

Ю. І. Кузьменко, Л. В. Гавловська

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

Оцінка поширення ландшафтних пожеж у Чорнобильській зоні відчуження в березні 2022 р. на основі моделі Ротермела і супутникових знімків Sentinel-2

Ключові слова:
розповсюдження пожеж,
спектральні індекси,
супутникові знімки,
площі вигорання,
геоінформаційні системи,
зона відчуження,
модель Ротермела,
Sentinel-2

Представлено результати визначення площ і периметрів вигорання для трьох груп пожеж, що сталися в Чорнобильській зоні відчуження у березні 2022 р., двома способами: а) шляхом моделювання на основі моделі Ротермела в середовищі геоінформаційної системи з відкритим кодом GRASS GIS за координатами активних пожеж супутників VIIRS і MODIS, отриманих у режимі NRT; б) на основі аналізу супутникових знімків Sentinel-2 із застосуванням спектральних індексів BAIS2 і NBR. У результаті розрахунків отримано карти розповсюдження пожеж, визначено їхні швидкості розповсюдження (ROS), а також запаси ^{137}Cs в межах спалених ділянок. Проведено порівняння змодельованих і отриманих за супутниковими знімками результатів. Відносна похибка розрахунку площ вигорання, отриманих обома способами для визначених груп пожеж, знаходиться в межах 15% при загальній площі згарищ близько 8,5 км². Порівняння оцінок вигорілих площ з аналогічними оцінками інших авторів, зроблених за супутниковими знімками, показало узгодженість результатів: відносна похибка для окремих груп пожеж становила 6–16%.

Вступ

Загроза виникнення та поширення ландшафтних пожеж в Україні зростає в умовах бойових дій, особливо в теплий період року. Чорнобильська зона відчуження (ЧЗВ) має особливий статус у зв'язку з наявністю радіаційно забруднених територій, які можуть стати джерелом небезпечних викидів в атмосферу в разі виникнення великих пожеж та погіршити екологічний стан довкілля на віддалених територіях за рахунок атмосферного перенесення. Для розрахунку атмосферного перенесення радіоактивних аерозолів у результаті пожеж необхідно вміти прогнозувати поведінку пожеж, зокрема швидкості й периметри розповсюдження вогню відповідно до погодних умов, рельєфу місцевості та наявних го-

рючих матеріалів (палива) для підтримання вогню. Моделювання поширення пожеж у поєднанні із застосуванням засобів дистанційного зондування землі є важливим засобом оцінки і прогнозування поведінки пожеж та оцінки їхніх наслідків. Останнім часом усе більше уваги приділяється методам дослідження наслідків пожеж на основі даних супутників Sentinel-2, знімки високої роздільної здатності яких використовуються для оцінювання площ вигорання та тяжкості пошкоджень рослинного покриву навіть на невеликих ділянках. Методам визначення постраждалих від пожеж територій на основі супутникових даних та їхній ефективності присвячено низку робіт. Зокрема в [1–3] проведено порівняння спектральних індексів вигорання розроблених для різних супутників, що дає змогу отримати інфор-

© Ю. І. Кузьменко, Л. В. Гавловська, 2022

мацію про наземні покриття з роздільною здатністю від 10 м.

Мета цього дослідження — оцінка поширення лісових пожеж у ЧЗВ шляхом моделювання на основі даних про осередки активних пожеж, отриманих від супутників MODIS і VIIRS, визначення фактично вигорілих площ за допомогою аналізу супутникових знімків Sentinel-2 і порівняння отриманих результатів з метою верифікації розрахунків. Моделювання поведінки пожеж було проведено на основі відомої моделі Ротермела [4], програмні реалізації якої використовуються Лісовою службою США (U.S. Forest Service) у Національній системі оцінки пожежної небезпеки США (National Fire Danger Rating System) NFDRS, у широко відомих програмних продуктах, таких як FlamMap, BEHAVE PLUS [5] та ін.

Методи і вихідна інформація

Методика моделювання була заснована на найбільш відомій широко вживаній моделі Ротермела [4], яка успішно використовується вже багато років у NFDRS, адаптованої для двомірного випадку і реалізованої у середовищі відкритого програмного забезпечення системи GRASS GIS.

Загальний вигляд моделі Ротермела такий:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}, \quad (1)$$

де R — швидкість розповсюдження вогню, м/с; I_R — інтенсивність реакції, кВт/м; ξ — коефіцієнт поширення теплового потоку; ϕ_w — коефіцієнт вітру; ϕ_s — коефіцієнт нахилу; ρ_b — об'ємна густина паливного шару, кг/м³; ε — ефективне число нагріву; Q_{ig} — кількість тепла, необхідного для запалювання 1 кг паливного шару, кДж/кг.

