

УДК 621.039

В.В. ДЕРЕНГОВСЬКИЙ*, **О.А. КАФТАНАТИНА***, **П.Л. КОРДЮКОВ***, **Є.А. МЕНЬШЕНИН***,
Є.Г. ГУЛАК,****

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВПЛИВУ РАДІАЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ДОВКІЛЛЯ ПРИ ПОЖЕЖІ

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, Україна

**ТОВ «DTEC Service», м. Київ, Україна

***Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Використовуючи отримані нові дані про оцінку виносу при пожежах від запасів у матеріалі горіння та швидкість поширення слабких низових пожеж, розу вітрів на території чорнобильської зони відчуження та можливості програмного комплексу HotSpot розроблено математичну модель оцінки в реальному часі наслідків аварій, що можуть виникнути на територіях радіаційно небезпечних об'єктів під час пожеж. Виконано верифікацію запропонованої моделі на основі порівняння з отриманими даними при масштабній пожежі на території чорнобильської зони відчуження у квітні 2020 року й побудовано карти забруднення ^{137}Cs та ^{90}Sr повітря та ґрунту чорнобильської зони відчуження. Використовуючи запропоновану математичну модель, виконано аналіз ступеня небезпеки, яку можуть спричинити радіаційно небезпечні об'єкти при виникненні пожежі безпосередньо на їхній території та розглянуто на прикладі пунктів санітарної обробки (ПуСО) «Рудня-Вересня», ПуСО «Розсоха» і «Пункту обмивання автотранспортних засобів біля водоймища-охолоджувача ЧАЕС» у порівнянні з поточним забрудненням радіонуклідами повітря та ґрунту навколо вказаних об'єктів. За результатами виконаного аналізу зроблено висновок про мізерний вплив на довкілля чорнобильської зони відчуження порівняно з існуючим станом забруднення повітря та поверхні її території. Дані оцінки радіаційного впливу на довкілля ПуСО «Рудня-Вересня», ПуСО «Розсоха» і «Пункту обмивання автотранспортних засобів біля водоймища-охолоджувача ЧАЕС», що отримані за допомогою побудованої спрощеної математичної моделі, знаходяться в достатній кореляційній залежності з реальними даними, отриманими у квітні 2020 року (під час масштабної пожежі в чорнобильській зоні відчуження) в районах розташування пунктів автоматизованої системи контролю радіаційного стану та місцях роботи, тимчасового та постійного перебування персоналу й населення. Тому побудована спрощена математична модель також може бути використаною для оцінки радіаційного впливу на довкілля при реалізації аварійних ситуацій різного характеру на інших чисельних радіаційно небезпечних об'єктах ЧЗВ.

Ключові слова: математична модель, пожежа, чорнобильська зона відчуження, ^{137}Cs , ^{90}Sr , довкілля, ПуСО, радіаційний вплив, HotSpot.

Abstract. On the basis of the new data on the assessment of the removal from fires from stocks in the combustible material and the speed of weak grassroots fires spread, the wind rose in the Chernobyl Exclusion Zone and the capabilities of the HotSpot software package, there has been developed a mathematical model of real-time assessment of the consequences of accidents that may occur in the areas of radiation-hazardous objects during fires. The proposed model was verified on the basis of comparison with the data obtained during a large-scale fire in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020, and the maps of the Chernobyl Exclusion Zone's air and soil contamination with ^{137}Cs and ^{90}Sr were made. Using the proposed mathematical model, there has been carried out the analysis of the degree of danger that may create radiation-hazardous objects in case of fire directly on the territory of their location. In the paper, there are also considered the examples of the sanitation point (SP) «Rudnia-Veresnia», SP «Rozsokha» and the «Point of vehicle washing near the ChNPP cooling reservoir» in comparison with the current contamination of air and soil around these facilities with radionuclides. The results of the con-

ducted analysis have been used to make a conclusion about the insignificant impact on the environment of the Chernobyl Exclusion Zone compared to the current level of air pollution and the surface of its territory. Estimates of radiation exposure from SP «Rudnia-Veresnia», SP «Rozsokha» and the «Point of vehicle washing near the ChNPP cooling reservoir" to the environment have been obtained with the help of a simplified mathematical model. These data have a significant correlation with the actual data obtained in April 2020 (during a large-scale fire in the Chernobyl Exclusion Zone) in the areas of location of the points of the automated system of radiation condition control, and places of work, temporary and permanent stay of the personnel and the population. Therefore, the created simplified mathematical model can also be used to assess the radiation impact on the environment in the implementation of emergencies of various kinds at other numerous radiation-hazardous facilities of the ChEZ.

Keywords: mathematical model, fire, Chernobyl Exclusion Zone, ^{137}Cs , ^{90}Sr , environment, SP, radiation exposure, HotSpot.

DOI: 10.34121/1028-9763-2021-4-99-111

1. Вступ

У даний час на території Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) існують чисельні об'єкти, що утворювались під час активної фази ліквідації аварії на ЧАЕС у 1986 році, а в подальшому залишилися покинутими, тобто на їхній території не здійснюється постійний контроль радіаційного стану. Серед таких об'єктів пункти санітарної обробки (ПуСО) та пункти тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ).

Аналіз ступеня небезпеки, яку можуть спричинити покинуті радіаційно небезпечні об'єкти при виникненні на їхній території аварійних ситуацій, розглянуто на прикладі ПуСО «Рудня-Вересня», ПуСО «Розсоха» і «Пункту обмивання автотранспортних засобів біля водоймища-охолоджувача ЧАЕС» (далі по тексту «Пункт обмиву») [1].

За відсутності діяльності людини покинуті ПуСО і «Пункт обмиву» (далі по тексту об'єкти дослідження) не можуть розглядатися як потенційно небезпечні об'єкти. Проте ймовірність такої діяльності неможливо виключити повністю. З часом зменшується радіоактивне забруднення на залишках металевих конструкцій, що у значній кількості знаходяться на території цих об'єктів, тому у довгостроковій перспективі не виключена можливість спроб дезактивації і вивезення залишків металевого лому. Тобто певний вплив на довкілля може відбутись.

Метою статті є розробка математичної моделі оцінювання в реальному часі наслідків аварій, що можуть виникнути на територіях таких об'єктів, а також детальне вивчення викидів в атмосферу радіоактивних речовин, виконані з застосуванням програмного комплексу HotSpot, розробленого науковцями Національного консультативного центру Національної лабораторії ім. Лоуренса Лівермору (NARAC). Це актуальна задача на даний час.

