

**К ОЦЕНКЕ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ЗА СЧЕТ РАДИОАКТИВНОГО АЭРОЗОЛЯ
ВНУТРИ И БЛИЗ НЕПЛОТНОСТЕЙ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»****Е. К. Гаргер, В. А. Кашпур, А. А. Ключников***Институт проблем безопасности АЭС НАН Украина, Киев***J. Tschiersch, P. Roth***GSF-IRP, Germany*

Характеристики радиоактивных аэрозолей в выбросах из объекта «Укрытие» были измерены в два периода времени: в 1996 – 1999 гг. и 2000 – 2003 гг. В 1996 – 1999 гг. общая мощность выброса была $274,1 \text{ Бк}\cdot\text{с}^{-1}$ или $8,64 \cdot 10^9 \text{ Бк}\cdot\text{год}^{-1}$. Общая мощность индивидуальной ингаляционной дозы, рассчитанной по измеренным объемной активности, медиане, геометрическому стандартному отклонению, скорости выщелачивания и по современным моделям МКРЗ, составила около $100 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$, а годовая - около $0,2 \text{ мЗв}$ в год. Средняя индивидуальная мощность дозы для помещения 406/2 составила $1130 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$, для комнаты 208/10 – $0,33 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$, в комнате 3.8 была еще на порядок меньше. Расчет годовой дозы для указанных помещений показал, что при годовой сумме рабочего времени 1710 ч наибольшая доза может быть равной $1,9 \text{ мЗв}$ в год только в помещении 406/2, в комнате 208 она составила $0,006 \text{ мЗв}$ в год, в комнате 3.8 доза не превосходила 10^{-4} мЗв в год.

Даже 20 лет после аварии на Чернобыльской АЭС бывший 4-й блок все еще является источником эмиссии радионуклидов в окружающую среду. Вскоре после создания объекта «Укрытие» в конце 1986 г. были начаты исследования процессов, протекающих внутри, и характеристик радиоактивного аэрозоля, поступающего в атмосферу [1 - 6]. Как отмечено в [1, 5], все многообразие аэрозолей объекта «Укрытие» можно разделить на два класса: аэрозоли, в состав которых входят тонкодисперсные частицы топливной матрицы, обычно обедненные летучими радионуклидами, и аэрозоли, радиоактивность которых была обусловлена адсорбцией осколочных радионуклидов. В работе [5] показано, что загрязненный воздух формируется за счет грубодиспергированных частиц с медианным диаметром по активности около 5 мкм в пространстве под крышей объекта «Укрытие» и делается вывод о величинах аэродинамических медианных по активности диаметров (АМАД) частиц (6–9) мкм , способных к вторичному подъему при интенсивном механическом воздействии. Интегральный запас топливной пыли (за счет топлива) составляет около 5 т , из которых 100 кг могли бы быть приписаны к потенциальному загрязнению за счет вторичного подъема.

Условия, при которых строился объект, не позволили создать полностью герметическую конструкцию. Были созданы технологические и конструктивные неплотности, по которым радиоактивный аэрозоль выходит в окружающую среду. В [1] приведены данные измерения выпадений радиоактивных аэрозолей на вертикальные и горизонтальные планшеты у основных отверстий на крыше объекта «Укрытие». Это были первые попытки, которые показали, что в течение наблюдений 1990 - 1993 гг. радиоактивные выбросы из неплотностей общей площадью примерно 206 м^2 были не более $1,11 \cdot 10^{10} \text{ Бк/год}$ (доля плутония составляла $0,4 - 1,2 \%$).

В настоящее время в связи с модификацией этого объекта и строительством «Укрытия-2» необходимо определить реальную величину радиоактивного выброса в приземный слой атмосферы из горизонтальных и вертикальных неплотностей в стенах здания объекта «Укрытие» и оценить радиационную нагрузку в ряде помещений, где могут находиться люди, за счет радиоактивного аэрозоля. В настоящей работе используются прямые измерения объемной активности и распределение активности по размерам частиц аэрозоля для оценки ингаляционных доз для основных дозообразующих нуклидов по результатам работ [7, 8, 12].

Условия и методы измерений

С мая 1996 по декабрь 2000 г. имелось несколько больших неплотностей с площадями от 10 до 90 м², в которых были проведены измерения (рис. 1). Мониторинг выбросов и распространения радиоактивных аэрозолей вблизи объекта «Укрытие», измерения в служебных помещениях объекта «Укрытие» 406/2, 208/10, 3,8 осуществлялись с помощью приборов и установок. Они подробно описаны в [7].

