

М. М. Талерко

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

Застосування величини FRP (Fire Radiative Power) для оцінки емісії радіонуклідів в атмосферу внаслідок лісових пожеж у зоні відчуження у квітні 2020 р.

Ключові слова: лісові пожежі, ресуспензія, радіонукліди, атмосферне перенесення, моделювання, об'ємна активність повітря, зона відчуження, супутниковий моніторинг пожеж.

Запропоновано метод оцінювання активності радіонуклідів, що надходять в атмосферу під час лісових та лугових пожеж на радіоактивно забруднених територіях, оснований на використанні супутникових даних вимірювань потужності радіаційного випромінювання (величина FRP), а також даних про щільність радіоактивних випадань на території пожежі та значення коефіцієнта емісії активності аерозольних часток C_r , що утворюються під час горіння. На прикладі лісових пожеж у зоні відчуження Чорнобильської АЕС у квітні 2020 р. зроблено попередні оцінки значення C_r — $9,5 \cdot 10^{-4}$ м²/МДж для ¹³⁷Cs. Запропонований метод дає можливості для проведення оперативних оцінювань та прогнозування наслідків лісових пожеж, включаючи модельні оцінювання розповсюдження радіоактивних аерозолів в атмосфері та оцінювання доз опромінення персоналу зони відчуження та населення за її межами з використанням комп'ютерних онлайн-систем підтримки прийняття рішень щодо захисту людей від впливу радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

Вступ

У роботі [1] викладено результати моделювання розповсюдження радіонуклідів, піднятих в атмосферу внаслідок інтенсивних лісових пожеж у зоні відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення (далі — ЗВ) у квітні 2020 р. Модельні розрахунки забруднення приземного повітря на регіональному масштабі (для території України) та локальному (у межах ЗВ) було виконано за допомогою моделі підйому, атмосферного перенесення та осадження радіонуклідів на підстильну поверхню LEDI. Під час формування модельного сценарію активність добових викидів з 4 по 20 квітня 2020 р. визначалась за результатами детального аналізу розповсюдження пожежі, проведеного співробітниками відділу радіаційного моніторингу природного середовища Українського гідрометеорологічного

інституту (УкрГМІ) [2]. У цій роботі розташування окремих осередків пожежі протягом кожної доби та їхня площа визначались за даними супутникового моніторингу [3]. Для проведення оцінювань активності емісії радіонуклідів у повітря використовувались дані про радіоактивне забруднення територій пожеж [4], а також результати вимірювань запасів горючих біоматеріалів у них, накопичення радіонуклідів у різних частинах біоценозів та коефіцієнти винесення їх в атмосферу, отримані співробітниками Українського науково-дослідного інституту сільськогосподарської радіології Національного університету біоресурсів і природокористування України [5].

Результати проведених модельних оцінювань активності ¹³⁷Cs у приземному повітрі [1], отримані з використанням указанного сценарію викиду, у цілому узгоджуються з даними вимірювань радіоактивного

© М. М. Талерко, 2020

забруднення повітря в Україні, що свідчить, зокрема, про достатньо високу достовірність отриманих у [2] оцінок емісії радіонуклідів під час пожежі. Однак наявні результати супутникових вимірювань дають можливість для оперативного проведення прямих оцінок інтенсивності емісії продуктів горіння під час пожеж, використовуючи значення потужності радіаційного випромінювання — величини FRP (Fire Radiative Power) [6]. Метою статті є оцінка можливості використання вказаної величини для обчислення активності радіоактивних аерозолів, що надходять в атмосферу під час лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях, на прикладі пожежі в ЗВ у квітні 2020 р.

Оцінка емісії радіонуклідів в атмосферу під час лісових пожеж

Як зазначалося в [1], для оцінювання активності радіоактивних аерозолів, що надходять в атмосферу під час пожеж на радіоактивно забруднених лісових і лугових територіях, можуть бути використані методи розрахунку маси аерозольних (нерадіоактивних) часток унаслідок природних пожеж [7]. Використовуючи супутникові дані про значення потужності радіаційного випромінювання FRP (МВт) для кожного пікселя на карті пожеж, активність аерозольних часток A (Бк), піднятих у повітря під час пожежі, може бути розрахована за формулою

$$A = C_r \cdot D \cdot FRE = C_r \cdot D \cdot \int_0^{T_F} FRP(t) dt, \quad (1)$$

де T_F — тривалість пожежі, с; D — щільність випадань, Бк/м²; FRE — енергія радіаційного випромінювання під час пожежі в межах пікселя, МДж. Коефіцієнт емісії активності аерозольних часток C_r (м²/МДж), нормований на щільність випадань D , є аналогом коефіцієнта емісії для оцінки маси димових часток C_e [7].

Загальна величина емісії радіоактивних аерозолів визначається підсумовуванням за всіма пікселями супутникового знімка, в яких зафіксовано лісові пожежі.

Зазначимо, що коефіцієнт емісії нерадіоактивних часток C_e варіює для різних регіонів та екосистем. Зокрема, у [7] на основі аналізу даних супутникових вимірювань оцінено його значення в межах 0,02–0,06 кг/МДж для тайгових лісів, 0,04–0,08 кг/МДж для тропічних лісів і савани та

0,08–0,1 кг/МДж для Європейської території Росії. У роботі [8] ці результати було уточнено для території Європи та інтерпретовано у вигляді залежності від типу землекористування: 0,1 кг/МДж для лісу, 0,05 кг/МДж для трави та сільськогосподарських полів і 0,075 кг/МДж для змішаних територій.

