

**А. М. Новіков***Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, 03028, Київ, Україна*

## Ретроспективний аналіз середньорічних значень швидкості осадження $^{137}\text{Cs}$ після Чорнобильської аварії

**Ключові слова:**

екологічна безпека,  
моніторинг,  
об'ємна активність,  
потік щільності випадінь,  
швидкість загального,  
вологого та сухого осадження,  
Чорнобильська аварія,  
 $^{137}\text{Cs}$ .

На підставі проаналізованих та систематизованих архівних експериментальних даних вимірювань, накопичених під час моніторингу, науково-прикладних, оперативних (спеціалізованих) робіт щодо дослідження та подолання наслідків Чорнобильської аварії, проведено оцінки середньорічних значень швидкості загального, сухого та вологого осадження  $^{137}\text{Cs}$ . Наведено результати кореляційного аналізу даних вимірювань, що дає змогу виявити просторово-часові закономірності формування полів радіоактивного забруднення повітря та випадінь на земну поверхню.

**Вступ**

Дослідження розповсюдження в навколишньому середовищі радіоактивних аерозолів стало актуальним після початку випробувань ядерної зброї в 1945 р., а особливо після аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) у 1986 р. Унаслідок аварії близько 5% радіоактивних продуктів поділу, напрацьованих за три роки роботи реактора 4-го енергоблока, потрапило до атмосфери. Лише через 12 діб після аварії інтенсивність викидів знизилась у 100–1000 разів [1]. За проведеними пізніше оцінками викид  $^{137}\text{Cs}$  становив близько 66–89 ПБк  $\pm 20\%$  [2]. Сформовані здебільшого метеорологічною обстановкою радіоактивні сліди та локальні плями (нові джерела) за рахунок ресуспензії [3] включаються до процесів кругообігу радіонуклідів у навколишньому середовищі, представляючи значну небезпеку через руйнівний вплив іонізуючого випромінювання на живі організми. Відповідно до опублікованих матеріалів Інституту проблем безпеки АЕС НАН України [4–6] середній рівень аерозольного забруднення в ближній зоні ЧАЕС не перевищує допустимих рівнів (0,8 Бк/м<sup>3</sup> для  $^{137}\text{Cs}$  [7]), проте пікові рівні під час виконання певних робіт можуть виходити за встановлені межі [8].

Збільшення кількості реакторів і продовження строків експлуатації існуючих призводить до зро-

стання кількості радіоактивних відходів і додаткових ризиків для населення. Тому радіаційний моніторинг (спостереження, аналіз та прогноз) стану навколишнього середовища, моделювання та прогноз поширення радіоактивного забруднення посідають важливе місце в проблемах екологічної безпеки.

Важливим параметром, що використовується під час розрахунків поширення радіоактивного забруднення, є швидкість осадження радіоактивного аерозолу на підстильну поверхню. Уявлення щодо існування залежності між об'ємною активністю та потоком щільності випадінь дозволяє на основі експериментальних даних оперативно оцінювати значення швидкості осадження. У той же час за даними експериментальних вимірювань спостерігається значна мінливість (більше трьох порядків величини) швидкості сухого осадження. Однією з досі остаточно невирішених проблем є параметризація інтенсивності (швидкості) осадження радіоактивних аерозолів на земну поверхню в моделях атмосферного перенесення радіонуклідів при аварійних викидах та внаслідок їхнього вторинного вітрового підйому в поставарійний період.

Метою роботи є оцінка середньостатистичних річних значень швидкості осадження  $^{137}\text{Cs}$ , а також дослідження кореляційних залежностей між об'ємною активністю, потоком щільності випадінь та

© А. М. Новіков, 2020

відповідно швидкістю осадження радіоактивних аерозолів на підстильну поверхню за даними багаторічних вимірювань після Чорнобильської аварії.

### Стан проблеми

**Швидкість осадження.** Радіоактивне забруднення, що потрапило до атмосфери за рахунок процесів сухого (гравітаційна седиментація та вітрова турбулентність) та вологого (унаслідок атмосферних опадів) осадження, з часом випадає на підстильну поверхню [9–11]. Час перебування забруднення в повітрі, а отже траєкторія його поширення та розподіл забруднення на поверхні (щільність випадінь) залежить від швидкості осадження. Залежно від процесів осадження, а саме метеорологічних умов, які їх обумовлюють, розрізняють швидкість сухого  $V_{dry}$ , вологого  $V_{wet}$  та загального  $V_{total}$  ( $dry + wet$ ) осадження аерозольних частинок.

Для оцінки швидкості осадження  $V_d$  (deposition velocity), як правило, використовується співвідношення [3, 12–14]

$$F = V_d C_{air}, \quad (1)$$

де  $F$  — потік радіоактивного аерозолу на підстильну поверхню, Бк/(м<sup>2</sup> · с);  $C_{air}$  — концентрація радіонукліда в повітрі, Бк/м<sup>3</sup>.

Оцінки  $V_d$  показують, що її значення досить мінливі та можуть змінюватися в межах декількох порядків величини [13]. У регіональних (до 1000 км) моделях для оцінки осадження чорнобильських викидів в Європі значення швидкості сухого осадження використовувались в інтервалі 0,05–0,20 см/с [15]. Швидкість вологого осадження здебільшого параметризується за допомогою коефіцієнта вимивання, який залежить від інтенсивності опадів [16, 17].

Відносна роль сухого та вологого осадження залежить від частоти виникнення тих чи інших процесів опадів або туману, їхнього масштабу та інтенсивності, а також ефективності видалення забруднюючих речовин за кожним механізмом. У зв'язку з обмеженістю метеорологічних даних на момент написання статті, а також зважаючи, що в цій роботі в першу чергу акцентовано увагу на середньостатистичних річних значеннях, швидкість вологого осадження  $V_{wet}$  розраховувалася за співвідношенням (1) без урахування інтенсивності опадів. Надалі за наявності відповідних метеорологічних даних можливий аналіз та врахування впливу на  $V_{wet}$  інтенсивності опадів.

**Питання усереднення.** У природних умовах, де існує просторово-часова мінливість багатьох фак-

торів, що впливають на генерацію, швидкість поширення та осадження радіоактивного забруднення, спостерігається значна мінливість об'ємної активності та щільності випадінь. Виникають питання достовірності оцінки середніх («центральної») значень, вибору способу (середньоарифметичне чи медіанне значення тощо) та періоду усереднення (які значною мірою визначають величину відхилення від середнього значення). Також важливим є питання щодо величини флуктуацій, а саме можливого неврахування їх за рахунок згладжування. Високий їхній рівень, що має порядок величини (або вище) середнього значення, та відносно велика часова тривалість може призводити до помилок в оцінках дозоформування. Не менш важливим є питання, що стосується розрахунку швидкості осадження з використанням залежності між об'ємною активністю та щільністю випадінь, а саме впливу способу та періоду усереднення на кореляційні залежності та остаточну оцінку швидкості осадження.

