

В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, О. А. Свирид

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

Радіоактивні аерозолі в ближній зоні Чорнобильської атомної електростанції у 2018 р.

Ключові слова:

об'єкт «Укриття»,
новий безпечний конфайнмент,
об'ємна активність ^{137}Cs в повітрі,
гарячі частинки,
кореляційний аналіз.

Наведено дані про стан забруднення радіоактивними аерозолями приземного шару атмосфери ближньої зони Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС) після спорудження арки нового безпечного конфайнмента (НБК). Незважаючи на досить високу питому активність повітря під накриттям НБК унаслідок проведення будівельно-монтажних робіт на прилеглій території спостерігається зменшення рівня забруднення приземного шару повітря не лише порівняно з рівнем під час будівництва об'єкта «Арка», а й з рівнем, що передував початку будівництва. Відсутність достовірних кореляцій між об'ємними активностями ^{137}Cs в повітрі всередині і зовні НБК свідчить про відсутність суттєвого впливу виносу радіоактивного аерозолю з-під арки на радіоаерозольну ситуацію в ближній зоні НБК. Кореляційний аналіз даних вимірювань об'ємних активностей повітря зовні об'єкта «Арка» та метеорологічних параметрів вказує на значний внесок у формування радіоактивних аерозолів радіоактивно забруднених прилеглих територій та провідну роль вітрової ресуспензії як механізму надходження радіоактивних аерозолів у приземний шар атмосфери ближньої зони ЧАЕС. Запропоновано алгоритм ранжування напрямків вітру, що дає змогу виділити переважні напрямки надходження радіоактивних аерозолів до кожної з чотирьох фільтровентиляційних установок у ближній зоні ЧАЕС. Проведений аналіз дозволив виявити та пояснити відмінності в механізмах формування аерозольного забруднення повітря в місцях розташування пробовідбірників.

Вступ

Відомо, що створення об'єкта «Укриття» повністю не ліквідувало проблему викидів радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище [1–3]. Будівництво нового безпечного конфайнмента (НБК) є одним з основних етапів перетворення 4-го енергоблока Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС) на екологічно безпечну систему, покликану забезпечити безпеку персоналу, населення та навколишнього середовища [4]. Основний елемент НБК — об'єкт «Арка» — було встановлено в кінці 2016 р., але протя-

гом 2018 р. на ньому ще проводилися роботи, зокрема герметизація щілин.

Необхідно відзначити, що крім завдання ізоляції 4-го енергоблока від навколишнього середовища будівництво НБК повинно дати змогу безпечно проводити роботи із залишками енергоблока, при цьому проектом допускаються досить високі рівні об'ємної активності радіоактивних аерозолів усередині НБК — до 210 Бк/м³ за загальною бета-активністю [5].

Спорудження НБК суттєво вплинуло на радіоаерозольну ситуацію в ближній зоні ЧАЕС. Спочатку в ході виконання підготовчих робіт і власне

© В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, О. А. Свирид, 2020

будівництва спостерігалися періоди значного підвищення (до 5 Бк/м^3) рівня об'ємних активностей ^{137}Cs , а відповідно й трансуранових елементів та сумарної бета-активності, оскільки основна активність ^{137}Cs пов'язана з паливними частинками [6–8]. При цьому високі рівні об'ємних активностей під час будівництва спостерігалися лише поблизу місць виконання робіт і не реєструвалися вже на відстані 0,5–1,5 км від них [6]. Відзначимо, що динаміка активності радіоактивних аерозолів у ближній зоні дещо відмінна від динаміки неорганізованих викидів через нещільності об'єкта «Укриття» та систему «Байпас» [9, 10]. Після встановлення об'єкта «Арка» та його герметизації об'ємні активності радіоактивних аерозолів на прилеглій території різко знизились. Але питання про вплив цього об'єкта на радіоаерозольну ситуацію в ближній зоні залишається відкритим з огляду на заплановані високі рівні при виконанні робіт усередині об'єкта «Арка».

Практично в усіх попередніх роботах як основне джерело радіоактивних аерозолів розглядався або сам об'єкт «Укриття», або відповідні місця проведення робіт на території ближньої зони. Після встановлення НБК і зниження потоку радіоактивних аерозолів від об'єкта «Укриття» в навколишнє середовище зростає внесок інших можливих джерел у формування радіоаерозольної ситуації в ближній зоні ЧАЕС. Оскільки детальний аналіз напрямків поширення радіоактивних аерозолів у ближній зоні та виявлення додаткових джерел їхніх надходжень не проводились, питання виявлення таких джерел залишається відкритим. Визначення напрямків переважного перенесення радіоактивних аерозолів за даними наших вимірювань ускладнено тим, що накопичення аерозольних часток на повітряному фільтрі відбувається протягом тривалого часу (7 діб), а напрямок вітру при цьому не залишається постійним. Обійти це ускладнення можна за допомогою статистичних методів для роботи з векторними величинами [11].

Метою роботи є дослідження динаміки забруднення приземного шару атмосфери радіоактивними аерозолями в ближній зоні ЧАЕС та виявлення основних напрямків поширення таких аерозолів після завершення будівництва НБК протягом 2018 р.