2. Стислий опис об'єктів дослідження

За часів експлуатації території ПуСО «Рудня-Вересня», ПуСО «Розсоха» і «Пункту обмиву» являли собою комплекси наземних споруд, що склалися з енергетичних об'єктів; компресорів; ділянок з ємностями підготовки розчинів для дезактивації; майданчиків для стоянки автотранспорту; закритих споруд або відкритих майданчиків для дезактивації автотранспортних засобів; систем металевих ємностей; трубопроводів і шламо-відстійників для збирання забрудненого відпрацьованого розчину. Території обох ПуСО і «Пункту обмиву» мали системи внутрішньомайданчикових під'їзних шляхів та окремого шляху для в'їзду «брудного» транспорту і шляху для виїзду «чистого» транспорту. Майданчики і автошляхи мали тверде покриття з бетону і бетонних плит.

ПуСО і «Пункт обмиву» активно функціонували:

– ПуСО «Рудня-Вересня» – до середини 1995 року з наступним заморожуванням об'єкта;

- ПуСО «Розсоха» – до 1988 року з наступним заморожуванням об'єкта;
- «Пункт обмиву» – до середини 1987 років із наступним заморожуванням об'єкта.

Основне насосне та електричне обладнання з зазначених вище об'єктів було демонтоване і вивезене, а самі об'єкти залишилися покинутими.

Частина металевих ємностей з цих об'єктів також була демонтована і дезактивована для використання як металевого брухту.

ПуСО «Розсоха» деякий час використовувався для зберігання зламаних і радіоактивно забруднених транспортних засобів та будівельних механізмів. З 2006 року почався процес ліквідації відстійника техніки, що зберігалась на ньому. Наявна техніка у більшій своїй кількості була дезактивована до прийнятних показників щодо забруднення, порізана і вивезена для господарського використання як металевого брухту. У даний час цілої техніки на майданчику відстійника ПуСО «Розсоха» не залишилось. Найбільш радіоактивно забруднені фрагменти, деталі та залишки транспортних засобів, які не піддавалися дезактивації, були покинуті на території ПуСО.

Станом на серпень 2020 року території ПуСО і «Пункту обмиву» повністю поросли молодими деревами і чагарниками. Бетонні майданчики хоча і не повністю втратили бетонне покриття, але у багатьох місцях воно пошкоджене трав'янистими і кущовими рослинами. Місця приготування розчинів для дезактивації і шламо-відстійники затоплені і заболочені. Будівлі дезактивації транспортних засобів і керування приводами насосів збереглися, але під впливом атмосферних чинників їхні несучі і огорожувальні конструкції поступово руйнуються і можуть завалитися. Існує підозра розгерметизації і руйнування конструкцій підземних резервуарів.

3. Передумови виникнення радіоактивних викидів

Максимально можливі радіаційні впливи на довкілля від об'єктів дослідження можуть бути такими [1]:

- викиди при потенційних роботах на території цих об'єктів із пошкодженням лісової підстилки;
- викиди при пожежі, що можуть виникнути від природних чинників або діяльності людини.

Потенційні роботи на території об'єктів дослідження, зокрема, можуть статись при виконанні робіт із вилучення металевих фрагментів і деталей, залишених на об'єктах дослідження (за умови зменшення радіоактивного забруднення металевих конструкцій до рівня, прийнятного для дезактивації). Такий вид діяльності людини (втручання у сталий спокій території об'єктів дослідження) може викликати певне здіймання пилу, яке виникає через порушення існуючої поверхні трав'яного покриву та лісової підстилки, що утворилась за ці роки. При цьому частина забруднення у вигляді пилової іржі може неконтрольовано потрапити на існуючу поверхню майданчиків.

Природа походження пожеж на території ЧЗВ, що зазнала забруднення під час ліквідації аварії на ЧАЕС, є різною і може відбуватися як від природних чинників (удар блискавки, самозагоряння від оптичного ефекту роси тощо), так і від діяльності людини (необережне поводження з вогнем, підпал).

Викиди при роботах на території об'єктів дослідження матимуть локальний характер і обмежуватимуться територією цих об'єктів на відміну від викидів, що спричиняються пожежею. Тому як аварійна ситуація, що може виникнути на об'єктах дослідження, розглядається пожежа (як аварія з максимальними наслідками).

4. Побудова моделі розрахунку впливу радіаційно небезпечних об'єктів при пожежі

Для розрахункового модуля математичної моделі оцінювання в реальному часі наслідків аварій при пожежі на довкілля від радіаційно небезпечних об'єктів було обрано програмний комплекс HotSpot, розроблений науковцями Національного консультативного центру Національної лабораторії ім. Лоуренса Лівермору (NARAC). Розрахунки в HotSpot базуються на дифузних моделях перенесення домішок в атмосфері, а саме:

– моделі атмосферного розсіювання плутонію за умов вибуху, пожежі та ресуспензії;

– моделі неядерного розсіювання урану при пожежі.

Також програмний комплекс містить програмні блоки, які дають можливість розраховувати викид будь-якого радіонукліда або суміші радіонуклідів, які знаходяться в бібліотеці HotSpot (ICRP 30, ICRP60 тощо). За допомогою цих моделей оцінюється радіаційний вплив (до 10 км) у результаті короткочасного впливу (менше декількох годин). Крім того, HotSpot дає змогу зберігати сценарій викиду та створювати, редагувати або додавати суміш радіонуклідів (до суміші можна включити до 50 радіонуклідів).

Основним чинником впливу на довкілля, який приймався при розрахунках, був розрахунок викиду радіонуклідів при пожежі на території об'єктів дослідження.

HotSpot дозволяє здійснювати візуалізацію результатів моделювання тільки в декількох виглядах: як графік та у вигляді просторових контурів розповсюдження забруднення (з можливістю географічної прив'язки даних розрахунків до будь-якої топографічної основи), але не дозволяє візуалізувати сукупний вплив на довкілля від декількох об'єктів дослідження. Для цього використовувалась геоінформаційна система Golden Software Surfer 15 (Surfer), де за методом Крайгенга здійснюється побудова картосхем забруднення.

