

В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко

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

До питання про основні напрямки повітряної міграції ^{137}Cs у зоні відчуження

Ключові слова:

об'єкт «Укриття»,
об'ємна активність ^{137}Cs у повітрі,
лісові пожежі

Проведено ретроспективні дослідження внеску викидів з об'єкта «Укриття» у формування радіоаерозольної обстановки в зоні відчуження до спорудження нового безпечного конфайнмента. Запропоновано алгоритм оцінки середньої об'ємної активності ^{137}Cs у повітрі залежно від напрямків вітру на основі даних про активність повітряних фільтрів, експонованих у системі АСКРС. Установлено, що переважні внески в надходження радіоактивних аерозолів у кожному з шести вибраних населених пунктів у 1992–1995 рр. давали вітри північної групи. Виявлено, що достовірне перенесення високих активностей далеко не завжди збігалось з напрямком вітру з боку Чорнобильської АЕС. За відсутності достовірних кореляцій між швидкостями вітру та значеннями об'ємної активності ^{137}Cs у повітрі та за наявності розвиненої рослинності під час періодів максимальної активності зроблено висновок про незначний внесок процесів вітрової ресуспензії у формування радіоаерозольної обстановки на території зони відчуження. Висловлено припущення, що найбільш вагомий внесок у радіоактивне забруднення повітря цієї зони дають лісові пожежі.

Вступ

Проблема радіоактивних аерозолів (РА) у планетарному масштабі вперше постала у зв'язку з випробуваннями ядерної зброї. Актуальність їхніх досліджень стала беззаперечною після аварії на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС), коли в атмосферу було викинуто близько 3–4% радіоактивних продуктів поділу, напрацьованих за три роки роботи реактора 4-го енергоблока [1]. Аварія, що сталася пізніше на АЕС «Фукусіма-1», підтвердила тезу про те, що ймовірність появи «свіжих» РА існуватиме доки існуватиме ядерна енергетика.

Під час цих аварій були сформовані радіоактивні сліди та локальні плями, що виступають у ролі нових джерел РА. За рахунок ресуспензії [2] вони включаються до процесів кругообігу радіонуклідів у навко-

лишньому середовищі, що становить значну небезпеку через руйнівний вплив іонізуючого випромінювання на живі організми. Так, після закінчення первинної фази Чорнобильської аварії продовжували діяти такі джерела РА, як природний вітровий підйом пилових частинок із забрудненої підстильної поверхні землі, антропогенне забруднення за рахунок підйому пилу із забруднених доріг, будівельних майданчиків, забруднення за рахунок лісових пожеж та постійної емісії з об'єкта «Укриття» [2, 3]. Зрозуміло, що внесок кожного з цих механізмів у формування аерозольної ситуації в зоні відчуження (ЗВ) безперервно змінюється залежно від метеорологічних умов (швидкості та напрямки вітру, наявності снігового покриву, вологості ґрунту тощо), виду, інтенсивності та місця проведення робіт.

Зниженню рівня ресуспензії у ЗВ на ранній фазі існування випадіння сприяло глибоке переорювання

© В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко, 2022

грунту, припинення сільськогосподарських робіт та формування рослинного покриву. Наявність рослин (трава, чагарники) суттєво знижує приземну швидкість вітру, а відтак і величину вітрової ресуспензії.

Складним і недостатньо вивченим є процес генерації РА під час пожеж на забрудненій території. Відзначимо, що пожежі у ЗВ трапляються регулярно, за статистикою 10–15 випадків щорічно, переважно в літній час [4]. Лісові пожежі на забруднених радіонуклідами територіях особливо небезпечні, оскільки поряд з основними негативними факторами лісової пожежі має місце також і радіаційний фактор. Питання профілактики та ліквідації пожеж загострилося після аварії на ЧАЕС, унаслідок якої забрудненими радіонуклідами виявилось понад 4 млн га земель лісового фонду Білорусі, України та Росії. У публікаціях [5–8], присвячених проблемам лісових пожеж у зонах радіоактивного забруднення, особлива увага приділяється повітряному перенесенню забруднюючих речовин та їхньому впливу на здоров'я людини, указується на достовірне збільшення об'ємної активності довгоживучих радіонуклідів у повітрі в літні місяці [8]. Протягом пожежонебезпечного сезону ризик виникнення лісових пожеж багаторазово зростає [6].

Для розуміння процесів міграції РА як усередині ЗВ, так і поза нею важливо знати напрямки основних потоків РА. Визначення їх ускладнено тим, що за час накопичення активності на фільтрі пробовідбірника, а це, як правило, кілька діб, вітер може неодноразово змінити напрямок. Обійти це ускладнення можна за допомогою статистичних методів для роботи з векторними величинами [9, 10]. У роботі [10] була зроблена спроба проведення кореляційного аналізу середніх за час експозиції напрямків вітрів з активностями відповідних фільтрів. Тут потрібно відзначити, що під час процедури усереднення втрачається значна частина метеорологічної інформації, крім того використання усереднених напрямків вітрів не завжди коректне, особливо у випадку сильної мінливості вітру під час експозиції повітряного фільтра.