Матеріали та методика експерименту

Відповідно до програми контролю радіаційного забруднення приземного шару атмосфери поблизу об'єкта «Укриття» протягом року в безперервному

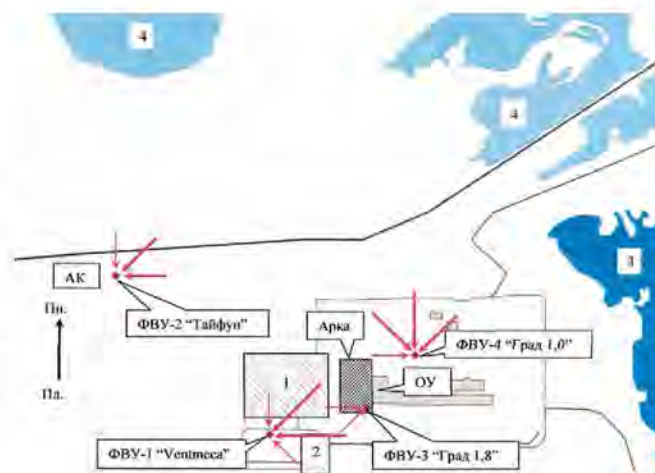


Рис. 1. Схема розташування ФВУ в ближній зоні об'єкта «Укриття».

Стрілками вказано напрямки переважаючого переносу, довжина стрілок пропорційна коефіцієнтам кореляцій, товщина відображає рівень достовірності (див. далі по тексту табл. 5). 1 — основний промисловий майданчик; 2 — допоміжний промисловий майданчик; 3 — залишки ставка охолоджувача; 4 — інші водойми

режимі працювали чотири фільтровентиляційні установки (ФВУ): ФВУ-1 «Ventmeca» — розташована на схід від санпропускника СП-1430 приблизно за 500 м від південно-західного кута машинного залу; ФВУ-2 «Тайфун» — знаходиться на відстані 1,4 км від адміністративного корпусу (АК) об'єкта «Укриття» (ОУ); ФВУ-3 «Град-1.8» була розміщена безпосередньо біля південної стіни машинного

Таблиця 1. Основні технічні характеристики ФВУ

Параметри ФВУ	ФВУ-1	ФВУ-2	ФВУ-3	ФВУ-4
	«Ventmeca»	«Тайфун»	«Град-1.8»	«Град-1.0»
Широта місцезнаходження	51°23'13.0»	51°23'39.9»	51°23'17.9»	51°23'26.8»
Довгота місцезнаходження	30°05'31.4»	30°04'50.8»	30°05'52.4»	30°06'09.2»
Висота відбирання проби, м	1,0	2,5	1,8	1,0
Продуктивність, м ³ /год	300	4500	450	450
Площа фільтра, м ²	0,36	0,78	0,56	0,56

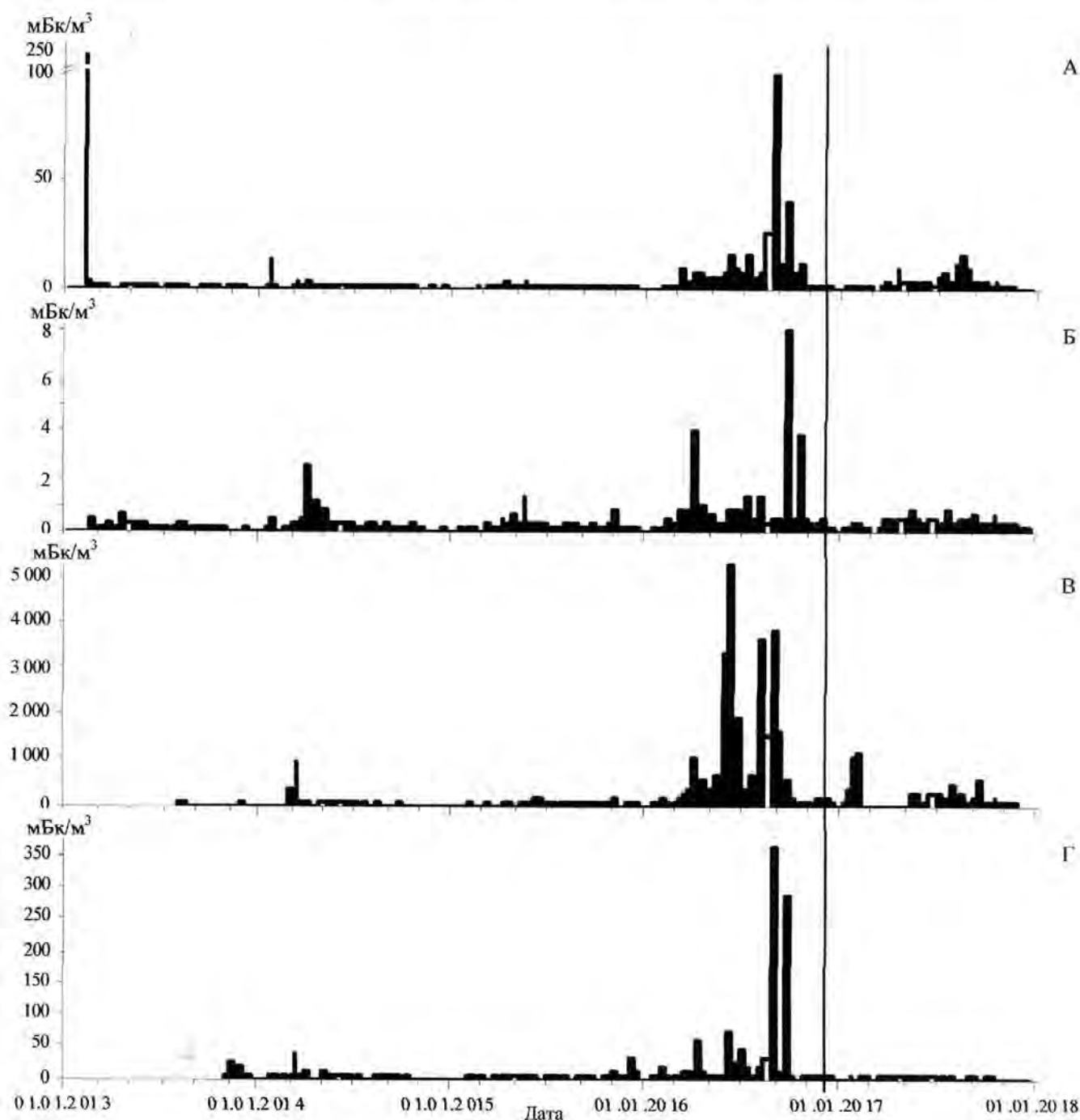


Рис. 2. Динаміка об'ємної активності ^{137}Cs в приземному шарі повітря поблизу об'єкта «Укриття»: А — ФВУ-1 «Ventmesa»; Б — ФВУ-2 «Тайфун»; В — ФВУ-3 «Град-1.8»; Г — ФВУ-4 «Град-1.0». Вертикальною лінією відмічено час насування об'єкта «Арка»

