

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЯ 30-КИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ ЧАЭС В 1986 - 2013 гг.

Представлено краткое обобщение исследований физико-химических характеристик аэрозоля 30-километровой зоны ЧАЭС, проведенные сотрудниками отдела безопасности и реабилитации окружающей среды ИПБ АЭС НАН Украины. Проанализированы результаты измерений объемной активности выбросов из объекта «Укрытие», их пространственно-временная изменчивость, приведены основные характеристики чернобыльского аэрозоля как в помещениях объекта «Укрытие», так и в его ближней зоне. Представлены данные по распределению активности по размерам частиц в течение естественного ветрового подъема. Внутри помещений объекта «Укрытие» и в его ближней зоне, кроме «горячих» частиц топливного состава, зарегистрированы малоактивные частицы, обогащенные ^{137}Cs . Данные по кинетике выщелачивания радионуклидов из «горячих» частиц позволяют определить класс растворимости ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в исследованных аэрозолях как класс S (медленное растворение) для топливных частиц и отнести растворимость ^{137}Cs в малоактивных цезиевых частицах к классу F (быстрое растворение).

Ключевые слова: радиоактивный аэрозоль, «горячие» частицы, распределение по активности, растворение в легочной жидкости.

После окончания первичной фазы Чернобыльской аварии источниками радиоактивного аэрозоля стали естественный ветровой подъем пылевых частиц с загрязненной подстилающей поверхности земли, антропогенное загрязнение за счет подъема пыли с загрязненных дорог, строительных площадок, за счет лесных пожаров, постоянной эмиссии из объекта «Укрытие». В конце 1986 г. были начаты исследования процессов, протекающих внутри объекта «Укрытие», характеристик радиоактивного аэрозоля, поступающего в атмосферу [1 - 4], и показано, что загрязненный воздух формируется в пространстве под крышей объекта «Укрытие» за счет грубо диспергированных частиц с медианным аэродинамическим диаметром по активности (АМАД) около 5 мкм.

Измерения объемной активности выбросов из объекта «Укрытие»

В объект «Укрытие» были созданы технологические и конструктивные (неплотности) амбразуры, по которым радиоактивный аэрозоль выходит в окружающую среду. В [2, 3] приведены данные измерения выпадений радиоактивных аэрозолей на вертикальные и горизонтальные планшеты у основных отверстий на крыше объекта «Укрытие». Данные измерений показали, что в течение наблюдений 1990 - 1993 гг. радиоактивные выбросы из проемов общей площадью $\sim 206 \text{ м}^2$ не превышали $1,11 \cdot 10^{10} \text{ Бк} \cdot \text{год}^{-1}$ (доля плутония составляла 0,4 - 1,2 %).

Измерения радиоактивных частиц, выброшенных в атмосферу из неорганизованных вертикальных неплотностей объекта «Укрытие» общей площадью 200 м^2 , были проведены в 1996 - 2001 гг. [5, 6]. Оценки среднего вклада ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в выбросах составили 78,8, 21,16 и 0,4 % соответственно. Общая мощность выброса этих нуклидов была равной $274,1 \text{ Бк} \cdot \text{с}^{-1}$, или $8,64 \cdot 10^9 \text{ Бк} \cdot \text{год}^{-1}$ ($0,234 \text{ Ки} \cdot \text{год}^{-1}$). Оценка изменчивости объемной активности, выбрасываемой в приземный слой атмосферы, показала, что амплитуда изменчивости объемной активности ^{137}Cs и ^{241}Am в воздухе достигала двух порядков величины, ^{90}Sr - 25 раз, $^{239+240}\text{Pu}$ - 15 раз (рис. 1). В связи с этим максимальная концентрация ^{137}Cs для малых времен наблюдений может иметь величины в несколько раз большие [7], т.е. максимальная средняя концентрация при осреднении за 1 - 2 ч может достигать величины $1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$.

Средние АМАД, определенные по данным 1996 - 2003 гг. и взвешенные по числу экспериментов, для ^{137}Cs составили 2,6 мкм, для ^{90}Sr - 2,8 мкм, для $^{239+240}\text{Pu}$ - 4,4 мкм, для ^{241}Am - 2,0 мкм.

Измерения на территории вокруг объекта «Укрытие» показали, что объемные активности были большими на коротких расстояниях от объекта «Укрытие», в особенности с южной стороны, и могли достигать $10 - 100 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$. Измерения, проведенные в 250 м от объекта «Укрытие» в юго-западном направлении, где планировались и уже начались строительные работы, показали, что объемные активности достигали $3 - 10 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ при обычных метеоусловиях и без техногенного подъема пыли.

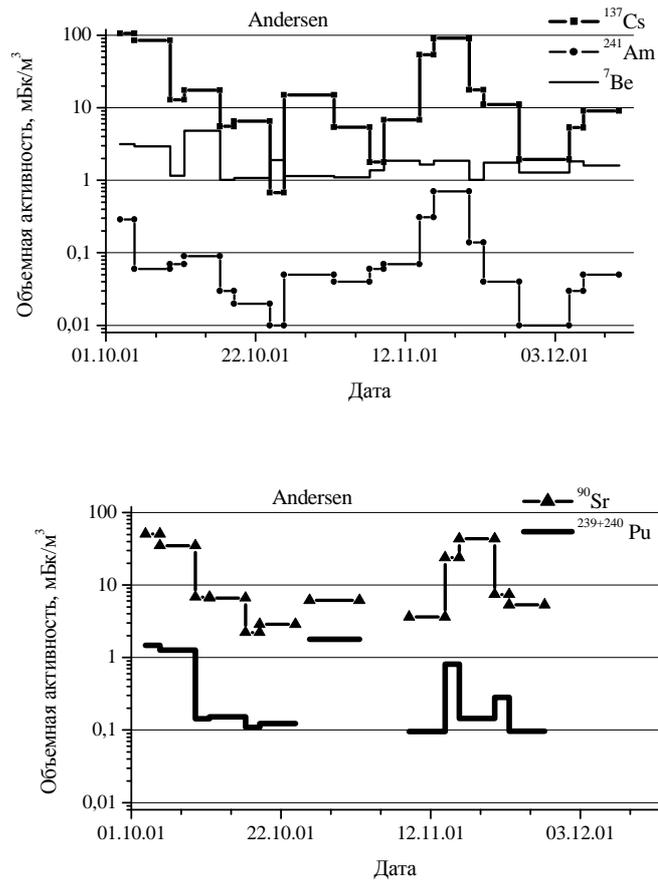


Рис. 1. Изменение во времени объемных активностей ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^7Be в потоке воздуха из вертикальной неплотности между осями 41 - 49 на отметке +36.5 в период 3 октября – 12 декабря 2001 г.