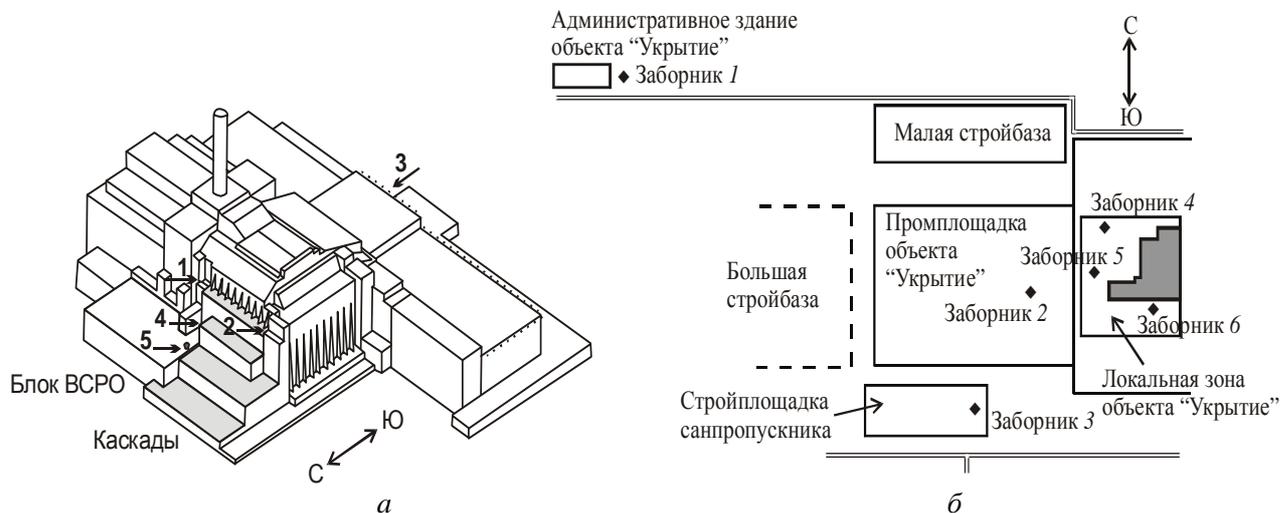


Рис. 1. Объект «Укрытие» и наибольшие фильтровентиляционные горизонтальные и вертикальные неплотности, где были проведены измерения (а); расположение установок вокруг объекта «Укрытие» (б): 1 – ФВУ «Тайфун»; 2, 4, 5, 6 – ФВУ «Град»; 3 – ФВУ IP.

Оценка скорости потока радиоактивного аэрозоля из неплотностей в атмосферу проводилась с помощью портативного анемометра с интервалом измеряемых скоростей потока воздуха от 0,05 до 30,0 м·с⁻¹ (вся площадь неплотности делилась на равные прямоугольники, в центре которых проводились измерения скорости потока) и аэрозольного заборника воздуха с расходом, равным 70 м³/ч. Распределение активности по размерам частиц проводилось импакторами ИБФ и РМ10, характеристики которых приведены в [8, 9]. Измерения дисперсных характеристик радиоактивного аэрозоля в помещениях проведены с помощью только импактора РМ10 фирмы Andersen. Импактор РМ10 является сертифицированным аэрозольным заборным устройством для измерений респирабельного аэрозоля с размерами аэродинамических диаметров, меньших 10 мкм.

Для измерений ¹³⁷Cs на фильтрах использовался гамма-спектрометр на основе полупроводникового детектора [7]. Концентрирование и выделение без носителей ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am из аэрозольных фильтров и выщелачивающих растворов проводилось по радиохимической методике [11, 12].

В нескольких больших неплотностях с площадями от 10 и до 90 м² (общей площадью около 200 м²) велись измерения выбросов радионуклидов в период с мая 1996 по декабрь 2000 г. Общий выброс из каждой неплотности оценивался, используя выражение

$$Q_j = \bar{q}_j \sum_1^n A_i v_i,$$

где Q_j (Бк·м⁻²·с⁻¹) есть суммарный средний поток радиоактивного аэрозоля из j неплотности, которая разделена на N прямоугольников. Измерения скорости ветра V_i (м·с⁻¹) и направления потока были проведены в центре каждого прямоугольника с площадью A_i (м²). Измерения средней объемной активности и распределение активности по размерам частиц проводились с помощью заборника и импакторов ИБФ или РМ10, которые располагались на входе неплотностей. Период измерений объемной активности \bar{q}_j (Бк·м⁻³) обычно был равен 2 – 4 сут, в

то время как параметры потока определялись за небольшой промежуток времени ежедневно.

