

*В. Л. Сидоренко¹, канд. техн. наук, доцент,
С. І. Азаров², д-р техн. наук, ст. наук. співр., Ю. П. Серета¹
(¹Інститут державного управління у сфері цивільного захисту,
²Інститут ядерних досліджень НАН України)*

ОЦІНКА ЗМІНИ РАДІАЦІЙНОЇ СИТУАЦІЇ У ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ ПІСЛЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Наведена методика дефляції радіонуклідів для проведення експертних оцінок радіаційної ситуації в Чорнобильській зоні відчуження після лісової пожежі. Модель дає змогу розраховувати поля концентрації радіонуклідів в приземному повітрі, густину випадінь на земну поверхню, дози опромінення у разі підвищеної емісії радіонуклідів з поверхні землі при екстремальних погодних умовах (включаючи вторинний вітровий підйом радіоактивних продуктів згорання після лісової пожежі).

Ключові слова: Чорнобильська катастрофа, лісові пожежі, радіоцезій, дефляція, модель турбулентної дифузії, Гауссова статична модель.

В. Л. Сидоренко, С. І. Азаров, Ю. П. Серета

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СИТУАЦИИ В ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ ПОСЛЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Приведена методика дефляции радионуклидов для проведения экспертных оценок радиационной ситуации в Чернобыльской зоне отчуждения после лесного пожара. Модель позволяет рассчитывать поля концентрации радионуклидов в приземном воздухе, плотность выпадений на земную поверхность, дозы облучения при повышенной эмиссии радионуклидов с поверхности земли при экстремальных погодных условиях (включая вторичный ветровой подъем радиоактивных продуктов сгорания после лесного пожара).

Ключевые слова: Чернобыльская катастрофа, лесные пожары, радиоцезий, дефляция, модель турбулентной диффузии, Гауссова статическая модель.

V. Sydorenko, S. Azarov, Yu. Sereda

ASSESSMENT OF RADIATION SITUATION CHERNOBYL EXCLUSION ZONE AFTER A FOREST FIRE

The technique of deflation of radionuclides for expert assessments of the radiation situation in the Chernobyl Exclusion Zone after a forest fire has been developed. The model allows the calculation of the field of radionuclide concentrations in the surface air density fallout on the earth's surface, the radiation dose at elevated emissions of radionuclides from the surface of the earth under extreme weather conditions (including a secondary wind rise of radioactive products of combustion after a forest fire).

Key words: Chernobyl disaster, forest fires, radiocaesium, deflation, turbulent diffusion model, Gaussian static model.

Постановка проблеми. В результаті Чорнобильської катастрофи на територію 30-кілометрової зони ЧАЕС випало, у вигляді радіоактивних опадів, приблизно 4,4 ПБк ^{137}Cs , 4,0 ПБк ^{90}Sr та 32 ТБк $^{239,240}\text{Pu}$. У забруднених навколо ЧАЕС лісах опади можна розподілити таким чином: у деревостані зосереджено біля 5 %, у підстильному шарі від 20 до 85 %, решта - у мінеральному шарі ґрунту, причому з плином часу відбувається збільшення вмісту радіонуклідів як у деревостані, так і в мінеральному шарі ґрунту.

З 1990 по 2014 роки у Чорнобильській зоні сталася значна кількість лісових пожеж, якими було охоплено 16,9 тис. га лісів та 19,6 тис. га трав'яного настилу. Горизонтальна міграція радіоактивних продуктів згорання, що містяться в ґрунтах після лісової пожежі, призводить до забруднення або збільшення щільності радіаційного забруднення тих ділянок, які розташовані поруч з територіями, що піддаються дефляції.

Інтенсивність і напрямки міграції пов'язані зі швидкістю вітру, його динамічними характеристиками, сприйнятливістю ґрунту до дефляції, ступенем захищеності його від впливу вітру тощо. Разом з тим, небезпека вторинного радіоактивного забруднення територій пов'язана зі щільністю забруднення ґрунту, що піддається впливу вітрової ерозії, та питомою активністю радіонуклідів в еоловому матеріалі.

Існуючі матеріали, які стосуються вітрової ерозії, потребують нового аналізу у зв'язку з виникненням питань оцінки поля концентрації радіонуклідів у приземному шарі повітря, густини випадіння на земну поверхню, дози опромінення від вторинного забруднення радіоактивними продуктами згорання, а дефляція, як агент горизонтальної міграції радіонуклідів, набуває нового, маловивченого напруження.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Інформація про рівень дефляції радіоактивних продуктів згорання після лісової пожежі пов'язана з розрахунками модуля дефляції. Такі розрахунки зручно виконувати, використовуючи моделі дефляції. Проте, існуюче різноманіття моделей дефляції радіонуклідів та їх аналіз, спричиняють вибір саме тих, які дають можливість отримувати реальні дані про модуль дефляції для конкретних лісових пожеж і природних умов.