залу. Після монтажу об'єкта «Арка» ця ФВУ опинилась усередині НБК, де і продовжує працювати. ФВУ-4 «Град-1.0» розташована з північної сторони 4-го енергоблока (рис. 1). Основні параметри ФВУ наведено в табл. 1. Матеріал повітряних фільтрів — тканина Петрянова ФПП-15-1,5. Періодичність зміни фільтрів — 7 діб.

Вимірювання активності ^{137}Cs на повітряних фільтрах проводили за допомогою напівпровідникового гамма-спектрометра.

Для аналізу погодних умов розповсюдження радіоактивних аерозолів було використано дані міні-метеостанції Інституту проблем безпеки АЕС НАН України CR-10, розташованої на даху

адміністративного корпусу об'єкта «Укриття». Основні метеорологічні параметри (напрямок і швидкість вітру, температура, вологість повітря, опади) осереднювалися і запам'ятовувалися по 10-хвилинних інтервалах.

Результати та їх обговорення

Динаміка питомої активності повітря в приземному шарі атмосфери поблизу об'єкта «Укриття» протягом 2013–2018 рр. представлена на рис. 2, а більш детально протягом 2018 р. — на рис. 3. Необхідно відзначити, що на ФВУ, розташованих поза межами НБК, спостерігається суттєве зниження об'ємної активності ^{137}Cs в порівнянні з роками до будівництва НБК і особливо в період будівництва самого НБК (див. рис. 3). У той же час активність ^{137}Cs в повітрі під накриттям НБК унаслідок виконання робіт з демонтажу радіоактивно забруднених об'єктів залишалася досить високою.

Значення коефіцієнтів кореляції між питомою об'ємною активністю ^{137}Cs в повітрі для кожної з точок відбору та метеорологічними параметрами — кількістю опадів, середніми за час експозиції вологістю повітря, швидкістю вітру та значеннями максимальної швидкості вітру, вирахованої при усередненні по 3-годинних інтервалах, — наведено у верхньому правому кутку табл. 2. Оскільки спостерігається явна кореляція об'ємних активностей з вологістю повітря, були знайдені частинні коефіцієнти кореляції при виключенні впливу вологості — вони наведені в нижньому лівому кутку таблиці.

Бачимо, що зовні НБК (ФВУ-1, 2 і 4) спостерігається пряма кореляція між об'ємними активностями ^{137}Cs в цих точках відбору, навіть при виключенні впливу вологості. Це свідчить про наявність спільних (окрім вологості) факторів, що впливають на надходження радіоактивних аерозолів для цих ФВУ. Кореляції між об'ємними активностями та швидкостями вітру, як середньою, так і максимальною, а також обернена кореляція об'ємної активності з вологістю повітря свідчать на користь вітрової ресуспензії як основного механізму надходження радіоактивних речовин у повітря поза межами НБК.

Відсутність кореляцій між об'ємними активностями для ФВУ-3 всередині НБК і рештою ФВУ, розташованих зовні, свідчить про те, що вплив виносу радіоактивних речовин з-під об'єкта «Арка» на радіоаерозольну ситуацію в ближній зоні ЧАЕС є не-

суттєвим, незважаючи на досить високі рівні об'ємної активності всередині об'єкта «Арка». Наявність прямої кореляції між об'ємною активністю та вологістю повітря під накриттям НБК, можливо, пов'язана з прискоренням коагуляції часток пилу та, відповідно, пришвидшенням випадання гарячих часток.

Відомо, що інтенсивність вітрової ресуспензії (ресуспензії) часток при малих швидкостях вітру V пов'язана з випадковим проривом турбулентних вихорів до підстильної поверхні і в першому наближенні пропорційна V . З ростом швидкості вітру починає працювати механізм перекошування більш крупних часток по поверхні з вивільненням дрібних пилових часток у повітряний потік. При подальшому збільшенні швидкості вітру вмикається механізм сальтації, коли частки, що котяться по поверхні, відриваються від неї, підстрибують, розганяються потоком повітря і після падіння на поверхню вибивають з неї дрібні пилові частки чи руйнуються самі з утворенням останніх. Унаслідок цього потік пилових часток на малих швидкостях пропорційний швидкості вітру, при більших високіх швидко зростає за кубічним законом. У свій час різними авторами для вітрової ресуспензії був запропонований ряд дещо подібних залежностей. Так, для горизонтального масового потоку часток $q \left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right]$ піщаних дюн Багнольдом [12] була запропонована залежність

$$q = C \cdot u_*^3 \frac{\rho}{g} \quad (1)$$

де C — безрозмірний коефіцієнт, що визначається властивостями поверхні (рельєф, склад часток, вологість, рослинний покрив тощо); ρ — густина повітря; u_* — динамічна швидкість (міра інтенсивності турбулентного пульсаційного руху, що дорівнює квадратному кореню з дотичної напруги турбулентного тертя, поділеної на густину повітря); g — прискорення вільного падіння. Оскільки робота механізмів перекошування та сальтації починається з певної граничної швидкості v_0 , для опису потоку часток були запропоновані більш складні вирази:

$$q = C u_*^3 \left(1 - \frac{v_0}{u_*} \right) = C u_*^2 (u_* - v_0) \quad [13] \quad (2)$$