Метод Крайгенга використовує математичні функції для певної кількості точок або всіх точок у межах заданого радіуса, щоб визначити вихідне значення для всіх напрямків. Для розрахунку викидів від об'єктів дослідження у програмному комплексі HotSpot використано картосхеми, побудовані за методом Крайгенга. В їхній основі дані щодо поверхневого забруднення ЧЗВ ^{137}Cs та ^{90}Sr станом на 2001 рік [2], які було перераховано на 2020 рік, з урахуванням періоду напіврозпаду.

На рис. 1 подано картосхему поверхневого забруднення ЧЗВ (розрахованого станом на 2020 р.) для ^{137}Cs та ^{90}Sr .

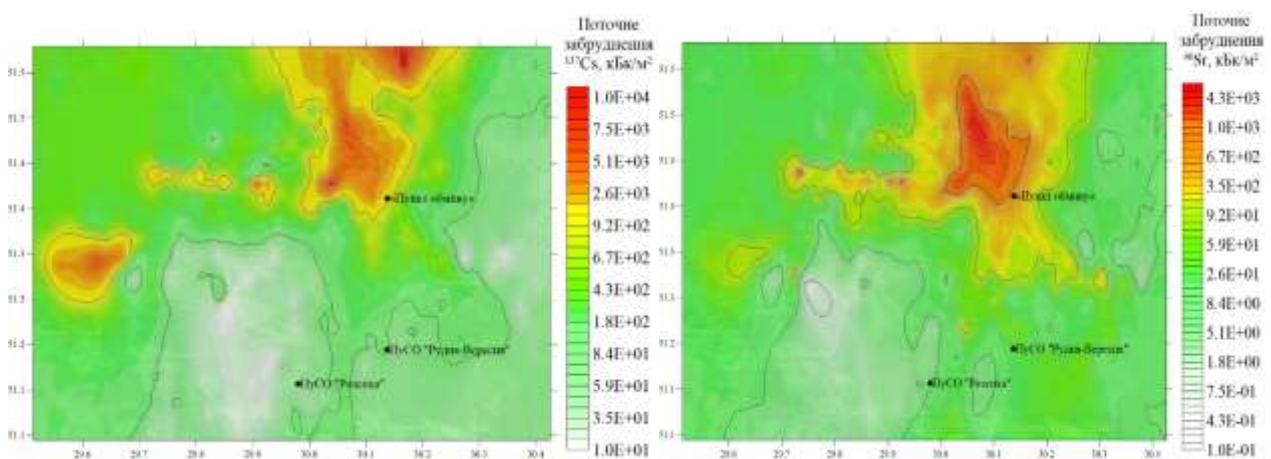


Рисунок 1 – Картосхема поверхневого забруднення ЧЗВ ^{137}Cs та ^{90}Sr станом на 2020 р.

Для обраних об'єктів дослідження з побудованих картосхем забруднення ЧЗВ отримано дані щодо поверхневого забруднення їхньої території радіонуклідами ^{137}Cs та

^{90}Sr . Усереднені дані надано в табл. 1 (координати об'єктів дослідження надано в градусах у вигляді десяткового дробу в системі WGS84).

Таблиця 1 – Усереднені дані поверхневого забруднення території ЧЗВ

№ з/п	Назва об'єкта	Координати об'єкта		Поверхнєве забруднення, кБк/м ²	
		Довгота	Широта	^{137}Cs	^{90}Sr
1	ПуСО «Рудня-Вересня»	51,194417	30,137528	103	26
2	ПуСО «Розсоха»	51,157806	29,980822	46	9
3	«Пункт обмиву»	51,361667	30,136806	1225	778

У процесі розрахунку викидів від об'єктів дослідження у програмному комплексі HotSpot (сценарій «General Fire») використовуються кілька величин і коефіцієнтів, які впливають на величину викиду, що розраховується:

– MAR (Material at Risk) – загальна кількість радіонукліда, що розташована на площі загоряння і бере участь у сценарії викиду;

– ARF (Airborne Fraction) – частина MAR, яка розпорошується і викидається в атмосферу;

– DR (Damage Ratio) – частка MAR, на яку фактично впливає сценарій викиду (в даному випадку цей коефіцієнт дорівнює одиниці, тому що у сценарії бере участь уся задана активність);

– LPF (Leakpath Factor) – частина MAR, яка проходить через будь-який механізм обмеження або фільтрації (застосовується для повітря, що проходить через установки фільтрації повітря). Для сценаріїв необмеженого викиду Leakpath Factor дорівнює одиниці;

– Release Radius – ефективний радіус пожежі, м;

– Surface roughness – величина шорсткості поверхні, см (трава висотою 30 см відповідає величині шорсткості поверхні 3,0 см, дерева висотою 18,0 м відповідають величині шорсткості поверхні 180 см).

При виконанні розрахунку викидів обирається:

– тип рельєфу – Standart;

– висота пожежі – 0,0 м;

– висота хмари пожежі – 20,0 м;

– швидкість вітру на висоті 10,0 м – 3,0 м/с;

– стійкість атмосфери за пасквілем – C;

– погодні умови – сонце розташовується низько на небосхилі або хмарно.

Розрахунок коефіцієнта ARF виконується на основі інформації [3]. Коефіцієнт ARF залежить від складу ділянки пожежі (ліс або луки) і відсотка переходу певного радіонукліда з частиною матеріалу горіння до хмари пожежі.

Відомо, що під час пожеж частина радіонуклідів також виноситься в атмосферу з частинками попелу. Винос радіонуклідів із частинками попелу за рахунок конвективного здійснення пилу буде залежати від інтенсивності горіння, температури, погодних умов та інших факторів. Але дане перенесення матиме локальний характер, оскільки частинки попелу мають відносно великий розмір ($AMAD > 10$ мкм) і осідають на відстанях до 3,0 км від джерела за рахунок гравітаційного осадження. Для розрахунків далекого перенесення (більше 3,0 км), згідно з [3], в розрахунках викиду радіонуклідів у повітря (консервативний підхід) використано таку оцінку виносу при пожежах від запасів у матеріалі горіння:

– для ^{137}Cs – 5%;

– для ^{90}Sr і ΣPu – 0,2%.