Ингаляционные дозовые коэффициенты для радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu , и ^{241}Am вычислялись, используя программу IMBA, разработанную NRPB [13]. Программа реализует дозиметрическую модель для респираторного тракта человека (ICRP Publication 66) [14], системные биокинетические модели, описанные в публикациях ICRP 56 и 67 [15, 16], и использует публикацию ICRP 38 [17]. Растворимость и абсорбция в кровь вещества, осаждаемого в респираторном тракте, описывается в модели ICRP двумя компонентами: быстрой компонентой (f_r) со скоростью растворимости s_r 100 сут $^{-1}$ и медленной компонентой ($1-f_r$) со скоростями растворимости s_s от $5 \cdot 10^{-3}$ сут $^{-1}$ (тип M) и $1 \cdot 10^{-4}$ сут $^{-1}$ (тип S). Быстрорастворимая часть вещества, как предполагается, (f_r) равняется 1 для типа F, 0,1 M и 0,001 типа S.

В недавнем эксперименте [18] была проведена оценка растворимости радионуклидов, содержащихся в аэрозолях чернобыльского происхождения. Результаты этого исследования используются для параметризации дозовой оценки, приведенной ниже. Экспериментально определенные константы выщелачивания для медленной компоненты скорости растворимости медианы величины s_s были следующими: $3,8 \cdot 10^{-3}$ сут $^{-1}$ для ^{137}Cs , $1,2 \cdot 10^{-3}$ сут $^{-1}$ для ^{90}Sr , $8,9 \cdot 10^{-5}$ сут $^{-1}$ для ^{239}Pu и $1,4 \cdot 10^{-4}$ сут $^{-1}$ для ^{241}Am [18]. Часть вещества, которая растворяется быстро, предполагалась равной нулю. Плотность частиц принималась равной $3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, коэффициент формы – 1,5, скорость дыхания – $1,2 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$. Доля вещества, первоначально осаждаемого в легких, переносится в желудочно-кишечный тракт. Соответствующие величины f_1 для учета переноса из желудочно-кишечного тракта в плазму были положены равными 0,1 для ^{137}Cs и ^{90}Sr , 0,00001 для ^{239}Pu и 0,0005 для ^{241}Am . Все остальные параметры оценивались по модели для легких ICRP [14].

Результаты и обсуждение

Выбросы из объекта «Укрытие»

Оценка среднего вклада ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в выбросе составили 78,80, 21,16 и 0,4 % соответственно. Суммарная скорость выброса этих нуклидов равнялась 274,1 (Бк \cdot с $^{-1}$) или $8,64 \cdot 10^9$ Бк \cdot год $^{-1}$. Анализ временного хода объемной активности ^{137}Cs , ^{241}Am , ^7Be , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, измеренной ПМ10 на входе вертикальной неплотности около крыши машинного зала, приведен в [7], где отмечена высокая корреляция во времени ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am и высокая вариабельность их выброса из объекта «Укрытие».

Распределение активности по размерам частиц для наибольших неплотностей были проведены с помощью импакторов ИБФ и ПМ10. В табл. 1 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 $243 \pm \pm 228 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ 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 $2,04 \pm \pm 1,73 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ для ^{241}Am . В период 2001 - 2003 гг. значительно более низкие объемные активности были зафиксированы (табл. 2). Объемные активности составили в среднем $14,0 \pm \pm 10,0 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ 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 \cdot м $^{-3}$ соответственно. Из табл. 1 видно, что ни в одном из периодов измерений средние величины объемной активности этих нуклидов не превосходили указанные нормативы: были на один – два порядка ниже.

Таблица 1. 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	Эффектив- ная доза, нЗв·ч ⁻¹	№ неплотности, тип импак- тора, 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»
⁹⁰ Sr 02.11. – 05.11.96	135 (1)	13,0	2,9	2,84	То же
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 02.11. – 05.11.96	2,0 (1)	3,5	5,4	23,7	То же
²⁴¹ Am 02.11. – 05.11.96 16.07. – 28.10.97	5,1 ± 7,8 (5)	1,7 ± 0,6	4,1 ± 1,1	108	То же
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	Неплотность 1, Anderson PM10 Поток из объекта «Укрытие»
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»
⁹⁰ Sr 06.11. – 12.11.96	184 (1)	3,1	6,8	11,4	То же
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 06.12. – 12.11.96	2,6 (1)	15	5,5	18,4	То же
²⁴¹ Am 06.11. – 15.11.96 18.07. – 22.07.97	3,3 ± 2,1 (3)	1,4 ± 0,6	4,0 ± 2,2	75,2	То же
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	Неплотность 3, ИБФ Поток в объект «Укрытие» То же ½ в объект и ½ из объекта Поток из объекта «Укрытие»
²⁴¹ Am 17.11. – 19.11.99 19.11. – 23.11.99 23.11. – 26.11.99 26.11. – 30.11.99	0,33 (1) 0,55 (1) 0,71 (1) 2,23 (1)	1,0 1,7 1,7 1,05	7,3 6,2 6,9 7,6	9,74 12,6 16,7 65,0	Поток в объект «Укрытие» То же ½ в объект и ½ из объекта Поток из объекта «Укрытие»
⁹⁰ Sr 17.11. – 30.11.99	38,8 (1)	4,5	7,5	2,10	Объединенные пробы: в+из
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 17.11. – 30.11.99	0,9 (1)	6,0	4,8	7,95	Объединенные пробы: в+из