Аналогічні залежності від географічного регіону, типу рослинності та землекористування на території пожежі мають бути встановлені й для коефіцієнта емісії радіоактивних частинок C_r . Крім того, його значення змінюється для різних радіонуклідів у складі радіоактивних випадань залежно від їхніх фізико-хімічних характеристик.

Використані дані супутникових спостережень

У цій роботі для визначення осередків горіння та інтенсивності виділення тепла в них під час лісових пожеж у квітні 2020 р. використовувались дані спостережень [3] із чотирьох супутників:

1. Terra (запущений у рамках програми NASA Earth Observing System 18.12.1999 р.).
2. Aqua (запущений 04.05.2002 р.).
3. Suomi NPP (S-NPP, Suomi National Polar-orbiting Partnership) — експериментальний супутник із серії супутників космічної програми Joint Polar Satellite System (Об'єднана полярна космічна система), запущений 28.10.2011 р.
4. NOAA-20 (JPSS-1) — перший оперативний супутник цієї серії, запущений 18.11.2017 р.

Перші два супутники для спостережень за пожежами на земній поверхні використовують спектрорадіометри MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Космічні апарати серії JPSS обладнано для зйомки земної поверхні радіометрами VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), аналогічними до MODIS, але й суттєво покращеними характеристиками (табл. 1).

Архівні дані про активні пожежі на території України з 3 по 22 квітня 2020 р. було отримано на сайті Fire Information for Resource Management System (FIRMS) Національного управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (NASA) США [3]. Після виділення осередків природних пожеж у ЗВ та прилеглих до неї територіях (включаючи Овруцький район Житомирської області) було сформовано базу даних, яка включала для кожного пікселя із зафіксованою пожежею на цій території дані про координати його центру, дату та час вимірювань, значення FRP, назву супутника та іншу інформацію

Таблиця 1. Основні технічні характеристики радіометрів, що використовуються для спостережень за пожежами

Тип радіометра	Кількість спектральних каналів	Спектральний діапазон, мкм	Діапазон для детектування пожеж, мкм	Просторова роздільність у надирі, м	Мінімальне значення вимірюваного FRP, МВт на піксель
MODIS	36	0,41–14,4	Канал № 21 (3,929–3,989)	1 000	<10
VIIRS	22	0,41–12,5	Канал № 14 (3,55–3,93) M13 (3,973–4,128)	375 — I-Bands (750 — M-Bands)	<1

(усього 10 751 запис). Загальні характеристики даних про значення FRP згідно з супутниковими вимірюваннями наведено в табл. 2. Вони значно різняться для вимірювань за допомогою радіометрів різного типу (MODIS або VIIRS), хоча фактично містять інформацію про просторово-часову динаміку тих самих подій. Відмінності в даних різних супутників пояснюються вищою роздільною здатністю та вищою чутливістю радіометрів VIIRS, а також різним часом проходження супутників над територією України: щодобові вимірювання супутника Terra проводяться приблизно на 2 год раніше інших удень та на 4–5 год раніше вночі. Унаслідок вищої роздільної здатності радіометрів VIIRS кількість осередків пожеж у ЗВ (кількість пікселів на карті пожеж), зафіксованих супутниками S-NPP та NOAA-20, виявилася майже на порядок більшою, ніж за даними MODIS на супутниках Terra та Aqua. Значна частина з них — це дрібні осередки горіння (рис. 1), які у випадку їхнього близького розташування радіометр MODIS може сприймати як єдиний осередок із великим значенням FRP. Саме тому, незважаючи на такі великі відмінності в кількості зареєстрованих осередків, розбіж-

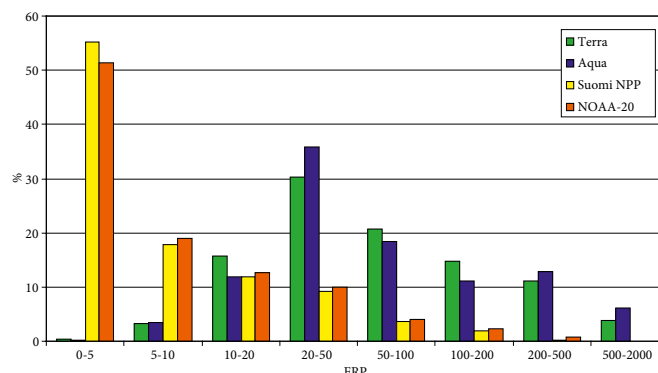


Рис. 1. Відносний розподіл (у відсотках) кількості осередків горіння в ЗВ протягом 3–22 квітня 2020 р. залежно від значення FRP (МВт) для чотирьох супутників

ності в сумі значень FRP за період пожеж по всій території, що розглядається, для різних супутників не перевищують 20 % (див. табл. 2).