Метою цієї роботи є оцінювання дефляції радіонуклідів для проведення експертних оцінок радіаційної ситуації у Чорнобильській зоні відчуження після лісової пожежі.

Виклад основного матеріалу. За своїм функціонуванням ці моделі неоднозначні і можуть бути об'єднані у декілька груп [1–3]:

- 1) прогнозу дефляції, що спираються на математико-статистичні залежності факторів дефляції;
- 2) дефляції, що спираються на результати досліджень фізичної природи ґрунтової аеродинаміки і кліматичних факторів;
- 3) прогнозу переносу радіонуклідів при дефляції.

В наведених вище моделях прогнозу переносу радіоактивних продуктів згорання у повітрі після лісової пожежі використовувалися непараметричні коефіцієнти, які мають суб'єктивний характер виявлення (розрахунку) модуля переносу радіоактивної речовини. Ці моделі представлені як такі, що не враховують особливості ґрунтових відмін, вони не містять інформацію про гранулометричний склад ґрунту, який є досить важливим показником.

Проведений вище аналіз відомих моделей дає підставу стверджувати, що прийняти за базову модель розрахунку підйому і атмосферного переносу радіоактивного аерозолу як таку, що найбільш повно враховує фізичну сутність дефляції радіоактивних продуктів згорання після лісової пожежі та дає її об'єктивну параметричну оцінку у вигляді модуля, неможливо. Тільки після проведення експериментальних досліджень радіоекологічного характеру, основними з яких є розподіл питомої активності радіонуклідів у структурних фракціях ґрунтів різного генетичного типу, а також спеціальних аеродинамічних досліджень, цю модель можна буде використати у прогнозних розрахунках переносу радіоактивної речовини.

Розробку нової моделі прогнозу переносу радіонуклідів у повітрі після лісової пожежі спирається передусім на те, що вона повинна істотно розкривати природу параметрів дефляції, насамперед, таких як їх радіоактивність, максимальна швидкість вітру, тривалість пилових бур тощо.

Для опису процесу розподілу радіонуклідів після лісової пожежі у повітрі використані модель турбулентної дифузії та Гауссова статична модель [4]. У цих моделях для кожної категорії стійкості атмосфери (за класифікацією Пасквіла-Гіфорда) приземну концентрацію точкового викиду радіоактивних продуктів згорання (C) визначали з такого виразу:

$$C_i = \frac{\sum_{i=1}^{N=1} q_i}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (1)$$

де q_i – кількість викиду i -го радіонукліда, $\text{м}^3/\text{с}$;
 σ_y, σ_z – стандартні відхилення радіоактивних продуктів згорання в напрямках Y та Z для визначеної категорії стійкості атмосфери, м ;
 u – середня швидкість вітру, $\text{м}/\text{с}$;
 y – координата розрахункової точки, м ;
 h – висота джерела викиду, м .

Максимальна концентрація радіоактивних продуктів згорання в приземному шарі становитиме:

$$C_i^{\max} = \frac{\sum q_i}{\pi \sigma_y \sigma_z h}. \quad (2)$$

Інтегруючи вираз (1) за площею джерела викиду радіоактивних продуктів згорання, отримуємо формулу для розрахунку концентрації їх домішок в атмосфері:

$$C(x, y)_i = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{\sqrt{2\pi} u} \int_0^{L_y} \frac{\exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right)}{\sigma_z} \left[\operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{2\sigma_y^2}} \left(y + \frac{L_z}{2}\right) - \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{2\sigma_y^2}} \left(y - \frac{L_z}{2}\right) \right] dx', \quad (3)$$

де x' – координата джерела викиду радіоактивних продуктів згорання, м ;
 $\sigma_z = \sigma_z(x - x')$ та $\sigma_y = \sigma_y(x - x')$;
 $S = L_x \times L_z$ – площа радіоактивного джерела викиду у формі прямокутника.