Поверхнєве забруднення (MAR, Бк) розраховується з урахуванням площі загоряння. У табл. 2 для кожного об'єкта дослідження надано радіус пожежі, розраховані коефіцієнти

ARF [1] і вихідні дані для розрахунку величини викидів залежно від виду рослинного покриття і частки виносу радіонуклідів.

Таблиця 2 – Вихідні дані для розрахунку величини викидів від об'єктів дослідження [1]

ПуСО «Рудня-Вересня»					
Широта	51,194417	Швидкість вітру на висоті 10 м, м/с	3	Радіонуклід	
Довгота	30,137528			¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Рельєф	Standard	MAR (Material at Risk), Бк		2,91E+10	7,35E+09
Висота хмари, м	20	ARF (Airborne Fraction)		3,13E-03	3,05E-04
Фізична висота пожежі, м	0	Радіус пожежі, м		300	
		Surface roundness, см		10	
ПуСО «Розсоха»					
Широта	51,157806	Швидкість вітру на висоті 10 м, м/с	3	Радіонуклід	
Довгота	29,980822			¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Рельєф	Standard	MAR (Material at Risk), Бк		1,30E+10	2,55E+09
Висота хмари, м	20	ARF (Airborne Fraction)		3,13E-03	3,05E-04
Фізична висота пожежі, м	0	Радіус пожежі, м		300	
		Surface roundness, см		80	
Пункт обмиву					
Широта	51,361667	Швидкість вітру на висоті 10 м, м/с	3	Радіонуклід	
Довгота	30,136806			¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Рельєф	Standard	MAR (Material at Risk), Бк		6,49E+10	4,12E+10
Висота хмари, м	20	ARF (Airborne Fraction)		5,50E-03	5,60E-04
Фізична висота пожежі, м	0	Радіус пожежі, м		130	
		Surface roundness, см		180	

Програмний комплекс HotSpot призначений для малих відстаней (менш 10 км) і короткострокових прогнозів (менше кількох годин). До того ж розрахунок викиду у програмному комплексі HotSpot здійснюється в одному напрямку (без урахування рози вітрів, що є характерною для даної території).

Згідно з [4], швидкість поширення слабких низових пожеж сягає 3,0 м/хв. На основі даних, наданих у табл. 2, сформовано файли з даними суміші радіонуклідів для кожного об'єкта дослідження [1].

Як сказано вище, програмний комплекс HotSpot дозволяє виконати розрахунок величин викидів з імовірністю «одиниця» тільки в одному напрямку. Побудова картосхем викидів об'ємної концентрації радіонуклідів в атмосфері і випадіння радіонуклідів на поверхню землі від об'єктів дослідження з урахуванням рози вітрів, що є характерною для даної місцевості, здійснюється в геоінформаційній системі Surfer, яка дозволяє візуалізувати сумарний одночасний викид від об'єктів дослідження шляхом підсумовування GRD-файлів викидів від окремих об'єктів. Для цього на основі вихідних даних у MS Excell сформовано таблиці розрахунків координат точок і значень параметрів викиду залежно від напрямку вітру в розі вітрів [1]. У вихідному масиві даних містяться дані про координати об'єкта; розу вітрів; розрахункові параметри викиду на відстані від 0,5 до 10,0 км від об'єктів дослідження. Інформацію про напрямки вітрів взято з [5].

Отримані за допомогою геоінформаційної системи Surfer картосхеми сумарного одночасного об'ємного забруднення атмосфери ЧЗВ радіонуклідами ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr від об'єктів дослідження (при реалізації сценарію «General Fire») представлено на рис. 2 і 3, а картосхеми сумарного одночасного випадіння на поверхню землі радіонуклідів ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr – на рис. 4.

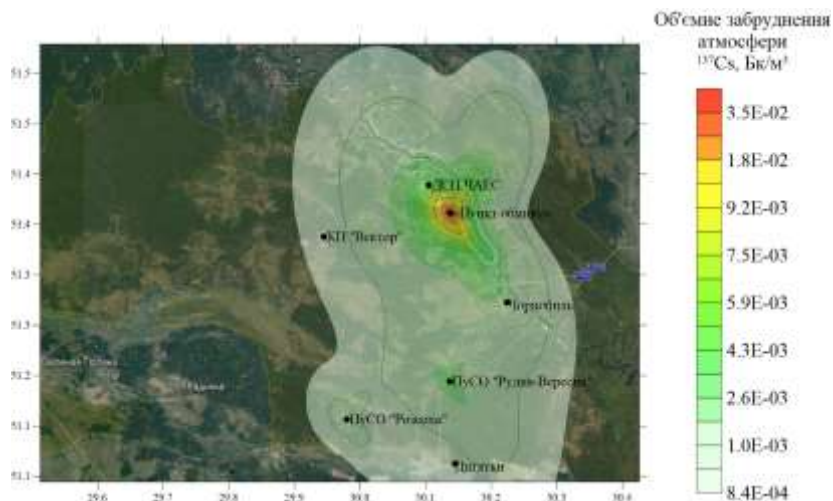


Рисунок 2 – Картошка сумарного одночасного об'ємного забруднення атмосфери ЧЗВ радіонуклідом ^{137}Cs при сценарії «General Fire»

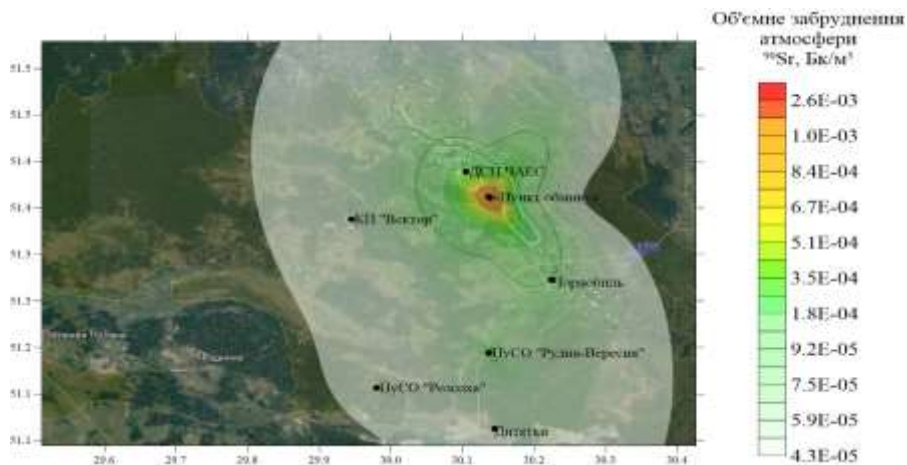


Рисунок 3 – Картошка сумарного одночасного об'ємного забруднення атмосфери ЧЗВ радіонуклідом ^{90}Sr при сценарії «General Fire»