Пространственно-временная изменчивость объемной активности

На практике используемые входные данные для оценок дозовых нагрузок имеют значительную пространственную и временную изменчивость из-за многих факторов. В частности, вариабельность объемной активности велика из-за большой подвижности атмосферного воздуха. В связи с этим учет изменчивости необходим для реальных оценок ингаляционных доз для населения и персонала. Для этого наиболее удобными являются суточные измерения радионуклидов в атмосферном воздухе. Ежесуточные измерения объемной активности в г. Чернобыль были начаты в июне 1986 г., а с июля 1987 г. - в г. Припять [8]. Эти данные демонстрируют случайную природу колебаний от среднего значения и имеют нестационарный характер. Асимметрия положительных и отрицательных флуктуаций относительно среднегодового значения очевидна; отношение максимальных объемных активностей к среднегодовой достигает 10 - 20 раз во все годы наблюдений.

Статистические характеристики распределений объемной активности ^{137}Cs и ^{144}Ce даны в [7] для пунктов измерений в городах Припять и Чернобыль. Эмпирические функции распределений объемной активности являлись результатом влияния нескольких различных процессов: локальной ветровой ресуспензии, переноса радиоактивного аэрозоля с сильно загрязненных пятен и ресуспензии за счет техногенной (механической) активности.

Выбор периода осреднения является важным для оценок измерений активностей и планирования полевых измерений с заданной степенью неопределенности. Приведенная формула в [7] помогает восстановить величины относительного стандартного геометрического отклонения (СГО)

$$\sigma(T_2) = \sigma(T_1) \left[\frac{T_2}{T_1} \right]^{-m},$$

здесь σ - стандартное отклонение объемной активности, T – время осреднения, m – показатель степени. Результаты расчетов показали различие между коэффициентами вариации среднесуточных и среднемесячных величин объемной активности. В 1986 г. среднесуточный коэффициент вариации достигал 5, среднемесячный – 2.

Рис. 2 иллюстрирует временной ход объемной активности ^{137}Cs на пяти станциях Украинского Полесья, расположенных друг от друга в интервале 60 - 230 км. Хорошо видно, что фаза стабилизации во всех пунктах началась в 1995 - 1996 гг. и характер временной изменчивости объемной активности ^{137}Cs для этого региона подобен.

На рис. 3 приведено сравнение временного хода объемной активности ^{137}Cs на в г. Припять в 1987 – 1988 гг. и на территории санпропускника СП-1430 в 2003 – 2014 гг. Из рисунка видно, что в 1987 – 1988 гг. объемная активность ^{137}Cs составляла десятки мБк/м³ с флуктуациями до 200 мБк/м³. В 2003 – 2014 гг. объемная активность ^{137}Cs составляла единицы мБк/м³ и возрастала в периоды интенсивной техногенной деятельности (2003, 2004, 2010 гг.). Во время обрушения крыши машинного зала 12 февраля 2013 г. объемная активность ^{137}Cs достигла 250 мБк/м³. Из приведенного ясно, что мониторинг радиационного состояния воздушной среды в районе АЭС должен продолжаться в связи с проведением работ по строительству “Укрытия-2” и возможностью непрогнозируемых явлений.

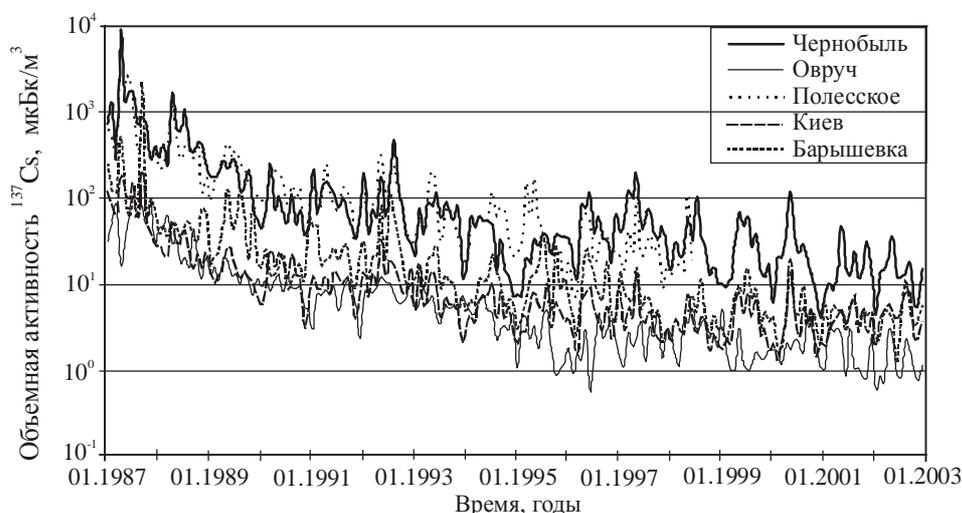


Рис. 2. Временной ход объемной активности ^{137}Cs на пяти станциях измерений, стоящих в 18 - 200 км от ЧАЭС.

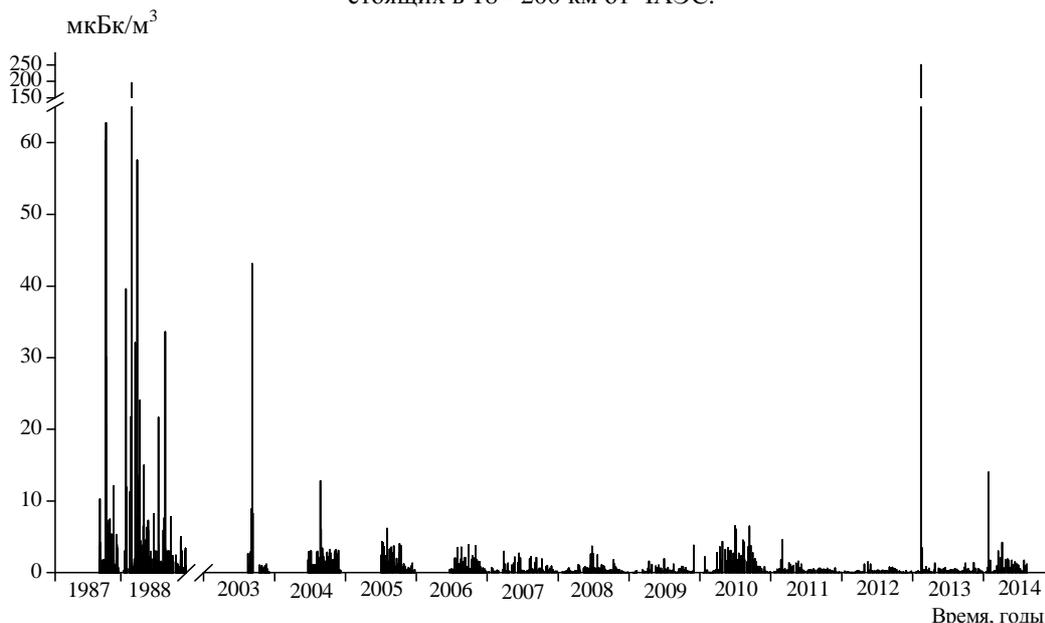


Рис. 3. Динамика изменения объемной активности ^{137}Cs в приземном слое атмосферы территории стадиона г. Припять в 1987 - 1988 гг. и территории СП-1430 в 2003 - 2014 гг.