Хоча оцінки сумарних значень FRP за весь період пожеж задовільно узгоджуються з даними різних супутників, просторово-часова динаміка розповсюдження районів пожеж по території ЗВ відтворюється набагато краще за результатами вимірювань більш

Таблиця 2. Загальні характеристики масиву значень FRP для пожеж у ЗВ та Овруцькому районі у квітні 2020 р. за супутниковими вимірюваннями [3]

Характеристика	Terra	Aqua	S-NPP	NOAA-20
Кількість детектованих осередків пожеж(пікселів з пожежами)	525	514	4983	4729
Час вимірювань (ранок — день), UTC	07 ³⁰ –10 ³⁰	09 ²⁵ –12 ²⁰	08 ⁴² –12 ²⁴	08 ³⁰ –12 ¹⁸
Час вимірювань (вечір — ніч), UTC	18 ²⁵ –20 ⁴⁰	23 ²⁰ –01 ²⁵	22 ¹⁸ –02 ⁰⁰	22 ⁰⁶ –01 ⁵⁴
Сума FRP (МВт) за весь період пожеж у ЗВ	60 281,5	65 906,3	65 987,4	73 659,1
Мінімальне FRP, МВт	3,2	4,2	0,4	0,4
Медіана FRP, МВт	50,4	49,3	4,2	4,9
Максимальне FRP, МВт	1 872,2	1 568,2	616,8	403,9

сучасних радіометрів VIIRS. На рис. 2 наведено дані про розташування окремих джерел горіння згідно з вимірюваннями за допомогою MODIS (на супутнику Terra) та VIIRS (на супутнику S-NPP). Видно, що загальна картина розповсюдження фронту пожеж у часі відтворюється згідно з даними радіометра VIIRS з більшою деталізацією. В умовах великих градієнтів щільності випадань у центральній частині ЗВ коректна оцінка площ та розташування окремих осередків пожеж може значно зменшити інтервал невизначеності оцінок емісії радіонуклідів в атмосферу.

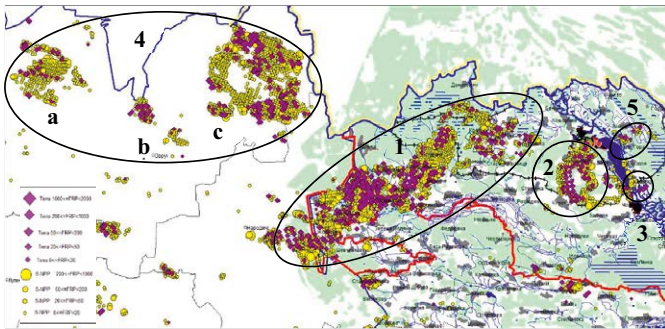


Рис. 2. Карта розташування окремих джерел горіння в ЗВ та Овруцькому районі Житомирської області протягом 3–22 квітня 2020 р. за даними спостережень супутників Terra (◆) та S-NPP (●). Овалами показано основні райони лісових пожеж

У цілому проблемі узгодження результатів вимірювань характеристик пожеж за даними різних супутників присвячено багато робіт [7, 9]. Обговорення можливості об'єднання узгоджених даних спостережень різних супутників в єдиний масив для оцінок емісії радіоактивних аерозолів під час лісових пожеж виходить за рамки цієї статті. Тому надалі зазначені вище набори даних вимірювань чотирьох супутників розглядаються як альтернативні з подальшим вибором найбільш прийняттого з них для отримання остаточних результатів.

Оцінка значень енергії радіаційного випромінювання під час пожеж FRE за даними супутникових спостережень

Спостереження кожного з чотирьох супутників над заданим районом виконуються двічі на добу (див. табл. 2) з періодичністю близько 12 год. Енергія радіаційного випромінювання FRE (МДж) (формула (1)) протягом кожної доби із заданої території пожежі як інтеграл у часі від значень FRP може бути чисельно оцінена двома способами.

1. Через напівсуму двох вимірювань протягом доби:

$$FRE_{(Sum)} = \frac{T}{2} \cdot (FRP_{meas}^{(N)} + FRP_{meas}^{(D)}), \quad (2)$$

де $FRP_{meas}^{(N)}$ і $FRP_{meas}^{(D)}$ — значення вимірювань потужності радіаційного випромінювання (МВт) у нічний та денний періоди доби відповідно, $T = 86400$ с.

2. У роботі [10] на основі аналізу даних супутникових спостережень показано, що в період пожежі величина FRP має чітко виражений добовий хід, і запропоновано формулу для її параметризації

$$FRP(t) = FRP_{peak} \left[b + \exp\left(-\frac{(t-h)^2}{2\sigma^2}\right) \right], \quad (3)$$

де t — час (год), а FRP_{peak} , b , σ , h — параметри, що визначаються залежно від регіону спостережень (рис. 3). Параметр h (год) відповідає місцевому часу, в який величина FRP досягає максимуму. Для оцінки величин b , σ , h у роботі [10] запропоновано емпіричні залежності від відношення значень вимірювань FRP (Terra)/ FRP (Aqua) для цього регіону.