Для моделювання поведінки пожеж було підготовлено декілька вхідних растрових шарів цифрових карт, що містять дані про місцевість, вітер, паливо та його вологість. Необхідні для розрахунку ухили поверхні, що впливають на швидкість розповсюдження вогню, а також аспекти, від яких залежать напрямки, в яких буде відбуватись поширення пожежі, було отримано з растрової карти цифрової моделі місцевості Японського національного космічного агентства JAXA з роздільною здатністю 30 м на 1 піксель у районі екватора [6]. Усі ці шари було отримано з електронних карт, спеціально підготовлених і перетворених на формати, підтримувані системою GRASS GIS, шляхом інтерполяції приведені до єдиного масштабу

та єдиної метричної системи координат UTM, дотримання якої вимагають розрахункові модулі системи r.ros і r.spread [7].

Для моделювання було обрано три групи пожеж на території ЧЗВ у березні 2022 р., коли її територія фактично знаходилася під контролем російських військ (рис. 1).

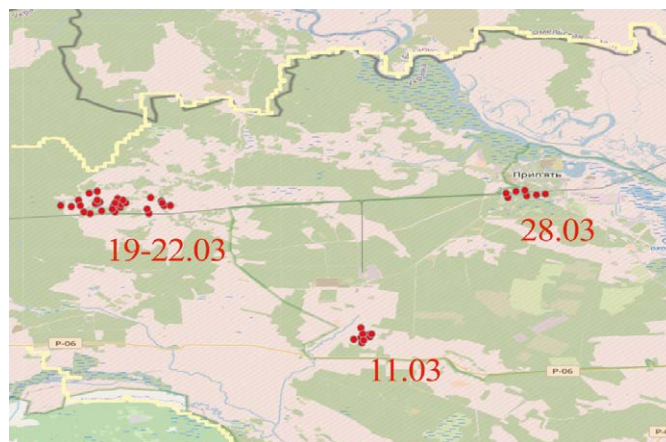


Рис. 1. Розташування найбільших осередків пожеж у ЧЗВ у березні 2022 р.

Інформацію про джерела пожеж для нашого розрахунку було отримано шляхом аналізу даних супутникових спостережень MODIS та VIIRS на сайті Fire Information for Resource Management System (FIRMS) NASA [8, 9].

Найважливішим елементом вихідних даних для моделювання є інформація про наявність і властивості рослинних горючих матеріалів, які для цілей моделювання об'єднують у певні набори параметрів (моделі палива), характерні для різних типів рослинного покриття. Для наших розрахунків ми використовували глобальний набір даних параметрів про рослинне паливо [10], структурованих спеціально для розрахунків у Системі класифікації характеристик палива (FCCS) [11], за допомогою якої можливо ідентифікувати моделі палива стандартного набору Андерсона (13 оригінальних моделей) [12], які можна вже безпосередньо використовувати в розрахунках за моделлю Ротермела. Карту таких моделей палива для території ЧЗВ ми створили на попередньому етапі досліджень за процедурами, описаними в [11, 13] (рис. 2).

У межах досліджуваної території, де знаходилися основні осередки пожеж, було виявлено три моделі: модель 2 — характерна для трав'янистої і чагарникової рослинності; модель 8 — включає набір параметрів паливної матриці, характерних для опадів закри-

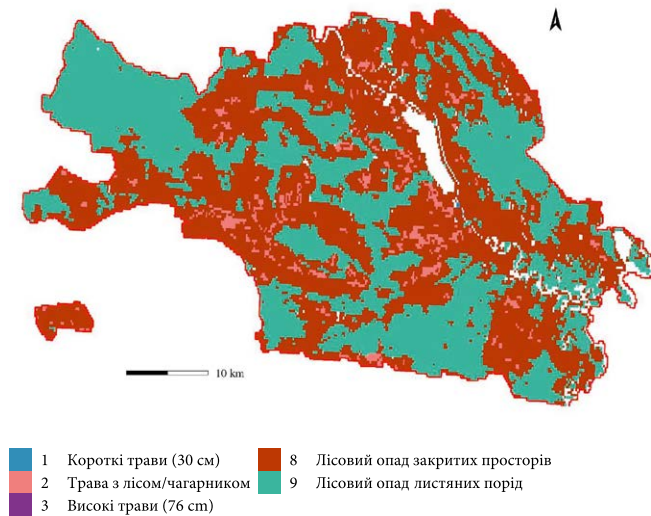


Рис. 2. Карта стандартних моделей палива Андерсона [5] на території ЧЗВ для моделі Ротермела

тих навісів хвойних порід; модель 9 — характеризує паливну матрицю опадів переважно листяних порід. Схему розташування найбільших осередків пожеж у межах ЧЗВ і виявлених на основі даних супутникового моніторингу за даними FIRMS представлено на рис. 1.

Аналіз даних супутникового моніторингу показав, що протягом березня 2022 р. в межах ЧЗВ можливо виділити три групи пожеж, які відбулися на найбільш забруднених територіях здебільшого в межах 10-км зони й у безпосередній близькості від неї, а саме: 28 березня в районі м. Прип'ять і станції «Янів» майже на північному кордоні ділянки захоронення «Рудого лісу» на захід від промислового майданчика Чорнобильської АЕС, 19–22 березня на західному сліді в районі покинутого с. Товстий Ліс і 11 березня в районі с. Стечанка південніше пункту захоронення радіоактивних відходів (ПЗРВ) «Буряківка». Саме для цих трьох груп і було проведено моделювання відповідно до метеорологічних умов на дати виявлення активних пожеж.