Распределение активности по размерам частиц в течение естественного ветрового подъема

На двух площадках в 30-километровой зоне ЧАЭС, различающихся характером почвы и первичным осаждением, импакторные измерения позволили оценить распределения радиоактивности по размерам аэрозоля. Анализ данных показал, что измеренные распределения являются в основном очень широкими и сильно отличаются от логнормального распределения. Статистические параметры распределения активности по размерам являются более однородными в г. Припять по сравнению с данными в с. Заполье (≈ 14 км к югу от ЧАЭС) [8]. Особый случай распределения активности по размерам частиц был обнаружен в течение двух периодов наблюдений при лесных пожарах: 7 – 30 июля 1992 г. и 5 августа – 5 сентября 1992 г. Основная доля активности была связана с субмикронными частицами с АМАД 0,28 и 0,5 мкм соответственно.

Табл. 1 представляет среднегодовую объемную активность ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{106}Ru , разделенных на четыре интервала по размерам частиц (крупные частицы с $d > 10$ мкм, респираторные частицы с $10 \text{ мкм} > d > 3,2$ мкм, ингаляционные частицы с $d < 3,2$ мкм) в течение 1986 - 1993 гг. Несмотря на процесс осреднения данных, бимодальные годовые распределения остаются во все времена. Однако пропорция больших частиц, содержащих ^{137}Cs , была около 60 % осенью 1986 г. и уменьшилась приблизительно до 30 % в 1993 г. Доля ингаляционных частиц увеличилась до ~ 50 % в 1992 - 1993 гг. Радиоактивность респираторных частиц колебалась около значения 25 % от общей объемной активности ^{137}Cs . В первые два года в с. Заполье доля частиц, содержащих ^{144}Ce , была значительно выше, чем доля частиц, содержащих ^{137}Cs ; ^{106}Ru в основном был прикреплен к тонкодисперсным и большим частицам в 1986 - 1988 гг.

Таблица 1. Временная эволюция распределений активности по размерам частиц в с. Заполье

Интервал, мкм	Нуклид	Относительная концентрация нуклидов, % от общей активности							
		1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
$d \geq 10$	^{137}Cs	63,2	34,6	36,6	36,1	49,5	32,8	20,5	27,3
	^{144}Ce	69,5	57,8	37,8	37,1	0,0	-	-	-
	^{106}Ru	22,0	50,0	44,4	-	-	-	-	-
$10 > d > 5$	^{137}Cs	15,5	9,9	12,9	19,0	6,1	22,6	8,4	13,3
	^{144}Ce	14,6	16,4	11,0	43,8	26,5	-	-	-
	^{106}Ru	5,5	0,0	5,9	-	-	-	-	-
$5 > d > 3,2$	^{137}Cs	8,4	8,0	13,8	15,1	13,4	10,2	8,7	11,2
	^{144}Ce	14,6	9,4	5,8	6,6	41,8	-	-	-
	^{106}Ru	25,5	-	4,2	-	-	-	-	-
$d \leq 3,2$	^{137}Cs	13,0	47,6	36,6	29,8	30,8	34,4	60,2	48,2
	^{144}Ce	1,4	16,3	25,4	12,5	31,6	-	-	-
	^{106}Ru	47,0	50,0	45,6	-	-	-	-	-
$d \leq 3,2$	^{137}Cs	13,0	47,6	36,6	29,8	30,8	34,4	60,2	48,2
	^{144}Ce	1,4	16,3	25,4	12,5	31,6	-	-	-
	^{106}Ru	47,0	50,0	45,6	-	-	-	-	-

Анализ 88 проб аэрозоля показал, что в с. Заполье бимодальное распределение ^{137}Cs наблюдалось в 91 % от всех случаев и было сформировано двумя процессами: локальной ресуспензией и адвективным переносом радиоактивным аэрозолем из высокозагрязненных территорий, т.е. площадки ЧАЭС. Однако в г. Припять, который расположен в более загрязненной области, чем с. Заполье, форма распределений активности по размерам соответствовала локальной ресуспензии со слабой трансформацией.

В течение периода измерений логнормальный закон распределения активности по размерам частиц наблюдался только в 3 % всех случаев в с. Заполье. В нем средняя объемная активность ^{137}Cs , разделенная на четыре интервала размера частиц, показала увеличение ингаляционной части частиц со временем после аварии. В 1993 г. ингаляционная фракция была около 48 % от общей объемной активности.

В период техногенной деятельности данные о распределениях активности ^{137}Cs по размерам частиц показали наличие двух максимумов: первый в интервале 2 - 4 мкм, второй - в интервале 12 - 20 мкм. В интервале тонкодисперсных частиц 0,1 - 2,0 мкм активность ^{137}Cs в среднем по всем экспериментам составила 33 ± 6 %.

Измерения счетной концентрации частиц в течение сельскохозяйственных работ показали, что средние концентрации для больших частиц 3 - 10 мкм и гигантских частиц 10 - 30 мкм оказываются

соответственно в 4 и 2 раза больше, чем средняя счетная концентрация тонкодисперсных частиц 0,6 - 1,0 мкм. Средняя счетная концентрация больших и гигантских частиц в период сельскохозяйственных работ была в 40 раз больше, чем в невозмущенном приземном слое, но для тонкодисперсных частиц это увеличение не превосходило 3 раз. Радиоактивная нагрузка поднятых в воздух частиц показала, что наибольшее обогащение частиц приходится на крупные фракции аэрозоля.

Обнаружение "горячих" частиц проводилось методом автордиографии. Для исследований были отобраны фильтры, которые экспонировались в течение 12 - 13 октября и 22 - 23 ноября 1987 г. в г. Припять. Объемная активность ^{137}Cs составляла $20,8 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$, ^{144}Ce - $89,3 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ и ^{106}Ru - $30,5 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ на момент измерений 12 - 13 октября 1987 г., и 22 - 23 ноября 1987 г. она составляла для ^{137}Cs - $12,1 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$, для ^{144}Ce - $34,9 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ и для ^{106}Ru - $24,3 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$. В это же время были измерены распределения активности по размерам частиц на импакторе UP (5 каскадов, скорость потока примерно $400 \text{ м}^3\cdot\text{ч}^{-1}$). Время экспозиции в данном случае было значительно больше, чем при отборе проб с помощью фильтровентиляционной установки "Тайфун", что было необходимо для достоверной оценки активности на каждом каскаде импактора. Для первого периода распределение приблизительно симметрично в представленных логарифмических координатах, второе - скошено в сторону крупных частиц. В первом случае АМАД был равен 3,0 мкм, а СГО $\sigma = \log \sigma_g = 0,88$. Во втором случае АМАД равен 7,5 мкм, а сама ширина распределения характеризуется меньшей величиной СГО $\sigma = 0,44$. Иначе говоря, данные взятых фильтров не идентичны по характеру формирования распределения активности частиц по размерам. Предварительно с помощью радиометра "Бета" было проведено сканирование поверхности фильтра с целью выявления участков с повышенной радиоактивностью. В результате были вырезаны фрагменты фильтра диаметром 6 - 7 см. Методом автордиографии произведена оценка дисперсного состава аэрозольных "горячих" частиц и определено количество "горячих" частиц на каждом фрагменте аэрозольного фильтра. Кроме того эти данные послужили для первых оценок характеристик скорости растворимости "горячих" частиц.