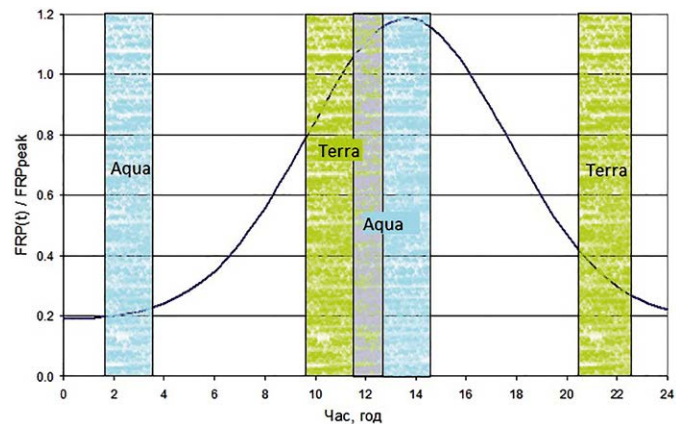


Рис. 3. Параметризація добового ходу нормалізованої потужності радіаційного випромінювання $FRP(t)/FRP_{peak}$ для вимірювань у ЗВ. Стовпчиками показано періоди проведення вимірювань супутниками Terra і Aqua за місцевим часом (Київський час = UTC + 2, без урахування зміщення на літній час)

Будемо вважати, що за наявності двох вимірювань протягом доби залежність потужності радіаційного випромінювання FRP від часу можна описати для нічного ($0 < t < T/4$; $3T/4 < t < T$) та денного ($T/4 < t < 3T/4$) періодів однаковими функціональними залежностями (3), але з різними значеннями $FRP_{peak}^{(N)}$ і $FRP_{peak}^{(D)}$ відповідно. Тоді оцінка енергії радіаційного випромінювання $FRE_{(Int)}$ цим способом може бути виконана за допомогою виразу

$$\begin{aligned}
 \text{FRE}_{(\text{Int})} &= \int_0^{T/4} \text{FRP}^{(N)}(t) dt + \int_{T/4}^{3T/4} \text{FRP}^{(D)}(t) dt + \int_{3T/4}^T \text{FRP}^{(N)}(t) dt = \\
 &= \text{FRP}_{\text{peak}}^{(N)} \left\{ \frac{bT}{2} + \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[\text{erf} \left(\frac{h}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{erf} \left(\frac{h-T/4}{\sqrt{2}\sigma} \right) + \text{erf} \left(\frac{T-h}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \right. \right. \\
 &\left. \left. - \text{erf} \left(\frac{3Th/4 -}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \right\} + \text{FRP}_{\text{peak}}^{(D)} \left\{ \frac{bT}{2} + \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[\text{erf} \left(\frac{h-T/4}{\sqrt{2}\sigma} \right) + \right. \right. \\
 &\left. \left. + \text{erf} \left(\frac{3Th/4 -}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \right\}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Параметри $\text{FRP}_{\text{peak}}^{(N)}$ і $\text{FRP}_{\text{peak}}^{(D)}$ обчислюються за даними вимірювань $\text{FRP}_{\text{meas}}^{(N)}(t = t_{\text{meas},N})$ і $\text{FRP}_{\text{meas}}^{(D)}(t = t_{\text{meas},D})$ у відповідну частину доби за формулою (3):

$$\text{FRP}_{\text{peak}}^{(N)} = \text{FRP}_{\text{meas}}^{(N)}(t_{\text{meas},N}) \left[b + \exp \left(-\frac{(t_{\text{meas},N} - h)^2}{2\sigma^2} \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$\text{FRP}_{\text{peak}}^{(D)} = \text{FRP}_{\text{meas}}^{(D)}(t_{\text{meas},D}) \left[b + \exp \left(-\frac{(t_{\text{meas},D} - h)^2}{2\sigma^2} \right) \right]^{-1}, \quad (6)$$

де $t_{\text{meas},N}$ і $t_{\text{meas},D}$ — час нічних та денних вимірювань.

Відзначимо, що за наявності оцінки загально-го викиду врахування добового ходу інтенсивності емісії радіоактивних аерозолів згідно з формулою (3) може суттєво уточнити результати модельних розрахунків дисперсії радіонуклідів, які надходять в атмосферу при лісових пожежах.

Результати

Відповідно до загального опису розвитку лісових пожеж у ЗВ та прилеглих до неї районах [1, 2] було виділено 5 основних територій горіння з 3 по 21 квітня 2020 р. (див. рис. 2): 1) у Поліському районі (від смт Народичі до кордону з Білоруссю); 2) у 10-кілометровій зоні поблизу с. Чистоголівка; 3) поблизу південного берега водойми-охолоджувача (ВО) Чорнобильської АЕС; 4) в Овруцькому районі Житомирської області; 5) на лівому березі р. Прип'ять.

За даними вимірювань значень FRP у ЗВ для всього використаного набору супутникових даних було обчислено середнє за набором відношення значень вимірювань $\text{FRP}(\text{Terra})/\text{FRP}(\text{Aqua}) = 0,765$. Згідно з [10] для цього значення параметри функції (3) дорівнюють $b = 0,185$; $\sigma = 4,01$; $h = 13,6$ год (момент максимального значення добового ходу потужності радіаційного випромінювання під час лісової пожежі

за місцевим часом, у цьому випадку UTC + 2 год). Двома вище зазначеними способами було обчислено добові значення енергії радіаційного випромінювання $\text{FRE}_{(\text{Sum})}$ і $\text{FRE}_{(\text{Int})}$ за період з 3 по 21 квітня 2020 р. окремо для чотирьох основних регіонів лісових пожеж (усього 34 значення FRE в кожному ряду). Пожежа поблизу ВО Чорнобильської АЕС (область 3 на рис. 2) окремо не розглядалась унаслідок її незначного внеску в загальний баланс оцінок енергії та емісії радіоактивного аерозолу в атмосферу. У табл. 3 наведено результати обчислення значень FRE за даними вимірювань супутника S-NPP методом, що враховує добовий хід FRP.