Оскільки інформація щодо метеостанції «Чорнобиль» за березень відсутня, ми використовували дані з найближчої до неї метеостанції, яка знаходиться в м. Брагін (Республіка Білорусь), скориставшись архівом спостережень сайту швейцарської компанії Meteoblue (<https://www.meteoblue.com/>), яка спеціалізується на високоточних прогнозах погоди та моніторингу довкілля.

Період моделювання активної фази пожежі для кожного з виявлених джерел був прийнятий макси-

мальною тривалістю до 12 год, виходячи з міркувань, що практично всі групові джерела пожеж фіксувалися супутниками MODIS і VIIRS лише 1–2 рази на добу, переважно в денний період, коли швидкість вітру, температура і стан вологості повітря найбільше сприяли поширенню пожежі.

Враховуючи відсутність даних спостережень за вологістю мертвого і живого палива для ЧЗВ, такі дані нами було штучно згенеровано у вигляді набору електронних карт з нормально розподіленими випадковими полями даних. Вони мають задані статистичні характеристики (середнє і стандартне відхилення) згідно з рекомендованим для умов сухої весняної погоди, за сценарієм для помірно сухого мертвого палива. Це так званий сценарій D3L4 (Moderate dead, fully green herb) з вологістю живого палива 120% і вологістю мертвого палива 9% [11].

Дані про температуру, швидкості і напрямки вітру, що можуть характеризувати метеорологічну ситуацію у дні пожеж, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристики вітру і температури на окремі дати виявлення пожеж згідно з даними метеостанції м. Брагін (Республіка Білорусь) у березні 2022 р.

Дата пожежі	$T_{\text{сер}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{мін}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	Напрямок вітру, град	Швидкість вітру, км год ⁻¹
11	-3,8	-8	2,1	22	17,8
19	-0,5	-5,8	5,6	16	7,6
20	2,1	-3,9	9,1	357	10,8
21	4,4	-1,5	11,9	350	11,5
22	5,9	-1,1	14,4	343	7,9
28	5,1	-3,4	13,4	250	24,5

Для кожної виділеної групи пожеж проводилися окремі розрахунки з урахуванням швидкостей і напрямків вітру на дати розрахунків згідно з табл. 1.

Моделювання відбувалося в програмному середовищі GRASS GIS за двоетапною процедурою. Спочатку на основі даних про підстильну поверхню, а також про напрямки і швидкості вітру розраховувалися поля напрямків поширення і швидкостей розповсюдження пожеж (ROS). Потім на основі цих даних та координат розташування, виявлених за даними супутникових спостережень MODIS та VIIRS осередків активних пожеж, моделювалися периметри розповсюдження фронту вогню з часовим кроком 1 хв і заданим часовим лагом.

Верифікацію отриманих результатів моделювання було проведено шляхом зіставлення змодельованих периметрів вигорілих ділянок із фактичними площами згарників, отриманих за допомогою обробки супутникових знімків із роздільною здатністю 10–60 м Sentinel-2 (S2) рівня L1C з коефіцієнтами відбиття верхнього шару атмосфери (TOA) з архіву Європейського космічного агентства у вільному доступі на сайті Copernicus Open Access Hub. Усього нами було використано 5 знімків (за 2022 р.): для групи пожеж біля с. Стечанка 11 березня — на 23 лютого і 16 березня; для групи пожеж біля с. Товстий Ліс 18 березня — на 18 і 23 березня; для пожежі в районі м. Прип'ять 28 березня — на 23 березня і 7 квітня. Отримані знімки було оброблено шляхом застосування алгоритму атмосферної корекції з метою приведення до рівня L2A з коефіцієнтами відбиття нижнього шару атмосфери (BOA) за допомогою програмного модуля Sen2Cor [14], із застосуванням опції корекції функції розподілу двонаправленого відбиття (BRDF) і передискретизацією до просторової роздільної здатності 20 м. З метою визначення площ вигорання (ВА) ми використовували спектральні індекси, що вираховуються за формулами, в яких аргументами є стандартні номери радіометричних діапазонів сенсорів супутників S2 для BOA (табл. 2 [15]).