Основные характеристики чернобыльского аэрозоля из объекта «Укрытие»

Распределение активности по размерам частиц для наибольших неплотностей были проведены с помощью импакторов ИБФ и РМ10 [5, 6]. В табл. 2 приведены основные параметры распределений, полученных в 1996, 1997 и 1999 гг. в обобщенном виде. Исходящий поток объемной активности был больше на один порядок величины, чем поток в объекте «Укрытие». Средневзвешенные по числу опытов объемные активности были равны $243 \pm 228 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ для ^{137}Cs , $119 \pm 60,3 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ для ^{90}Sr , $1,83 \pm 0,70 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ для $^{239+240}\text{Pu}$ и $2,04 \pm 1,73 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ для ^{241}Am . В период 2001 - 2003 гг. значительно более низкие объемные активности были зафиксированы (см. табл. 2). Объемные активности составили в среднем $14,0 \pm 10,0 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ для ^{137}Cs , $3,12 \pm 2,57 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ для ^{90}Sr , $0,095 \pm 0,025 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ для $^{239+240}\text{Pu}$ и $0,845 \pm 0,515 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ для ^{241}Am . Это уменьшение связано с закрытием нескольких неплотностей объекта «Укрытие». Вместе с тем отметим, что по данным НРБУ-97 допустимые концентрации для персонала (категория А) для ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am равны 60, 10, 0,09, 0,09 Бк·м⁻³ соответственно. Из табл. 2 видно, что ни в одном из периодов измерений средние величины объемной активности этих нуклидов не превосходили указанные нормативы: были на один-два порядка ниже.

Средневзвешенный по числу опытов АМАД при потоке из объекта «Укрытие» в период 1996 - 1999 гг. составил $2,4 \pm 0,8 \text{ мкм}$ для ^{137}Cs , $1,5 \pm 0,2 \text{ мкм}$ для ^{241}Am . Для ^{90}Sr величина АМАД колебалась в пределах 3,1 - 13,0 мкм, для $^{239+240}\text{Pu}$ - от 3,5 до 11 мкм (см. табл. 1). Соответственно СГО σ_g были равны $4,4 \pm 1,3$, $4,5 \pm 1,1$, $2,9 - 7,5$, и $4,8 - 5,5$. В период 2000 - 2003 гг. средний АМАД для ^{137}Cs был равен $3,0 \pm 1,9 \text{ мкм}$ и $\sigma_g = 4.3 \pm 1,7$ (табл. 3). В двух сериях измерений АМАД ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ лежали в интервале 1,0 - 2,9 мкм, σ_g в интервале от 1,0 - 6,6.

На рис. 4 представлены распределения активности по размерам частиц для ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$, которые были оценены по измерениям в исходящем потоке из объекта «Укрытие» в северной неплотности в 1996 г. Из рисунка видно, что функции распределений были широкими и имели два максимума для грубо- и тонкодисперсного аэрозоля. Плотность вероятности активности для интервала субмикронных частиц была минимальна для $^{239+240}\text{Pu}$ и максимальна для ^{137}Cs .

Таблица 2. Основные параметры чернобыльского аэрозоля в неплотностях объекта «Укрытие», полученные из функций распределения объемной активности по размерам частиц в 1996, 1997 и 1999 гг., и соответствующие им эффективные дозы

Радионуклид, период измерений	Объемная активность $\pm \sigma$ (мБк·м ⁻³), число экспериментов	АМАД d _m , мкм	СГО σ_g	Эффективная доза, нЗв·ч ⁻¹	№ неплотности, тип импактора, направление потока
¹³⁷ Cs 30.10. – 05.11.96 16.07. – 28.10.97 12.07. – 16.07.97	464 ± 625 (6) 85,8 (1)	2,0 ± 0,5 1,9	3,8 ± 1,6 7,1	5,47 1,06	Неплотность 1, ИБФ Поток из объекта «Укрытие» Поток в объект «Укрытие» Поток из объекта «Укрытие» То же То же
⁹⁰ Sr 02.11. – 05.11.96	135 (1)	13,0	2,9	2,84	
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 02.11. – 05.11.96	2,0 (1)	3,5	5,4	23,7	
²⁴¹ Am 02.11. – 05.11.96		1,7 ± 0,6			
16.07. – 28.10.97	5,1 ± 7,8 (5)		4,1 ± 1,1	108	
¹³⁷ Cs 09.10. – 30.10.97 17.10. – 21.10.97	16,6 ± 22,8 (5) 3,2 (1)	2,0 ± 0,4 1,8	3,3 ± 2,1 1,8	0,201 0,0495	
¹³⁷ Cs 06.11. – 15.11.96 18.07. – 22.07.97 22.07. – 24.07.97	534 ± 407 (3) 72,8 (1)	3,0 ± 1,0 2,5	6,3 ± 1,2 6,3	5,59 0,811	Неплотность 4, ИБФ Поток из объекта «Укрытие» Поток в объект «Укрытие» Поток из объекта «Укрытие» То же То же
⁹⁰ Sr 06.11. – 12.11.96	184 (1)	3,1	6,8	11,4	
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 06.12. – 12.11.96	2,6 (1)	15	5,5	18,4	
²⁴¹ Am 06.11. – 15.11.96		1,4 ± 0,6			
18.07. – 22.07.97	3,3 ± 2,1 (3)		4,0 ± 2,2	75,2	
¹³⁷ Cs 17.11. – 19.11.99 19.11. – 23.11.99 23.11. – 26.11.99 26.11. – 30.11.99	14,6 (1) 11,7 (1) 45,9 (1) 409,8 (1)	4,1 5,6 7,2 5,1	10,0 4,2 8,5 7,0	0,147 0,0963 0,361 3,58	
²⁴¹ Am 17.11. – 19.11.99	0,33 (1)	1,0	7,3	9,74	
19.11. – 23.11.99	0,55 (1)	1,7	6,2	12,6	
23.11. – 26.11.99	0,71 (1)	1,7	6,9	16,7	
26.11. – 30.11.99	2,23 (1)	1,05	7,6	65,0	
⁹⁰ Sr 17.11. – 30.11.99	38,8 (1)	4,5	7,5	2,10	
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 17.11. – 30.11.99	0,9 (1)	6,0	4,8	7,95	