Метою роботи є дослідження динаміки забруднення приземного шару атмосфери РА в ЗВ та виявлення основних напрямків поширення таких аерозолів.

Матеріали дослідження, експериментальна частина

Відомо, що після спорудження нового безпечного конфайнмента (НБК) спостерігається різке зниження надходжень РА з об'єкта «Укриття» [10–

12]. З огляду на це для дослідження внеску викидів з об'єкта «Укриття» на формування радіоаерозольної обстановки в ЗВ були проведені ретроспективні дослідження за результатами вимірювань автоматичної системи контролю радіаційної ситуації (АСКРС) за 1992–1995 рр. для 6 пунктів: Бенівка, Дитятки, Зелений Мис (Страховісся), Машеве, Старосілля, Чистогалівка. Положення цих пунктів по-різному орієнтоване відносно положення ЧАЕС (рис. 1). У кожному з пунктів за допомогою фільтровентиляційних установок (ФВУ) проводились регулярні експозиції повітряних фільтрів (як правило 2–3 рази на місяць, іноді частіше), час експозиції — від кількох годин до кількох діб. Середня продуктивність ФВУ близько 1 000 м³/год. Дані включали в себе резуль-

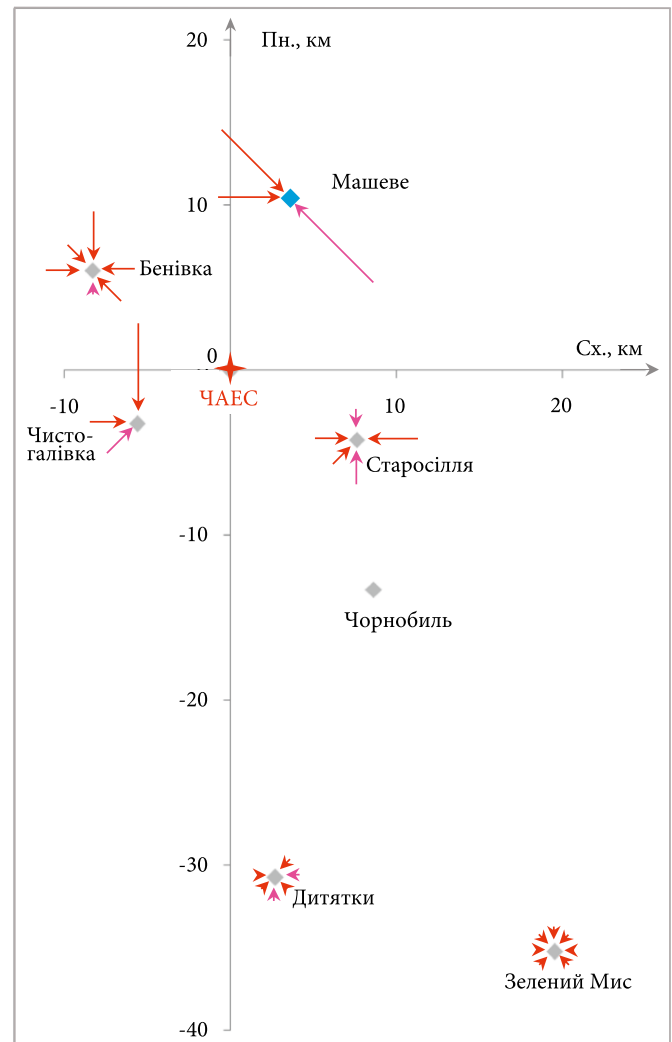


Рис. 1. Схема розташування пунктів спостережень. Величини стрілок пропорційні середній об'ємній активності ¹³⁷Cs у повітрі, див. нижче. Місця розташування ЧАЕС та м. Чорнобиль наведені для орієнтації

тати вимірювань об'ємної активності ^{137}Cs у повітрі, час експозиції фільтрів, прокачаний об'єм повітря. На жаль, дані про точний час початку і закінчення експозиції фільтрів були відсутні. У зв'язку з цим початком вимірювань вважали 12-ту годину дня вказаної доби, годину закінчення експозиції визначали, враховуючи її тривалість.

Поряд з даними АСКРС були враховані дані метеорологічної станції в м. Чорнобиль Гідрометеорологічної служби України. Визначались середні значення швидкості та напрямку вітру протягом тригодинних інтервалів 8 разів на добу.

Основні статистичні характеристики об'ємної активності ^{137}Cs у повітрі вказаних пунктів наведено в табл. 1. Для кожного з пунктів відбору характерні суттєві відмінності середніх та медіанних значень об'ємної активності, що свідчить про відмінний від нормального розподіл та наявність «викидів», нехарактерних для вибірки занадто великих значень, оскільки середні значно більше медіан.

