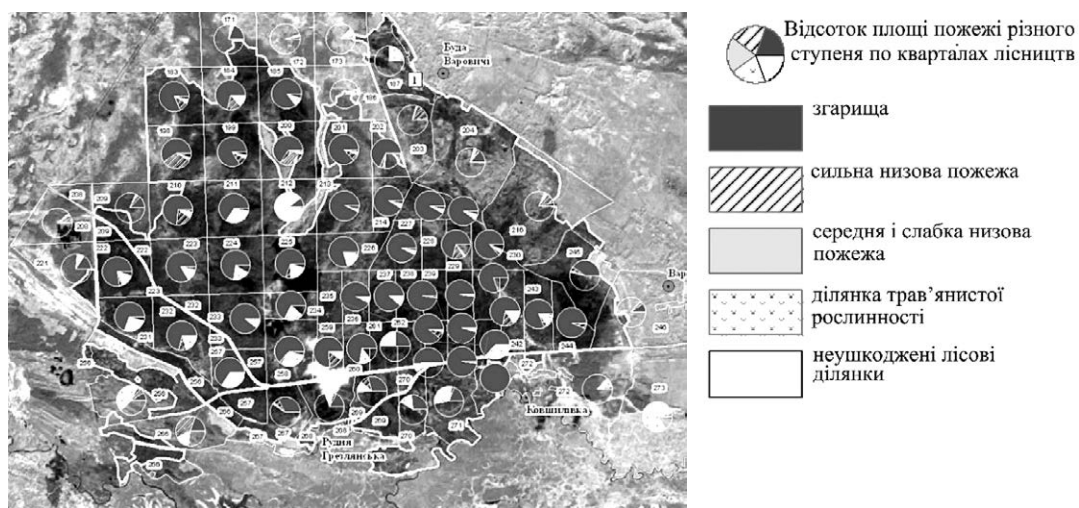


Рис. 7. Розподіл осередків пожежі в серпні 2015 р. за даними таксаційного обстеження в Денисовецькому лісництві

Таблиця 6. Питома маса фітокомпонентів малого діаметра у вигорілих насадженнях сосни та берези після пожежі 2015 р.

Порода дерев	Площа згарища, м ²	Питома маса, кг/м ²				
		Деревина	Кора	Гілки	Хвоя	Листя
Сосна	55 143 000	10,11	0,52	0,92	0,27	0
Береза	4 046 000	7,27	1,24	1,28	0	0,25

За інформацією інтернет-порталу Fire Map найбільші ушкодження від пожеж зафіксовані в березні-квітні та серпні 2015 р. [4]. У результаті аналізу даних космічного знімання визначено осередки пожежі, а ділянки лісових екосистем розподілено за ступенем їхнього ушкодження. На рис. 8 показано приклад

просторово-часової зміни рослинного покриву під впливом однієї з масштабних пожеж у зоні відчуження. Тематичні карти створені після аналізу набору даних: мультиспектрального знімка Sentinel 2, векторних картографічних шарів: рослинного покриву станом до пожежі; класифікації стану рослинності