Таблица 2. 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 $\pm \sigma$ (мБк·м ⁻³), число экспериментов	АМАД d_m , мкм	СГО σ_g	Эффектив- ная доза, нЗв·ч ⁻¹	№ неплотности, тип импа- ктора, 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, ИВР 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	0,55 (1)	2,0	3,0	0,0391	То же
28.10 – 31.10.02	5,69 (1)	2,9	3,2	0,353	То же
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu 01.10 – 03.10.02	0,07 (1)	2,0	3,3	1,02	То же
28.10 – 31.10.02	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»

Таблица 3. Основные параметры чернобыльского аэрозоля в окружающей среде объекта «Укрытие», полученные из функций распределения объемной активности по размерам частиц в 1997 - 2003 гг., и соответствующие им эффективные дозы

Период измерений ¹³⁷ Cs	Объемная активность $\pm \sigma$, мБк·м ⁻³ , число экспериментов	АМАД d_m , мкм	СГО σ_g	Эффекти- вная доза, нЗв·ч ⁻¹	Местоположение заборников
10.07. – 31.07.97	2,2 ± 1,2 (7)	2,2 ± 1,1	4,3 ± 2,4	25,1	Заборник 4,5 м, северная сторона
05.11. – 15.11.02	9,95 ± 8,64 (3)	0,7 ± 0,5	3,1 ± 1,7	139	Заборник 6,5 м, южная сторона
12.08. – 30.09.03	0,97 ± 0,42 (7)	3,6 ± 0,8	4,3 ± 1,3	9,50	
30.09. – 10.12.03	0,33 ± 0,17 (10)	2,1 ± 0,3	2,2 ± 0,4	2,57	
30.07. – 07.12.02	0,87 ± 0,23 (4)	1,2 ± 0,1	4,7 ± 0,9	12,1	Заборник 3,2 м, юго-запад A < 1,0 мБк·м ⁻³ A > 1,0 мБк·м ⁻³
07.08. – 16.10.03	0,79 ± 0,20 (7)	2,1 ± 0,6	2,1 ± 0,9	11,3	
	3,36 ± 2,26 (3)	0,57 ± 0,06	1,3 ± 0,2	30,4	
1987 – 1992	2,44 ± 2,19 (17)	5,4 ± 3,2	1,7 ± 1,2	21,9	г. Припять, 4 км на северо-запад
1996 – 2000	0,34 ± 0,18 (9)	1,2 ± 0,1	4,7 ± 1,0	4,57	

Пр и м е ч а н и е. Величины, измеренные в г. Припять, даны для сравнения.

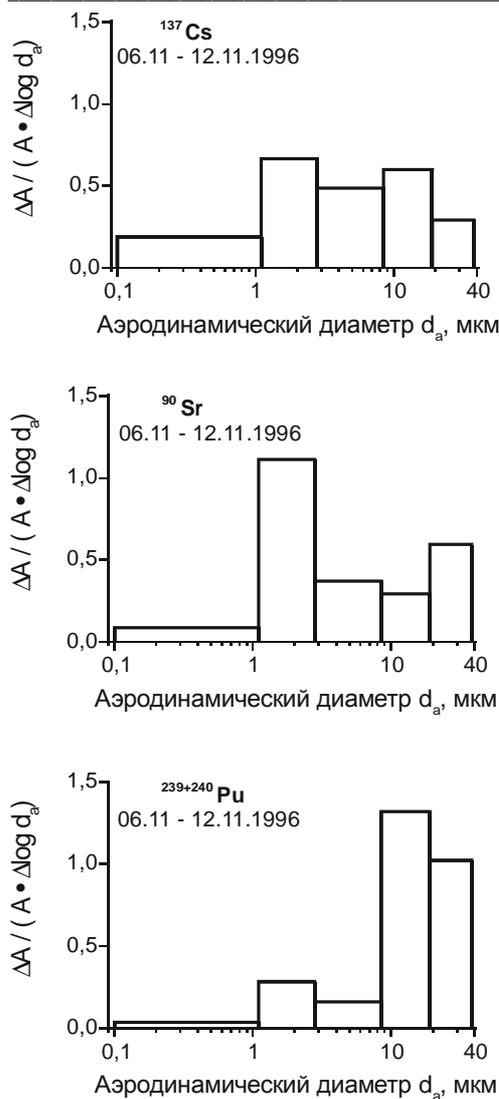


Рис. 2. Распределение активности ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ по размерам частиц аэрозоля в выходящем потоке из северной неплотности объекта «Укрытие» в 1996 г.