Знаходження середньої питомої активності ^{137}Cs у повітрі вітрів різних румбів

Як уже було зазначено вище, визначення напрямків переважного перенесення РА та оцінка усередненої за часом об'ємної активності радіонуклідів

у повітрі за даними вимірювань активності аерозольних фільтрів ускладнено тим, що накопичення аерозольних часток на повітряному фільтрі відбувається за тривалий період, протягом якого напрямок вітру не залишається постійним. Нижче ми пропонуємо алгоритм проведення такої оцінки, що дає змогу обійти це ускладнення.

Насамперед проведемо ранжування усереднених для кожного з тригодинних інтервалів напрямків (азимутів) вітру по румбах, румбам присвоїмо відповідні номери згідно з табл. 2.

Розглянемо один окремий випадок вимірювання питомої активності радіонукліда, у нашому випадку ^{137}Cs у повітрі. Протягом часу експозиції $t_{\text{експ}}$ ФВУ прокачує певний об'єм повітря Q , при цьому на фільтрі накопичується активність A_f . Відповідно одержано об'ємну активність $A_{\text{об}} = A_f/Q$. Кожну з експозицій повітряних фільтрів будемо характеризувати набором румбів, діючих під час експозиції вітрів. Скориставшись таблицею метеоданих, підрахуємо для кожної окремо взятої експозиції число вітрів кожного з румбів n_i , де i — номер відповідного румба. Тобто кожній з експозицій поставимо у відповідність набір з 8 чисел, що відповідають набору діючих вітрів (деякі з цих чисел можуть бути нулями).

Знехтуємо змінами питомої активності ^{137}Cs у повітрі для вітрів кожного з румбів протягом часу експози-

Таблиця 1. Статистичні характеристики об'ємної активності ^{137}Cs (мкБк/м³) у повітрі пунктів відбору проб

Пункт відбору	Число вимірювань	Середнє	Нижній квартиль ¹	Медіана	Верхній квартиль	П-95 ²	Мінімум	Максимум
Бенівка	87	354,9	25,16	59,2	136,9	962	2,8	9250
Дитятки	96	69,1	11,47	23,9	51,8	214,6	1,96	1554
Зелений Мис	103	41,1	11,47	21,8	44,4	133,2	2,18	336,7
Машеве	65	194,6	48,1	114,7	199,8	666	6,66	1258
Старосілля	81	83,1	25,9	51,8	103,6	273,8	6,29	555
Чистоголівка	98	299,7	40,7	85,1	192,4	1628	7,4	4810

Таблиця 2. Номери румбів та відповідні азимутальні кути

Параметр	Румби вітрів							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Номер румба, i	1	2	3	4	5	6	7	8
Азимутальні кути, град	[337,5, 22,5]	[22,5, 67,5]	[67,5, 112,5]	[112,5, 157,5]	[157,5, 202,5]	[202,5, 247,5]	[247,5, 292,5]	[292,5, 337,5]

¹ Квартиль — значення, нижче якого лежить частина вибірки чи розподілу ймовірностей випадкової величини, кратна одній чверті (нуль, чверть, половина, три чверті чи одиниця). Нижній квартиль відділяє перші 25 % значень упорядкованої по зростанню вибірки, відповідно медіана 50 %, верхній квартиль 75 %.

² 95-й перцентиль, відсікає 95 % упорядкованої вибірки.

ції фільтра, тобто будемо вважати, що питома активність у повітрі для вітрів даного румба є постійною протягом цього часу. Позначимо шукану питому активність у повітрі за наявності вітру i -го румба через a_i . Відповідно така ж питома активність a_i буде на вході пробовідбірника ФВУ протягом дії вітру даного румба. При цьому на фільтрі за час t_i буде відкладено активність A_i :

$$A_i = a_i \cdot t_i \cdot W = a_i \cdot \Delta t \cdot n_i \cdot W, \quad (1)$$

де t_i — час дії вітрів даного румба; Δt — інтервал часу між вимірюваннями напрямку вітру; n_i — число інтервалів, протягом яких діяли вітри даного румба; W — продуктивність прокачування повітря через ФВУ. У першому наближенні будемо вважати W сталою для цієї установки.

Знайдемо суму внесків вітрів (1) усіх румбів в активність A_f на фільтрі

$$\sum_{i=1}^8 A_i = A_f = \sum_{i=1}^8 a_i \cdot \Delta t \cdot n_i \cdot W = \Delta t \cdot W \cdot \sum_{i=1}^8 a_i \cdot n_i. \quad (2)$$

Звідки

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^8 a_i \cdot n_i &= \frac{A_f}{\Delta t \cdot W} = \frac{A_{\text{обт}} \cdot t_{\text{експ}} \cdot W}{\Delta t \cdot W} = \\ &= \frac{A_{\text{об}} \cdot \Delta t \cdot W \cdot \sum_{i=1}^8 n_i}{\Delta t \cdot W} = A_{\text{об}} \cdot \sum_{i=1}^8 n_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Отже, для кожної експозиції фільтрів ФВУ в загальному випадку маємо рівняння з восьми невідомими об'ємними активностями a_i вітрів різних румбів. Відповідно для N вимірювань у цьому пункті отри-

муємо систему з N рівнянь, наближений розв'язок якої дає значення a_i — усереднених протягом виконання вимірювань об'ємної активності ^{137}Cs у повітрі для кожного з румбів. Знаходження наближених розв'язків систем рівнянь проводили в середовищі пакету *Statistica-6* користуючись методом Левенберга-Марквардта. Крім знаходження значень a_i , метод дає змогу також оцінити рівень достовірності отриманих коефіцієнтів, тобто визначає рівень їхньої надійності.