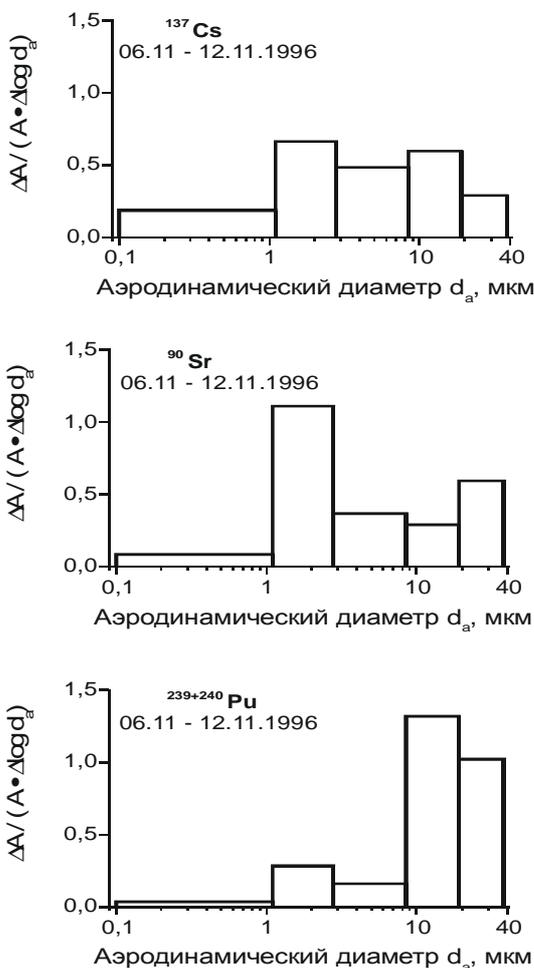
Измерения на площадке объекта «Укрытие»

В работе [10] приведены данные об объемной активности ¹³⁷Cs и характере распределений активности по размерам частиц вокруг объекта «Укрытие». Все измерения были проведены с помощью PM10. Отметим, что по наблюдениям с южной стороны объемная активность колебалась в пределах 1 – 1,5 порядков величины с максимальной средней объемной активностью 10 мБк·м⁻³. АМАД менялся в пределах 3 - 5 раз с минимальным средним значением 0,7 мкм, а СГО - в пределах 2 - 3 раз. На расстоянии около 200 м наблюдения были проведены в 2002 г. (четыре серии измерений) и в 2003 г. (10 серий).

Данные можно было разделить на две группы с объемной активностью меньше 1 мБк·м⁻³ и с объемной активностью больше этой величины. В первой группе средний АМАД находился в диапа-

Таблица 3. Основные параметры чернобыльского аэрозоля в неплотностях объекта «Укрытие», полученные из функций распределения объемной активности по размерам частиц в 2000 - 2003 гг., и соответствующие им эффективные дозы

Радионуклид, период измерений	Объемная активность ± σ (МБк·м ⁻³), число экспериментов	АМАД d _m , мкм	СГО σ _g	Эффективная доза, нЗв·ч ⁻¹	№ неплотности, тип импактора, направление потока
¹³⁷ Cs 18.08 – 30.08.00 05.10 – 12.12.01	20,9 ± 13,3 (4) 33,05 ± 28,0 (4)	2,2 ± 0,3 6,8 ± 6,9	5,9 ± 0,8 6,8 ± 2,6	0,241 0,256	Неплотность 3, ИБР Поток из объекта «Укрытие»
²⁴¹ Am 18.08 – 30.08.00 05.10 – 12.12.01	0,33 ± 0,26 (4) 1,36 ± 1,5 (4)	1,0 ± 0,2 2,6 ± 1,6	4,0 ± 1,5 6,6 ± 1,0	6,57 20,7	
¹³⁷ Cs 04.09 – 03.12.02	8,08 ± 5,87 (11)	1,7 ± 0,8	3,5 ± 1,4	0,0999	Неплотность 3, Anderson PM10, поток из объекта «Укрытие»
⁹⁰ Sr 01.10 – 03.10.02		2,0	3,0	0,0391	
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 28.10 – 31.10.02	0,55 (1)	2,9	3,2	0,353	То же
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 01.10 – 03.10.02	5,69 (1)	2,0	3,3	1,02	То же
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 28.10 – 31.10.02	0,07 (1) 0,12 (1)	2,0	1,8	2,17	То же
¹³⁷ Cs 21.10 – 04.11.03 02.12 – 10.12.03 17.10 – 02.12.03	13,75 ± 1,96 (3) 1,29 ± 1,0 (3)	3,5 ± 0,6 2,2 ± 0,3	1,8 ± 0,6 2,0 ± 0,6	0,182 0,0189	Неплотность 3, Anderson PM10 Поток из объекта «Укрытие»



зоне микронных частиц, во второй группе он был меньше и равен (0,57 ± 0,06) мкм. Учитывая, что реальные частицы радиоактивного аэрозоля имеют большую плотность, то, по-видимому, геометрический диаметр частиц мог иметь значительно меньшую величину. Среднее значение СГО менялось от 0,3 для частиц со средним значением АМАД 0,57 мкм и до 2,1 и 4,7 для АМАД 2,2 и 1,2 мкм соответственно.

Измерения в г. Припять могут рассматриваться как фоновые значения относительно площадки объекта «Укрытие», так как город расположен в 4 км на северо-запад. Девять серий измерений были проведены в г. Припять с помощью импактора PM10 в 1996, 1997, 1999 и 2000 гг. По этим данным можно сравнить характеристики, полученные в г. Припять, с характеристиками распределений активности ¹³⁷Cs, полученных в работе [10] в г. Припять в 1987 – 1992 гг. Из данных следовало, что в течение упомянутых периодов времени радиационные условия в воздухе г. Припять изменились в основном благодаря дезактивационным работам, очень слабой практической деятельности и времени. Объемная активность уменьшилась за этот период времени на один порядок величины и составила (0,34 ± 0,18) мБк·м⁻³, значение АМАД также уменьшилось до значения в 1,2 ± ± 0,1 мкм.

Рис. 4. Распределение активности ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu по размерам частиц аэрозоля в выходящем потоке из северной неплотности объекта «Укрытие» в 1996 г.

В табл. 4 приведены усредненные характеристики функций распределения активности по размерам частиц, полученные с помощью импактора РМ10, в трех помещениях объекта «Укрытие» в период с 16 по 28 октября 2002 г. в трех сериях измерений. Зафиксированные распределения оказались более широкими, с более высокой долей плотности вероятности активности, принадлежащей субмикронным частицам аэрозоля. Особенно большой эта доля наблюдалась в период измерений с 20 по 24 сентября 2002 г. в комнате 208, когда АМАД для ^{137}Cs был равен 0,4 мкм, а СГО - 4,5. В этой серии измерений удалось получить эмпирические функции распределения для ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$, где d_m и σ_g соответственно упомянутым нуклидам составили 0,5 и 0,7, 3,2 и 3,1 мкм. Иначе говоря, доля микронных и, что более важно, субмикронных частиц в условиях данного измерения была велика, а АМАД были ниже 1 мкм. АМАД для плутония был равен 0,7 мкм против 0,4 мкм для ^{137}Cs , а СГО - 3,1 для плутония против 4,5 для ^{137}Cs .