**Роль інформаційних технологій.** Інформаційні процеси — перенесення архівних даних на технічні носії [18], роботи з забезпечення інформаційно-аналітичними та картографічними матеріалами систем аварійного реагування на АЕС [19], аналіз та переведення архівної інформації в цифрову [20], підвищення швидкості пошуку та можливість дистанційного доступу до джерел інформації незалежно від місця їхнього розташування [21] — сприяють розв'язанню проблем забезпечення інформаційних потреб та інформаційної підтримки екологічної та науково-технічної діяльності.

Під час вирішення наукових та прикладних завдань важливе місце посідають методи математичного моделювання поширення радіоактивних викидів та осадження їх на підстильну поверхню [2, 22–25]. Існує велика різноманітність дисперсійних моделей, що відрізняються за сферою використання, загальним рівнем складності, просторовими масштабами застосування тощо [15, 26–28]. Складність процесів генерації забруднень, просторово-часової міграції, фізико-хімічної трансформації та видалення забруднюючих речовин роблять завдання, що вирішуються, багатовимірними, призводячи до необхідності врахування впливу таких факторів, як особливості джерела викиду, орографії та землекористування, метеорологічних умов тощо.

### Аналіз даних спостережень

Під час різноманітних наукових, цільових, оперативних (спеціалізованих) робіт щодо дослідження та подолання наслідків Чорнобильської аварії був

накопичений значний експериментальний матеріал даних вимірювань активності радіонуклідів у повітрі та випадіннях. У межах цієї роботи було проведено комплексний аналіз, оцифрування та обробка (узгодження) даних часових рядів об'ємної активності та потоку щільності випадінь  $^{137}\text{Cs}$ , наведених в оглядах робіт з вивчення радіоактивного забруднення на території України (Державний комітет УРСР гідрометеорології, Українське республіканське управління по гідрометеорології); у технічних звітах за даними моніторингу радіоактивного аерозолі в приземному шарі атмосферного повітря (Київське радіологічне відділення НПО «Тайфун»), в оглядах стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за даними спостережень гідрометеорологічної мережі (Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського (ЦГО)) тощо. Зважаючи, що достатньо велика частина даних стосується  $^{137}\text{Cs}$  (період напіврозпаду 30,13 років) як одного з головних дозоформуючих компонентів, основна увага приділена саме цьому радіонукліді. Також одним із ключових моментів обрання  $^{137}\text{Cs}$  є наявність достатньої кількості отриманих узгоджених часових рядів об'ємної активності та потоку щільності випадінь, що надало можливість проведення оцінки швидкості його осадження на земну поверхню для таких пунктів спостережень, як Київ, Чорнобиль, Поліське, Прип'ять, Баришівка, а також Салоніки (Греція) [13].

**1987–2018 рр.** Як зазначалося вище, шляхом аналізу, узгодження та усереднення до середньорічних значень наявних добових, декадних, місячних даних об'ємної активності та потоку щільності випадінь  $^{137}\text{Cs}$  було отримано неперервну часову вибірку 32 середньорічних результатів вимірювань на метеорологічних станціях у Києві та Чорнобилі. Цей ряд досить добре задовольняє існуючі уявлення щодо необхідного об'єму вибірки, яка для кореляційного аналізу (розрахунку коефіцієнта Пірсона) повинна становити не менше 25 спостережень [29, 30]. На рис. 1 наведено середньорічні дані об'ємної активності та відповідно потоку щільності випадінь  $^{137}\text{Cs}$  на вказаних метеостанціях (дані ЦГО). За відповідний проміжок часу спостерігається зниження об'ємної активності та потоку щільності випадінь, що становить близько двох порядків величини. На рис. 2 наведено часовий хід розрахованих за співвідношенням (1) середньорічних значень швидкості загального осадження  $^{137}\text{Cs}$  для Чорнобиля та Києва. Також на рис. 1 і 2 наведено підібрані лінії тренду, апроксимовані експоненційною

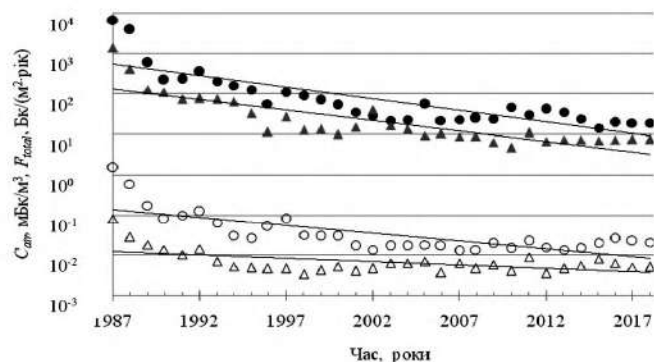


Рис. 1. Часові ряди середньорічних значень об'ємної активності  $C_{air}$  та потоку щільності випадінь  $F_{total}$   $^{137}\text{Cs}$  у Чорнобилі та Києві, 1987–2018 рр.: ● —  $F_{total}$  та ○ —  $C_{air}$  у Чорнобилі; ▲ —  $F_{total}$  та Δ —  $C_{air}$  у Києві

функцією  $f(t) = ae^{-\frac{t}{T_{0,5}} \ln(2)}$ , для якої в такому випадку відповідають порівняно високі величини достовірності апроксимації (табл. 1), де  $t$  — час у роках після Чорнобильської аварії,  $T_{0,5}$  — період напівзменшення відповідної величини.

**Таблиця 1. Коефіцієнти функцій ліній тренду для об'ємної активності  $C_{air}(t)$ , потоку щільності загального випадіння  $F_{total}(t)$  та швидкості загального осадження  $V_{total}(t)$   $^{137}\text{Cs}$  у Чорнобилі та Києві, 1987–2018 рр. ( $R^2$  — коефіцієнт апроксимації)**

Коефіцієнт	Чорнобиль			Київ		
	$C_{air}(t)$	$F_{total}(t)$	$V_{total}(t)$	$C_{air}(t)$	$F_{total}(t)$	$V_{total}(t)$
$a$	0,151	588,8	11,59	0,012	145,7	36,11
$T_{0,5}$ рік	7,7	5,33	17,3	23,1	5,78	8,66
$R^2$	0,565	0,702	0,456	0,294	0,712	0,780