Одержані середні значення об'ємної активності наведено в табл. 3. Значення об'ємної активності з рівнем достовірності $p > 0,95$ виділено жирним шрифтом, для $0,9 < p < 0,95$ використано звичайний шрифт, а для $p < 0,9$ — сірий. Нижче дрібним похилим шрифтом наведено відповідні значення рівня достовірності. Значення активності з рівнем достовірності $p < 0,5$ опущено. Фоном відмічено напрямки вітру з ЧАЕС до цього пункту.

З табл. 3 бачимо, що для всіх пунктів спостережень вітри північної групи спрямування характеризуються надходженням повітря з максимально високими рівнями об'ємної активності ^{137}Cs . Відзначимо, що для деяких пунктів (Бенівка, Дитятки, Машево) напрямки з максимально високими рівнями об'ємної активності не збігаються з напрямком вітрів з боку ЧАЕС.

Необхідно зауважити, що реальний процес накопичення активності на фільтрі більш складний. Крім розглянутого перенесення з вітром наявні також потужні випадкові чинники антропогенного характеру, обумовлені проведенням деяких видів робіт, рухом автотранспорту, а також лісовими пожежами. Викликані ними значні підвищення активності на фільтрах ФВУ здатні дати вагомий внесок у середню питому

Таблиця 3. Середні значення об'ємної активності (мкБк/м³) для вітрів різних румбів

Пункт спостереження	Румби вітрів							
	<i>N</i>	<i>NE</i>	<i>E</i>	<i>SE</i>	<i>S</i>	<i>SW</i>	<i>W</i>	<i>NW</i>
Бенівка		373		82			60	181
		<i>0,99</i>		<i>0,58</i>			<i>0,57</i>	<i>0,93</i>
Дитятки	54			44			19	84
	<i>0,83</i>			<i>0,81</i>			<i>0,57</i>	<i>0,98</i>
Зелений Мис		50				29	22	77
		<i>0,97</i>				<i>0,88</i>	<i>0,91</i>	<i>1,00</i>
Машево		533			172	144	159	204
		<i>1,00</i>			<i>0,61</i>	<i>0,60</i>	<i>0,80</i>	<i>0,83</i>
Старосілля		63	29		65	41	123	135
		<i>0,72</i>	<i>0,57</i>		<i>0,76</i>	<i>0,64</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>
Чистогалівка	114	269		93			58	318
	<i>0,74</i>	<i>0,96</i>		<i>0,72</i>			<i>0,70</i>	<i>1,00</i>

активність напрямку того вітру, з яким збігся по часу цей викид. Звичайно, екстремальні значення досить легко виключити з розгляду, але питання про визначення граничного рівня, вище якого починаються власне викиди, залишається відкритим. Проте величина цього рівня залежить також і від мети проведення дослідження. Так, обумовлені лісовими пожежами значення A_{06} слід виключати з розгляду як викиди при дослідженні РА в пунктах спостережень за звичайних умов, але вони ж будуть предметом аналізу при вивченні впливу лісових пожеж на забрудненість повітря.

З'ясуємо, як змінюються напрямки перенесення для одного й того ж пункту спостереження залежно від зареєстрованої об'ємної активності. Для цього дані по цьому пункту розташуємо в порядку зростання об'ємної активності й розіб'ємо їх на чотири групи згідно із значеннями кватилів цієї величини. До першої групи ввійде чверть даних з найменшими активностями (0–25%), до другої — з активностями, що містяться між 25 і 50% даних, до третьої — між 50 і 75%, до четвертої — між 75 і 95%. (Рівні відповідних кватилів та 95-х процентилів для кожного з пунктів наведено в табл. 1.) Дані

Таблиця 4. Середні значення об'ємної активності ^{137}Cs (мкБк/м³) для вітрів різних румбів залежно від рівня зареєстрованої об'ємної активності

Пункт спостереження	Група	Напрямки вітру, румби							
		<i>N</i>	<i>NE</i>	<i>E</i>	<i>SE</i>	<i>S</i>	<i>SW</i>	<i>W</i>	<i>NW</i>
Бенівка	0		373		82			60	181
	1	27	31			11		23	15
	2	76		52	53	19	17	53	40
	3	68	173	78	93		202	59	135
	4			565				547	
Дитятки	0	54			44			19	84
	1		8	9		8	5	14	
	2	19	22	21	15	21	17	14	19
	3	65		23	26	75		41	27
	4	302		225	274	138			79
Зелений Мис	0		50				29	22	77
	1		11	5	11			7	24
	2	20	20	15	21		18	13	21
	3	13	67			46	35	35	29
	4		82	89			138	28	141
Машеве	0		533			172	144	159	204
	1		80	33		61		67	
	2			45	173		68	97	137
	3	293			210	280	76	237	
	4		598					662	392
Старосілля	0		63	29		65	41	123	135
	1	21		16	10	10	32		13
	2	29	48	78		53	39	52	
	3	59	41	130	60		113	47	93
	4	106	307			279	73	242	
Чистоголівка	0	114	269		93			58	318
	1	27	83	19	23		23	28	
	2	136	27	34	67	42	57	57	46
	3	199	92	132	143	176	253	49	169
	4	456		652		513	442		223