Таблица 4. Характеристики распределения объемной активности по размерам частиц в помещениях объекта «Укрытие» при скорости дыхания (1,2 м³·ч⁻¹)

Помещение, нуклиды	Объемная активность, мБк·м ⁻³	АМАД d_m , мкм	СГО σ_g	Эффективная доза, Зв·ч ⁻¹	Скорость поступления, Бк/ч	Мощность дозы, Зв/ч
Помещение 406 ^{137}Cs ^{90}Sr $^{239+240}\text{Pu}$	366,7±137,6 192,8 ± 56,4 15,9 ± 8,4	1,7 ± 0,1 1,6 ± 0,1 2,0 ± 0,6	1,8 ± 0,1 1,9 ± 0,1 1,4 ± 0,1	6,40·10 ⁻⁹ 3,72·10 ⁻⁸ 5,85·10 ⁻⁵	4,40·10 ⁻¹ 2,31·10 ⁻¹ 1,91·10 ⁻²	2,82·10 ⁻⁹ 8,61·10 ⁻⁹ 1,12·10 ⁻⁶
Комната 208 ^{137}Cs ^{90}Sr $^{239+240}\text{Pu}$	28,6 ± 24,4 3,18 0,19	1,0 ± 0,7 0,5 0,7	3,6 ± 0,8 3,2 3,1	4,97·10 ⁻⁹ 3,97·10 ⁻⁸ 5,18·10 ⁻⁸	3,43·10 ⁻² 3,82·10 ⁻³ 2,28·10 ⁻⁴	1,71·10 ⁻¹⁰ 1,51·10 ⁻¹⁰ 1,18·10 ⁻¹¹
Комната 3.8 ^{137}Cs	2,81 ± 0,87	2,0 ± 0,3	2,6 ± 0,8	6,12·10 ⁻⁹	3,37·10 ⁻³	2,06·10 ⁻¹¹

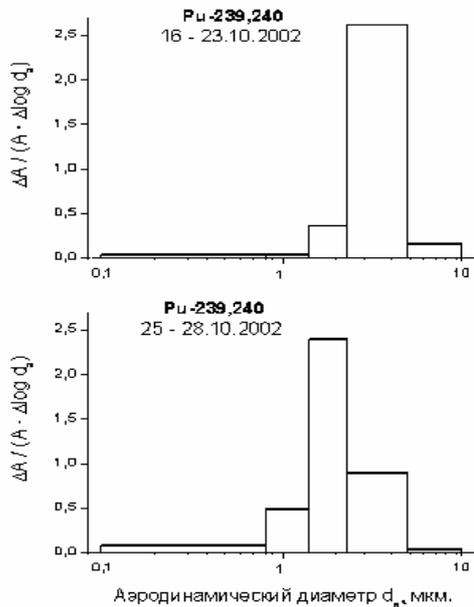


Рис. 5. Распределение объемной активности $^{239+240}\text{Pu}$ по размерам частиц в воздухе служебного помещения 406/2

В то же время для основных характеристик функций распределений ^{137}Cs и ^{90}Sr в этом помещении стандартные отклонения величин d_m и σ_g не превышают 7 %. Средние данные по плутонию имеют значительно большие стандартные отклонения, их относительные величины достигают (30 – 34) % для медианного и среднеарифметического по активности аэродинамических диаметров частиц. Эти данные характеризуют помещение 406/2 как помещение с мало меняющимися условиями, АМАД и СГО при предположении соответствия эмпирических распределений логнормальному закону.

Для этого помещения на рис. 5 приведены эмпирические функции распределения активностей по размерам частиц в нормированных координатах, в которых относительная плотность активности не зависит от диапазона размеров частиц, общая площадь под кривой распределения равна единице. Отметим, что в этом представлении логарифмически нормальная функция распределения должна иметь вид нормального закона.

Из рис. 5 видно, что такого строгого соответствия нет, но приближенно этой гипотезой можно воспользоваться. Из данных распределений видно, что активность на частицах, меньших 1 мкм, мала в помещении 406/2 и в комнате 3.8 (комната дозиметристов) во всех сериях измерений.

Особенно хорошо это видно для суммы плутониев в серии 16 – 23 октября, когда абсолютные величины d_m были наибольшими.

Скорость растворения в имитаторах легочной жидкости

Одним из главных факторов, влияющих на формирование и динамику доз внутреннего облучения различных органов при ингаляционном поступлении радионуклидов в организм, является скорость их поступления из респираторного тракта в кровь с последующим отложением в других органах и тканях. Дозиметрическая модель ингаляционного поступления радионуклидов, разработанная Международным комитетом по радиационной защите (МКРЗ) рекомендует классифицировать частицы, в зависимости от скорости их растворения, по трем классам: F – быстрорастворимые, M – среднерастворимые и S – медленнорастворимые и предлагает стандартизированные значения величин для перехода радиоизотопов в кровь, но рекомендует, при возможности, использовать удельные коэффициенты поглощения, полученные из экспериментов *in vitro* или *in vivo*.

Для определения скорости растворения использовали кассеты для фрагментов фильтров согласно методике, описанной в [11, 2]. Был выбран статический метод, при котором фрагменты фильтров находились между двумя мембранными фильтрами с размером пор 0,14 – 0,22 мкм, в виде сэндвича. Кассеты с фильтрами помещали в горизонтальном положении в стеклянные стаканы или вертикальные кюветы [15 - 17] и выдерживали при комнатной температуре в течение 1 - 55 сут в растворе, имитирующем легочную жидкость; использовали два раствора - Gamble и SLF [11, 15 - 17]). Через заданные промежутки времени раствор отбирался, и в нем определяли содержание радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{244}Cm .

В результате было выявлено отличие в выщелачивании отдельных радионуклидов, прежде всего ^{137}Cs из фильтров, экспонированных вблизи г. Припять, в ближней зоне и внутри объекта “Укрытие”. С помощью радиографии удалось разделить относительно крупные топливные частицы и мелкие частицы, обогащенные цезием. Частицы различного генезиса отличаются как изотопным составом, так и физико-химическими свойствами, в частности скоростью выщелачивания в имитаторе легочной жидкости. Скорость выщелачивания из “горячих” частиц обоих типов зависит от вида радионуклида и уменьшается в ряду $^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} \gg ^{239+240}\text{Pu} \approx ^{241}\text{Am}$. Для мелких цезиевых частиц, по сравнению с топливными, характерно более быстрое и более полное выщелачивание не только ^{137}Cs , но и ^{90}Sr .

Кинетика выщелачивания радионуклидов из “горячих” частиц хорошо описывается двух-экспоненциальной моделью, параметры которой позволяют определить класс растворимости ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в исследованных аэрозолях как класс S (медленное растворение) для топливных частиц и отнести растворимость ^{137}Cs в малоактивных цезиевых частицах к классу F (быстрое растворение) [15 - 17]. Быстрая фаза выщелачивания ^{137}Cs из цезиевых частиц в свою очередь состоит из двух компонент с периодами полурастворения порядка часа и двух суток [18].

Ингаляционные дозы, вычисленные по измеренным выше характеристикам радиоактивных частиц (объемной активности, АМАД, СГО, скорости растворения) и по современным моделям, были оценены в $\approx 100 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$ с учетом величины общей мощности индивидуальной эффективной дозы, что на порядок меньше предельной индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения персонала объекта “Укрытие”.