У табл. 4 наведено коефіцієнти кореляції між рядами значень FRE, розрахованих двома різними методами чисельного інтегрування за даними кожного з чотирьох супутників, а також сумарні значення $\text{FRE}_{\text{Total}}$ по всій території пожеж у ЗВ за період 3–21 квітня 2020 р. Варіабельність оцінок сумарної енергії $\text{FRE}_{\text{Total}}$ для різних супутників досягає 40 %, а залежно від методу обчислення FRE для того самого супутника — до 34 %. Як видно з таблиці, узгодженість між рядами оцінок, зроблених тим самим методом, дещо вище. При цьому використання методу з урахуванням добового ходу на загал підвищує значення коефіцієнта кореляції у порівнянні з методом простого сумування. Оцінки, зроблені цим методом, дають найбільше значення $\text{FRE}_{\text{Total}}$ за даними вимірювань супутника S-NPP, що може бути показником найкращого детектування осередків пожеж 2020 р. в ЗВ серед усіх супутників. Тому остаточні оцінки емісії радіоактивних аерозолів, зроблені в цій роботі, базуються на результатах вимірювань значень FRP радіометром VIIRS супутника S-NPP та обчислень енергії FRE методом, що враховує добовий хід FRP (див. табл. 3).

Згідно з формулою (1) значення активності радіоактивних аерозолів, що надходять в атмосферу під час лісової пожежі, пропорційне добутку енергії радіаційного випромінювання FRE і щільності радіоактивних випадань на території пожежі D . Тому було обчислено добутки $\text{FRE} \cdot D$ за даними кожного з чотирьох супутників і для FRE, розрахованої двома різними методами чисельного інтегрування для основних регіонів пожеж (у табл. 3 наведено приклад результатів обчислень за даними вимірювань супутника S-NPP методом, що враховує добовий хід FRP). Значення щільності випадань D для областей пожеж вибирались згідно з [2]. Якщо вважати значення коефіцієнта C_r з формули (1) постійним і незалежним від характеристик території горіння, то варіації добутку

Таблиця 3. Добові значення енергії радіаційного випромінювання FRE (МДж) та добутку FRE на щільність випадань $^{137}\text{Cs } D$ (кБк/м²) для кожного з чотирьох основних регіонів пожеж

Дата	Поліський район		Копачі		Овруцький район		Лівий берег	
	FRE	FRE×D	FRE	FRE×D	FRE	FRE×D	FRE	FRE×D
03.04	$6,48 \cdot 10^6$	$4,54 \cdot 10^9$						
04.04	$2,01 \cdot 10^8$	$1,41 \cdot 10^{11}$						
05.04	$2,57 \cdot 10^7$	$2,57 \cdot 10^{10}$						
06.04	$1,30 \cdot 10^7$	$1,30 \cdot 10^{10}$						
07.04	$5,11 \cdot 10^7$	$1,28 \cdot 10^{10}$						
08.04	$1,82 \cdot 10^8$	$4,54 \cdot 10^{10}$	$5,83 \cdot 10^5$	$2,10 \cdot 10^9$				
09.04	$6,98 \cdot 10^7$	$1,74 \cdot 10^{10}$	$2,67 \cdot 10^7$	$9,62 \cdot 10^{10}$				
10.04	$1,69 \cdot 10^8$	$4,22 \cdot 10^{10}$	$9,30 \cdot 10^6$	$3,35 \cdot 10^{10}$				
11.04	$3,24 \cdot 10^7$	$9,71 \cdot 10^9$	$4,97 \cdot 10^5$	$1,79 \cdot 10^9$				
12.04	$1,40 \cdot 10^8$	$8,42 \cdot 10^{10}$	$3,36 \cdot 10^6$	$1,21 \cdot 10^{10}$				
13.04	$1,32 \cdot 10^8$	$5,26 \cdot 10^{10}$	$8,97 \cdot 10^6$	$3,23 \cdot 10^{10}$				
14.04	0	0						
15.04	0	0						
16.04	$4,83 \cdot 10^6$	$9,66 \cdot 10^8$			$1,26 \cdot 10^6$	$4,55 \cdot 10^9$	$4,25 \cdot 10^4$	$1,53 \cdot 10^8$
17.04	$3,38 \cdot 10^7$	$1,18 \cdot 10^{10}$			$1,11 \cdot 10^7$	$3,99 \cdot 10^{10}$	$7,89 \cdot 10^5$	$2,84 \cdot 10^9$
18.04	$3,38 \cdot 10^7$	$2,03 \cdot 10^{10}$			$3,58 \cdot 10^6$	$1,29 \cdot 10^{10}$	$4,86 \cdot 10^5$	$1,75 \cdot 10^9$
19.04	$5,02 \cdot 10^5$	$1,25 \cdot 10^8$			$8,51 \cdot 10^4$	$3,06 \cdot 10^8$	0	0
20.04	$6,05 \cdot 10^6$	$6,05 \cdot 10^8$			$5,00 \cdot 10^5$	$1,80 \cdot 10^9$	$4,00 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^9$
21.04	$7,02 \cdot 10^6$	$7,02 \cdot 10^8$			0	0	$1,31 \cdot 10^5$	$4,71 \cdot 10^8$