Протягом усього часу спостережень відзначається спадаючий тренд річних значень швидкості загального осадження  $V_{total}$ . Привертають увагу перші після аварії на ЧАЕС роки, де для Києва спостерігалися вищі в декілька разів, ніж для Чорнобиля, середньорічні значення швидкості загального осадження, що може бути пов'язано з більш високою антропогенною діяльністю та міськими умовами столиці (підйомом аерозолів-носіїв  $^{137}\text{Cs}$  з порівняно більшими аеродинамічними діаметрами). Починаючи приблизно з 2003 р., середньорічні значення  $V_{total}(t)$  для Києва та Чорнобиля певною мірою вирівнялись та становили  $5 \pm 2$  см/с. Це свідчить про те, що з часом переважну роль у процесах ресуспензії  $^{137}\text{Cs}$  починають віді-

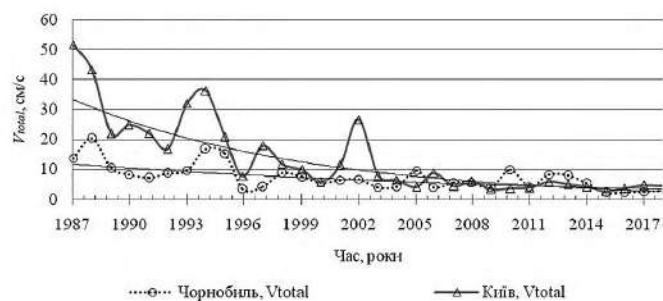


Рис. 2. Оцінені значення швидкості загального осадження  $V_{total}^{137}\text{Cs}$ :  $\circ$  — у Чорнобилі,  $\Delta$  — у Києві

гравати менші за аеродинамічним діаметром частинки. У цілому оцінені в роботі значення швидкості загального осадження  $^{137}\text{Cs}$  для України близькі до значень, оцінених у Бразилії (Гоянія) для міських умов (інтервал 1–30 см/с, середні значення 5–6 см/с) [31].

Сильні позитивні кореляційні залежності між об'ємною активністю та потоком щільності випадіння як у межах однієї площадки, так і між площадками Києва та Чорнобиля (табл. 2), можуть підтверджувати коректність проведених за співвідношенням (1) розрахунків. Від'ємна кореляційна залежність проявляється між часом та всіма досліджуваними величинами.

**1987–1993 рр.** Вибір цього періоду обумовлений спробою порівняння даних моніторингу в Україні з результатами вимірювань об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному повітрі та випадіння, що проводились у цей період у Греції (Салоніки —  $40^{\circ}38'N$ ,  $22^{\circ}58'E$ , 1317 км від зруйнованого реактора ЧАЕС) [12]. У вказаній роботі наведено дані про часові ряди середньорічних значень об'ємної активності, потоку щільності вологого та загального (*dry + wet*) випадіння  $^{137}\text{Cs}$ , що дозволяє виділити суху складову радіоактивного потоку, а отже, оцінити швидкості сухого та вологого осадження (табл. 3) та провести кореляційний аналіз (табл. 4).

Незважаючи на незначну кількість вибірки (7 значень) [29, 30], для значень, отриманих у Греції (Салоніки), спостерігається позитивна кореляційна залежність між об'ємною активністю та потоком щільності загального осадження (*total deposition*), де коефіцієнт кореляції Пірсона становить **0,90**. Також наявна сильна позитивна кореляційна залежність між об'ємною активністю та потоком щільності вологого осадження (*wet deposition*) — коефіцієнт кореляції Пірсона **0,92**. Проте відсутня кореляційна залежність між об'ємною активністю та потоком щільності сухого осадження (*dry deposition*) — коефіцієнт кореляції Пірсона — 0,59, що є наслідком

відносно невеликого внеску сухого осадження у величину сумарного за рік осадження радіоактивного аерозолю на підстильну поверхню (див. табл. 3). Водночас оцінене за співвідношенням (1) середньарифметичне значення швидкості сухого осадження становить  $0,58 \pm 0,48$  см/с при медіанному значенні 0,64 см/с. Отримані середньорічні та медіанні значення  $V_{dry}$  в цілому узгоджуються з результатами відповідних оцінок, зроблених в інших дослідженнях для початкового періоду аварії [13]. Зокрема, оцінені 3–6 травня 1986 р. значення швидкості сухого осадження  $^{137}\text{Cs}$  для Мюнхена, що знаходиться за 1300 км від зруйнованого реактора ЧАЕС, були в межах  $0,27 \pm 0,11$  см/с [32]. Для Японії (близько 8000 км від ЧАЕС) отримано значення швидкості сухого осадження  $^{137}\text{Cs}$   $V_{dry} = 0,46$  см/с за 12–14 травня та  $V_{dry} = 0,58$  см/с за 17–19 травня 1986 р. [33].

У табл. 5 наведено кореляційні залежності за відповідний період середньорічних даних вимірювань об'ємної активності та потоку щільності загальних випадіння, отриманих під час наукових (спеціалізованих) робіт в Україні (Чорнобиль, Поліське, Київ, Баришівка), а також у Греції (Салоніки) [12]. Сильні кореляційні зв'язки між об'ємною активністю та потоком щільності випадіння спостерігаються не лише для окремо взятого пункту спостережень, але між значеннями цих величин, отриманих у різних пунктах, що знаходяться на різних віддаленнях один від одного. Відповідні питання просторових залежностей, масштабності чи локальності процесів потребують більш розширеного аналізу із залученням додаткової (метеорологічної, орографічної та іншої) інформації.

У табл. 6 наведено значення кореляційних залежностей між об'ємною активністю та потоком щільності випадіння ( $C_{air}$  та  $F_{total}$ ), потоком щільності випадіння та часом ( $F_{total}$  та час), часом та об'ємною активністю ( $C_{air}$  та час), швидкістю загального осадження та часом ( $V_{total}$  та час), швидкістю загального осадження та об'ємною активністю ( $V_{total}$  та  $C_{air}$ ), а також швидкістю загального осадження та потоком щільності випадіння ( $V_{total}$  та  $F_{total}$ ) для Греції (Салоніки [12]) та України (Поліське, Чорнобиль, Баришівка та Київ — дані Гідрометеорологічної служби України та Київського радіологічного відділення НПО «Гайфун») за 1987–1993 рр. Спостерігаються сильні позитивні кореляційні залежності між  $C_{air}$  та  $F_{total}$  для всіх пунктів спостереження. Для Салонік не відмічається кореляція між  $V_{total}$  та  $C_{air}$ , хоча між  $C_{air}$  та  $V_{wet}$  (див. табл. 4) спостерігається позитивна кореляція, де коефіцієнт кореляції Пірсона становить **0,77**. Для швидкості загального осадження  $V_{total}$  роз-

**Таблиця 2. Кореляційні залежності між об'ємною активністю  $C_{air}$  та потоком щільності загального випадіння  $F_{total}$  а також швидкістю загального осадження  $V_{total}$   $^{137}\text{Cs}$  в Чорнобилі та Києві, 1987–2018 рр.**

Площадка	Чорнобиль			Київ			Час, рік	
	$C_{air}$	$F_{total}$	$V_{total}$	$C_{air}$	$F_{total}$	$V_{total}$		
Чорнобиль	$C_{air}$	1,00	<b>0,98</b>	<b>0,47</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,71</b>	-0,47
	$F_{total}$		1,00	<b>0,55</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,73</b>	-0,47
	$V_{total}$			1,00	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>	<b>0,76</b>	-0,64
Київ	$C_{air}$				1,00	<b>0,99</b>	<b>0,68</b>	-0,46
	$F_{total}$					1,00	<b>0,71</b>	-0,45
	$V_{total}$						1,00	-0,79

Примітка. Жирним шрифтом виділено кореляції, значимі на рівні  $p < 0,05$ ,  $N = 32$ .