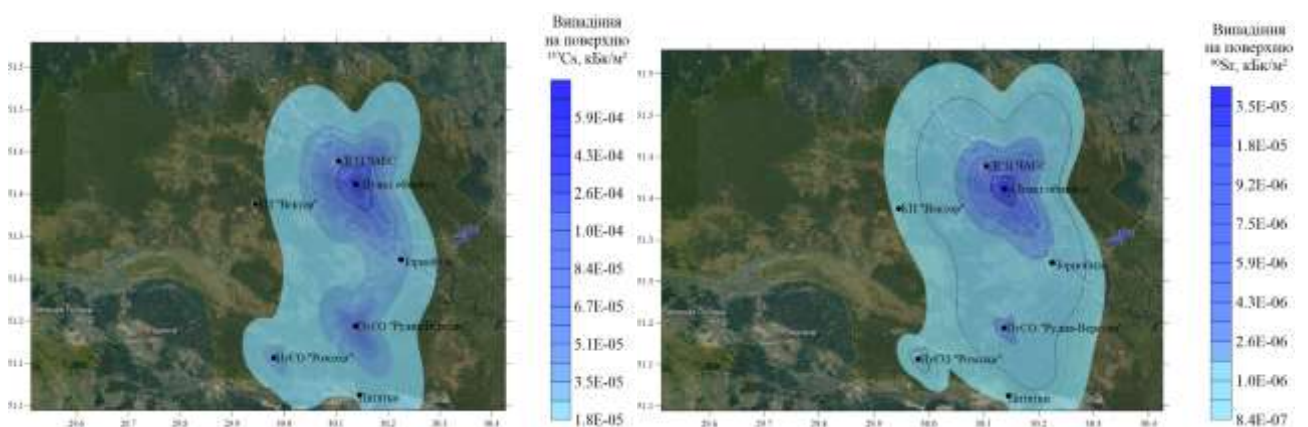


Рисунок 4 – Картошка сумарного одночасного випадіння ^{137}Cs та ^{90}Sr на поверхню землі від об'єктів дослідження при сценарії «General Fire»

5. Верифікація побудованої математичної моделі

Для оцінки коректності впливу на довкілля побудованої математичної моделі (від пожежі, що відбувалася на території об'єктів дослідження) необхідно виконати її верифікацію за реальними даними.

У період з 02 по 20 квітня 2020 р. на території ЧЗВ відбулась масштабна пожежа. У ЧЗВ навколо ЧАЕС вигоріло близько 65 км², а також близько 20 км² на лівому березі р. Прип'ять [3]. Тому з'явилася можливість порівняння реальних даних із розрахованими. Для цього була отримана інформація про забруднення атмосфери в районах розташування пунктів АСКРС [6], а також дані щодо забруднення атмосфери в місцях роботи, тимчасового та постійного перебування персоналу й населення.

Згідно з [7], для 10-км зони відчуження контрольні рівні (КР) забруднення атмосфери для ¹³⁷Cs становлять 1,0×10⁻² Бк/м³, а для ⁹⁰Sr – 3,0×10⁻³ Бк/м³.

З побудованих картосхем сумарного одночасного об'ємного забруднення атмосфери ЧЗВ радіонуклідами ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr від об'єктів дослідження (рис. 1) виконана вибірка екстрапольованих даних (станом на 2020 рік) про забруднення атмосфери в районах розташування пунктів АСКРС. Порівняння КР ЧЗВ з екстрапольованими даними і з такими, що отримані практичним шляхом у квітні 2020 року, подано у табл. 3, а в табл. 4 – порівняння КР ЧЗВ з розрахованими даними в місцях роботи, тимчасового та постійного перебування персоналу й населення (дані картосхем сумарного одночасного об'ємного забруднення атмосфери – рис. 3 і 4).

Таблиця 3 – Порівняння з КР ЧЗВ даних про забруднення атмосфери в районах розташування пунктів АСКРС (розрахункові та отримані у квітні 2020 р.)

№ з/п	Назва пункту АСКРС	¹³⁷ Cs, Бк/м ³			⁹⁰ Sr, Бк/м ³		
		Викид	АСКРС	КР	Викид	АСКРС	КР
1	ВРП-750	5,26E-03	1,00E-02	1,0E-02	3,43E-04	3,10E-02	3,0E-03
2	БНС	2,85E-03	4,90E-03	1,0E-02	2,85E-03	7,70E-03	3,0E-03
3	Нафтобаза	3,19E-03	8,30E-03	1,0E-02	3,21E-03	1,70E-02	3,0E-03
4	ПЗРВ «Буряківка»	8,45E-04	9,40E-04	1,0E-02	4,81E-05	3,00E-04	3,0E-03
5	Буряківка	8,64E-04	1,10E-03	1,0E-02	8,65E-04	1,20E-04	3,0E-03
6	Чистогалівка	1,63E-03	9,00E-04	1,0E-02	1,63E-03	1,80E-03	3,0E-03
7	Машеве	8,65E-04	5,90E-04	1,0E-02	8,65E-04	1,10E-04	3,0E-03
8	Бенівка	9,63E-04	2,40E-03	1,0E-02	9,62E-04	1,60E-03	3,0E-03

Таблиця 4 – Порівняння з КР ЧЗВ ступеня забруднення атмосфери в місцях роботи, тимчасового та постійного перебування персоналу й населення

№ з/п	Назва об'єкта	¹³⁷ Cs, Бк/м ³		% від КР	⁹⁰ Sr, Бк/м ³		% від КР
		Викид	КР		Викид	КР	
1	ДСП «Чорнобильська АЕС»	4,40E-03	1,0E-02	44	2,82E-04	3,0E-03	9
2	КП «Вектор»	8,79E-04	1,0E-02	9	5,04E-05	3,0E-03	2
3	Місто Чорнобиль	1,65E-03	1,0E-02	17	9,64E-05	3,0E-03	3
4	Селище Дитятки	9,15E-04	1,0E-02	9	4,93E-05	3,0E-03	2

Порівняння розрахункових значень викидів у місцях роботи, тимчасового та постійного перебування персоналу й населення зі значеннями КР об'ємного забруднення атмосфери для ЧЗВ (табл. 4) свідчить про те, що розраховані величини викидів при пожежі

на території об'єктів дослідження для ^{137}Cs становлять 9 – 44% від КР, а для ^{90}Sr 2 – 9% від КР.