Выводы

Данные объемной активности радиоактивного аэрозоля во времени и по пространству показали большую его пространственно-временную изменчивость. В то же время данные наблюдений объемной активности на пяти станциях Украинского Полесья, расположенных друг от друга в интервале 60 – 230 км, демонстрируют подобный тренд во времени, а фаза стабилизации временного хода началась в 1995 - 1996 гг. Измеренные функции распределения активности по размерам частиц в основном отличаются от логнормального распределения большей шириной и нередко наличием двух мод. Это определяется двумя процессами: локальной ресуспензией и адвективным переносом аэрозоля из высокозагрязненных территорий.

Прямые измерения выбросов из неплотностей объекта “Укрытие” и вокруг него показали, что объект все еще остается источником радиоактивного аэрозоля. Объемные активности, которые были определены в неплотностях объекта “Укрытие”, в локальной зоне и на промплощадке, всегда значительно превосходят “фоновые” величины объемной концентрации, измеренные в г. Припять, расположенном в 4 км от объекта “Укрытие”, но не превосходят ДКА. В то же время наибольшее число “горячих” частиц имеет диаметры от 1 до 5 мкм. Именно эти частицы летят за пределы локальной зоны объекта “Укрытие”, но доля их активности составляет приблизительно 5 %.

Измерения в локальной зоне объекта “Укрытие” показали, что основная активность переносится частицами с диаметрами порядка 5 - 7 мкм, принадлежащими к респираторному диапазону аэрозольных частиц.

Отмечается большая изменчивость величин радиоактивной нагрузки при выбросе частиц из южного проема и в локальной зоне объекта “Укрытие”, достигающая 100 %, что можно объяснить зависимостью выброса от погодных условий и работ, проводимых внутри объекта “Укрытие”. В отличие от них изменчивость нагрузки частиц бета-активностью на стройплощадке составляет только 37 % и может зависеть от характера строительных работ. На стройплощадке и в локальной зоне объекта “Укрытие” в основном доля бета-активности не превышала 70 % от содержания гамма-активности ^{137}Cs .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаргер Е.К., Жуков Г.П. и Седунов Ю.С.* Оценка параметров ветрового подъема радионуклидов в зоне Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. - 1990. - № 1. - С. 5 - 10.
2. *Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ (25 - 29 августа, 1986 г.).* - М.: ГКИАЭ СССР, 1986. USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy “The Accident at the Chernobyl NPP and its Consequences” IAEA Post Review Meeting, Vienna, 25 - 29 August 1986.
3. *Богатов С.А., Боровой А.А., Дубасов Ю.В., Ломоносов В.В.* Форма и характеристики частиц топливного выброса при аварии на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. - 1990. - Т. 69, вып. 1.
4. *Огородников Б.И., Пазухин Э.М.* Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» (Обзор). Часть 4.1. Источники и генерация радиоактивных аэрозолей в 1986 г. – Чернобыль, 2005. – 32 с. - (Препр. / НАН Украины. ИПБ АЭС; 05-2).
5. *Belovodsky L.E., Panfilov A.P.* Ensuring radiation safety during construction of the facility “Ukrytie” and restoration of Unit 3 of the Chernobyl Nuclear Power Station // One decade after Chernobyl: Summing up the consequences of the accident. Poster presentation. - (International conf., Vienna, 8 - 12 Apr. 1996). – Vienna: IAEA, 1997. - Vol.2. - P. 574 - 590.
6. *Гаргер Е.К., Каптур В.А., Корнеев А.А., Курочкин А.А.* Результаты исследований выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта “Укрытие” // Проблемы Чернобиля. - 2002. - Вып. 10, ч.2. - С. 60 - 71.
7. *Гаргер Е.К., Каптур В.А., Саженьюк А.Д. и др.* Характеристика аэрозоля неорганизованных выбросов объекта «Укрытие» // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чернобиля. - 2004. - Вып.1. - С. 125 - 135.
8. *Garger E.K., Kashpur V.A., Gurgula B.I. et al.* Statistical characteristics of the activity concentration in the surface layer of the atmosphere in the 30 km zone of Chernobyl // J. Aerosol Sci. - 1994. - 25. - P. 767 - 777.
9. *Garger E.K., Kashpur V., Paretzke H.G., Tschiersch J.* Measurement of resuspended aerosol in the Chernobyl area. Part II: Size distribution of radioactive particles // Radiat Environ Biophys. - 1998. - Vol. 36. - P. 275 - 238.
10. *Гаргер Е.К., Каптур В.А.* Исследование объекта “Укрытие” как источника радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы. Разработка регламента контроля неорганизованных выбросов радиоактивного аэрозоля из ОУ: Научно-технический отчет. - Т. 1 - 3. - К.: ИАБ УААН, 2000.
11. *Gamble J.L.* Chemical anatomy, physiology and pathology of extracellular fluid, 8th edition // Harvard University Press, Boston, 1967. - P. 4 - 11.
12. *Агеев В.А., Ключников А.А., Одинцов А.А. и др.* Метод определения содержания продуктов деления урана, плутония и трансураниевых элементов в объектах окружающей среды // А. с. SU № 1701047, МКИ G21G4/04. - 1991.
13. *Garger E.K., Sazhenyuk A.D., Odintsov A.A. et al.* Solubility of airborne radioactive fuel particles from the Chernobyl reactor and implication to dose // Radiat Environ Biophys. - 2004. - Vol. 43. - P. 43 - 49.
14. *Mercer T.T.* On the role of particle size in the dissolution of lung burdens // Health Physics. - 1967. - 13. - P. 1211 - 1221.
15. *Гаргер Е.К., Одинцов А.А., Шинкаренко В.К.* Оценка степени растворения радиоактивных аэрозольных частиц из объекта «Укрытие» // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чернобиля. – 2009. – Вып. 12. – С. 125 – 136.
16. *Garger E.K., Meisenberg O., Odintsov O. et al.* Solubility of hot fuel particles from Chernobyl - Influencing parameters for individual radiation dose calculations // Talanta. – 2013. – Vol. 115. – P. 40–46.
17. *Гаргер Е.К., Одинцов А.А., Шинкаренко В.К., Tschiersch J.* Поведение «горячих» аэрозольных частиц из объекта «Укрытие» в имитаторах легочной жидкости // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чернобиля. – 2013. - Вып. 21. - С. 43 - 52.

18. Шинкаренко В.К., Кашпур В.А., Скоряк Г.Г. Результаты исследований аэрозольных фильтров, экспонированных до, во время и после разрушения крыши машинного зала 4-го блока Чернобыльской АЭС // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2014. – Вип. 23. – С. 45 – 53.

Є. К. Гаргер, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, В. К. Шинкаренко

Інститут проблем безпеки НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

ФИЗИКО-ХІМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЕРОЗОЛЮ 30-КІЛОМЕТРОВОЇ ЗОНИ ЧАЕС У 1986 - 2013 рр.