**Таблиця 3. Середньорічні значення об'ємної активності  $C_{air}$ , потоку щільності загального  $F_{total}$ , вологого  $F_{wet}$  та сухого  $F_{dry}$  випадіння і розраховані швидкості загального  $V_{total}$ , вологого  $V_{wet}$  та сухого  $V_{dry}$  осадження  $^{137}\text{Cs}$  у Греції (Салоніки) 1987–1993 рр., а також внесок вологого та сухого осадження в загальне**

Період спостереження	$C_{air}$	$F_{total}$	$F_{wet}$	$F_{dry}$	$V_{total}$	$V_{wet}$	$V_{dry}$	$total (wet + dry), \%$	
	мБк/м <sup>3</sup>	Бк/(м <sup>2</sup> · рік)			см/с			wet	dry
1987	0,09	182,6	182,6	–	6,43	6,43	–	100	–
1988	0,05	95,5	83,1	12,4	6,04	5,26	0,78	87	13
1989	0,03	42,8	29,1	13,7	4,52	3,08	1,45	68	32
1990	0,05	18,2	16	2,2	1,15	1,01	0,14	88	12
1991	0,03	17,7	14,5	3,2	1,87	1,53	0,34	82	18
1992	0,03	16,4	9,7	6,7	1,73	1,02	0,71	59	41
1993	0,02	15	11,1	4	2,4	1,76	0,64	73	27
макс.	0,09	182,6	182,6	13,7	6,43	6,43	1,45	100	41
медіана	0,03	18,2	16	4,04	2,4	1,76	0,64	82	18
середнє	0,04	55,48	49,44	6,03	3,45	2,87	0,58	80	20
ст. відх.	0,02	63,11	64,12	5,21	2,18	2,17	0,48	14	14
мін.	0,02	15,14	9,7	2,2	1,15	1,01	0,14	59	–

**Таблиця 4. Кореляційні залежності даних вимірювань  $^{137}\text{Cs}$  в Салоніках, 1987–1993 рр.**

	Середнє	Ст. відх.	$C_{air}$	$F_{tot}$	$F_{wet}$	$F_{dry}$	$V_{tot}$	$V_{wet}$	$V_{dry}$	Час, рік
$C_{air}$	0,04	0,02	1,00	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	-0,39	0,63	<b>0,77</b>	-0,59	-0,82
$F_{total}$	55,48	63,11		1,00	<b>1,00</b>	-0,15	<b>0,88</b>	<b>0,95</b>	-0,32	-0,84
$F_{wet}$	49,44	64,12			1,00	-0,23	<b>0,84</b>	<b>0,93</b>	-0,39	-0,81
$F_{dry} (F_{tot} - F_{wet})$	6,03	5,21				1,00	0,31	0,11	<b>0,91</b>	-0,14
$V_{total}$	3,45	2,18					1,00	<b>0,98</b>	0,13	-0,82
$V_{wet}$	2,87	2,17						1,00	-0,09	<b>0,85</b>
$V_{dry}$	0,58	0,48							1,00	0,11

Примітка. Жирним шрифтом виділено кореляції, значимі на рівні  $p < 0,05$ ,  $N = 7$ .

Таблиця 5. Кореляційні залежності між об'ємною активністю  $C_{air}$  та потоком щільності загальних випадінь  $F_{total}$   $^{137}\text{Cs}$ , 1987–1993 рр.

$C_{air}$	Чорнобиль (Ч)		Поліське (П)		Київ (К)		Баришівка (Б)		Салоніки (С)		Час, рік	
	$C_{air}$	$F_{total}$	$C_{air}$	$F_{total}$	$C_{air}$	$F_{total}$	$C_{air}$	$F_{total}$	$C_{air}$	$F_{total}$		
Ч	$C_{air}$	<b>1,00</b>	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	<b>1,00</b>	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,92</b>	<b>0,98</b>	-0,76
	$F_{total}$		<b>1,00</b>	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>	<b>0,93</b>	<b>0,95</b>	<b>0,88</b>	<b>0,98</b>	<b>0,90</b>	<b>0,99</b>	-0,81
П	$C_{air}$			<b>1,00</b>	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	<b>1,00</b>	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	-0,82
	$F_{total}$				<b>1,00</b>	<b>0,87</b>	<b>0,90</b>	<b>0,82</b>	<b>0,95</b>	<b>0,86</b>	<b>0,98</b>	-0,88
К	$C_{air}$					<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	<b>0,93</b>	<b>0,95</b>	-0,72
	$F_{total}$						<b>1,00</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,93</b>	<b>0,96</b>	-0,74
Б	$C_{air}$							<b>1,00</b>	<b>0,95</b>	<b>0,89</b>	<b>0,91</b>	-0,68
	$F_{total}$								<b>1,00</b>	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	-0,79
С	$C_{air}$									<b>1,00</b>	<b>0,92</b>	-0,82
	$F_{total}$										<b>1,00</b>	-0,87

Примітка. Жирним шрифтом виділено кореляції, значимі на рівні  $p < 0,05$ ,  $N = 7$ .

Таблиця 6. Швидкості загального осадження та кореляційні залежності  $^{137}\text{Cs}$  для Салонік, Поліського, Чорнобиля, Баришівки та Києва, 1987–1993 рр.

Площадка	$V_{total}$ , см/с		Коефіцієнт кореляції Пірсона					
	середнє	ст. відх.	$C_{air}$ та $F_{total}$	$F_{total}$ та час	$C_{air}$ та час	$V_{total}$ та час	$V_{total}$ та $C_{air}$	$V_{total}$ та $F_{total}$
Київ	30,62	10,22	<b>1,00</b>	-0,74	-0,72	-0,73	0,65	0,71
Чорнобиль	10,51	4,68	<b>0,97</b>	-0,82	-0,76	-0,81	0,45	0,65
Поліське	8,04	2,44	<b>0,95</b>	-0,88	-0,82	<b>0,78</b>	-0,73	-0,65
Баришівка	7,39	3,81	<b>0,95</b>	-0,79	-0,68	0,07	-0,40	-0,13
Салоніки	3,45	2,18	<b>0,92</b>	-0,87	-0,82	-0,83	0,63	<b>0,87</b>

Примітка. Жирним шрифтом виділено кореляції, значимі на рівні  $p < 0,05$ ,  $N = 7$ .