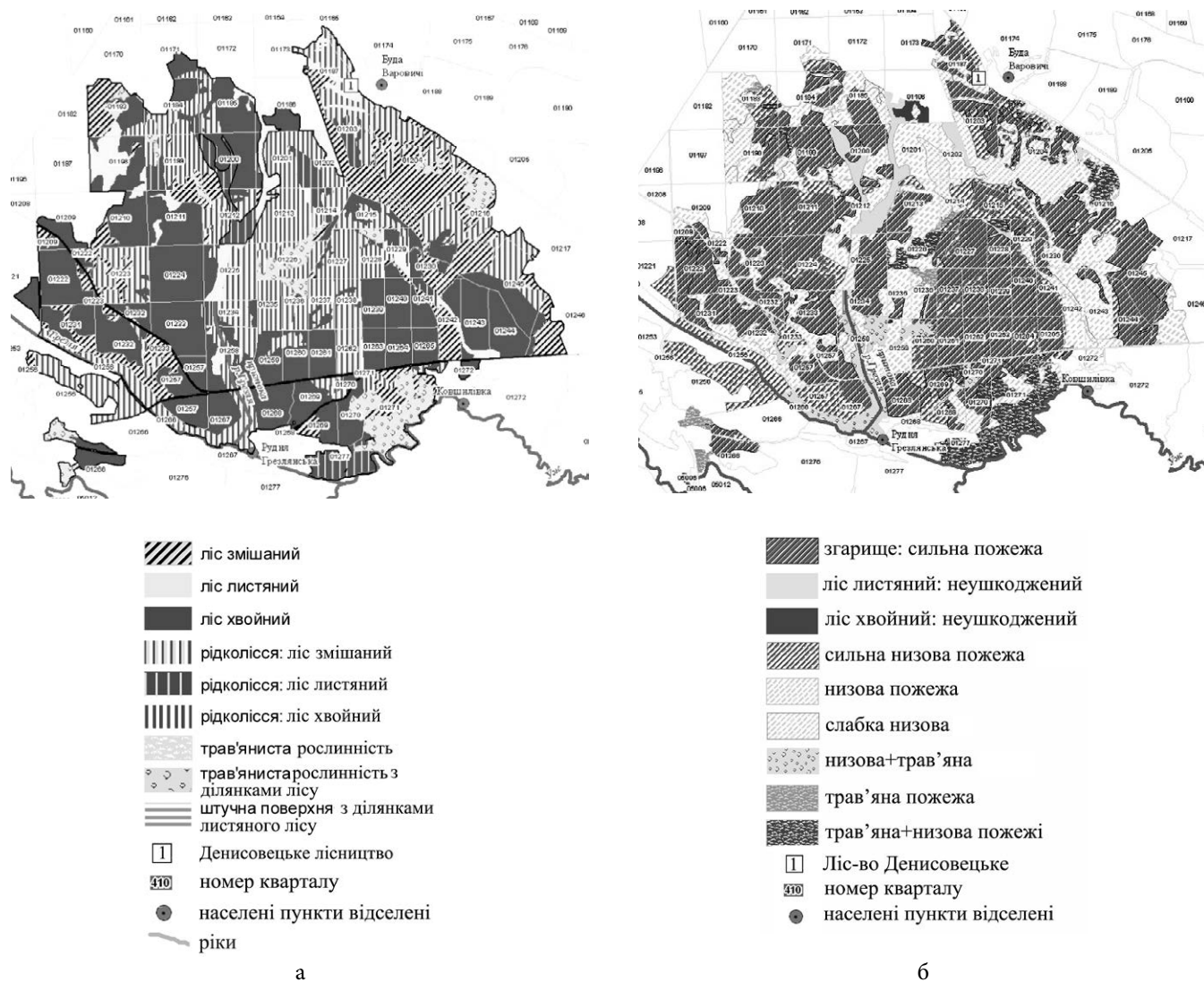


Рис. 8. Зміни в рослинному покриві внаслідок пожежі та ступінь ушкодження лісових екосистем у серпні 2015 р. в Денисовецькому лісництві: рослинний покрив до (а) та після пожежі (б)

після пожежі; розподілу вегетаційного індексу NDVI, розрахованого після проходження пожежі.

Використання супутникової інформації дало змогу розділити рослинність за ступенем ушкодження від пожежі та визначити площу за різними категоріями ушкодження лісових екосистем.

Великий за площею осередок пожежі утворився у квітні 2015 р. на території Луб'янського та Корогодського лісництв. За розрахунками пройдена пожежею площа була 5295 га. Площа сильно ушкодженого лісу становила 2089 га, з них згарищ 1640 га (78 %), сильної низової пожежі 449 га (22 %).

За супутниковими даними в Денисовецькому лісництві площа згарищ (верхова + низова пожежі) і сильної низової пожежі в лісі становила 3121 га, з них згарищ — 2524 га (81 %), сильної низової пожежі — 597 га (19 %).