Таблиця 2. Спектральні діапазони датчиків Sentinel-2 (S2A і S2B)

Номер діапазону	Довжина центральної хвилі, нм		Роздільна здатність, м
	S2A	S2B	
B1 — Coastal Aerosol	442,7	442,3	60
B2 — Blue	492,7	492,3	10
B3 — Green	559,8	558,9	10
B4 — Red	664,6	664,9	10
B5 — Red Edge1	704,1	703,8	20
B6 — Red Edge2	740,5	739,1	20
B7 — Red Edge3	782,8	779,7	20
B8 — NIR	832,8	832,9	10
B8A — Narrow NIR	864,7	864,0	20
B9 — Water Vapor	945,1	943,2	60
B10 — SWIR Cirrus	1373,5	1376,9	60
B11 — SWIR1	1613,7	1610,4	20
B12 — SWIR2	2202,4	2185,7	20

Нормалізований коефіцієнт вигорання (Normalized Burn Ratio, NBR) [16] — найбільш відомий спектральний індекс, що широко використовується в літературі для виділення вигорілих площ у зонах великих пожеж і вважається стандартом для оцінки

серйозності пожежі. Його формула поєднує використання довжин хвиль як NIR (B8), так і SWIR (B12), де високе значення NBR зазвичай указує на здорову рослинність, а низьке значення вказує на оголену землю та нещодавно спалені ділянки:

$$NBR = \frac{B8 - B12}{B8 + B12}. \quad (2)$$

Індекс вигорілої площі для Sentinel-2 (Burned Area Index for Sentinel-2, BAIS2) [17] адаптує традиційний індекс BAI [3] для можливостей діапазонів мультиспектральних датчиків Sentinel-2 (S2 MSI), використовуючи переваги комбінації діапазонів спектра S2 MSI для виявлення вигорілої території після пожежі: видимий (B4); червоний край Red Edge (B6 і B7), головним чином пов'язаний з варіаціями вмісту хлорофілу; інфрачервоні NIR — (B8A), здебільшого пов'язаний зі змінами у структурі листя, і SWIR (B12). Діапазон значень для BAIS2 становить від -1 до +1 для згарників і 1–6 для активних пожеж і розраховується за формулою

$$BAIS2 = \left(1 - \sqrt{\frac{B6 \cdot B7 \cdot B8A}{B4}} \right) \cdot \left(\frac{B12 - B8A}{\sqrt{B12 + B8A}} + 1 \right). \quad (3)$$

Також були визначені похідні індекси dNBR і dBAIS2 як різниця між відповідними індексами NBR і BAIS2, розрахованими до початку і після завершення пожежі для кожної пари знімків для кожної групи активних пожеж.

Визначення площ вигорання відбувалося за бічасовою (be-temporal) методикою, за якою відбувається зіставлення даних супутникових знімків, отриманих у часовому ряді якнайближче до початку й після завершення події пожежі [20].

Контури периметрів і площі пожеж були визначені в процесі візуального аналізу шляхом зіставлення периметрів згаріщ супутникових зображень у штучних кольорах комбінацій RGB (B12-B8A-B4) з отриманими зображеннями карт індексів, розрахованих за формулами (1) і (2), та їхніх похідних на основі підбору порогових значень до найкращого узгодження окремо для кожної групи пожеж і кожного виду спектрального індексу.

Оцінку спектральної чутливості розрахованих індексів NBR і BAIS2 для кожної пари знімків, зроблених на дати перед початком і після завершення пожеж, було проведено за допомогою індексу сепарабельності SI [17, 20]:

$$SI = \frac{|\mu_b - \mu_u|}{\sigma_b + \sigma_u}. \quad (4)$$

Тут μ_b та μ_u — середні значення розрахованих показників для згорілої та незгорілої площі, визначених по знімках до і після пожежі, а σ_b і σ_u — стандартні відхилення відповідних індексів. Значення індексу SI, які перевищують 1, повинні дати змогу добре відокремити вигорілі ділянки, тоді як значення < 1 свідчать про погану дискримінаційну здатність [20]. Остаточний варіант індексу вигорання для виділення фактично вигорілої площі для кожної з трьох зон активації пожеж був обраний на основі більшого значення індексу SI (табл. 3).

Таблиця 3. Значення індексу сепарабельності (SI) індексів NBR і BAIS2, розрахованих для зон активації пожеж у березні 2022 р.

Дата пожежі	NBR	BAIS2
11	0,968	1,999
19–22	0,514	1,346
28	0,886	0,673

Результати моделювання

У табл. 4 представлено узагальнені результати моделювання характеристик пожеж, що включають розрахункові (мод) і фактичні (факт) площі вигорання в межах периметрів поширення пожеж, зокрема з розбивкою за типами палива (РГМ), швидкості розповсюдження вогню в напрямку поширення пожежі (ROS). Також додатково в межах периметрів вигорання було розраховано запаси ^{137}Cs в ґрунті та середні щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs за даними [18].

На рис. 3, а–в представлено фрагменти супутникових знімків, що містять зображення вигорілих ділянок по кожній групі досліджуваних пожеж у штучній гамі кольорів (false colors) RGB (R: B12–2186 нм; G: B8A — 864 нм; B: B4–665 нм згідно з табл. 2). У цій гамі кольорів червоному і темно-пурпурному кольорам відповідають постраждалі від вогню площі.