Таблиця 4. Коефіцієнти кореляції між рядами добових значень FRE, розрахованих двома методами для кожного з чотирьох основних регіонів пожеж окремо за період 3–21 квітня 2020 р. за даними чотирьох супутників, а також значення сумарної енергії радіаційного випромінювання FRE_{Total}

Супутник і метод обчислення FRE	Terra FRE _(Int)	Aqua FRE _(Int)	S-NPP FRE _(Int)	NOAA-20 FRE _(Int)	Terra FRE _(Sum)	Aqua FRE _(Sum)	S-NPP FRE _(Sum)	NOAA-20 FRE _(Sum)
Terra FRE _(Int)	1	0,697	0,920	0,759	0,962	0,617	0,885	0,610
Aqua FRE _(Int)	0,697	1	0,754	0,873	0,771	0,993	0,828	0,905
S-NPP FRE _(Int)	0,920	0,754	1	0,848	0,852	0,677	0,977	0,716
NOAA-20 FRE _(Int)	0,759	0,873	0,848	1	0,759	0,833	0,850	0,958
Terra FRE _(Sum)	0,962	0,771	0,852	0,759	1	0,716	0,851	0,664
Aqua FRE _(Sum)	0,617	0,993	0,677	0,833	0,716	1	0,772	0,898
S-NPP FRE _(Sum)	0,885	0,828	0,977	0,850	0,851	0,772	1	0,771
NOAA-20 FRE _(Sum)	0,610	0,905	0,716	0,958	0,664	0,898	0,771	1
FRE_{Total}, МДж	60036	47504	67601	54827	44845	57409	73204	65366

FRE · D залежно від дати й місця області пожежі повинні відтворювати часову і просторову варіабельність інтенсивності емісії радіоактивних аерозолів в атмосферу. Тому головним критерієм коректності оцінок інтенсивності емісії радіоактивних аерозолів, виконаних у цій роботі, і, відповідно, усього методу реконструкції цієї величини за даними супутникових вимірювань величини FRP може розглядатися узгодженість отриманих результатів з даними незалежних оцінок — результатів роботи [2] у цьому випадку.

У табл. 5 наведено коефіцієнти кореляції між часовими рядами значень добутку FRE · D за даними кожного з чотирьох супутників для FRE. Із представлених результатів видно, що а) оцінки, в яких енергія радіаційного випромінювання обчислюється з урахуванням добового ходу, на загал дають краще узгодження з результатами [2]; б) відсутня кореляція результатів для оцінок емісії з джерела на лівому березі р. Прип'ять, однак його внесок у загальному викиді активності відносно невеликий; в) з двох супутників, обладнаних радіометрами VIIRS, краще узгодження з результатами [2] дають дані супутника S-NPP (виділено жирним шрифтом у табл. 5).

Для оцінок за даними супутника S-NPP сумарне значення добутків FRE · D по всіх джерелах за весь період з 3 по 21 квітня 2020 р. становило $7,27 \cdot 10^{11}$ МДж · кБк/м². Згідно з [2] сумарна активність емісії ¹³⁷Cs протягом періоду пожеж по всій території оцінено рівною $6,9 \cdot 10^8$ кБк. Тоді за формулою (1) можна оцінити значення коефіцієнта емісії C_p для ¹³⁷Cs як $9,5 \cdot 10^{-4}$ м²/МДж. Похибка його оцінки, пов'язана з ви-

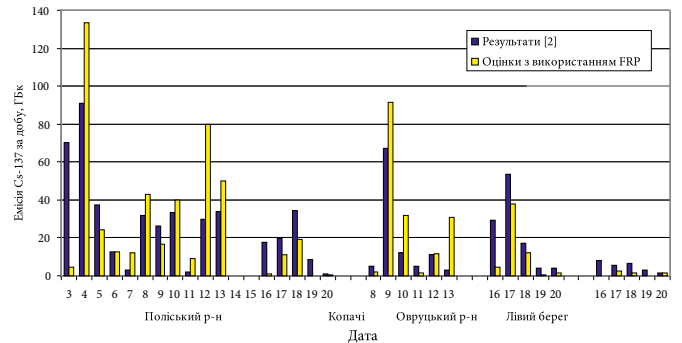


Рис. 4. Порівняння оцінок добової емісії ¹³⁷Cs в атмосферу з основних регіонів пожеж у період 3 по 21 квітня 2020 р. згідно з [2] та за результатами даної роботи

користанням даних інших трьох супутників, дорівнює $\Delta C_p = \pm 1,5 \cdot 10^{-4}$ м²/МДж.

Використовуючи знайдене таким чином значення коефіцієнта емісії C_p за допомогою формули (1) оцінено значення добових викидів з основних осередків пожеж у ЗВ. Їхня часова динаміка та абсолютні значення в цілому задовільно узгоджуються з результатами [2] (рис. 4).