На рис. 5 і 6 представлено графіки порівняння з КР ЧЗВ (табл. 3) розрахункових даних об'ємної активності забруднення атмосфери радіонуклідами ^{137}Cs та ^{90}Sr (Бк/м³) у районах розташування пунктів АСКРС і даних, отриманих у квітні 2020 р.

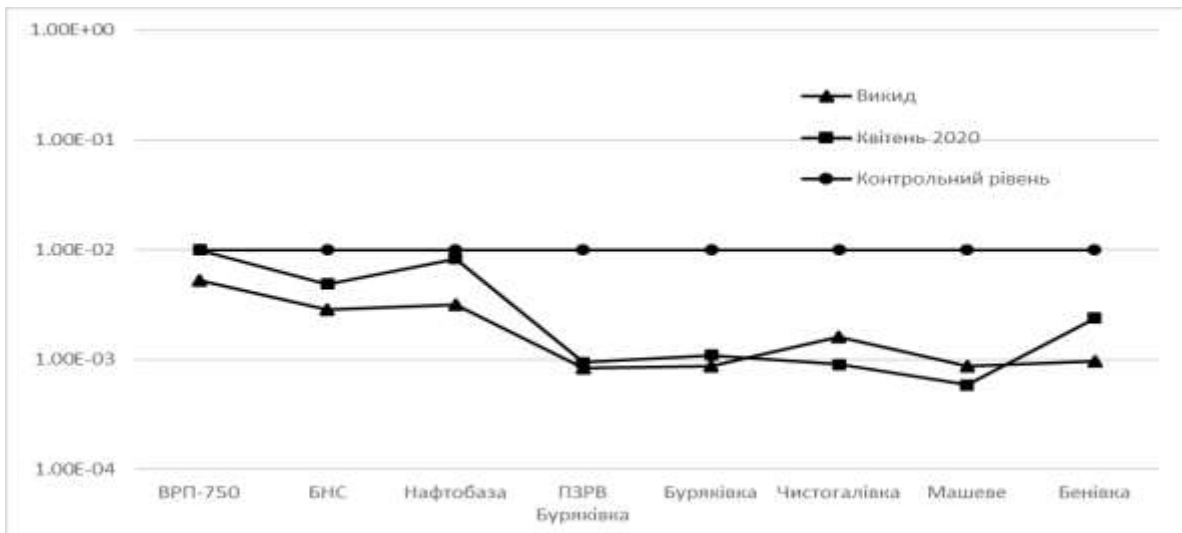


Рисунок 5 – Порівняння КР ЧЗВ з розрахунковими даними і даними про забруднення атмосфери радіонуклідом ^{137}Cs у квітні 2020 р.

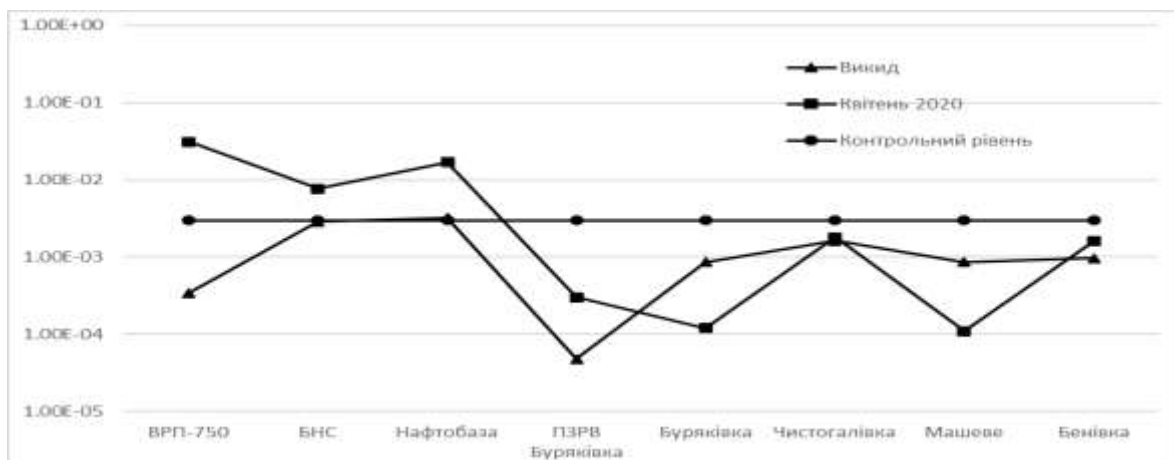


Рисунок 6 – Порівняння КР ЧЗВ з розрахунковими даними і даними про забруднення атмосфери радіонуклідом ^{90}Sr у квітні 2020 р.

З аналізу рис. 5 і 6 можна дійти висновку, що побудована математична модель для розрахунку викиду при пожежі знаходиться в достатній кореляційній залежності до реальних даних, отриманих при пожежі на території ЧЗВ у квітні 2020 р.

Порівняння КР забруднення атмосфери в ЧЗВ з максимальними значеннями рівнів забруднення атмосфери в епіцентрах пожежі для об'єктів дослідження, розрахованих із урахуванням рози вітрів, подано в табл. 5.

Таблиця 5 – Порівняння КР забруднення атмосфери в ЧЗВ з максимальними значеннями розрахованих рівнів забруднення атмосфери об'єктів дослідження

№ з/п	Назва об'єкта	^{137}Cs , Бк/м ³		^{90}Sr , Бк/м ³	
		max	КР	max	КР
1	ПуСО «Рудня-Вересня»	3,33E-03	1,0E-02	8,08E-05	3,0E-03
2	ПуСО «Розсоха»	9,82E-04	1,0E-02	1,90E-05	3,0E-03
3	«Пункт обмиву»	5,12E-02	1,0E-02	3,36E-03	3,0E-03

Як видно з табл. 5, для «Пункта обмиву» в епіцентрі пожежі спостерігається перевищення в 5 разів КР забруднення атмосфери ^{137}Cs , встановленого для ЧЗВ. Це пояснюється тим, що на відміну від двох інших об'єктів дослідження на території «Пункта обмиву» поросли високі дерева, тому і швидкість розсіювання хмари пожежі буде нижчою, ніж для територій, на яких розташовані переважно луки.