Ділянки здорової рослинності мають зелений колір. На рис. 3, г–е зображено розраховані за моделлю Роттермела периметри пожеж, накладені на визначені за допомогою спектральних індексів BAIS2 і NBR контури фактично вигорілих площ.

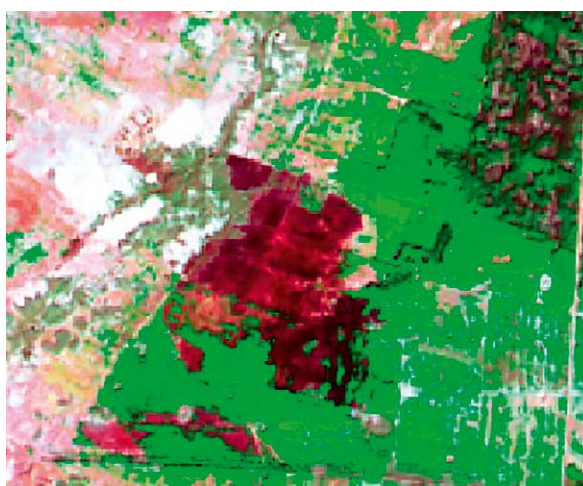
Аналіз метеорологічної обстановки і результати моделювання, представлені в табл. 4 та на рис. 3, загалом свідчать про те, що метеорологічні умови, за яких відбувалися пожежі після серії незначних опадів у першій декаді березня, не сприяли значному поширенню пожеж за домінування слабого і помірного вітру в другій половині березня, а в першій декаді фактично їх унеможлилювали. Результати моделювання також показують, що пожежі відбувалися здебільшого на вкритих лісом ділянках, де горіння підстилки відбувалося відносно повільними темпами, але в умовах відсутності швидкостей вітру на окремих ділянках відбувалося прискорення за рахунок ефекту споттінгу (виникнення нових осередків пожежі за межами зони загорання основної пожежі за рахунок рознесення вітром палаючих частинок і тліючих вуглинок), особливо в місцях з трав'янистим покривом, де просування вогню може суттєво прискорюватися, що могло призводити до появи дрібноосередкових пожеж.

Враховуючи невеликі швидкості вітру, швидкості поширення вогню також були невеликими і не перевищували 9 м/хв у напрямку основного поширення пожежі. Разом з тим швидкий підйом максимальних денних температур (див. табл. 1) у поєднанні з вітрами до 8 км/год створили умови для поширення пожеж в окремі дні другої половини березня, які досить швидко затухали, зважаючи на нерівномірне зволоження паливного шару РГМ різного типу.

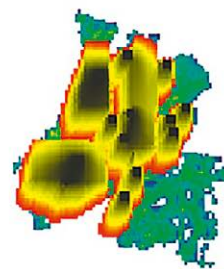
Потенційно найбільш небезпечною була пожежа 28 березня 2022 р. у районі м. Прип'ять і станції «Янів» на захід від промислового майданчика Чорнобильської АЕС, оскільки в межах фронту пожежі

Таблиця 4. Результати моделювання пожеж на визначених ділянках ЧЗВ у березні 2022 р.

Дата пожежі	Площа пожежі, км ²		Ліс, км ²		Трава/кущі, км ²		ROS, м/хв	Макс. ROS, м/хв	Запаси ^{137}Cs , МБк · 10 ⁶		Щільність забруднення ^{137}Cs , кБк/м	
	мод	факт	мод	факт	мод	факт			мод	факт	мод	факт
11	1,41	1,66	0,97	1,32	0,44	0,34	2,80	9,30	0,05	0,06	36	36
19–22	6,33	6,26	4,79	5,39	1,54	0,87	2,18	8,58	4,66	4,43	736	709
28	0,67	0,59	0,67	0,59	0,00	0,00	4,59	5,64	7,58	6,52	11 328	11 012
Усього	8,41	8,51	6,42	7,30	1,98	1,21	–	–	12,3	11,0	–	–