з найбільшими значеннями активності між 95 і 100 % відкинемо³ як екстремальні викиди. Далі їх розглянемо окремо. Для порівняння наведено дані без поділу на групи з табл. 3, їх позначено як група нуль. Середні значення об'ємної активності для вітрів різних румбів по кожній з таких груп наведено в табл. 4. Градації до-

стовірностей наведених значень позначено кольором та розміром кеглю $p > 0,95$, $0,9 < p < 0,95$, $p < 0,9$, значення з достовірностями нижче 0,5 опущено. Фоном відмічено напрямки вітру з ЧАЕС до цього пункту.

З даних табл. 4 бачимо, що в одному й тому ж пункті переважні напрямки перенесення для вітрів різ-

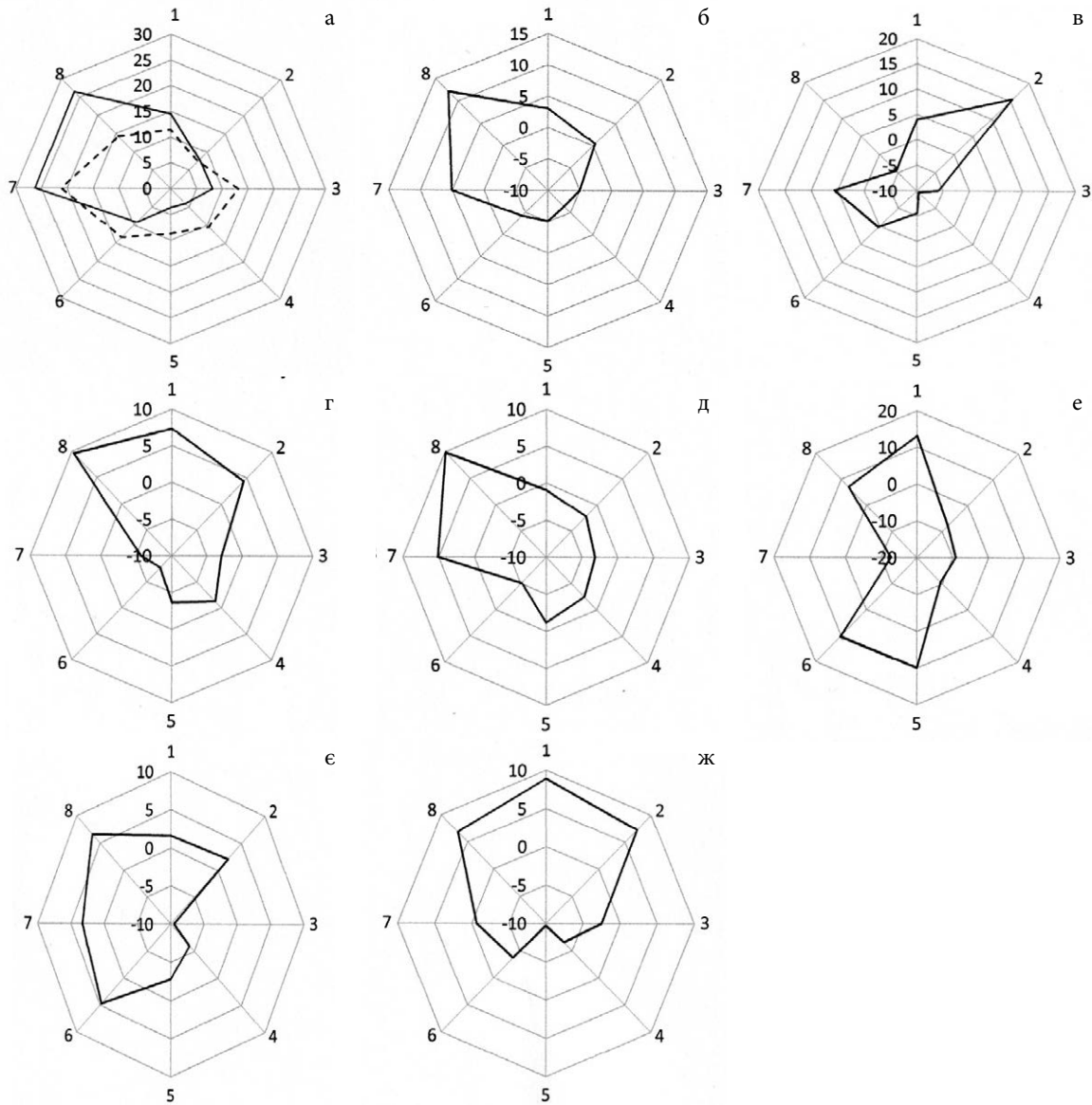


Рис. 2. Рози вітрів для відкинутих 5 % максимальних значень об'ємної активності:
 а – пунктирна лінія – роза вітрів для всіх вимірів, суцільна – для відкинутих викидів;
 б – диференціальна роза вітрів для всіх пунктів вимірювань. Диференціальні співвідношення для кожного з пунктів спостережень: в – Бенівка, г – Дитятки, д – Зелений Мис (Страхолісся), е – Машеве, є – Старосілля, ж – Чистогалівка