Розглянемо радіоактивне джерело забруднення радіоактивних продуктів згорання у формі кола з радіусом R з початком координат у центрі. Використовуючи принцип суперпозиції, знайдемо величину інтегральної координати радіоактивних продуктів згорання від $-\infty$ до $+\infty$ за y :

$$C_i = \frac{2 \sum_{i=1}^N q_i}{\pi u} \int_{-R}^R \frac{\exp\left(-\frac{h^2}{2y_z^2}\right)}{y_z} \left[\int_{x'}^x \frac{\exp\left(-\frac{h^2}{2y_z^2}\right)}{y_z} \right] (R^2 - x'^2)^{1/2} dx. \quad (4)$$

Тоді при безперервному надходженні радіонуклідів, середня по сектору концентрація радіоактивних продуктів згорання за контрольований інтервал часу, яка утворюється джерелом радіусом R , дорівнює:

$$C_i = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sum_{i=1}^N q_i n \zeta}{\pi x} \sum_{j=1}^M \frac{\omega_j}{\bar{u}_j} \int_{-R}^R \frac{\exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2, j}\right) (R^2 - x'^2)^{1/2}}{\sigma_z, j} dx', \quad (5)$$

де ω_j – повторюваність j -ї категорії за час викиду шкідливих речовин;
 \bar{u}_j – середня швидкість вітру в j -й погодній категорії, м/с;
 n – число секторів;
 ζ – частота, з якою вітер дме у даному азимутальному секторі;
 $M = 6$ – категорія стійкості атмосфери.

На рис. 1 надана розрахована за формулою (3), у вигляді ізоплет, приземна концентрація викинутого в атмосферу ^{137}Cs на площі розміром $L_1 \times L_2 = 5 \times 15 \text{ м}^2$.

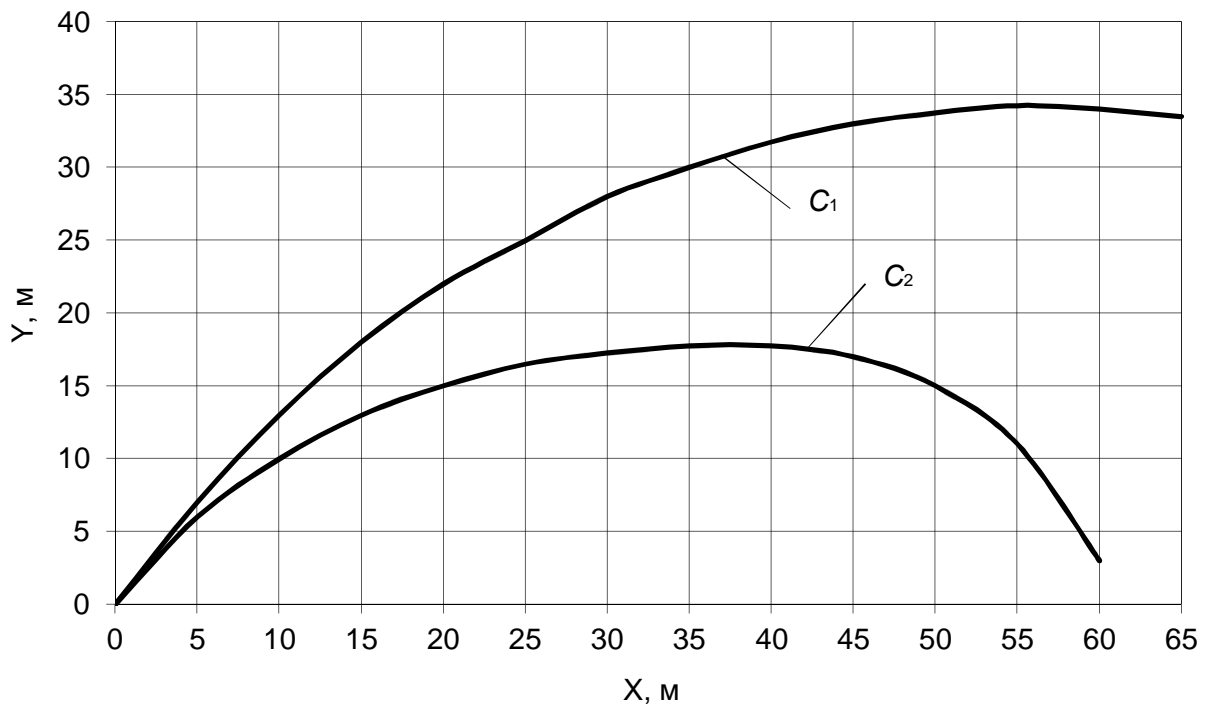


Рисунок 1 – Ізоплети приземної концентрації ^{137}Cs у повітрі після лісової пожежі у Чорнобильській зоні відчуження:
 $C_1 > 25$; $C_2 < 25$ – приземні концентрації ^{137}Cs , викинутого у повітря (Бк/м³)

Значення величин, які входять у формулу (2) такі: $u = 1 \text{ м/с}$, $h = 1,7 \text{ м}$; середня температура суміші – 300°K ; середня температура атмосферного повітря – 293 K ; час осереднення – $0,5 \text{ год}$; $\sigma_y = a_1 x^{b1}$; $\sigma_z = a_2 x^{b2}$, де a_1, a_2, b_1, b_2 – емпіричні коефіцієнти, що залежать від категорії стійкості атмосфери по Пасквілу-Гіфорду.