та

$$q = C_{DK} \frac{\rho}{g} v_0 u_*^2 \left(1 - \frac{v_0^2}{u_*^2} \right) = C_{DK} \frac{\rho}{g} v_0 (u_*^2 - v_0^2). \quad [14] \quad (3)$$

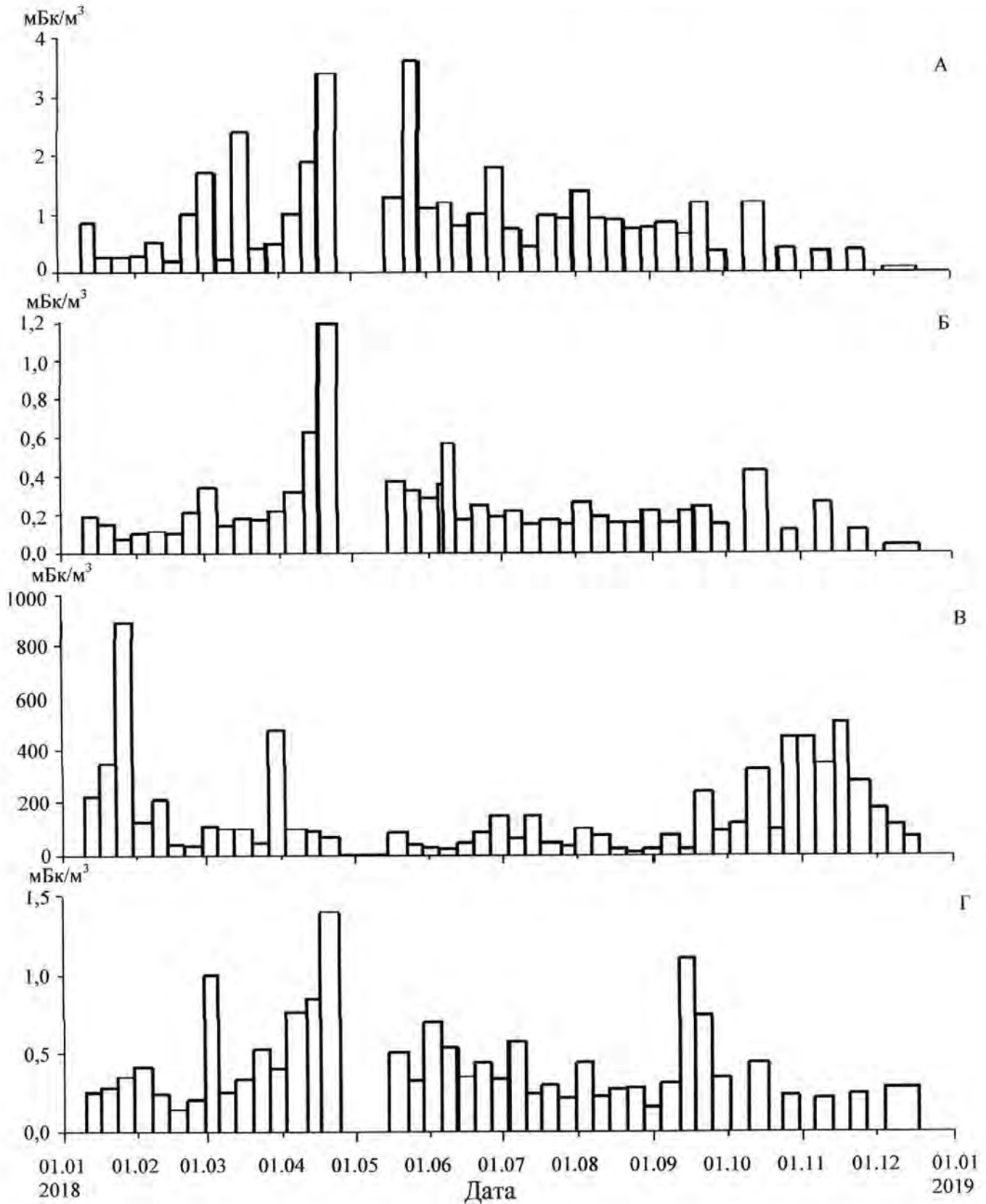


Рис. 3. Динаміка об'ємної активності ¹³⁷Cs в приземному шарі повітря поблизу об'єкта «Укриття»: А — ФВУ-1 «Ventmesa»; Б — ФВУ-2 «Тайфун»; В — ФВУ-3 «Град-1.8»; Г — ФВУ-4 «Град-1.0»

Таблиця 2. Кореляційні співвідношення між об'ємними активностями ^{137}Cs в повітрі поблизу точок відбору проб та метеорологічними параметрами — правий верхній кут таблиці; нижній лівий — частинні коефіцієнти кореляції при виключенні впливу вологості

	ФВУ-1	ФВУ-2	ФВУ-3	ФВУ-4	Вологість, %	Опади, мм	V_{cp} , м/с	V_{max} , м/с
ФВУ-1	1	0,69	-0,29	0,48	-0,51	0,06	0,34	0,38
ФВУ-2	0,58	1	-0,19	0,72	-0,52	-0,24	0,40	0,38
ФВУ-3	-0,12	0,01	1	-0,15	0,38	0,09	0,16	0,19
ФВУ-4	0,32	0,64	-0,15	1	-0,44	-0,09	0,51	0,45
Вологість, %	-	-	-	-	1	0,40	-0,10	-0,09
Опади, мм	0,34	-0,04	-0,08	0,11	-	1	0,28	0,13
V_{cp} , м/с	0,34	0,40	0,21	0,52	-	0,36	1	0,80
V_{max} , м/с	0,30	0,30	0,30	0,39	-	0,14	0,81	1

Примітка. Жирним шрифтом виділені значення з достовірністю $p > 95\%$, звичайним — $p > 93\%$, курсивом — $p < 93\%$.