Медианный по активности аэродинамический диаметр (АМАД) и стандартное геометрическое отклонение (СГО) не показывают подобной большой изменчивости как объемные активности. Средневзвешенный по числу опытов АМАД при потоке из объекта «Укрытие» в период 1996 – 1999 гг. составил $2,4 \pm 0,8$ мкм для ^{137}Cs , $1,5 \pm 0,2$ 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 медианный диаметр для ^{137}Cs был равен $3,0 \pm 1,9$ мкм и $\sigma_g = 4..3 \pm 1,7$ (табл. 3). В двух сериях измерений медианные диаметры ^{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. 2 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 .

Измерения на площадке объекта «Укрытие»

В работе [8] приведены данные об объемной активности ^{137}Cs и характере распределений активности по размерам частиц вокруг объекта «Укрытие». Эти данные приведены в табл. 3, где представлены также более поздние измерения в 60 м от северной стены объекта «Укрытие» (1997 г. – серия 1), измерения на южной стороне объекта «Укрытие» (около 40 м в 2002 г., серия 2) и около 200 м от объекта «Укрытие» в юго-западном направлении (серия 3). Все измерения были проведены с помощью РМ10. Отметим, что по наблюдениям с южной стороны объемная активность колебалась в пределах 1 – 1,5 порядков величины с максимальной средней объемной активностью $10 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$. 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 $1 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ и с объемной активностью больше этой величины. В первой группе средний АМАД находился в диапазоне микронных частиц, во второй группе он был меньше и равен $(0,57 \pm 0,06)$ 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 медианных диаметров 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 РМ10 в 1996, 1997, 1999 и 2000 гг. По данным табл. 3 можно сравнить характеристики, полученные в г. Припять, с характеристиками распределений активности ^{137}Cs , полученных в работе [8] в г. Припять в 1987 – 1992 гг. Из таблицы хорошо видно, 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 $(0,34 \pm 0,18)$ мБк·м⁻³, значение АМАД также уменьшилось до значения в $1,2 \pm 0,1$ мкм.

Измерения в помещениях объекта «Укрытие»

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. В первую очередь обращает на себя внимание высокая изменчивость объемной активности в помещении 406/2.

Ее относительные величины составляют 37 % для ^{137}Cs , 29 % для ^{90}Sr , 53 % для $^{239+240}\text{Pu}$.

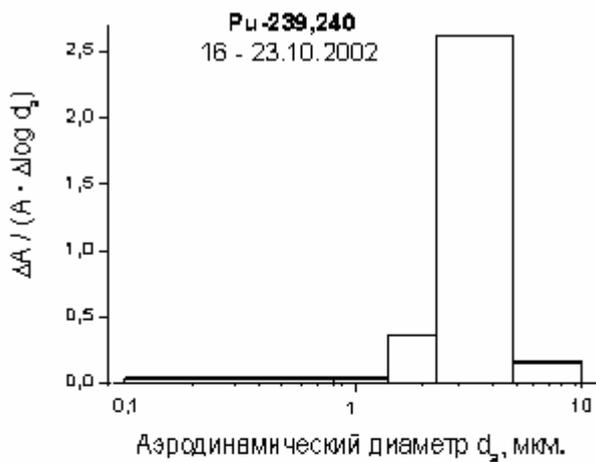
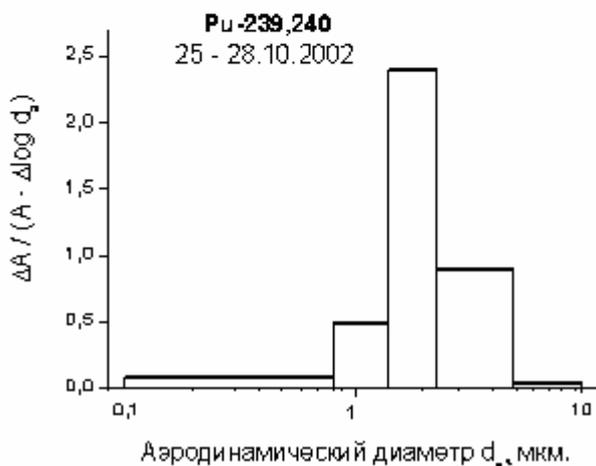


Рис. 3. Распределение объемной активности $^{239+240}\text{Pu}$ по размерам частиц в воздухе служебного помещения 406/2 объекта «Укрытие» (импактор РМ10, 16.10 - 28.10.2002).