а



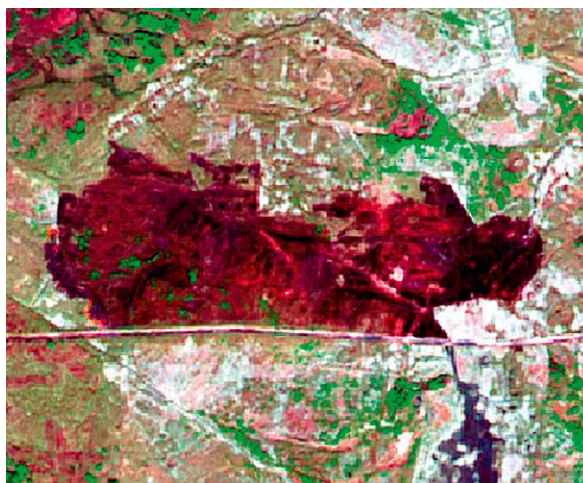
г



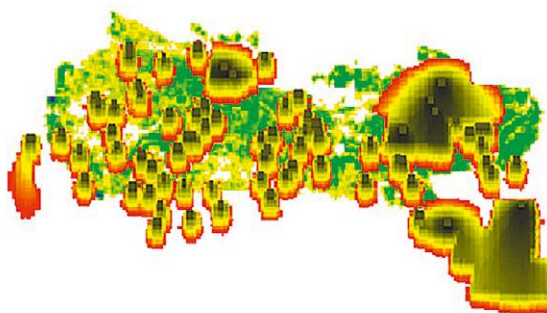
б



д



в



е

Рис. 3. Зони локації найбільших пожеж у ЧЗВ в березні 2022 р.: а — 18–23 березня (знімок станом на 23 березня); б — 11 березня (знімок станом на 16 березня); в — 28 березня (знімок станом на 7 квітня); г–е — змодельовані і фактичні периметри пожеж станом на 18–23, 11 і 28 березня відповідно

опинилися сильно забруднені території, що примикають на півдні до місць захоронення «Рудого лісу» із середніми щільностями забруднення в окремих місцях більше 11 000 кБк/м². Південно-західний напрямок вітру саме в день 28 березня міг суттєво зменшити негативні наслідки від можливого перенесення радіоактивних продуктів згорання вбік густонаселених районів Київської області, порівняно з можливим гіпотетичним випадком північного або північно-західного напрямку вітру. Дві інші групи пожеж відбувалися на територіях набагато менше забруднених і за умов незначного вітру, більш низьких температур і не могли становити великої небезпеки навіть за умов північного напрямку вітру.

Порівняння розмірів фактично вигорілих площ із розрахунковими показує, що різниця не є значною і становить усього близько 1 % сумарно за трьома групами пожеж, а за окремими групами не перевищує 15 %. У той же час ми можемо бачити певні розбіжності контурів периметрів змодельованих і фактично вигорілих площ (див. рис. 3, г–е). Їхній перетин показав, що в цілому 45 % (4,6 км²) визначених при моделюванні площ знаходяться поза межами фактично визначених згарищ. Особливо великі розбіжності зафіксовані там, де координати активних пожеж, отримані з супутників, знаходяться за межами фактично визначених площ вигорання або на межі згарників. Цей факт можна пояснити відомою проблемою недостатньої точності визначення координат для невеликих локальних пожеж супутників MODIS і VIIRS. Ми також порівняли визначені нами на основі аналізу супутникових знімків площі пожеж із результатами визначення площ, пройдених пожежами в ЧЗВ, представлених у рамках дослідження можливих викидів в атмосферу радіонуклідів від пожеж на території ЧЗВ за період 11–29 березня 2022 р. [22, 23]. Так, за даними [22], визначена площа пожеж у районі с. Стечанка 11 березня становила 194 га (розбіжність із нашими даними згідно з табл. 3–17 %), визначена за даними [23] площа пожеж у районі м. Прип'ять 28 березня — 7,08 га (розбіжність з нашими даними згідно з табл. 3–6 %). За групою пожеж у районі с. Товстий Ліс за період 18–23 березня порівняння не проводилося у зв'язку з відсутністю в опублікованих матеріалах даних за 21–23 березня 2022 р.

Висновки

Особливістю цієї роботи є моделювання площ вигорання внаслідок пожеж двома способами:

а) шляхом моделювання на основі моделі Ротермела в середовищі GRASS GIS за координатами активних пожеж супутників VIIRS і MODIS, отриманих у режимі NRT; б) на основі аналізу супутникових знімків Sentinel-2 із застосуванням спектральних індексів BAIS2 і NBR. Відносна похибка розрахунку площ вигорання, отриманих обома способами для визначених груп пожеж, знаходиться в межах 15 % при загальній площі згарищ близько 8,5 км².

Отримані результати розрахунків, а також їхнє часткове порівняння з результатами інших досліджень [22, 23] підтверджують можливість застосування реалізованої методики моделювання на основі моделі Ротермела для попередньої оцінки площ і периметрів пожеж у ЧЗВ для оперативних або сценарних розрахунків за різних екологічних умов, зокрема під час ведення військових дій в умовах відсутності наземного контролю за станом пожежної ситуації без значної втрати точності.

Список використаної літератури

1. Alcaras E. Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index for Sentinel-2 Imagery / E. Alcaras, D. Costantino, F. Guas-taferro, et al. // *International Journal of Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14. — Art. 1727.
2. Chuvieco E. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation / E. Chuvieco, F. Mouillot, G. R. Van Der Werf, et al. // *Remote Sensing of Environment*. — 2019. — Vol. 225. — P. 45–64.
3. Chuvieco E. 2002. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination / E. Chuvieco, M. P. Martín, A. Palacios // *International Journal of Remote Sensing*. — 2002. — Vol. 23. — P. 5103–5110.
4. Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels / R. C. Rothermel // *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-115*. — Ogden, 1972.
5. Andrews P. L. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System / P. L. Andrews // *International Journal of Wildland Fire*. — 2014. — Vol. 23 (1). — P. 21–33.
6. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D — 30m (AW3D30)”. — Available at: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.
7. Petras V. Wild fire modeling in GRASS GIS / Vaclav Petras. — Class project final report: GIS/MEA582–601, Spring 2014.