Оскільки територія ближньої зони в основному вкрита рослинністю, що сприяє зниженню швидкості вітру безпосередньо біля земної поверхні, а швидкості вітру не такі вже й великі (максимальне значення протягом року 7,7 м/с), у першому наближенні будемо вважати величину ефективності вітрового піднімання пропорційною швидкості вітру. У такому разі для об'ємної активності A в місці розташування ФВУ $A = k \cdot V$, де k — деякий коефіцієнт, що характеризує середню продуктивність піднімання радіоактивних аерозолів при даному напрямку і швидкості вітру. Необхідно відразу зауважити, що для різних площадок і різних напрямків вітру цей коефіцієнт буде різний. Крім того, він значною мірою буде залежати від метеорологічних умов, у першу чергу від вологості ґрунту.

Спробуємо визначити пріоритетні напрямки вітру, за яких відбувається максимальне накопичення активності на повітряних фільтрах. Зауважимо, що описаний підхід дещо відрізняється від запропонованих у [11].

Нехай існує певний напрямок, з яким ми пов'язуємо вітрову ресуспензію та відповідне перенесення. Складемо список напрямків (румбів) вітру так, щоб їхня значимість зростала (з номерами місць від 1 до 8). Проведемо ранжування напрямків. Для прикладу на рис. 4, а як такий пріоритетний напрямок вибрано напрямком південного вітру, а на рис 4, б — північно-західного. Дробові значення одержано згідно з правилами обчислення середніх рангів. Позитивна

кореляція між об'ємною активністю в цій точці й ранжованими величинами напрямків вітру буде слугувати деяким аргументом на користь такої гіпотези. Але апіорі невідомо, з якими напрямками вітру пов'язане перенесення радіоактивних аерозолів. Тому далі проводиться процедура пошуку найбільш імовірного відповідного напрямку. Для цього побудуємо таблицю середніх рангів для кожного з напрямків рози вітрів (табл. 3), де пріоритетні напрямки позначено загальноприйнятими латинськими літерами.

Оскільки в нашому випадку середні швидкості вітру достовірно корелюють з максимальними його швидкостями ($R = 0,8$), а величина інтенсивності ресуспензії зростає зі збільшенням швидкості повітряного потоку, то інтенсивність ресуспензії повинна корелювати з напрямками та величинами максимальної швидкості вітру V_{max} . У таблицю для статистичної обробки внесемо відповідно 8 варіантів напрямків вітру з ранжуванням за пріоритетними напрямками рози вітрів. Знайдені коефіцієнти кореляцій між об'ємною активністю і рангами для всіх 8 румбів, що відповідають напрямку максимальної швидкості вітру V_{max} під час даної експозиції, наведено в табл. 4. Як бачимо, для об'ємних активностей ^{137}Cs в повітрі поблизу ФВУ-1 спостерігаються достовірні кореляції з напрямками східного та північно-східного вітрів, дещо менш достовірними є кореляції з південно-західним та західним вітрами для ФВУ-3 і ще менш достовірними кореляції з північно-західним та західним вітром для ФВУ-4.

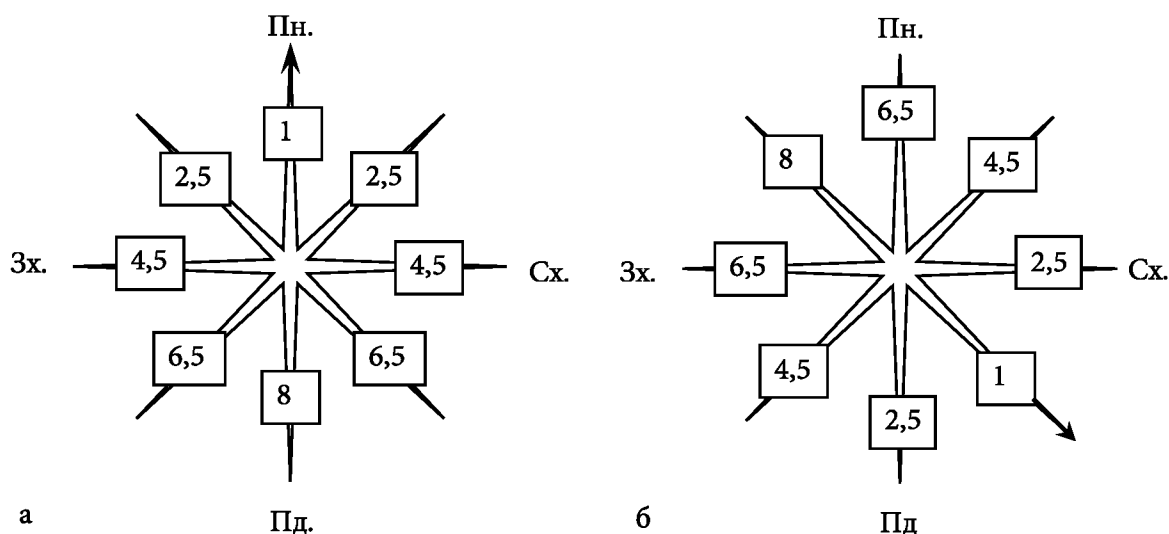


Рис. 4. Рангові коефіцієнти для вибраних пріоритетних напрямків: а — південного, б — північно-східного