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 помещений 406/2, 3.8 (рис. 3) показывают 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. 3 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.

Таблица 4. Характеристики распределения объемной активности по размерам частиц в помещениях объекта «Укрытие» при скорости дыхания (1,2 мЗ·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 Pu	366,7±137,6	1,7 ± 0,1	1,8 ± 0,1	6,40·10 ⁻⁹	4,40E-01	2,82·10 ⁻⁹
	192,8 ± 56,4	1,6 ± 0,1	1,9 ± 0,1	3,72·10 ⁻⁸	2,31E-01	8,61·10 ⁻⁹
	15,9 ± 8,4	2,0 ± 0,6	1,4 ± 0,1	5,85·10 ⁻⁵	1,91·10 ⁻²	1,12·10 ⁻⁶
Комната 208 ¹³⁷ Cs ⁹⁰ Sr ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	28,6 ± 24,4	1,0 ± 0,7	3,6 ± 0,8	4,97·10 ⁻⁹	3,43·10 ⁻²	1,71·10 ⁻¹⁰
	3,18	0,5	3,2	3,97·10 ⁻⁸	3,82·10 ⁻³	1,51·10 ⁻¹⁰
	0,19	0,7	3,1	5,18·10 ⁻⁸	2,28·10 ⁻⁴	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

В служебном помещении 208/10 вид эмпирических функций распределения активности радионуклидов и их характеристик в этом помещении резко отличался от предыдущего. В этом случае АМАД определялась по величине диаметра, делящего площадь под нормированной дифференциальной функцией распределения активности по размерам частиц, равной единице, на две равные части. 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., когда АМАД для ¹³⁷Cs был равен 0,4 мкм, а СГО было равно 4,5. В этой серии измерений удалось получить эмпирические функции распределения и для ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, 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 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 ¹³⁷Cs, а СГО 3,1 для плутония против 4,5 для ¹³⁷Cs.

Оценка ингаляционных доз

Мощности эффективных доз были вычислены для всех периодов наблюдений по модели и при предположениях, упомянутых в разделе, посвященном методике. Объемные активность, АМАД, СГО распределений частиц по размерам каждого эксперимента были использованы и приведены в табл. 1 – 4 вместе с мощностью эффективных доз.

Обобщенные данные по дозам приведены в табл. 5 для двух периодов наблюдений 1996 – 1999 гг. и 2000 – 2003 гг. По данным выбросов из неплотностей в период 1996 – 1999 гг. общая мощность эффективной дозы была равна 97,5 нЗв·ч⁻¹. Средний вклад в ингаляционную дозу от ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs составил около 3 % от общей ингаляционной дозы. Уменьшение эмиссии в период 2000 – 2003 гг. привел к уменьшению более чем на порядок величины мощностей эффективных доз для большинства радионуклидов. Но из-за уменьшения дозы для ²⁴¹Am только в пять раз общая мощность эффективной дозы для 2000 – 2003 гг. еще равнялась 15,6 нЗв·ч⁻¹.

Из-за низких активностей в окрестностях объекта «Укрытие» в табл. 6 приведена оценка общей мощности эффективной дозы по единичному периоду измерений высоких значений объемной активности, измеренной в непосредственной близости с южной стороны объекта «Укрытие» (заборник б). Мощность эффективной дозы была вычислена для трех предполагаемых АМАД, отражающих возможные интервалы размеров частиц. Общая мощность эффективной дозы могла достичь 107 нЗв·ч⁻¹, которая оказалась сравнимой со

значениями, наблюдаемыми в измерениях в неплотностях. Основной вклад в МЭД был обусловлен $^{239+240}\text{Pu}$.

Мощность ингаляционной эффективной дозы в $100 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$, определенная в неплотностях или при некоторых измерениях вокруг объекта «Укрытие», может быть выбрана для оценки доз строительных рабочих как дополнительная часть за счет ингаляционной нагрузки. Предполагая, что годовое рабочее время равно 1710 ч, эффективная ингаляционная доза может достигать до 0,2 мЗв в год.

Расчет годовой дозы для указанных помещений показал, что при годовой сумме рабочего времени 1710 ч наибольшая доза может быть равной 1,9 мЗв в год только в помещении 406/2, в комнате 208 она составила 0,006 мЗв в год, несмотря на большую долю частиц, меньших 1 мкм. В комнате 3.8, где располагаются дозиметристы, доза не превосходит 10^{-4} мЗв в год.