Висновки

1. Запропоновано метод оцінювання активності радіонуклідів, що надходять в атмосферу внаслідок лісових та лугових пожеж на радіоактивно забруднених територіях, оснований на використанні супутникових даних значень потужності радіаційного випромінювання (величина FRP). Ефективність методу показана на прикладі лісових пожеж у ЗВ у квітні 2020 р.

Таблиця 5. Коефіцієнти кореляції між часовими рядами значень добутку FRE · D за даними кожного з чотирьох супутників для FRE, розрахованої двома різними методами, та результатами оцінок активності ¹³⁷Cs, піднятої в повітря внаслідок лісових пожеж у період 3–21 квітня 2020 р. з [2]

Супутник і метод обчислення FRE	Поліський район	Копачі	Овруцький район	Лівий берег	У цілому
Terra FRE _(Int)	0,650	0,970	0,850	0,087	0,725
Aqua FRE _(Int)	0,646	0,965	0,881	-0,676	0,750
S-NPP FRE_(Int)	0,680	0,922	0,891	-0,007	0,746
NOAA-20 FRE _(Int)	0,481	0,859	0,951	-0,156	0,649
Terra FRE _(Sum)	0,500	0,944	0,853	0,093	0,619
Aqua FRE _(Sum)	0,613	0,974	0,747	-0,675	0,722
S-NPP FRE _(Sum)	0,676	0,942	0,913	0,229	0,740
NOAA-20 FRE _(Sum)	0,415	0,869	0,673	-0,061	0,592

2. У порівнянні з методами оцінки емісії радіоактивності, основаними на використанні інформації про екологічні характеристики території горіння (площа горіння, запаси біопалива, його вологість, повнота згорання), запропонований метод використовує лише поточні дані супутникових спостережень про кількість і розташування пікселів з пожежами на карті та значеннями потужності радіаційного випромінювання FRP, а також дані про щільність радіоактивних випадань на території пожежі та значення коефіцієнта емісії активності аерозольних часток C_p , що утворюються під час горіння. Головною перевагою такого підходу є можливість його використання для проведення оперативних оцінювань та прогнозування наслідків лісових пожеж, включаючи модельні оцінювання розповсюдження радіоактивних аерозолів в атмосфері та оцінювання доз опромінення персоналу ЗВ та населення за її межами з використанням комп'ютерних онлайн-систем підтримки прийняття рішень щодо захисту людей від впливу радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

3. Для використання запропонованого підходу необхідно коректно визначити коефіцієнт емісії активності аерозольних часток C_p . У цій роботі на основі співставлення отриманих результатів з оцінками емісії радіонуклідів під час пожеж у ЗВ у квітні 2020 р., які були виконані співробітниками УкрГМІ [2], було отримано його значення $9,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{МДж}$ для ^{137}Cs . Потрібно зазначити, що ці результати можуть розглядатися зараз лише як попередні оцінки, що потребують подальшого уточнення. У загальному випадку коефіцієнт емісії радіоактивних аерозолів C_p , як і його аналог для оцінки маси нерадіоактивних димових часток, повинен залежати від географічного регіону, типу рослинності та землекористування на території пожежі. Його значення має бути уточнене як за результатами ретроспективних досліджень лісових пожеж минулих років на радіоактивно забруднених територіях, так і за даними спеціально поставлених експериментів (зокрема, вимірювань питомої активності аерозольних часток, що утворюються під час пожеж).

Список використаної літератури

1. Талерко М. М. Моделювання атмосферного розповсюдження радіоактивності, винесеної в повітря в результаті лісових пожеж у зоні відчуження у квітні 2020 р. / М. М. Талерко, Т. Д. Лев, І. В. Ковалець, Ю. В. Яценко // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — Вип. 3 (18). — С. 86–104.

2. Процак В. П. Оцінка динаміки виносу радіонуклідів за межі зони відчуження повітряним шляхом під час пожежі 02–20.04.2020 р. / В. П. Процак, О. В. Войцехович, Г. В. Лаптев // Технічний звіт. Український гідрометорологічний інститут ДСНС України та НАН України. — Режим доступу: <https://uhmi.org.ua/msg/fire2020/analytical.pdf>.
3. The Fire Information for Resource Management System (FIRMS). — Available at: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>.
4. Атлас. Україна. Радіоактивне забруднення / за ред. В. І. Холоші. — Київ: ТОВ «Інтелектуальні системи ГЕО», 2002, 2008, 2011. — 52 с.
5. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments / V. I. Yoschenko, V. A. Kashparov, V. P. Protsak [et al.] // J. Environ. Radioact. — 2006. — Vol. 86. — P. 143–163.
6. Wooster M. J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release / M. J. Wooster, G. Roberts, G. L. W. Perry, Y. J. Kaufman // J. Geophys. Res. — 2005. — № 110. — 24 p.
7. Ichoku C. A. Method to Derive Smoke Emission Rates From MODIS Fire Radiative Energy Measurements / C. Ichoku, J. Y. Kaufman // IEEE T. Geosci. Remote. — 2005. — Vol. 43 (11). — P. 2636–2649.
8. An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting / M. Sofiev, R. Vankevich, M. Lotjonen [et al.] // Atmos. Chem. Phys. — 2009. — № 9. — P. 6833–6847.
9. Vadrevu K. Intercomparison of MODIS AQUA and VIIRS I-Band Fires and Emissions in an Agricultural Landscape — Implications for Air Pollution Research / K. Vadrevu, K. Lasako // Remote Sens. — 2018. — Vol. 10. — P. 978.
10. Estimating biomass consumed from fire using MODIS FIRE / E. Ellicott, E. Vermote, L. Giglio, G. Roberts // Geophys. Res. Lett. — 2009. — Vol. 36. — P. L13401.