Вихідні дані по ω_j та \bar{u}_j надані в табл. 1.

Таблиця 1

Значення повторень категорій стійкості атмосфери та середніх швидкостей вітру

Значення	Категорія стійкості атмосфери					
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$
\bar{u}_j	2	2,5	3	5	2	3
ω_j	0,05	0,05	0,1	0,5	0,1	0,1

Розподіл питомої активності, наприклад, радіоцезію у структурних фракціях ґрунтів (пилу) після лісової пожежі залежить від їх генетичного типу. Не пояснюючи в межах цієї роботи природу цього явища, що було предметом спеціальних досліджень [5], зазначимо, що у торфових і дерново-підзолистих суглинкових ґрунтах питома активність ^{137}Cs збільшується зі зменшенням діаметра структурних фракцій.

З метою виявлення закономірностей розподілу активності ^{137}Cs у структурних фракціях ґрунтів та визначення її в тій частині ґрунту, що транспортується вітром (мова йде про структурні фракції розміром до 1 мм в діаметрі, про еоловий матеріал), були проведені спеціальні аеродинамічні експериментальні дослідження, результати яких наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Питома активність радіоцезію у ґрунтах та їх ерозійній фракції

Статистичний показник	Дерново-підзолистий суглинковий		Дерново-підзолистий суглинковий		Торфовий	
	ґрунт	еоловий матеріал	ґрунт	еоловий матеріал	ґрунт	еоловий матеріал
Питома активність ^{137}Cs , Бк/кг	770	550	760	780	540	990
Стандартна похибка, Бк/кг	214,7	219,3	150,4	143,2	115,8	175,1
Стандартне відхилення	607,2	620,4	425,5	405,1	463,0	700,2
Дисперсія вибірки	368691	384882	181053	164100	214375	490327
Ексцес	4,68	6,84	0,84	0,21	3,98	0,74
Мінімум	200	70	270	250	113	187
Максимум	2150	2045	1575	1505	1810	2470
Коефіцієнт варіації	79,0	113,0	56,3	51,8	86,3	71,1

З приведених в табл. 1 даних бачимо, що активність ^{137}Cs у еоловому матеріалі трьох типів ґрунтів, що аналізувалися, коливалася у межах від 540 на мінеральних до 990 Бк/кг на органічних ґрунтах. Причому активність еолового матеріалу торфовищ перевищувала в 1,8 раза питому активність еолового матеріалу 0–5 см шарі ґрунту.

Коефіцієнт інтенсивності дефляції ^{137}Cs після лісової пожежі визначали за даними натурних спостережень:

$$K(t) = \frac{100mbV_2}{SatV_1}, \quad (6)$$

- де $K(t)$ – коефіцієнт інтенсивності дефляції, т/га · год;
 m – середня вага шару ґрунту забрудненого ^{137}Cs після лісової пожежі, що вловлений пилосбірником під час інтенсивного вітру, кг;
 t – час дефляції, год;
 V_1, V_2 – середня та базисна ($10, 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) швидкість вітру на висоті 0,5 м, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;
 a – ширина приймальної частини пиловловлювача, см;
 b – ширина пожежі, м;
 S – площа пожежі, га.

На рис. 2 представлено залежність інтенсивності дефляції $K(t)$ для різних метеорологічних умов (швидкості вітру та категорії погоди): Д – нестійка стратифікація атмосфери, що характерна для сонячної літньої погоди (конвекція); В – нейтральна стратифікація для літньої погоди з перемінною хмарністю (ізотермія); А – стійка стратифікація атмосфери, що характерна для морозного зимового дня (інверсія).