Таблиця 3. Значення рангових коефіцієнтів для вибраних напрямків вітру

Напрямок вітру	Пріоритетний напрямок							
	S	SE	E	NE	N	NW	W	SW
Пн.	1	2,5	4,5	6,5	8	6,5	4,5	2,5
Пн. Сх.	2,5	4,5	6,5	8	6,5	4,5	2,5	1
Сх.	4,5	6,5	8	6,5	4,5	2,5	1	2,5
Пд. Сх.	6,5	8	6,5	4,5	2,5	1	2,5	4,5
Пд.	8	6,5	4,5	2,5	1	2,5	4,5	6,5
Пд. Зх.	6,5	4,5	2,5	1	2,5	4,5	6,5	8
Зх.	4,5	2,5	1	2,5	4,5	6,5	8	6,5
Пн. Зх.	2,5	1	2,5	4,5	6,5	8	6,5	4,5

Таблиця 4. Коефіцієнти кореляцій між об'ємною активністю і рангами основних напрямків

	ФВУ-1	ФВУ-2	ФВУ-3	ФВУ-4	Вологість, %	Опади, мм	$V_{\text{середн}}$, м/с	V_{max} , м/с
S	-0,06	-0,03	0,10	-0,23	0,16	-0,16	-0,02	0,08
SE	0,17	0,08	-0,13	-0,23	0,05	-0,08	-0,12	-0,06
E	0,35	0,14	-0,28	-0,12	-0,02	0,11	-0,13	-0,19
NE	0,32	0,14	-0,29	0,17	-0,19	0,24	-0,02	-0,17
N	0,06	0,03	-0,10	0,23	-0,16	0,16	0,02	-0,08
NW	-0,17	-0,08	0,13	0,23	-0,05	0,08	0,12	0,06
W	-0,35	-0,14	0,28	0,12	0,02	-0,11	0,13	0,19
SW	-0,32	-0,14	0,29	-0,17	0,19	-0,24	0,02	0,17

Примітка. Жирним шрифтом виділені значення з достовірністю $p > 95\%$, жирним курсивом — $p > 90\%$, звичайним шрифтом — $p > 80\%$, звичайним курсивом — $p < 80\%$.

Таблиця 5. Коефіцієнти кореляцій між об'ємними активностями повітря в точках розташування ФВУ і добутками максимальних швидкостей вітру з рангами основних напрямків

	ФВУ-1	ФВУ-2	ФВУ-3	ФВУ-4	Вологість, %	Опади, мм	$V_{\text{середн}}$, м/с	V_{max} , м/с
S	-0,02	-0,01	0,18	-0,14	0,11	-0,10	0,20	0,37
SE	0,28	0,16	-0,07	-0,09	-0,03	-0,02	0,19	0,32
E	0,57	0,34	-0,22	0,14	-0,19	0,16	0,35	0,37
NE	0,55	0,38	-0,22	0,43	-0,33	0,20	0,44	0,39
N	0,31	0,30	-0,05	0,48	-0,31	0,12	0,41	0,40
NW	0,05	0,16	0,20	0,45	-0,17	0,04	0,47	0,51
W	-0,13	0,07	0,35	0,30	-0,08	-0,11	0,46	0,62
SW	-0,19	-0,02	0,35	0,00	0,09	-0,17	0,30	0,51

Примітка. Жирним шрифтом виділені значення з достовірністю $p > 95\%$, жирним курсивом — $p > 90\%$, звичайним шрифтом — $p > 80\%$, звичайним курсивом — $p < 80\%$.

Спробуємо врахувати не лише напрямки, а й величини максимальних швидкостей вітру. Для цього знайдемо коефіцієнти кореляцій між об'ємними активностями ^{137}Cs в повітрі в точках розташування ФВУ і добутками максимальних швидкостей вітру з рангами основних напрямків. Представлені в табл. 5 результати демонструють явне збільшення коефіцієнтів кореляцій та їхньої достовірності.

Виділені напрямки пріоритетного переносу активності для кожної з ФВУ позначено стрілками на рис. 1. Бачимо, що зовні об'єкта «Арка» (ФВУ-1, 2 та 4) головними напрямками, з яких відбувається перенесення радіоактивних аерозолів, є група вітрів північного, північно-східного та східного напрямків. Депо меншим є вплив північно-західних вітрів.

Для ФВУ-1 північний і північно-східний напрямки є очікуваними — це напрямки з 4-го енергоблока. Східний вітер — це вітер уздовж південної стіни енергоблока та дороги, що проходить поруч. Тут імовірний вплив антропогенного піднімання, викликаний рухом транспортних засобів. А південно-східний вітер уже спрямований не від, а до об'єкта «Укриття». Підвищення активності ^{137}Cs в повітрі за такого напрямку може бути пояснено ресуспензією радіоактивних часток з осушеної поверхні ставка-охолоджувача ЧАЕС та подальшим перенесенням їх на ФВУ-1, хоча не можна виключати й вітрове піднімання на решті території поблизу промислового майданчика 2 (див. рис. 1).

Для ФВУ-2 і 4 спостерігаються схожі між собою залежності. Основний внесок у перенесення дають вітри північного спрямування, і в цих випадках активність повітря значною мірою визначається перенесенням радіоактивних часток з території на північ

від ЧАЕС, що може бути пояснено процесами ресуспензії на північному сліді чорнобильських випадань та сильно забрудненій території між станцією та заплавою річки Прип'ять.

Як уже було зазначено, об'ємні активності під дахом об'єкта «Арка» (ФВУ-3) не корелюють з активностями на інших ФВУ. Основний внесок в об'ємну активність дають вітри західного спрямування. Найбільш імовірно пояснення полягає в тому, що саме ці вітри спрямовані у ворота об'єкта, завдяки чому відбувається перенесення пилу всередині об'єкта та транспорт пилу до ФВУ-3.