³ У разі відхилення розподілу від нормального закону середнє значення використовувати некоректно, оскільки воно є надто чутливим параметром до «викидів», нехарактерних для вибірки, що вивчається, занадто великих або занадто малих значень. Ми ж шукаємо саме середні надходження по кожному з румбів. І щоб наблизити розподіли наших даних до нормальних, ми змушені аподизувати викиди, але ніщо не заважає розглянути їх окремо.

них груп дещо відрізняються. Так, у пунктах Бенівка, Дитятки та Зелений Мис віднесені до групи 2 вітри, розподілені більш-менш рівномірно по напрямках. Схожий розподіл спостерігається для груп 2 і 3 в пунктах Машево, Старосілля, Чистоголівка. Напрямки ж переважного перенесення вітрів груп 3 і 4 більш схильні до групи вітрів північного спрямування. Відзначимо, що напрямки такого перенесення (групи 3 і 4) далеко не завжди збігаються з напрямком на ЧАЕС.

Провести визначення переважних напрямків перенесення для відкинутих максимальних викидів ми не маємо змоги з огляду на високий рівень дисперсії та малу кількість випадків для складання сумісної системи рівнянь. Але ми в змозі побудувати відповідні рози вітрів для відкинутих викидів по кожному з пунктів спостережень. Результати наведено на рис. 2. Напрямки вітрів позначено номером відповідного румба згідно з табл. 2, по осі ординат відкладено відсоток суми тригодинних інтервалів вітрів даного румба до загальної суми таких інтервалів. На рис. 2, а проведено порівняння сумарного внеску вітрів різних напрямків віднесених до груп 1–4 та внеску вітрів, характерних для відкинутих 5% випадків з максимальними об'ємними активностями. Бачимо, що для таких викидів характерними є вітри північно-західного напрямку. Більш інформативний диференціальний графік (відсоток вітрів даного румба для відкинутих випадків мінус відсоток вітрів для загального числа вимірювань) наведено на рис. 2, б. Рис. 2, в ілюструє такі співвідношення для кожного з пунктів спостережень.

З наведених діаграм видно, що для різних пунктів спостережень переважні напрямки вітрів, пов'язаних з викидами, дещо різні, проте переважаючими є напрямки північного та західного спрямування. У табл. 5 наведено помісячну хронологію викидів по пунктах відбору проб повітря. Бачимо, що під час масштабної лісової пожежі в травні 1992 р. викиди відзначено в більшості пунктів. Інші викиди мають більш локальний характер і відповідають більш локальним осередкам горіння лісу чи сухої трави.

На рис. 3 наведено динаміку медіанних значень об'ємної активності ^{137}Cs у повітрі пунктів спостережень протягом року. Для пунктів, що характеризуються більш високими рівнями забруднення повітря (Машево, Бенівка, Чистоголівка), спостерігаються три піки активності: весняний — квітень, травень; літній — липень; осінній — вересень. Для інших трьох пунктів виражені піки активності практично відсутні. Але на рівнях середніх значень і верхнього

Таблиця 5. Хронологія викидів по пунктах відбору

Пункт відбору	Роки													
	1992			1993			1994							
	Номери місяців													
	5	7	8	9	2	7	9	1	3	4	5	7	9	11
Бенівка	X						X							
Дитятки		X		X				X			X			X
Зелений Мис			X			X				X		X		
Машево	X						X		X					
Старосілля	X				X						X			
Чистоголівка	X	X												X

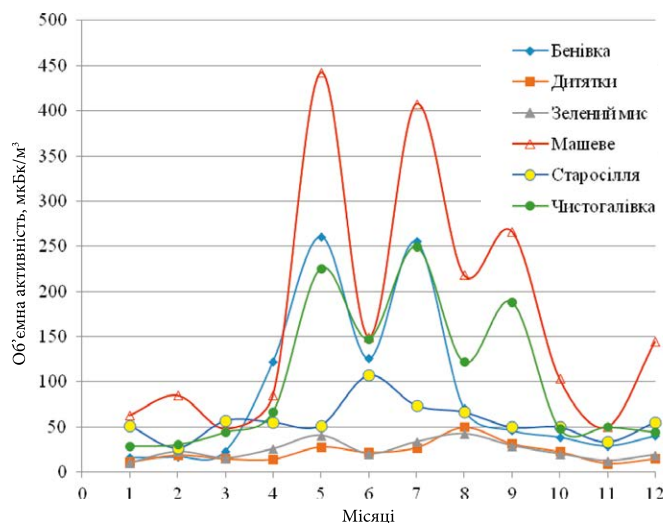


Рис. 3. Річна динаміка медіанних значень об'ємної активності ^{137}Cs у повітрі пунктів спостережень