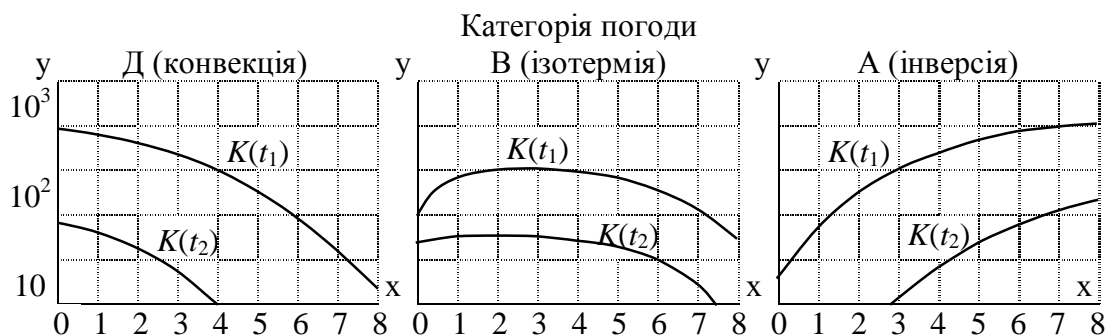


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта інтенсивності дефляції $K(t)$ після лісової пожежі від метеорологічних умов (вісь x – швидкість вітру, м/с; вісь y – площа зони забруднення ^{137}Cs , м^2): $K(t_1) > 10$; $K(t_2) < 10$ – інтенсивність дефляції ^{137}Cs ($\text{м}/\text{га} \cdot \text{год}$)

Висновки. Таким чином, використовуючи викладену вище модель прогнозу переносу радіонуклідів після лісової пожежі, а також експериментальні дані по коефіцієнту інтенсивності дефляції радіоактивних продуктів згорання та їх співвідношення у повітрі, можна оцінити величину радіоактивної забрудненості атмосфери для сертифікації робіт в процесі локалізації та ліквідації лісових пожеж на відповідність вимогам з безпеки праці, атестації робочих місць рятувальників за умовами праці та класифікації аварійно-рятувальних робіт за класами професійного радіаційного ризику для встановлення страхових тарифів.

Перспективи подальших досліджень. Існуючий матеріал відносно вітрової ерозії потребує нового аналізу, у зв'язку з виникненням питання захисту населення і територій від вторинного радіоактивного забруднення внаслідок лісових пожеж у зоні відчуження, а дефляція, як агент горизонтальної міграції радіонуклідів, набуває нового, мало вивченого напрямку досліджень. Тому, було б доцільно створити повноцінну методику оцінки дефляції радіонуклідів для проведення експертних оцінок радіаційної ситуації на територіях, що піддались впливу радіоактивних продуктів згорання внаслідок лісових пожеж.

Список літератури:

1. Пристер Б. С. Ветроэрозионные процессы и особенности создания оптимальных комплексных решений охраны почв в зоне загрязнения радионуклидами / Б. С. Пристер, Н. П. Омеляненко, Л. В. Перепелятникова, А. Б. Лавровский // Проблемы сельскохозяйственной радиоэкологии: сб. научн. трудов Укр. НИИ сельскохоз. радиологии. – К., 1991. – С. 64–74.
2. Васенков Г. І., Поліщук О. Є. Горизонтальна міграція цезію-137 при ерозійних процесах / Г. І. Васенков, О. Є. Поліщук // Вісник аграрної науки. – 1999. – № 9. – С. 37–39.
3. Долгилевич М. И. Функции органического вещества, определяющие поведение радиоцезия в системе почва-растение / М. И. Долгилевич, К. Йохансон, Г. И. Васенков // Вісник аграрної науки. – 1997. – № 3. – С. 19–25.
4. Ньюстанд Ф. Т. М., Ван-Доп Х. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 212 с.
5. Борисюк Б. В. Агроекологічна оцінка радіоактивно забрудненого ґрунтового покриву виведеного із сільськогосподарського обігу / Б. В. Борисюк, В. А. Трембіцький, О. М. Лукомський // Зб. наук. праць Подільського ДАТУ. – 2009. – С. 131–136.

References:

1. Priester B., Omelyanenko N., Perepelyatnikova L., Lavrovski A. Wind erosion processes and features to create optimal integrated solutions for soil protection in the area of radioactive contamination / Problems of Agriculture radioecology: Sat. Scien. works Ukr. Institute of Agricultural Radiology. – K., 1991. – P. 64–74.
2. Vasenkov G., Polishchuk A. Horizontal migration of cesium-137 in erosion. – Bulletin of Agricultural Science. – 1999. – № 9. – P. 37–39.

3. Dolgilevich M. Johansson K., Vasenkov G. Functions of organic matter, determine the behavior of radioactive cesium in the soil-plant / Bulletin of Agrarian Sciences. – 1997. – № 3. – P. 19–25.
4. Nyustand F. T. M., Van-Dop H. Atmospheric turbulence and modeling of impurities. Trans. from English. – L.: Gidrometeoizdat, 1985. – 212 p.
5. Borysiuk B. Trembitski V., Lukomski A. Agroecological assessment of radioactively contaminated soil cover derived from agricultural turnover / Coll. Science. works Podolsky State Agricultural Technical University. – 2009. – P. 131–136.