Відсутність явного впливу ресуспензії вздовж більш потужного західного сліду може бути пояснена дією деяких факторів: по-перше, для західного сліду характерне випадання більш крупних гарячих часток [2], вітрове піднімання яких менш імовірно; по-друге — ліс, по якому переважно проходить слід, перешкоджає вітровому підніманню; по-третє — ближня до станції зона сліду під час ліквідації наслідків аварії була засипана товстим шаром піску (прилегла до станції територія, частина «Рудого лісу»).

Висновки

1. Після встановлення арки НБК у проектне положення в ближній зоні об'єкта «Укриття» спостерігається зменшення рівня забруднення приземного шару повітря, незважаючи на те що внаслідок проведення монтажних робіт питома активність повітря під накриттям НБК залишається досить високою.

2. Відсутність кореляцій між об'ємними активностями ^{137}Cs у повітрі всередині (ФВУ-3) і зовні НБК

свідчить про відсутність суттєвого впливу виносу радіоактивних аерозолів з-під об'єкта «Арка» на об'ємну активність аерозолу в інших пунктах спостережень.

3. Кореляційний аналіз об'ємних активностей ^{137}Cs у повітрі та метеорологічних параметрів указує на провідну роль ресуспензії радіоактивних часток із забрудненої території навколо ЧАЕС у формуванні радіоактивних аерозолів поза об'єктом «Арка».

4. Запропонований алгоритм ранжування напрямків вітру дозволяє виділити переважні напрямки надходження радіоактивних аерозолів до кожної з чотирьох фільтровентиляційних установок у ближній зоні ЧАЕС. Проведений аналіз дав змогу виявити та пояснити відмінності в механізмах формування аерозольного забруднення повітря в місцях розташування пробовідбірників.

Список використаної літератури

1. 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 Чернобыля. — 2014. — Вып. 23. — С. 54–65.
2. 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.
3. Огородников Б. И. Состав и свойства радиоактивных аэрозолей объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС: 2000-2015 гг / Б. И. Огородников // Журнал физической химии. — 2018. — Т. 92, № 6. — С. 1006–1017.
4. Закон України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» від 11.12.1998 р. № 309-XIV // Відомості Верховної Ради України. — 1999. — № 4. — С. 33.
5. Документ з безпеки в рамках концепції проекту ПК-1 НБК / SIP-N-LI-22-A500_-CDS-001-01. Revision 1-Appendix. — 2008. — 63 с.
6. 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.
7. Assessment of aerosol radiation environment in short-range region of ChNPP during building of the new safe confinement / E. K. Garger, V. K. Shynkarenko, V. A. Kashpur [et al.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. — 2017. — Вып. 29. — С. 78–84.
8. Шинкаренко В. К. Новий безпечний конфайнмент і радіоактивні аерозолі в ближній зоні ЧАЕС / В. К. Шинкаренко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк // Ядерна енергетика та довкілля. — 2019. — № 1 (13). — С. 76–82.
9. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2015–2016 гг. / А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. К. Калиновский [и др.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. — 2017. — Вып. 29. — С. 69–77.
10. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в условиях нового безопасного конфайнмента в 2017 г. / А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. К. Калиновский [и др.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. — 2017. — Вып. 31. — С. 68–75.
11. Mardia K. V. Directional Statistics / K. V. Mardia, P. E. Jupp. — Chichester: Wiley, 2000. — 441 p.
12. Bagnold R. A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes / R. A. Bagnold. — London : Methuen, 1954. — 288 p.
13. Gillette D. A. On the production on soil wind erosion aerosols having the potential for long range transport / D. A. Gillette // Atmos. Res. — 1974. — Vol. 8 (3/4). — P. 735–744.
14. The physics of wind-blown sand and dust. / J. F. Kok., E. J. R. Parteli, T. I. Michaels, D. B. Karam // Rept. Prog. Phys. — 2012. — Vol. 75 (10). — 106901.

В. К. Шинкаренко, Н. Н. Талерко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк, А. А. Свирид

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

Радиоактивные аэрозоли в ближней зоне Чернобыльской атомной электростанции в 2018 г.

Приведены данные о состоянии загрязнения радиоактивными аэрозолями приземного слоя атмосферы ближней зоны Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) после сооружения арки нового безопасного конфайнмента (НБК). Несмотря на достаточно высокую удельную активность воздуха под накрытием НБК в результате проведения строительно-монтажных работ на прилегающей территории наблюдается уменьшение уровня загряз-

нения приземного слоя воздуха не только по сравнению с уровнем при строительстве объекта «Арка», но и с уровнем, предшествовавшим началу строительства. Отсутствие достоверных корреляций между объемными активностями ^{137}Cs в воздухе внутри и снаружи НБК свидетельствует об отсутствии существенного влияния выноса радиоактивного аэрозоля из-под арки на радиоаэрозольную ситуацию в ближней зоне НБК. Корреляционный анализ данных измерений объемных активностей воздуха снаружи объекта «Арка» и метеорологических параметров указывает на значительный вклад радиоактивных выпадений на прилегающих территориях в формирование радиоактивных аэрозолей и ведущую роль ветровой ресуспензии в качестве механизма поступления радиоактивных аэрозолей в приземный слой атмосферы ближней зоны ЧАЭС. Предложен алгоритм ранжирования направлений ветра, позволяющий выделить преимущественные направления поступления радиоактивных аэрозолей к каждой из четырех фильтровентиляционных установок в ближней зоне ЧАЭС. Проведенный анализ позволил выявить и объяснить отличия в механизмах формирования аэрозольного загрязнения воздуха в местах расположения пробоотборников.

Ключевые слова: объект «Укрытие», новый безопасный конфайнмент, объемная активность ^{137}Cs в воздухе, горячие частицы, корреляционный анализ.