Если сравнить рассчитанные годовые дозы с нормативной годовой индивидуальной эффективной дозой внутреннего облучения для персонала объекта «Укрытие» ≤ 3 мЗв в год, то увидим, что только годовое пребывание в помещении 406/2 персонала соизмеримо с допустимым пределом. В комнате 208/10, где дозиметристы бывают эпизодически, и тем более в комнате 3.8 радиационные условия соответствуют предъявляемым к ним требованиям безопасности.

Таблица 5. Средневзвешенные мощности эффективных ингаляционных доз, вычисленные по измерениям, проведенным в неплотностях объекта «Укрытие» в периоды 1996 – 1999 гг. согласно табл. 1 и в 2000 – 2003 гг. согласно табл. 2

Период наблюдений	Средняя мощность эффективной дозы, нЗв·ч ⁻¹				
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am	Общая
1996 - 1999	2,70	5,46	16,7	72,6	97,5
2000 - 2003	0,149	0,196	1,60	13,7	15,6

Таблица 6. Средневзвешенные мощности эффективных ингаляционных доз в локальной зоне объекта «Укрытие» в периоды 1997 и 2002 – 2003 гг.

Период наблюдений	Средняя мощность эффективной дозы, нЗв·ч ⁻¹				
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am	Общая
1997	0,0251				
2002 - 2003	0,0214				
14 - 23.11.2001 d = 0,5 мкм, $\sigma_g = 2,46$	1,87	10,3	69,4	25,6	107
d = 1 мкм, $\sigma_g = 2,47$	1,87	9,4	61,3	23,0	95,6
d = 5 мкм, $\sigma_g = 2,50$	1,33	5,55	43,0	13,2	63,1

Выводы

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 $ДК_A$. Ингаляционные дозы, вычисленные по измеренным характеристикам радиоактивных частиц (объемной активности, АМАД, СГО, растворимости) и по современным моделям, были найдены с учетом величины общей мощности индивидуальной эффективной дозы порядка $100 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$, а годовая эффективная ингаляционная доза может доходить до $0,2 \text{ мЗв}$, что на порядок меньше предельной индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения персонала объекта «Укрытие».

В помещении 406/10 средняя величина мощности эффективной дозы составила $1920 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$, в комнате 208 – $0,33 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$, а в комнате 3.8 - еще на порядок меньше. Годовые индивидуальные эффективные дозы для помещений 406/2 и 208/10 составили 1,9 и 0,006 мЗв соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воздействие* объекта «Укрытие» на окружающую среду (выброс радиоактивных аэрозолей): (Отчет) / КЭ ИАЭ им. И. В. Курчатова. - М., 1990 .
2. *Боровой А.А.* Внутри и вне Саркофага // *Природа*. - 1990. - № 11. - С. 83 - 90 .
3. *Богатов С.А., Боровой А.А., Дубасов Ю.В., Ломоносов В.В.* Формы и характеристики топливных частиц в период Чернобыльской аварии // *Атомная энергия*. - 1990. - Т. 69, № 1. - С. 36 - 40.
4. *Боровой А.А.* Выброс ядерного топлива и продуктов деления из реактора 4-го блока ЧАЭС при аварии (Обзор). - Чернобыль, 2000. -15 с.- (Препр. / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 00-10).
5. *Богатов С.А.* Оценка запасов и определение свойств пылевого загрязнения в подкровельном пространстве объекта «Укрытие». - Чернобыль, 2000. - 16 с. - (Препр. / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 00-2).
6. *Боровой А.А., Гагаринский А.Ю.* Выброс радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС // *Атомная энергия*. - Февраль 2001. - Т. 90, вып.2. - С. 137 - 145.
7. *Гаргер Е.К., Кашпур В.А., Саженьюк А.Д. и др.* Характеристика аэрозоля неорганизованных выбросов объекта «Укрытие» // *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. - 2004. - Вип. 1. - С. 125 - 135.
8. *Гаргер Е.К., Кашпур 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.
9. *Garger E.K., Kashpur V., Belov G. et al.* Measurement of resuspended aerosol in the Chernobyl area I. Discussion of instrumentation and estimation of measurement uncertainty // *Radiat Environ Biophys*. - 1997. - Vol. 36. - P. 139 - 148.
10. *Frank G., Kashparov V., Protsak V., Tschiersch V.* Comparison measurements of a Russian standard aerosol impactor with several western standard aerosol instruments // *J. Aerosol Sci.* - 1996. - Vol. 27, No. 3. - P. 477 - 486.
11. *Ageev V.A., Odintsov A.A., Sajeniouk A.D.* The rapid radiochemical method for determination of ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am and ^{244}Cm in the aerosol filter, by ion-exchange chromatography // *Proceedings of the Sixth International Conference on Methods and Application of Radioanalytical Chemistry (MARC VI)*. April 1 - 11, 2003, Kailua-Kona, Hawaii, USA, p. 64 - 65.
12. *Гаргер Е.К., Кашпур В.А., Корнеев А.А., Курочкин А.А.* Результаты исследований выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» // *Проблеми Чорнобиля*. - 2002. - Вип. 10, ч. 2. - С. 60 - 71.
13. *Birchall A., Puncher M., James A.C. et al.* (2003) IMBA-EXPERT™: Internal dosimetry made simple. *Radiat Prot Dosim* 105: 421 - 424.
14. *ICRP (1994) Publication 66.* Human respiratory tract model for radiological protection. *Annals of the ICRP* 24, Pergamon Press, Oxford.
15. *ICRP (1990) Publication 56.* Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. *Annals of the ICRP* 20, Pergamon Press, Oxford.
16. *ICRP (1993) Publication 67.* Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. *Annals of the ICRP* 23, Pergamon Press, Oxford.
17. *ICRP (1983) Publication 38.* Radionuclide transformations: Energy and intensity of emissions. *Annals of the ICRP* 11 - 13, Pergamon Press, Oxford.
18. *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. - P. 43:43 - 49.