6. Порівняння рівнів поточного і розрахункового випадіння радіонуклідів

Для оцінки потенційного впливу випадіння радіонуклідів при пожежі, що може відбутись на об'єктах дослідження, було побудовано картосхеми в геоінформаційній системі Surfer при сценарії «General Fire» (рис. 4). Отримані дані порівняно з даними картосхем ступеня поточного забруднення ЧЗВ радіонуклідами ^{137}Cs та ^{90}Sr у місцях виконання робіт, тимчасового та постійного перебування персоналу і населення, що були побудовані за методом Крайгенга в геоінформаційній системі Surfer (рис. 1). Результати порівняння подано в табл. 6.

Таблиця 6 – Порівняння даних поточного забруднення ЧЗВ і сумарного одночасного випадіння на поверхню землі радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr

№ з/п	Назва об'єкта	^{137}Cs , кБк/м ²		% від поточного	^{90}Sr , кБк/м ²		% від поточного
		Поточне	Випадіння		Поточне	Випадіння	
1	ДСП «ЧАЕС»	4,16E+03	7,22E-05	1,74E-06	2,36E+03	4,41E-06	1,87E-07
2	КП «Вектор»	2,78E+02	1,70E-05	6,12E-06	9,98E+01	8,63E-07	8,65E-07
3	Місто Чорнобиль	2,40E+02	3,11E-05	1,30E-05	1,06E+02	1,61E-06	1,52E-06
4	Селище Дитятки	6,42E+01	1,90E-05	2,96E-05	2,53E+01	8,73E-07	3,45E-06

Як видно з табл. 6, випадіння на поверхню землі ^{137}Cs та ^{90}Sr від об'єктів дослідження при сценарії «General Fire» є мізерно малими порівняно з поточним забрудненням ЧЗВ.

Візуальне порівняння картосхем поточного сумарного забруднення території ЧЗВ радіонуклідами ^{137}Cs та ^{90}Sr і сумарного одночасного випадіння на поверхню землі від об'єктів дослідження при сценарії «General Fire» подано на рис. 7 і 8.

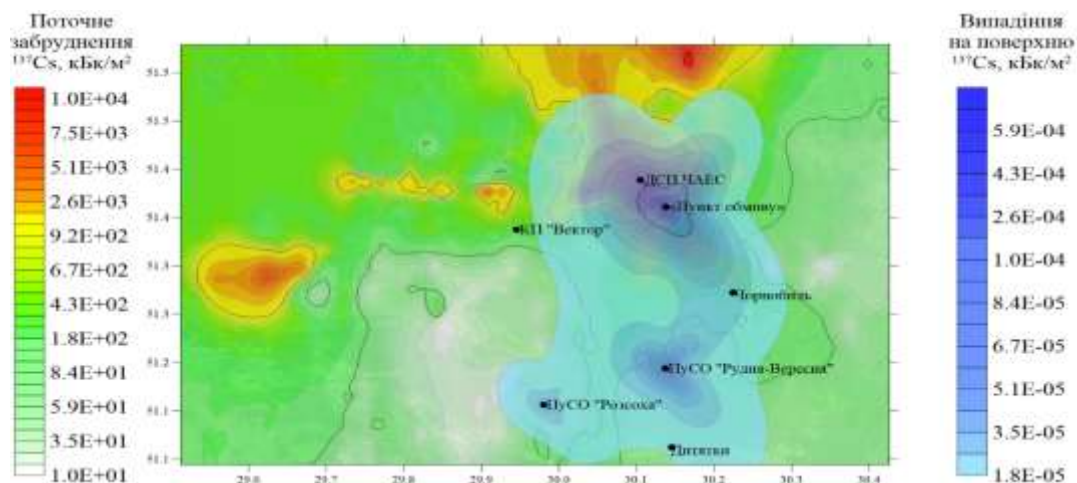


Рисунок 7 – Порівняння картосхем поточного сумарного забруднення території ЧЗВ ^{137}Cs із сумарним одночасним його випадінням на поверхню землі при сценарії «General Fige»

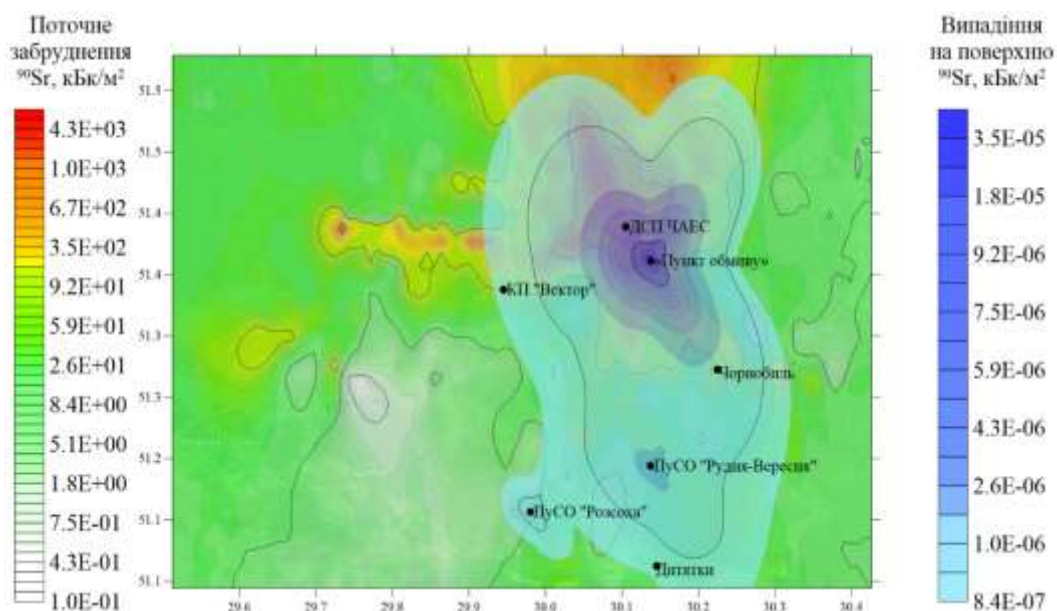


Рисунок 8 – Порівняння картосхем поточного сумарного забруднення території ЧЗВ ^{90}Sr із сумарним одночасним його випадінням на поверхню землі при сценарії «General Fige»

Для порівняння поточних даних поверхневого забруднення територій об'єктів дослідження ^{137}Cs та ^{90}Sr з екстрапольованими усередненими даними (табл. 1) було відібрано декілька проб на територіях цих об'єктів. Дані щодо значень питомої активності проб подано в табл. 7.