8. MODIS Collection 61 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL distributed from NASA FIRMS. Available at: <https://earthdata.nasa.gov/firms>. — doi:10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.0061.
9. NRT VIIRS375 m Active Fire product VJ114IMGT-DL_NRT distributed from NASA FIRMS. Available at: <https://earthdata.nasa.gov/firms>. — doi:10.5067/FIRMS/VIIRS/VJ114IMGT_NRT.002
10. Pettinari M. L. Generation of a global fuel data set using the Fuel Characteristic Classification System / M. L. Pettinari, E. Chuvieco // *Biogeosciences*. — 2016. — Vol. 13. — P. 2061–2076.
11. Ottmar R. D. An overview of the Fuel Characteristic Classification System — Quantifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning / R. D. Ottmar, D. V. Sandberg, C. L. Riccardi, S. J. Prichard // *Can. J. Forest Res.* — 2007. — Vol. 37. — P. 2383–2393.
12. Anderson H. E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-122 / H. E. Anderson. — Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982. — 22 p.
13. Гис-подход к решению задачи прогнозирования развития природных пожаров в Чернобыльской зоне отчуждения на основе модели Ротермела / Ю. И. Кузьменко, Т. Д. Лев, О. Г. Тищенко [и др.] // *Ядерная энергетика та довкілля*. — 2020. — Вип. 2. — С. 79–94.
14. Louis J. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A Processor for Users / J. Louis, V. Debaecker, B. Pflug, et al. // *Proceedings of the Living Planet Symposium (Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016)*. — P. 1–8.
15. Sentinel-2 User Handbook. — ESA, 2015, 64 p. — Available at: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.pdf/8869acdf-fd84-43ec-ae8c-3e80a436a16c?t=1438278087000.
16. García M. J. L. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data / M. J. L. García, V. Caselles // *Geocarto Int.* — 1991. — Vol. 6. — P. 31–37.
17. Filipponi F. BAIS2: Burned area index for Sentinel-2 / F. Filipponi // *Multidiscip. Digit. Publ. Inst. Proc.* — 2018. — Vol. 2. — P. 364. — doi.org/10.3390/ecrs-2-05177
18. Kashparov V. Spatial data sets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone / V. Kashparov, S. Levchuk, M. Zhurba // *Earth System Science Data*. — 2018. — Vol. 10. — P. 339–353.
19. Fernández-Manso A. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity / A. Fernández-Manso, O. Fernández-Manso, C. Quintano // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* — 2016. — Vol. 50. — P. 170–175.
20. Veraverbeke S. Evaluation of pre/post-fire differenced spectral indices for assessing burn severity in a mediterranean environment with landsat thematic mapper / S. Veraverbeke, S. Lhermitte, W. Verstraeten, R. Goossens // *Int. J. Remote Sens.* — 2001. — Vol. 32. — P. 3521–3537.
21. Navarro G. Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery / G. Navarro, I. Caballero, G. Silva, et al. // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* — 2017. — Vol. 58. — P. 97–106.
22. Процак В. Довідка № 1 від 21.03.2022. Про викиди в атмосферу радіонуклідів від пожеж на території Чорнобильської зони відчуження за період 11.03–20.03.2022 р. / В. Процак, Д. Голяка. — Режим доступу: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u259/information_firecez_n1.pdf.
23. Процак В. Довідка № 3 від 30.03.2022. Про викиди в атмосферу радіонуклідів від пожеж на території Чорнобильської зони відчуження за період 24.03–29.03.2022 р. та узагальнені дані за період 11.03–29.03.2022 р. / В. Процак, Д. Голяка. — Режим доступу: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u184/information_firecez_n3.pdf.

Yu. I. Kuzmenko, L. V. Havlovska

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 12, Lysogirska St., Kyiv, 03028, Ukraine

Assessment of the Landscape Fires Spread in the Chernobyl Exclusion Zone in March 2022 Based on the Rothermel Model and Sentinel-2 Satellite Imagery

The threat of occurrence and spread of landscape fires in Ukraine increases in the conditions of hostilities, therefore the possibility of terrestrial monitoring and suppression of wildfires is getting worsen. The Chernobyl Exclusion Zone (ChEZ) has a special status due to the presence of radioactively contaminated areas that can become a source of dangerous emissions into the atmosphere from fires. Therefore, the implementation of satellite monitoring for active fires and the development of methods for predicting the behavior of fires and their consequences in the ChEZ by the computer modeling using GIS systems is relevant. The aim of this work was to estimate the size of burned areas (BA) due to the spread of fires in March 2022 during the period of its occupation by Russian troops using NRT data on active fires, obtained from the VIIRS and MODIS satellites

from the NASA FIRMS as input. Calculations were made in two ways: a) fire propagation was simulated based on the well-known Rothermel model, implemented in the GRASS GIS open source software environment; b) actual BAs were defined using Normalized Burn Ratio (NBR) and Burned Area Index for Sentinel-2 (BAIS2) spectral indices, based on the involvement of Sentinel-2 bands. A comparison of the simulated areas and perimeters of scarses with the actual Bas, detected from Sentinel-2 satellite images, showed that the relative errors in BAs detection for individual groups of fires do not exceed 15 %, which makes it possible to apply this approach for operative or scenario forecasting of the wildfire spread without significant loss in accuracy.