рахованих за даними, отриманими в Україні, значимі кореляції з  $C_{air}$  та  $F_{total}$  не спостерігаються. Привертає увагу позитивна кореляційна залежність між  $V_{total}$  та часом для Поліського (коефіцієнт кореляції Пірсона становить **0,78**; див. табл. 6). Зважаючи, що між часом та  $F_{total}$ , а також часом та  $C_{air}$  спостерігаються від'ємні кореляційні залежності — коефіцієнт кореляції Пірсона — **0,88** та відповідно — **0,82** (відбувається падіння як потоку щільності випадінь, так і об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  із часом), що може вказувати на зміну дисперсного складу, а саме на укрупнення частинок носіїв  $^{137}\text{Cs}$ .

Під час аналізу та обробки наявних матеріалів також було опрацьовано дані вимірювань, що проводилися Київським відділенням НПО «Тайфун» у м. Прип'ять [3]. Період накопичених даних 1989–1993 рр., тому розмір вибірки становить лише по 5 середньорічних значень для об'ємної активності, потоку щільності

випадінь та розрахованої за співвідношенням (1) швидкості загального осадження. Відзначається значима на рівні  $p < 0,05$  кореляція між  $V_{total}$  та  $F_{total}$  коефіцієнт кореляції Пірсона становить **0,98**. Кореляційної залежності між  $C_{air}$  та  $F_{total}$  з рівнем значимості  $p < 0,05$  не отримано, при цьому значення коефіцієнта кореляції Пірсона від'ємне і дорівнює -0,45 (аналогічно до результатів для сухого осадження в Салоніках). Варто зазначити, що до отриманих результатів необхідно ставитись з обережністю через імовірний вплив на отримані результати невеликої кількості значень у вибірці.

## Висновки

З проаналізованих експериментальних даних вимірювань, отриманих після Чорнобильської



аварії, впливає, що між середньорічними значеннями об'ємної активності та потоком щільності випадінь  $^{137}\text{Cs}$  загалом спостерігається сильна позитивна кореляційна залежність. Це певною мірою надає можливість додатково підтверджувати коректність даних експериментальних вимірювань, що проводились, та виконувати оцінки швидкості осадження радіоактивних аерозолів з використанням співвідношення між об'ємною активністю та потоком щільності випадінь.

Спадаючі тренди середньорічних значень загальної швидкості осадження для Києва та Чорнобиля та від'ємні кореляційні залежності між  $V_{total}$  та часом можуть свідчити про загальну тенденцію щодо зменшення аеродинамічних розмірів частинок аерозолів-носіїв  $^{137}\text{Cs}$ . Згідно з отриманими результатами вимірювань у Києві залежність швидкості загального осадження  $^{137}\text{Cs}$  від часу може бути апроксимована функцією  $V_{total} = 36,11e^{-\frac{t}{3,66 \ln(2)}}$ . У декілька разів вищі значення швидкості загального осадження в Києві в порівнянні з Чорнобилем у перші післяаварійні роки та поступове зменшення та вирівнювання значень у подальшому можуть вказувати на суттєву роль антропогенної діяльності саме в перші післяаварійні роки.

Відслідковується позитивна кореляційна залежність між швидкістю загального (а також вологого) осадження та об'ємною активністю. У той же час між швидкістю сухого осадження та об'ємною активністю кореляційна залежність, значима на рівні  $p < 0,05$ , не спостерігається, а коефіцієнт кореляції Пірсона має від'ємне значення. Поясненням цього може бути те, що внесок у річні значення загального осадження в основному визначався вологим осадженням (~82% і лише на ~18% за рахунок сухого осадження за даними вимірювань у Греції в 1987–1993 рр.).

У цілому оцінені значення швидкості загального, а також сухого осадження близькі до значень, отриманих у незалежних дослідженнях (1–30 см/с та 0,14–1,45 см/с відповідно).

### Список використаної літератури

1. Израэль Ю. А. Радиоактивное загрязнение природных сред в результате аварии на Чернобыльской атомной станции / Ю. А. Израэль. — Москва : Изд-во «Комтех-принт», 2006. — 28 с.
2. Талерко Н. Н. Оценки первичного выброса из аварийного блока ЧАЭС с помощью моделирования атмосферного переноса (обзор) / Н. Н. Талерко, Е. К. Гар-

- гер // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2006. — Вып. 5. — С. 80–90.
3. Гаргер Е. К. Вторичный подъем радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы: монография / Е. К. Гаргер. — Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. — 192 с.
4. Огородников Б. И. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» (обзор). Ч. 2.2: Концентрации радиоактивных аэрозолей на промплощадке объекта «Укрытие» / Б. И. Огородников, Н. И. Павлюченко, Э. М. Пазухин. — Чернобыль, 2004. — 44 с. — (Препринт / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 04-1).
5. Огородников Б. И. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986–2006 гг. : монография / Б. И. Огородников, Э. М. Пазухин, А. А. Ключников. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2008. — 456 с.
6. Физико-химические характеристики аэрозоля 30-километровой зоны ЧАЭС в 1986–2013 гг. / Е. К. Гаргер, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, В. К. Шинкаренко // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2014. — Вып. 23. — С. 54–65
7. НРБУ-97, ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Норми радіаційної безпеки України. Державні гігієнічні нормативи [Затверджені постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1997 р., № 62]. — 127 с.
8. Оценка аэрозольной радиационной обстановки на промплощадке ЧАЭС во время проведения работ по строительству нового безопасного конфайнмента / В. К. Шинкаренко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк, А. К. Калиновский // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2016. — Вып. 27. — С. 58–66.
9. Fowler D. Transfer to terrestrial surfaces / D. Fowler // Phil. Trans. R. Soc. Lond. — 1986. — B305. — P. 281–297.
10. Observations on radioactivity from the Chernobyl accident / R. S. Cambray, P. A. Cawse, J. A. Garland, J. A. B. Gibson, P. Johnson, G. N. J. Lewis, D. Newton, L. Salmon, B. O. Wade // Nucl. Energy. — 1987. — Vol. 26. — P. 77–101.
11. Nicholson K. W. The deposition, resuspension and weathering of Chernobyl-derived material in the UK / K. W. Nicholson // J. Radiol. Prot. — 1989. — Vol. 9. — P. 113–119.
12. Atmospheric deposition of cosmogenic Be-7 and Cs-137 form fallout of the Chernobyl accident. / C. Papastefanou, A. Iounnidou, S. Stoulos, M. Manolopoulou // Sci. Total. Environ. — 1995. — Vol. 170. — P. 151–156.
13. Гаргер Е. К. Скорость сухого осаждения радиоактивных веществ чернобыльского происхождения по данным наблюдений / Е. К. Гаргер // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2018. — Вып. 31. — С. 85–103.
14. Mohan S. M. An overview of particulate dry deposition:

- measuring methods, deposition velocity and controlling factors / S. M. Mohan // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* — 2016. — Vol. 13. — P. 387–402. — Doi: 10.1007/s13762-015-0898-7.
15. The ATMES Report: Evaluation of long range atmospheric transport models using environmental radioactivity data from the Chernobyl accident. — 1992. — 366 p.
  16. Barrie L. A. Pollutant wet deposition mechanisms in precipitation and fog water / L. A. Barrie, R. S. Schemenauer // *Water, Air, and Soil Pollution.* — September 1986. — Vol. 30. — No. 1–2. — P. 91–104.
  17. Sportisse B. A review of parameterizations for modelling dry deposition and scavenging of radionuclides / B. Sportisse // *Atmospheric Environment.* — 2007. — Vol. 41, No. 13. — P. 2683–2698.
  18. Использование современных информационных технологий при создании базы метеорологических данных Украины / В. П. Евстигнеев, М. П. Евстигнеев, Н. И. Кульбида, В. А. Наумова, Н. И. Швень // *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту.* — 2013. — Вип. 264. — С. 81–90. — Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npundgi\\_2013\\_264\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npundgi_2013_264_12).
  19. Лев Т. Д. Информационно-аналитическое и картографическое обеспечение систем аварийного реагирования АЭС / Т. Д. Лев, О. Г. Тищенко, В. Н. Пискун // *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля.* — 2011. — Вип. 16. — С. 17–26. Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/112903/02-Lev.pdf?sequence=1>.
  20. Новіков А. М. Ретроспективний аналіз даних вимірювань швидкості осадження Cs-137 після Чорнобильської аварії / А. М. Новіков // *Електронне видання: XXVI щорічна наукова конференція ІЯД НАН України, (Київ, 8-12.04.2019).* — С. 183–184. — Режим доступу: [http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/Book\\_of\\_Abstracts\\_2019.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/Book_of_Abstracts_2019.pdf)
  21. Новіков А. М. Застосування інформаційно-пошукових систем для забезпечення наукових робіт архівними метеорологічними даними / А. М. Новіков // *Комп'ютерні та інформаційні системи і технології: тези доповідей третьої Міжнародної науково-технічної конференції.* — 2019. — С. 25–26. — Режим доступу: <https://nure.ua/wp-content/uploads/workshop/csitic.2019.pdf>
  22. Чупов А. В. Відтворення інгаляційних доз опромінення після аварії на ЧАЕС в 30-км зоні: автореферат / А. В. Чупов. — Чорнобиль, 2002. — 19 с.
  23. Талерко Н. Н. Комплекс моделей для оценки последствий атмосферных выбросов из АЭС в условиях неоднородных и нестационарных полей активности радионуклидов в воздухе / Н. Н. Талерко // *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля.* — 2005. — Вип. 2. — С. 8–17.
  24. Талерко Н. Н. Физические особенности и ограничения моделей атмосферного переноса радионуклидов для разных пространственно-временных масштабов / Н. Н. Талерко // *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля.* — 2009. — Вип. 11. — С. 57–62.
  25. Талерко Н. Н. Восстановление параметров Чернобыльского выброса по измерениям мощности экспозиционной дозы в г. Припять / Н. Н. Талерко // *Ядерная физика и энергетика.* — 2010. — Т. 11. — № 2. — С. 169–177.
  26. EPA, 2003. Guidelines on Air Quality Models. CFR, Part 51, Title 40, Appendix W. Режим доступу: [https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-W\\_to\\_part\\_51](https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-W_to_part_51).
  27. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review / A. Leelosy, F. Molnár, F. Izsák, A. Havasi, I. Lagzi, R. Mészáros // *Cent. Eur. J. Geosci.* — 2014. — Vol. 6 (3). — P. 257–278. — Available at: <http://dx.doi.org/10.2478/s13533-012-0188-6>.
  28. The Chernobyl nuclear accident Cs-137 cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system / Giaiotti D. et al. // *Atmospheric Pollution Research.* — 2018. — Vol. 9, No. 3. — P. 502–512.
  29. David F. Tables of the ordinates and probability integral of the distribution of the correlation coefficient in small samples / F. David. — Cambridge : Cambridge University Press, 1938.
  30. Гржибовский А. М. Корреляционный анализ данных с использованием программного обеспечения Statistica и SPSS / А. М. Гржибовский // *Наука и здравоохранение.* — 2017. — № 1.
  31. Pires do Rio M. A. The resuspension and redeposition of Cs-137 in an urban area: The experience after the Goiânia accident / Amaral E. C. S., Paretzke H. G. // *Journal of Aerosol Science.* — Vol. 25, No. 5. — P. 821–831.
  32. Rosner G. Effect of dry deposition, washout and resuspension on radionuclide ratios after the Chernobyl accident / G. Rosner, H. Hotzl and R. Winkler // *The Science Total Environment.* — 1990. — Vol. 90. — P. 1–12.
  33. Aoyama M. Particle size dependent dry deposition velocity of the Chernobyl Radioactivity / M. Aoyama, H. Katsumi // *Proceedings of the Fifth International Conference Precipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchange (S. E. Schwartz et al.) (Richland, Washington, July 15–19, 1991).* — Hemisphere Publishing, Washington DC. — Vol. 3. — P. 1581–1593. Aoyama and Hirose, 1991. — Режим доступу: [https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=YqIGzPVJiNwC&oi=fnd&pg=PA593&dq=Precipitation+Scavenging+and+Atmosphere-Surface+Exchange+&ots=nSmGbrLjbl&sig=I-MRhmnGdj17a-ufwqKZJmFk9Vs&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Precipitation%20Scavenging%20and%20Atmosphere-Surface%20Exchange&f=false](https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=YqIGzPVJiNwC&oi=fnd&pg=PA593&dq=Precipitation+Scavenging+and+Atmosphere-Surface+Exchange+&ots=nSmGbrLjbl&sig=I-MRhmnGdj17a-ufwqKZJmFk9Vs&redir_esc=y#v=onepage&q=Precipitation%20Scavenging%20and%20Atmosphere-Surface%20Exchange&f=false).



**А. Н. Новиков**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины,  
ул. Лысогорская, 12, 03028, Киев, Украина*

**Ретроспективный анализ среднегодовых значений скорости осаждения  $^{137}\text{Cs}$  после Чернобыльской аварии**

На основании анализа и систематизации архивных экспериментальных данных измерений, накопленных во время мониторинга, научно-прикладных, оперативных (специализированных) работ по преодолению последствий Чернобыльской аварии, проведены оценки среднегодовых значений скорости общего, сухого и влажного осаждения  $^{137}\text{Cs}$ . Представлены результаты корреляционного анализа данных измерений, что позволяет выявить пространственно-временные закономерности формирования полей радиоактивного загрязнения атмосферы и выпадений на земную поверхность.