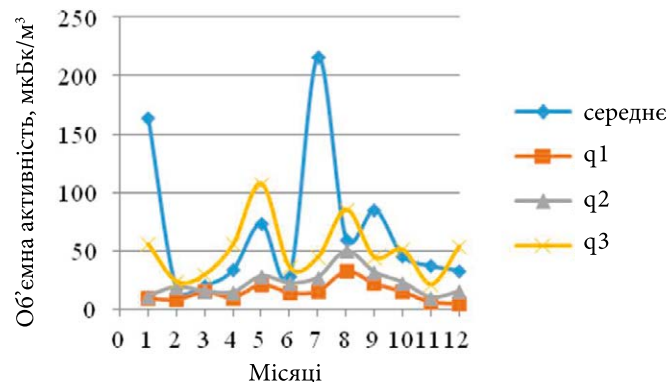


Рис. 4. Дитятки. Річна динаміка об'ємної активності ^{137}Cs у повітрі. q_1 – q_3 — квартилі 25–75 % відповідно

квартиля (50–75%) аналогічні піки активності спостерігаються і для цих пунктів теж (рис. 4).

Відзначимо, що вказані піки активності спостерігаються в той час, коли підстильна поверхня вкрита рослинністю, що стає на заваді для вітрової ресуспензії. Крім цього, відсутні достовірні кореляції між об'ємною активністю ^{137}Cs у повітрі та швидкостями вітру (як середньою, так і максимальною). Звідси можна зробити висновок про те, що вітрова ресуспензія не відіграє суттєвої ролі в забрудненні повітря ^{137}Cs у вказаних пунктах у весняно-осінній період.

Висновки

1. Запропоновано алгоритм обчислень, що дає змогу оцінити середні рівні об'ємної активності ^{137}Cs чи інших радіонуклідів у повітрі залежно від напрямків діючих вітрів у випадках, коли вітер змінює свої напрямки під час експозиції повітряного фільтра.

2. Для всіх пунктів спостережень вітри північної групи спрямування характеризуються надходженням повітря з максимально високими рівнями об'ємної активності ^{137}Cs .

3. Визначені напрямки перенесення підвищеної об'ємної активності ^{137}Cs далеко не завжди збігаються з напрямком на ЧАЕС.

4. Вітрова ресуспензія не відіграє суттєвої ролі в забрудненні повітря ^{137}Cs розглянутих пунктів у весняно-осінній період.

5. Оскільки появу підвищеної об'ємної активності в повітрі цих пунктів не може бути пояснено ні вітровою ресуспензією, ні перенесенням зі сторони Чорнобильської АЕС, а вплив дії антропогенних джерел типу виконання будівельних чи сільськогосподарських робіт видається малоімовірним, внесок лісових пожеж у забруднення повітря ^{137}Cs з великою ймовірністю слід вважати превалюючим у порівнянні з іншими механізмами формування аерозольної ситуації в ЗВ.

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. Гаргер Е. К. Вторичный подъем радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы: монография / Е. К. Гаргер. — Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. — 192 с.

3. 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. — (Препр. / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 04–1).
4. Радиационные последствия пожара в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС / В. И. Богорад, Т. В. Литвинская, И. А. Шевченко [и др.] // Ядерная радиационная безопасность. — 2016. — № 1 (69). — С. 64.
5. Hao W. M., Vegetation fires, smoke emissions, and dispersion of radionuclides in the Chernobyl exclusion zone / W. M. Hao, O. O. Bondarenko, S. Zibtsev, D. Hutton // Developments in Environ. Sci. — 2009. — Vol. 8. — pp. 265–275.
6. Zibtsev S. V. Fires in nuclear forests: silent threats to the environment and human security / S. V. Zibtsev, J. G. Goldammer, S. Robinson, O. A. Borsuk // Unasylva. — 2015. — Vol. 66. — pp. 40–51.
7. Kashparov V. A. Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters / V. A. Kashparov, S. M. Lundin, A. M. Kadygrib [et al.] // J. Environm. Radioactivity. — 2000. — Vol. 51. — pp. 281–298.
8. Kulan, A. Seasonal ^{7}Be and ^{137}Cs activities in surface air before and after the Chernobyl event / A. Kulan // J. Environm. Radioactivity. — 2006. — vol. 90. — pp. 140–150.
9. Mardia K. V. Directional Statistics / K. V. Mardia, P. E. Jupp. — Chichester : Wiley, 2000. — 441 p.
10. Радиоактивні аерозолі в ближній зоні Чорнобильської атомної електростанції в 2018 році / В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко, В. О. Кашпур [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 1 (16). — С. 57–67.
11. Оценка аэрозольной радиационной обстановки на промплощадке ЧАЭС во время проведения работ по строительству НБК / В. К. Шинкаренко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк, А. К. Калиновский // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. — 2016. — Вып. 27. — С. 58–66.
12. Новий безпечний конфайнмент і радіоактивні аерозолі в ближній зоні Чорнобильської атомної електростанції / В. К. Шинкаренко, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, О. А. Свирид // Ядерна енергетика та довкілля. — 2019. — № 1 (13). — С. 76–82.