**V. K. Shynkarenko, M. M. Talerko, V. A. Kashpur,
G. G. Skorjak, O. A. Svyryd**

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

Radioactive Aerosols in the Near Zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2018

The construction of a new safe confinement (NSC) is one of the main stages in transforming the 4th power unit of the Chernobyl nuclear power plant (NPP) into an environmentally safe system designed to ensure safety of personnel, population and environment. In addition to the task of isolating the 4th power unit from the environment, the construction of the NSC should enable safe work with residues of the 4th unit, while the project allows quite high levels of volumetric activity of radioactive

aerosols inside the NSC – up to 210 Bq/m^3 in total beta activity. The purpose of the work is to study the dynamics of the aerosol situation in the near zone of the Chernobyl NPP under the influence of the NSC during 2018. Data on the contamination with radioactive aerosols of the near-surface atmosphere in the near zone of the Chernobyl NPP after the construction of the arch of the NSC are presented. Despite a relatively high specific activity of the air under the NSC roof as a result of building and construction works, there is a decrease in the level of contamination of the surface air layer in the adjacent territory, not only compared to the level during the construction of the “Arch” object, but also to levels preceding the start of construction. The absence of reliable correlations between the ^{137}Cs volumetric activities in the air inside and outside the NSC indicates the absence of a significant effect of the outside transport of radioactive aerosol from the “Arch” on the radio-aerosol situation in the near zone of the NSC. A correlation analysis of volumetric air activity measurement data outside the “Arch” facility and meteorological parameters indicates a significant contribution of radioactive depositions in the adjacent territories into the formation of radioactive aerosols and the leading role of wind resuspension as a mechanism for the input of radioactive aerosols into the near-ground atmospheric layer of the near Chernobyl NPP zone. An algorithm for wind directions ranking is proposed, which enables to identify the preferred directions of the arrival of radioactive aerosols to each of 4 air samplers in the near Chernobyl NPP zone. The analysis made it possible to identify and explain the differences in the mechanisms of formation of aerosol air contamination at the locations of the samplers.

Keywords: Shelter object, new safe confinement, ^{137}Cs volumetric activity in air, hot particles, correlation analysis.

References

1. Garger E. K., Kashpur V. A., Skorjak G. G., Shynkarenko V. K. (2014). [Physical and chemical characteristics of the aerosol of the 30 km zone of ChNPP in 1986–2013]. *Problemy bezpeky atomnyh elektrostansiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chernobyl], vol. 23, pp. 54–64. (in Russ.)
2. Ogorodnikov B. I., Pazukhin E. M., Kliuchnykov A. A. (2008). *Radioaktivnye aerosoli obekta “Ukrytie”: 1986–2006 gg.* [Radioactive aerosols of the Shelter object: 1986–2006]. Chernobyl: ISP NPP NAS of Ukraine, 456 p. (in Russ.)
3. Ogorodnikov B. I. (2018). [Composition of Radioactive Aerosols in the Shelter Construction of the Chernobyl

- Nuclear Power Plant in 2000–2015]. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry], vol. 92, no 6, pp. 1006–1017. (in Russ.)
4. The Law of Ukraine “On General Principles of Further Operation and Decommissioning of Chornobyl NPP and Transformation of Ruined Fourth Power Unit of This NPP into Ecologically Safe System” of December 11, 1998, No. 309-XIV. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], no. 4, p. 33. (in Ukr.)
 5. NSC CS-1 Concept Design Safety Document SIP-N-LI-22-A500_CDS-001. Revision 1-Appendix, 2008, 63 p.
 6. Shynkarenko V. K., Kashpur V. A., Skorjak G. G., Kalinovsky A. K. (2016). [Assessment of aerosol radiation situation on ChNPP industrial platform during work on building a New safe confinement]. *Problemy bezpeky atomnyh elektrostansiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 27, pp. 58–66. (in Russ.)
 7. Garger E. K., Shynkarenko V. K., Kashpur V. A., Skorjak G. G., Kalinovsky A. K. (2017) [Assessment of aerosol radiation environment in short-range region of ChNPP during building of the New safe confinement]. *Problemy bezpeky atomnyh elektrostansiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 29, pp. 78–84.
 8. Shynkarenko V. K., Kashpur V. A., Skorjak G. G., Svirid A. A. (2019). [New safe confinement and radioactive aerosols in short-range region of Chornobyl nuclear power plant]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillya* [Nuclear Power and the Environment], vol. 13, no 1, pp 76–82. (in Ukr.)
 9. Lagunencko A. S., Khan V. E., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A., Kashpur V. O., Dovyd'kov S. A. (2016). [Control of releases of radioactive aerosols from the Shelter object in 2015–2016]. *Problemy bezpeky atomnyh elektrostansiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 29, pp. 69–77.
 10. Lagunencko A. S., Khan V. E., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A., Kashpur V. O., Kovalchuk V. P. (2017). [Monitoring of radioactive aerosol releases from the Shelter object within conditions of New Safe Confinement in 2017]. *Problemy bezpeky atomnyh elektrostansiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 31, pp. 68–75.
 11. Mardia K.V., Jupp P. E. (2000). *Directional Statistics*. Chichester: Wiley, 441 p.
 12. Bagnold R. A. (1954). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen, 288 p.
 13. Gillette D. A. (1974). On the production on soil wind erosion aerosols having the potential for long range transport. *Atmos. Res.*, vol. 8(3/4), pp. 735–744.
 14. Kok J. F., Parteli E. J. R., Michaels T. I., Karam D. B. (2012). The physics of wind-blown sand and dust. *Rept. Prog. Phys.*, vol. 75, no. 10, 106901.

Надійшла 24.10.2019

Recieved 24.10.2019