*Ключевые слова:* экологическая безопасность, мониторинг, объемная активность, поток плотности выпадений, скорость общего, влажного и сухого осаждения, Чернобыльская авария,  $^{137}\text{Cs}$ .

**A. M. Novikov**

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

**Retrospective Analysis of the Annual Deposition Velocity of  $^{137}\text{Cs}$  after the Fallout of the Chernobyl Accident**

The radioactive aerosol deposition velocity is a very important parameter for calculation of radioactive fallout transportation. The idea concerning the existence of interdependence between the volume activity and the depositional fluxes allows evaluating quickly the deposition velocity on the grounds of the experimental data. At the same time in accordance with the experimental measurement data a considerable fluctuation of the dry deposition velocity (more than three orders of magnitude) is observed.

In this review the assessment of the average annual total deposition (dry and wet) velocity of  $^{137}\text{Cs}$  was carried out on the basis of the analysed and systematised archive experimental data on volume activity and deposition fluxes that was accumulated during monitoring, research and practical work on investigation and liquidation of the consequences of the Chernobyl accident. Moreover, the results of the correlation analysis are given, which to some extent gives a possibility not only to reveal the regularities pertinent to respective processes, but also to complement and extend the existing knowledge concerning the improvement of the deposition velocity assessment with the help of the experimental data.

From the analyzed experimental data on the measurements obtained after the Chernobyl accident, it appears that there is generally a strong positive correlation between the average annual volume activity values and the  $^{137}\text{Cs}$  fallout flux density. This, to a certain extent, makes it possible to further confirm the validity of the experimental measurements taken and to estimate the deposition rate of radioactive aerosols using the ratio between the volume activity and depositional fluxes.

The declining trends in annual average values of the total deposition rate for Kyiv and Chernobyl and the negative correlation between time and  $V_{total}$  may indicate a general trend towards a decrease in the aerodynamic size of aerosol particles —  $^{137}\text{Cs}$  carriers. According to the results of measurements in Kyiv, the dependence of the rate of total deposition of  $^{137}\text{Cs}$  on time can be approximated by a function  $V_{total}(t) = 36.11 e^{-\frac{t}{8.66} \ln(2)}$ . Several times higher values of the general deposition rate in Kyiv compared to Chernobyl in the years following the accident and the gradual decrease and equalization of values in the future may indicate a significant role of anthropogenic activity in the years following the accident.

A positive correlation between the rate of total (as well as wet) deposition and volume activity is observed. At the same time, there is no correlation between the rate of dry deposition and the volume activity, and the Pearson correlation coefficient is negative. The explanation to this may be that the contribution to the annual values of the total deposition was mainly determined by wet deposition (~82%, and only ~18% by dry deposition, according to measurements in Greece, 1987–1993).

Overall, the estimated values of total velocity as well as the dry deposition are close to those obtained in independent studies (1–30 cm/s and 0.14–1.45 cm/s, respectively).

*Keywords:* total, wet and dry deposition velocity, volume activity, deposition fluxes, Chernobyl accident,  $^{137}\text{Cs}$ .

## References

1. Izrael Yu. A. (2006). *Radioaktivnoe zagryaznenie prirodnykh sred v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoy atomnoy stantsii* [Radioactive pollution of the environment as a result of the accident at the Chornobyl nuclear power plant]. Moscow: Komtekhpriint, 28 p. (in Russ.)
2. Talerko N. N., Garger E. K. (2006). Otsenki pervichnogo vybrosa iz avariynogo bloka ChAES s pomoshch'yu modelirovaniya atmosferного perenosa (obzor). [Estimates of the primary release from the Chornobyl emergency unit using atmospheric transport modeling (overview)]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 5, pp. 80–90. (in Russ.)
3. Garger E. K. (2008). *Vtorichnyy podem radioaktivnogo aerolya v prizemnom sloe atmosfery* [Secondary rise of radioactive aerosol in the surface layer of the atmosphere]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 192 p. (in Russ.)
4. Ogorodnikov B. I., Pavlyuchenko N. I., Pazukhin E. M. (2004). *Radioaktivnye aerolyi obekta "Ukrytie" (obzor). Ch. 2.2: Kontsentratsii radioaktivnykh aerolyey na prompshchadke obekta "Ukrytie"* [Radioactive aerosols of the Shelter object (overview). Part 2.2: Concentrations of radioactive aerosols at the industrial site of Shelter object]. Chornobyl, 44 p. (in Russ.)
5. Ogorodnikov B. I., Pazukhin E. M., Klyuchnikov A. A. (2008). *Radioaktivnye aerolyi obekta "Ukrytie": 1986–2006 gg.* [Radioactive aerosols of the Shelter object: 1986–2006]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 456 p. (in Russ.)
6. Garger E. K., Kashpur V. O., Skoryak G. G., Shinkarenko V. K. (2014). Fiziko-khimicheskie kharakteristiki aerolya 30-kilometrovoy zony ChAES v 1986–2013 gg. [Physico-chemical characteristics of the aerosol of the 30-km zone of the Chornobyl NPP in 1986–2013]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 23, pp. 54–65. (in Russ.)
7. NRBU-97, DGN6.6.1.-6.5.001-98. *Norms of radiation safety of Ukraine. State Hygiene Standards.* Approved by the decision of the Chief State Sanitary Doctor of Ukraine dated 01.12.1997, no. 62, 127 p. (in Ukr.)
8. Shinkarenko V. K., Kashpur V. A., Skoryak G. G., Kalinovskiy A. K. (2016). Otsenka aerol'noy radiatsionnoy obstanovki na prompshchadke ChAES vo vremya provedeniya rabot po stroitel'stvu novogo bezopasnogo konfaynmenta [Assessment of aerosol radiation situation on ChNPP industrial site during work on construction a New safe confinement]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 27, pp. 58–66. (in Russ.)
9. Fowler D. (1984). Transfer to terrestrial surfaces. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B305, pp. 281–297.
10. Cambray, R. S., Cawse, P. A., Garland, J. A., Gibson, J. A. B., Johnson, P., Lewis, G. N. J., Newton, D., Salmon, L. & Wade, B. O. (1987). Observations on radioactivity from the Chornobyl accident. *Nucl. Enemy*, vol. 26, pp. 77–101.
11. Nicholson, K. W. (1989). The deposition, resuspension and weathering of Chornobyl-derived material in the UK. *J. Radiol. Prot.*, vol. 9, pp. 113–119.
12. Papastefanou C., Iounnidou A., Stoulos S., Manolopoulou M. (1995). Atmospheric deposition of cosmogenic Be-7 and Cs-137 form fallout of the Chornobyl accident. *Sci. Total Environ.*, vol. 170, pp. 151–156.
13. Garger E. K. (2018). Skorost sukhogo osazhdeniya radioaktivnykh veshchestv chernobyl'skogo proiskhozhdeniya po dannym nablyudeniya [The dry deposition rate of radioactive substances of Chornobyl origin according to observations]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 31, pp. 85–103. (in Russ.)
14. Mohan S. M. (2016). An overview of particulate dry deposition: measuring methods, deposition velocity and controlling factors. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. 387–402. Doi: 10.1007/s13762-015-0898-7.
15. *Evaluation of long range atmospheric transport models using environmental radioactivity data from the Chornobyl accident: The ATMES Report.* Comission of the European Communities, 1992, 366 p.
16. Barrie L. A., Schemenauer R. S. (1986). Pollutant wet deposition mechanisms in precipitation and fog water. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 30, no. 1–2, pp. 91–104.
17. Sportisse B. (2007). A review of parameterizations for modelling dry deposition and scavenging of radionuclides. *Atmospheric Environment*, vol. 41, no. 13, pp. 2683–2698.
18. Evstigneev V. P., Evstigneev M. P., Kul'bida N. I., Naumova V. A., Shven' N. I. (2013). Ispolzovanie sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy pri sozdaniy bazy meteorologicheskikh dannyyh Ukrainy [The use of modern information technology in creating a meteorological database of Ukraine]. *Naukovi pratsi Ukrain'skoho naukovo-doslidnogo hidrometeorologichnogo instytutu* [Scientific works of the Ukrainian Hydrometeorological Research Institute], vol. 264, pp. 81–90. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npundgi\\_2013\\_264\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npundgi_2013_264_12). (in Russ.)
19. Lev T. D., Tishchenko O. G., Piskun V. N. (2011). Informatsionno-analiticheskoe i kartograficheskoe obespechenie sistem avariynogo reagirovaniya AES. [Information-analytical and cartographical support for emergency response system of Nuclear Power Plant]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya*