М. М. Талерко

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

Application of FRP (Fire Radiative Power) to Estimate the Emission of Radionuclides into the Atmosphere due to Forest Fires in the Exclusion Zone in April 2020

A method is proposed for assessing the activity of radionuclides released into the atmosphere during forest and meadow fires in radioactively contaminated areas, based on using satellite measurement data of the fire radiative power (FRP), as well as data on the radionuclide deposition density in the fire area and the value of the emission factor C_r of the activity of aerosol particles formed during fires. The method was applied for forest fires in the Exclusion Zone in April 2020. The used FRP values were obtained from MOD14 (Terra) / MYD14 (Aqua) for MODIS Collection 6, VIIRS (S-NPP) I Band 375 m and VIIRS (NOAA-20/JPSS-1) I Band 375 m AF products of the Fire Information for Resource Management System (NASA). A comparative analysis of the data of these satellites showed that the spatio-temporal dynamics of the spread of fire areas in the Exclusion Zone is better reproduced by the results of VIIRS radiometer measurements. Using the satellite data, calculations of fire radiative energy (FRE) were made taking into account the daily course of aerosol emission intensity. Preliminary estimates of the C_r value were obtained as $9.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{MJ}$ for ^{137}Cs . These results should be considered as preliminary estimates now. In the general case, the emission factor for radioactive aerosols C_r should depend on the geographical region, type of vegetation and land use in the fire area. Its value may be clarified both by the results of retrospective studies of forest fires in recent years in radioactively contaminated areas, and by specially conducted experiments (in particular, measurements of the specific activity of aerosol particles formed during fires). The proposed method enables operational assessments and prediction of the consequences of forest fires, including model assessments of the atmospheric transport of radioactive aerosols and assessments of exposure doses to the personnel of the Exclusion Zone and the population outside it using online computer-based decision support systems for protecting people from the effects of radioactive contamination of the environment.

Keywords: forest fires, resuspension, radionuclides, atmospheric transport, modeling, volumetric air activity, Exclusion Zone, satellite monitoring of fires.

References

1. Talerko M. M., Lev T. D., Kovalets I. V., Yatsenko Yu. V. (2020). [Modeling study of the atmospheric transport of radioactivity released into the air as a result of forest fires in the Exclusion Zone in April 2020]. *Yaderna enerhetyka ta dovkilliya* [Nuclear Power and the Environment], vol. 18, no. 3, pp. 86–104, doi: 10.31717/2311–8253.20.3.10. (in Ukr.)
2. Protsak V. P., Voitsekhovich O. V., Laptev G. V. (2020). *Assessment of the dynamics of radionuclide transport outside the exclusion zone by air during a fire April 02–20, 2020*. Technical Report. Ukrainian Hydrometeorological Institute. Available at: <https://uhmi.org.ua/msg/fire2020/analytical.pdf>. (in Ukr.)
3. *The Fire Information for Resource Management System (FIRMS)*. Available at: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>.
4. Kholosha V. I. (ed.) (2002, 2008, 2011). *Atlas. Ukraine. Radioactive contamination*. Kyiv: Intelligence Systems GEO, 52 p. (in Ukr.)
5. Yoschenko V. I., Kashparov V. A., Protsak V. P., Lundin S. M., Levchuk S. E., Kadygrib A. M., Zvarich S. I., Khomutinin Yu. V., Maloshtan I. M., Lanshin V. P., Kovtun M. V., Tschiersch J. (2006). Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments. *J. Environ. Radioact.*, vol. 86, pp. 143–163, doi: 10.1016/j.jenvrad.2005.08.003.
6. Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W., Kaufman Y. J. (2005). Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. *J. Geophys. Res.*, vol. 110, 24 p., doi: 10.1029/2005JD006318.
7. Ichoku C., Kaufman J. Y. (2005). A Method to Derive Smoke Emission Rates From MODIS Fire Radiative Energy Measurements. *IEEE T. Geosci. Remote.*, vol. 43, no. 11, pp. 2636–2649, doi: 10.1109/TGRS.2005.857328.
8. Sofiev M., Vankevich R., Lotjonen M., Prank M. (2009). An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting. *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9, pp. 6833–6847, doi: 10.5194/acp-9–6833–2009.
9. Vadrevu K., Lasko K. (2018). Intercomparison of MODIS AQUA and VIIRS I-Band Fires and Emissions in an Agricultural Landscape — Implications for Air Pollution Research. *Remote Sens.*, vol. 10, no. 7, pp. 978, doi: 10.3390/rs10070978.
10. Ellicott E., Vermote E., Giglio L., Roberts G. (2009). Estimating biomass consumed from fire using MODIS FRE. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, pp. L13401, doi: 10.1029/2009GL038581.

Надійшла 18.07.2020

Received 18.07.2020