Keywords: Sentinel-2, normalized burn ratio, burned area, wildfire, spectral indices, GIS, Rothermel model, Chornobyl Exclusion Zone, fire monitoring, BAIS2.

References

- Alcaras E., Costantino D., Guastaferrero F. Parente C., Pepe M. (2022). Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index for Sentinel-2 Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, art. 1727.
- Chuvieco E., Mouillot F., Van Der Werf G. R., San Miguel J., Tanasse M., Koutsias N., García M., Yebra M., Padilla M., Gitas I., Heil A., Hawbaker T. J., Giglio L. (2019). Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, vol. 225, pp. 45–64.
- Chuvieco E., Martín M. P., Palacios A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, pp. 5103–5110.
- Rothermel R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Ogden: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-115.
- Andrews P. L. (2014). Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 23, no. 1, pp. 21–33.
- ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D — 30m (AW3D30)”. Available at: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.
- Petras V. (2014). *Wild fire modeling in GRASS GIS*. Class project final report: GIS/MEA582–601.
- MODIS Collection 61 NRT Hotspot. *Active Fire Detections MCD14DL distributed from NASA FIRMS*. doi.org/10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.0061.
- NRT VIIRS375 m Active Fire product VJ114IMGTDL_ NRT distributed from NASA FIRMS. doi.org/10.5067/FIRMS/VIIRS/VJ114IMGTDL_NRT.002.
- Pettinari M. L., Chuvieco E. (2016). Generation of a global fuel data set using the Fuel Characteristic Classification System. *Biogeosciences*, vol. 13, pp. 2061–2076.
- Ottmar R. D., Sandberg D. V., Riccardi C. L., Prichard S. J. (2007). An overview of the Fuel Characteristic Classification System — Quantifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 37, pp. 2383–2393.
- Anderson H. E. (1982). *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. Gen. Tech. Rep. INT-122. Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 22 p.
- Kuzmenko Yu. I., Lev T. D., Tishchenko O. G., Piskun V. N., Gavlovska L. V. (2020). GIS approach to the solution of the project for forecasting the development of natural fires in the Chornobyl Exclusion Zone based on the Rothermel model. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 2 (17), pp. 79–94. (in Rus.)
- Louis J., Debaecker V., Pflug B., Main-Knorn M., Bie-niarz J., Mueller-Wilm U., Cadau E., Gascon F. (2016). Sentinel-2 Sen2Cor: L2A Processor for Users. Proceedings of the *Living Planet Symposium (Prague, Czech Republic, May, 9–13, 2016)*, pp. 1–8.
- Sentinel-2 User Handbook*. ESA, 2015, 64 p. Available at: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.pdf/8869acdf-fd84-43ec-ae8c-3e80a436a16c?t=1438278087000.
- García M. J. L. Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto Int.*, vol. 6, pp. 31–37.
- Filippini F. (2018). BAIS2: Burned area index for Sentinel-2. *Multidiscip. Digit. Publ. Inst. Proc.*, vol. 2, p. 364. doi.org/10.3390/ecrs-2-05177.
- Kashparov V., Levchuk S., Zhurba M. (2018). Spatial data sets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth System Science Data*, vol. 10, pp. 339–353. doi.org/10.5194/essd-10-339-2018.
- Fernández-Manso A., Fernández-Manso O., Quintano C. (2016). SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 50, pp. 170–175.
- Veraverbeke S., Lhermitte S., Verstraeten W., Goossens R. (2001). Evaluation of pre/post-fire differenced spectral indices for assessing burn severity in a Mediterranean environment with Landsat Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, pp. 3521–3537.

21. Navarro G., Caballero I., Silva G., Parra P. C., Vázquez A., Caldeira R. (2017). Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 58, pp. 97–106.
22. Protsak V., Holyaka D. Reference No. 1 dated 21.03.2022. *On emissions of radionuclides into the atmosphere from fires at of the territory of the Chornobyl Exclusion Zone for the period 11.03–20.03.2022*. Available at: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u259/information_firecez_n1.pdf. (in Ukr.)
23. Protsak V., Holyaka D. Reference No. 3 dated 30.03.2022. *On emissions of radionuclides into the atmosphere from fires at of the territory of the Chornobyl Exclusion Zone for the period 24.03–29.03.2022 and summarized data for the period 11.03–29.03.2022*. Available at: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u184/information_firecez_n3.pdf. (in Ukr.)

Надійшла 19.08.2022

Received 19.08.2022