- [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chernobyl], vol. 16, pp. 17–26. (in Russ.)
20. Novikov A. M. (2019). Retrospektyvnyi analiz danykh vymiriuvan shvydkosti osadzheniia Cs-137 pislia chornobyl'skoi avarii [Retrospective analysis of Cs-137 deposition rate measurements after the Chernobyl accident]. *Proceedings of the XXVI Annual Scientific Conference of the Institute of Nuclear Sciences of the NAS of Ukraine (Kyiv, April 8–12, 2019)*, pp. 183–184. Available at: [http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/Book\\_of\\_Abstracts\\_2019.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/Book_of_Abstracts_2019.pdf). (in Ukr.)
  21. Novikov A. M. (2019). Zastosuvannia informatsiino-poshukovykh system dlia zabezpechennia naukovykh robit arkhivnymy meteorolohichnymy danymy [Application of information retrieval systems for providing scientific works with archival meteorological data]. *Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference "Computer and Informational Systems and Technologies" (Kharkiv, April 23–24, 2019)*, pp. 25–26. Available at: <https://nure.ua/wp-content/uploads/workshop/csitic.2019.pdf>. (in Ukr.)
  22. Chupov A. V. (2002). *Vidtvorenna inhaliatsiinykh doz oprominennia pislia avarii na ChAES v 30-km zoni* [Reproduction of inhalation doses after the Chernobyl accident in the 30 km zone] (PhD Thesis). Chernobyl, 19 p. (in Ukr.)
  23. Talerko N. N. (2005). Kompleks modeley dlya otsenki posledstviy atmosfernykh vybrosov iz AES v usloviyakh neodnorodnykh i nestatsionarnykh poley aktivnosti radionuklidov v vozdukhe [The set of models for the assessment of consequences of atmospheric releases from nuclear power plants in inhomogeneous and time-dependent fields of nuclide volume activity]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chernobyl], vol. 2, pp. 8–16. (in Ukr.)
  24. Talerko N. N. (2009). Fizicheskie osobennosti i ogranicheniya modeley atmosfernogo perenosa radionuklidov dlya raznykh prostranstvenno-vremennykh masshtabov [Physical features and limitations of atmospheric transport models of radionuclides for different spatio-temporal scales]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chernobyl], vol. 11, pp. 57–62. (in Russ.)
  25. Talerko N. N. (2010). Vosstanovlenie parametrov Chernobyl'skogo vybrosa po izmereniyam moshchnosti ekspozitsionnoy dozy v g. Prip'yat [Reconstruction of Chernobyl source parameters using gamma dose rate measurements in town Prip'yat]. *Yadernaya fizika i energetika* [Nuclear Physics and Energy], vol. 11, no. 2, pp. 169–177. (in Russ.)
  26. EPA, 2003. *Guidelines on Air Quality Models*. CFR, Part 51, Title 40, Appendix W. Available at: [https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-W\\_to\\_part\\_51](https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-W_to_part_51).
  27. Leelossy A., Molnár F., Izsák F., Havasi A., Lagzi I., Mészáros R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Cent. Eur. J. Geosci.*, vol. 6, no. 3, pp. 257–278. <http://dx.doi.org/10.2478/s13533-012-0188-6>.
  28. Giaioti D., Oshurok D., Skrynyk O. (2018). The Chernobyl nuclear accident Cs-137 cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system. *Atmospheric Pollution Research*, vol. 9, no. 3, pp. 502–512.
  29. David F. (1938). *Tables of the ordinates and probability integral of the distribution of the correlation coefficient in small samples*. Cambridge: Cambridge University Press, 112 p.
  30. Grzhibovskiy A. M. (2017). Korrelyatsionnyy analiz dannykh s ispolzovaniem programmnoho obespecheniya Statistica i SPSS [Correlation data analysis using Statistica and SPSS software]. *Nauka i Zdravookhranenie* [Science and Health], vol. 1. (in Russ.)
  31. Pires do Rio M. A., Amaral E. C. S., Paretzke H. G. (1994). The resuspension and redeposition of Cs-137 in an urban area: The experience after the Goiânia accident. *Journal of Aerosol Science*, vol. 25, no. 5, pp. 821–831.
  32. Rosner G., Hotzl H., Winkler R. (1990). Effect of dry deposition, washout and resuspension on radionuclide ratios after the Chernobyl accident. *The Science Total Environment*, vol. 90, pp. 1–12.
  33. Aoyama M., Hirose K. (1991). Particle size dependent dry deposition velocity of the Chernobyl Radioactivity. *Proceedings of the V International Conference Precipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchange* (S. E. Schwartz, et al.). (Richland, Washington, July 15–19, 1991). Hemisphere Publishing, Washington DC, vol. 3, pp. 1581–1593.

Надійшла 10.02.2019

Received 10.02.2019