Таблиця 7 – Значення питомої активності проб, відібраних на території об'єктів дослідження

Шифр проби	Вага висушеної проби, г	Активність, Бк/г				Примітка
		^{145}Eu	^{241}Am	^{137}Cs	^{90}Sr	
ПуСО «Рудня-Вересня»						
ПуСОЗ-Д1	–	0,07	0,76	32,50	18,80	Акт «09/05» № 49 від 22.10.2018 [1]
ПуСОЗ-Д2	–	–	–	1,75	1,33	
ПуСОЗ-Г5	300,0	0,03	0,39	10,70	4,74	
ПуСОЗ-Р	81,0	–	–	0,23	0,26	

Продовж. табл. 7

ПуСО3-С	–	<МДА*	<МДА*	1,50*	0,24*	
ПуСО «Розсоха»						
ПуСО1-Г5	481,0	<МДА	0,22	57,30	21,80	Акт «09/05» № 49 від 22.10.2018 [1]
ПуСО1-Р	83,0	–	–	7,06	24,80	
ПуСО1-С	–	<МДА*	0,08*	5,10*	2,20*	
ПуСО2-Г5	49,0	–	–	66,40	–	
Пункт обмиву						
ПуСО4-Г20	204,0	0,29	3,82	95,50	54,30	Акт «09/05» № 49 від 22.10.2018 [1]

Примітка: * – Значення питомої активності проб – Бк/пробу.

Встановлено, що верхній десятисантиметровий шар ґрунту має питому вагу від 110 до 130 кг/м². Для розрахунків приймалось середнє значення питомої ваги – 120 кг/м². Для порівняння з табл. 7 обрано, переважно, значення проб, відібраних у п'ятисантиметровому шарі ґрунту.

У табл. 8 подано результати порівняння екстрапольованих усереднених даних поверхневого забруднення ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr об'єктів дослідження (табл. 1) з поточними даними, розрахованими з урахуванням даних табл. 7.

Таблиця 8 – Порівняння даних розрахункового і екстрапольованого поверхневого забруднення територій об'єктів дослідження

Назва об'єкта	Шифр проби	Розрахункова забрудненість, кБк/м ²		Екстрапольована забрудненість, кБк/м ²		Примітка
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	
ПуСО «Рудня-Вересня»	ПуСО3-Г5	128,4	56,88	103	26	
ПуСО «Розсоха»	ПуСО1-Г5	687,6	261,6	46	9	
«Пункт обмиву»	ПуСО4-Г20*	1146	651,6	1225	778	

Примітка: * – проба відібрана з глибини 20 см

З аналізу табл. 8 видно, що дані по пробах ПуСО3-Г5 та ПуСО4-Г20* з територій об'єктів дослідження добре корелюють з отриманими даними, які було розраховано за побудованою математичною моделлю. Винятком є проба ПуСО1-Г5, яка була відібрана на місці розташування залишків техніки, що використовувалася під час активної фази ліквідації аварії на ЧАЕС у 1986 році. Тому ця проба не корелює з екстрапольованими даними.

7. Висновки

1. У результаті прогнозової оцінки радіаційного впливу на довкілля ПуСО «Рудня-Вересня», ПуСО «Розсоха» і «Пункта обмивання автотранспортних засобів біля водоймища-охолоджувача ЧАЕС», виконаної за побудованою спрощеною математичною моделлю для об'єктів дослідження, які не експлуатуються і є покинутими, можна стверджувати, що можливі пожежі на таких об'єктах матимуть мізерний вплив на довкілля ЧЗВ порівняно з існуючим станом забруднення повітря та поверхні її території.

2. Дані оцінки радіаційного впливу на довкілля ПуСО «Рудня-Вересня», ПуСО «Розсоха» і «Пункта обмивання автотранспортних засобів біля водоймища-охолоджувача ЧАЕС», отриманими за допомогою побудованої спрощеної математичної моделі, знаходяться в до-

статній кореляційній залежності з реальними даними, що отримані у квітні 2020 року (під час масштабної пожежі в ЧЗВ) в районах розташування пунктів АСКРС та місцях роботи, тимчасового та постійного перебування персоналу й населення. Тому побудована спрощена математична модель також може бути використана для оцінки радіаційного впливу на довкілля при реалізації аварійних ситуацій різного характеру на інших чисельних радіаційно небезпечних об'єктах ЧЗВ.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Комплексна оцінка сукупних впливів на навколишнє середовище радіаційно-небезпечних об'єктів Чорнобильської зони відчуження: заключний звіт про науково-дослідну роботу. Ч. 3. Чорнобиль: ІПБ АЕС НАНУ, 2020. 272 с.
2. Атлас. Україна. Радіоактивне забруднення. Мінчорнобиль України. Київ, 2001. 46 с.
3. Процак В.П., Войцехович О.В., Лаптев Г.В. Оцінка динаміки виносу радіонуклідів за межі зони відчуження повітряним шляхом за період пожеж 02–20.04.2020 р. Київ: Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. URL: <https://www.uhmi.org.ua/msg/fire2020/analytical.pdf>.
4. Сегоднік А.М. та ін. Довідник з ліквідації лісових і торф'яних пожеж. Гродно: Гродненське обласне управління МНС Республіки Білорусь, 2012. 160 с.
5. Загальна кліматична характеристика Чорнобильської АЕС: лист вих. № 13-20/183. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 1997. 1 с.
6. Про надання інформаційних матеріалів: лист № 232/09/896-20 від 09.07.2020. Чорнобиль: ДСП Екоцентр, 2020. 8 с.
7. Основні контрольні рівні, рівні звільнення та рівні дії щодо радіоактивного забруднення об'єктів зони відчуження: ГН 6.6.1.076-01. Чорнобиль, 2013. 17 с.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2021