Представлено коротке узагальнення досліджень фізико-хімічних характеристик аерозолю 30-кілометрової зони ЧАЕС, проведених співробітниками відділу безпеки та реабілітації навколишнього середовища ІПБ АЕС НАН України. Проаналізовано результати вимірювань об'ємної активності викидів з об'єкта «Укриття», їхню просторово-часову мінливість. Наведено основні характеристики чорнобильського аерозолю як у приміщеннях об'єкта «Укриття», так і в його ближній зоні. Представлено дані про розподіл активності за розмірами частинок під час природного вітрового підйому. У середині приміщень об'єкта «Укриття» і його близькій зоні крім "гарячих" частинок паливного складу зареєстровано малоактивні частинки, збагачені ^{137}Cs . Дані по кінетиці вилугування радіонуклідів з "гарячих" частинок дають змогу визначити клас розчинності ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ і ^{241}Am у досліджених аерозолях як клас S (повільне розчинення) для паливних частинок і віднести розчинність ^{137}Cs у малоактивних цезієвих частинках до класу F (швидке розчинення).

Ключові слова: радіоактивний аерозоль, "гарячі" частинки, розподіл за активністю, розчинність у легеневій рідині.

E. K. Garger, V. O. Kashpur, G. G. Skorjak, V. K. Shynkarenko

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE AEROSOL OF THE 30 KM ZONE OF ChNPP IN 1986 - 2013

Short generalization of researches of physical and chemical characteristics of the radioactivity aerosol of the 30 km zone of the ChNPP spent by employees of department of safety and rehabilitation of environment of the Institute of the Problem Safety of the NPP of NAN Ukraine is presented. Results of measurements of volume activity of emissions from object "Ukrytya", their existential variability, are resulted the basic characteristics Chernobyl an aerosol both in premises of object "Ukrytya", and in its near zone were analyzed. Data on activity distribution on the sizes of particles during natural wind lifting are presented. In premises of object "Ukrytya" and in its near zone except hot particles of fuel structure registered малоактивные particles enriched ^{137}Cs . Data on a kinetics выщелачивания радионуклидов from "hot" particles allow to define a solubility class ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in the investigated aerosols as class S (slow dissolution) for fuel particles and to carry solubility ^{137}Cs in low-level active caesium particles to class F (fast dissolution).

Keywords: radioactive aerosol, "hot" particles, distribution on activity, solubility in lung fluid.

REFERENCES

1. Garger E.K., Zhukov G. P and Sedunov Ju.S. Estimation of parametres of wind lifting of radionuclides in a zone of the Chernobyl atomic power station // Meteorologija i gidrologija. - 1990. - № 1. - P. 5 - 10. (Rus).
2. USSR State Commitee on the Utilization of Atomic Energy "The Accident at the Chernobyl NPP and its Consequences" IAEA Post Review Meeting, Vienna, 25 - 29 August 1986.
3. Bogatov S., Borovoj A., Dubasov Y., Lomonosov V. Forms and characteristics of particles of fuel at the Chernobyl NPP accident // Atomnaya Energiya. – 1990. - Vol. 69, Iss. 1.
4. Ogorodnikov B.I., Pazukhin E.M. Radioactive aerosols of object "Shelter" (Review). Part 4.1. Sources and generation of radioactive aerosols in 1986. - Chornobyl, 2005. - 32p. - (Prepr. / NAS Ukraine. IBP NPP; 05-2). (Rus).
5. Belovodsky L.E., Panfilov A.P. Ensuring radiation safety during construction of the facility "Ukrytie" and restoration of Unit 3 of the Chernobyl Nuclear Power Station // One decade after Chernobyl: Summing up the consequences of the accident. Poster presentation. - (International conf., Vienna, 8 - 12 Apr. 1996). – Vienna: IAEA, 1997. - Vol.2. - P. 574 - 590.
6. Garger E.K., Kashpur V.A., Korneev A.A., Kurochkin A.A. Results of examination of exhausts of radioactive aerosols from object "Shelter" // Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2002. - Iss. 10. - P. 60 - 71. (Rus).
7. Garger E.K., Kashpur V.A., Sazhenyuk A.D. et al. Description of aerosol of unorganized releases from Ukrytya object // Ibid. - 2004. - Iss.1. - P. 125 – 135. (Rus).

8. *Garger E.K., Kashpur V.A., Gurgula B.I. et al.* Statistical characteristics of the activity concentration in the surface layer of the atmosphere in the 30 km zone of Chernobyl // *J. Aerosol Sci.* - 1994. - 25. - P. 767 – 777.
9. *Garger E.K., Kashpur V., Paretzke H.G., Tschiersch J.* Measurement of resuspended aerosol in the Chernobyl area. Part II: Size distribution of radioactive particles // *Radiat Environ Biophys.* - 1998. - Vol. 36. - P. 275 - 238.
10. *Garger E.K., Kashpur V.A.* Research of object "Shelter" as source radioactive an aerosol in a ground layer of atmosphere. Working out of regulations of the control of unorganized emissions radioactive an aerosol from Shelter: the Scientific and technical report. - Vol. 1 - 3. - K: IAB YAAS, 2000. (Rus).
11. *Gamble J.L.* Chemical anatomy, physiology and pathology of extracellular fluid, 8th edition // Harvard University Press, Boston, 1967. - P. 4 - 11.
12. *Ageev V.A., Klyuchnikov A.A., Odintsov A.A.* Method for determining the content of plutonium, fission products, and transuranium elements in environmental objects // Inventor's certificate No. 1701047 SU, G21G4/04. - 1991.
13. *Garger E.K., A.D. Sazhenyuk, A.A. Odintsov et al.* Solubility of airborne radioactive fuel particles from the Chernobyl reactor and implication to dose // *Radiat Environ Biophys.* - 2004. - Vol. 43. - P. 43 - 49.
14. *Mercer T.T.* On the role of particle size in the dissolution of lung burdens // *Health Physics.* - 1967. - 13. - P. 1211 - 1221.
15. *Garger E.K., Odintsov A.A., Shynkarenko V.K.* Estimation of the degree of dissolution radioactive aerosols particles from object «Ukryttya» // *Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly).* - 2009. - Iss. 12. - P. 125 – 136. (Rus).
16. *Garger E.K., Meisenberg O., Odintsov O. et al.* Solubility of hot fuel particles from Chernobyl. - Influencing parameters for individual radiation dose calculations // *Talanta.* - 2013. - Vol. 115. - P. 40–46.
17. *Garger E. K., Odintsov A. A., Shynkarenko V.K. Tschiersch J.* Behaviour of "hot" aerosol particles from object "Shelter" in simulators of a pulmonary liquid // *Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly).* - 2013. - Iss. 21. - P. 43 – 52. (Rus).
18. *Shynkarenko V. K., Kashpur V. O., Skorjak G. G.* Results of studies of the aerosol filters exposed before, during and after the destruction of the roof of the machine hall of Chernobyl NPP 4-th block // *Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly).* - 2014.- Iss. 23. - P. 45 - 53. (Rus)

Надійшла 09.09.2014
Received 09.09.2014