V. K. Shynkarenko, M. M. Talerko

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

On the Issue of the Main Directions of the ^{137}Cs Air Migration in the Exclusion Zone

Retrospective studies of the contribution of emissions from the Shelter object to the formation of the radioaerosol situation in the Exclusion Zone before the construction of the New Safe Confinement were conducted. An algorithm for estimating the average volumetric activity of ^{137}Cs in the air depending on the wind direction is proposed based on data on the activity of air filters exposed in the monitoring posts of the ASKRO system. It was established that the predominant contributions to the arrival of radioactive aerosols in each of the six selected settlements in the Exclusion Zone in previous years were made by the winds of the northern group. It was found that the reliable periods of high activity transport did not always coincide with the wind direction from the Chornobyl nuclear power plant. From the absence of reliable correlations between wind speeds and the values of the ^{137}Cs volumetric activity in the air, the same as from the presence of developed vegetation during periods of maximum activity, it was concluded that the wind resuspension processes have an insignificant contribution to the formation of the radioaerosol situation in the territory of the Exclusion Zone. It is assumed that forest fires make the most significant contribution to radioactive air pollution in this area.

Keywords: Shelter object, ^{137}Cs volume activity in the air, forest fires.

References

1. Israel Yu. A. (2006). *Radioaktivnoye zagryazneniye prirodnykh sred v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoy atomnoy stantsii* [Radioactive pollution of natural environments as a result of the accident at the Chornobyl nuclear power plant]. Moscow: Komtechprint Publishing House, 28 p. (in Rus.)
2. Garger E. K. (2008). *Vtorichnyy pod'yem radioaktivnogo aerolya v prizemnom sloye atmosfery* [Secondary rise of radioactive aerosol in the surface layer of the atmosphere]. Chornobyl: ISP NPP, 192 p. (in Rus.)
3. Ogorodnikov B. I., Pavlyuchenko N. I., Pazukhin E. M. (2004). *Radioaktivnyye aerolyi obyekta "Ukrytiye" (obzor). CH. 2.2. Kontsentratsii radioaktivnykh aerolyey na promplohchadke obyekta "Ukrytiye"* [Radioactive aerosols of the Shelter object (review). Part 2.2: Concentrations of radioactive aerosols at the industrial site of the Shelter object]. Preprint of the NAS of Ukraine, ISTC "Shelter"; 04-1. Chornobyl, 44 p. (in Rus.)
4. Bogorad V. I., Lytvynskaya T. V., Shevchenko I. A., Dybach A. M., Slepchenko A. Yu. (2016). [Radiation consequences of the fire in the Exclusion Zone of the Chornobyl nuclear power plant]. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 1(69), p. 64. (in Rus.)
5. Hao W. M., Bondarenko O. O., Zibtsev S., Hutton D. (2009). Vegetation fires, smoke emissions, and dispersion of radionuclides in the Chernobyl exclusion zone. *Developments in Environ. Sci.*, vol. 8, pp. 265–275.
6. Zibtsev S. V., Goldammer J. G., Robinson S., Borsuk O. A. (2015). Fires in nuclear forests: silent threats to the environment and human security. *Unasylva*, vol. 66, pp. 40–51.
7. Kashparov V. A., Lundin S. M., Kadygrib A. M., Protasak V. P., Levchuk S. E., Yoschenko V. I., Kashpur V. A., Talerko M. M. (2000). Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters. *J. Environm. Radioactivity*, vol. 51, pp. 281–298.
8. Kulan A. (2006). Seasonal ^7Be and ^{137}Cs activities in surface air before and after the Chernobyl event. *J. Environm. Radioactivity*, vol. 90, pp. 140–150.
9. Mardia K. V., Jupp P. E. (2000). *Directional Statistics*. Chichester: Wiley, 441 p.
10. Shynkarenko V. K., Talerko M. M., Kashpur V. O., Skoryak H. G., Svyrid O. A. (2020). [Radioactive aerosols in the near zone of the Chornobyl nuclear power plant in 2018]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 1 (16), pp. 57–67. (in Ukr.)
11. Shynkarenko V. K., Kashpur V. O., Skoryak H. G., Kalynovskiy A. K. (2016). [Evaluation of the aerosol radiation situation at the ChNPP industrial site during construction works of the NSC]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 27, pp. 58–66. (in Rus.)
12. Shynkarenko V. K., Kashpur V. O., Skoryak H. G., Svyryd O. A. (2019). [New Safe Confinement and radioactive aerosols in the near zone of the Chornobyl nuclear power plant]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 1 (13), pp. 76–82. (in Ukr.)

Надійшла 16.11.2022

Received 16.11.2022