Поступила в редакцию 26.02.06

4 ДО ОЦІНКИ ДОЗОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗА РАХУНОК РАДІОАКТИВНОГО АЕРОЗОЛЮ ВСЕРЕДИНИ ТА БІЛЯ НЕЩІЛЬНОСТЕЙ ОБ'ЄКТА "УКРИТТЯ"**Є. К. Гаргер, В. О. Кашпур, О. О. Ключников, J. Tschiersch, P. Roth**

Характеристики радіоактивних аерозолів у викидах із об'єкта "Укриття" були виміряні у два періоди часу в 1996 - 1999 рр. і 2000 - 2003 рр. У 1996 - 1999 рр. загальна потужність викиду була $274,1 \text{ Бк}\cdot\text{с}^{-1}$ або $8,64\cdot 10^9 \text{ Бк}\cdot\text{рік}^{-1}$. Загальна потужність індивідуальної інгаляційної дози, розрахованої по вимірним об'ємній активності, медіані, геометричному стандартному відхиленню, швидкості вищолочування та сучасним моделям МКРЗ, становила біля $100 \text{ нЗв}\cdot\text{год}^{-1}$, а річна - біля $0,2 \text{ мЗв}$ в рік. Середня індивідуальна потужність дози для приміщення 406/2 склала $1130 \text{ нЗв}\cdot\text{год}^{-1}$, для кімнати 208/10 - $0,33 \text{ нЗв}\cdot\text{год}^{-1}$, у кімнаті 3,8 була ще на порядок менша. Розрахунок річної дози для зазначених приміщень показав, що при річній сумі робочого часу 1710 год найбільша доза може бути рівна $1,9 \text{ мЗв}$ в рік тільки в приміщенні 406/2, у кімнаті 208/10 вона становила $0,006 \text{ мЗв}$ в рік, у кімнаті 3.8 доза не перевищувала 10^{-4} мЗв в рік.

4 ESTIMATION OF INHALATION DOSE ASSESSMENT AT EXPENSE OF THE RADIOACTIVE AEROSOL INTO AND THE VICINITY OF APERTURES OF UKRYTTYA**E. K. Garger, V. A. Kashpur, A. A. Klyuchnikov, J. Tschiersch, P. Roth**

The characteristics of radioactive aerosols through large apertures of object Shelter were assessed in two meserment periods 1996 – 1999 and 2000 – 2003. In 1996 – 1999 a total radionuclide flow rate of 274.1 Bq s^{-1} or $8.64\cdot 10^9 \text{ Bq}\cdot\text{y}^{-1}$ was determined. The resulting total inhalation dose calculated from the individual experimental parameters was about 100 nSv h^{-1} and annual near 0.2 mS per year. Inhalation doses in the range of 100 nSv h^{-1} as determined at the apertures or in some periods in the Shelter vicinity would mean for construction workers of a new Shelter-2 an addition dose which is not negligible. Assuming an annual working time of 1710 h (standard working time in the European Union and Ukraine) the inhalation dose would sum up to about 0.2 mSv a^{-1} . The annual dose for the indicated rooms was 1.9 mSv a^{-1} for the premises 406/2, 0.006 mSv a^{-1} for the room 208/10 and $10^{-4} \text{ mSv a}^{-1}$ for the room 3.8.