З 9850 га пройденої вогнем площі лісів трьох лісництв зони відчуження та гарантованого відселення загиблі та критично пошкоджені деревостани визначені на 5210 га. У цій категорії площа хвойних лісів з невеликими ділянками листяних дерев або трав'янистої рослинності була 4484 га, мішаних лісів — 707 га, листяних лісів — 19 га. Слабо ушкоджені лісові екосистеми мали площу 1806 га, з них хвойні ліси — 686 га, листяні ліси — 665 га, мішані ліси — 455 га. Площа ділянок підприємств основного та допоміжного циклів та відселених населених пунктів була невеликою — 218 га, з них площа згарищ — 44 га, а ділянок, ушкоджених низовою, слабкою низовою та трав'яною пожежами, 175 га.

Висновки

У результаті проведеного аналізу супутникової інформації та наземних даних таксаційних обстежень лісових екосистем за кварталами лісництв зони відчуження та заповідника «Древлянський», розташованого в зоні гарантованого відселення, визначено високу ефективність використання даних дистанційного зондування з метою визначення осередків вигорання рослинного покриву внаслідок пожежі. Досліджено ступінь ушкодження ділянок у зоні дослідження, що зазнали впливу лісових пожеж. Використання сумісного аналізу даних дистанційного зондування та інформації наземного обстеження збільшила обґрунтованість діагностичних тематичних карт структури та оцінки стану рослинного покриву.

Класифікація структури рослинності, проведена за супутниковими даними, була використана як картографічна модель стану лісових насаджень за різні

періоди: до пожежі та після пожежі. За допомогою даних космічного знімання визначено, що ділянки, пройдені пожежею, мають дуже нерівномірну і строкату картину ураження рослинного покриву. На інтенсивність ушкодження та його площу впливав вид деревостану. У хвойних деревостанах створюються сприятливі умови для розповсюдження вогню в екосистемі, зважаючи на накопичення великої маси сухих фітокомпонентів малої фракції. У хвойному лісі перебіг пожежі складний і має важкі наслідки для екосистеми. Суха хвоя довго розкладається й нагромаджується в товстому шарі сухої підстилки. Накопичена за декілька років суха маса фітокомпонентів сприяє виникненню затяжної сильної низової пожежі, у результаті чого ушкоджені деревостани мають тенденцію до всихання в наступний вегетаційний період. Вміст смоляних речовин у хвойних деревах сприяє розповсюдженню вогню у крони дерев і переходу до верхової пожежі та формування згарищ або згарищ із невеликим відсотком живих дерев.

У листяних березових деревостанах відпад листя розкладається протягом року, не утворюючи товстого шару сухих фітокомпонентів. Таким чином, екосистемам березового лісу в разі весняної пожежі характерний швидкий перебіг низової пожежі середнього та слабого ступеня впливу. Аналіз супутникових знімків після пожеж такого характеру показує, що в екосистемі листяного лісу дерева часто поновлюють вегетацію у той же рік після пожежі.

Список використаної літератури

1. Кохан С. С. Дистанційне зондування Землі. Теоретичні основи / С. С. Кохан, А. Б. Востоков. — Київ : Вища школа, 2009. — 510 с.
2. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування: монографія / за ред. В. І. Лялько, М. О. Попова. — Київ : Наукова думка, 2006. — 360 с.
3. Key С. Н. Landscape Assessment (LA) / С. Н. Key, N. С. Benson // Key, Carl H.; Benson, Nathan C. 2006. Landscape Assessment (LA) // FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD / D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, С. Н. Key, N. С. Benson, S. Sutherland, L. J. Gangi. — Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006. — P. LA-1-55.
4. Дані радіометричних вимірювань NASA. — Режим доступу: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_M-C61_356618.zip, <https://firms>.

- modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_SV-C2_356620.zip (дата звернення: 08.06.2023).
5. Таксаційний опис земельних ділянок лісового фонду станом на 01.01.2017 р. — ДСКП «Північна Пуща», 2017. — 1 електрон. опт. диск.
 6. ArcGIS Pro 3.3. — Режим доступу: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/get-started/get-started.htm>; <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/arcpy/image-analyst/nbr.htm>.
 7. Інтегрована система охорони лісів від пожеж: монографія / С. В. Зібцев, П. І. Лакида, П. П. Яворовский [та ін.]. — Київ : Наукова столиця, 2020. — С. 98–100.

for different periods: before the fire and after the fire. The satellite imagery data showed that the areas affected by the fire have a very uneven and variegated pattern of vegetation damage. The type of stand influenced the intensity of the damage and area. In coniferous stands, favorable conditions created for the spread of fire in the ecosystem, due to the accumulation of a large mass of small fraction of dry plant components. In the case of a spring fire, birch forest ecosystems characterized by a rapid course of a low-level fire of medium and low impact. Analysis of satellite images after fires of this nature shows that in the deciduous forest ecosystem, trees often resume vegetation in the same year after the fire.

Keywords: vegetation structure, forest fires, remote sensing of the Earth, geoinformation technologies, NDVI, NBR, deltaNBR.

O. G. Tyshchenko¹, P. V. Pyvovar², N. M. Tsydyk¹

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 12, Lysohirska st., Kyiv, 03028, Ukraine

² Polissia National University, 7, Staryi Boulevard, Zhytomyr, Zhytomyr region, 10008, Ukraine

Assessment of the Effects of Fires on Forest Ecosystems Based on Space Survey Data and Forest Plantation Survey Data

The article presents the structural features of plant communities in the zone of contamination of radionuclides, which affected by large-scale forest fires. The areas of the Exclusion Zone and the Drevlianskyi Nature Reserve (the guaranteed resettlement zone) that affected by forest fires were identified and the extent of their damage was investigated. Using Sentinel 2 satellite imagery data, as well as forest survey data, categories and classes of vegetation were determined. Examples of thematic maps showing the degree of fire impact on coniferous, deciduous, mixed forest ecosystems and areas with mosaic vegetation cover provided. In the areas affected by the fire, the vegetation divided according to the degree of forest damage into the following categories: heavily burned forest (dead forest), burned with small areas of vegetative trees, fire in the tree litters: heavy fire, medium-, and light fire. The statistical indicators of NDVI and NBR for defined categories of fire in plant groups revisited. The use of joint analysis of remote sensing data and ground survey information increased the validity of diagnostic thematic maps of the structure and assessment of the state of vegetation cover. The classification of vegetation structure based on remote sensing data of the Earth used as a cartographic model of the state of forest plantations

References

1. Kokhan S. S., Vostokov A. B. (2009). *Dystantsiine zonduvannia Zemli. Teoretychni osnovy* [Remote sensing of the Earth. Theoretical foundations]. Kyiv: Vyshcha shkola (in Ukr).
2. Lyalko V. I., Popova V. O. (eds.) (2006). *Bahatospektral'ni metody dystantsiinoho zonduvannia Zemli v zadachakh pryrodokorystuvannia* [Multispectral methods of remote sensing of the Earth in nature management problems]. Kyiv: Naukova Dumka, 360 p. (in Ukr).
3. Key C. H., Benson N. C. (2006). Landscape Assessment (LA). In: Lutes D. C., Keane R. E., Caratti J. F., Key C. H., Benson N. C., Sutherland S., Gangi L. J. *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD*. Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, p. LA-1–55.
4. *Dani radiometrychnykh vymyruvan' NASA. (2015)*. [NASA radiometric measurement data]. — Retrieved from: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_M-C61_356618.zip, https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_SV-C2_356620.zip.
5. Taxation description of land plots of forest fund as 01.01.2017. SSE “Pivnichna Pushcha”, 2017. (in Ukr).
6. ArcGIS3.3. — Available at: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/get-started/get-started.htm>; <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/arcpy/image-analyst/nbr.htm>.
7. Zibtsev S. V., Myroniuk V. V., Bohomolov V. V., Yavorovskiy P. P., Soshenskiy O. M., Humeniuk V. V., Sedonin S. Ye., Levchenko V. V., Puzrina N. V. (2020). *Itehrovana systema okhorony lisiv vad pozhezh* [Integrated forest fire protection system]. Kyiv, Naukova stolytsia, 340 p. (in Ukr).

Надійшла 06.09.2024

Received 06.09.2024