

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОЗОЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ, ЭКСПОНИРОВАННЫХ ДО, ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ РАЗРУШЕНИЯ КРЫШИ МАШИННОГО ЗАЛА 4-ГО ЭНЕРГБЛОКА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Приведены результаты исследований аэрозольных фильтров, экспонированных в ближней зоне ЧАЭС до и после разрушения крыши машинного зала 4-го энергоблока в феврале 2013 г. На фильтрах, относящихся ко времени разрушения, зарегистрирован сильный (более чем на 3 порядка) рост бета- и гамма-активностей. Авторадиограммы фрагментов этих фильтров свидетельствуют о значительном ( $\approx 2$  порядка) возрастании числа “горячих” частиц. Дисперсионный анализ обнаруженных “горячих” частиц свидетельствует о существенном вкладе в общую активность большого числа относительно малоактивных частиц ( $0,15 \div 3$  Бк). В приближении мгновенного точечного выброса построена предполагаемая траектория движения центра клуба выброса. Выполнены оценки суммарной активности выброса, дальности полета частиц, а также удельной активности воздуха по оси траектории. Исследована кинетика растворения “горячих” аэрозольных частиц в имитанте легочной жидкости. Показано, что около 13 %  $^{137}\text{Cs}$  находится в виде быстрорастворимой фракции, характерной для подкровельного пространства машинного зала.

**Ключевые слова:** объект «Укрытие», “горячие” частицы, авторадиография, удельная активность воздуха, кинетика растворения в легочной жидкости.

### Введение

Одним из основных факторов радиационного влияния на персонал, работающий на строительной площадке и в локальной зоне объекта “Укрытие”, является ингаляционное поступление радионуклидов в организм. Согласно опубликованным данным, средние уровни аэрозольного загрязнения в ближней зоне ЧАЭС не превышают допустимых пределов [1], однако их пиковые уровни во время выполнения некоторых видов работ могут выходить за эти пределы.

12 февраля 2013 г. в 14<sup>03</sup> произошло обрушение части крыши машинного зала 4-го энергоблока ЧАЭС. Поскольку на крыше и внутри машинного зала содержатся значительные количества радиоактивных материалов, обрушение крыши должно было сопровождаться выбросом облака радиоактивного аэрозоля.

Целью данной работы является регистрация выброшенных во время обрушения аэрозольных “горячих” частиц, оценка суммарной активности выброса и ориентировочных значений удельной активности воздуха на пути следования аэрозольного облака, а также изучение свойств “горячих”

частиц, в частности дисперсного состава и скорости их растворения в имитаторе легочной жидкости.

### Материалы и методика эксперимента

По программе контроля радиационного загрязнения приземного воздушного слоя вблизи объекта “Укрытие” в это время в непрерывном режиме работали две фильтро-вентиляционные установки (ФВУ): ФВУ-1, расположенная с восточной стороны объекта СП-1430 примерно в 500 м от места обвала (технические характеристики приведены в табл. 1), и ФВУ «Тайфун», расположенная на расстоянии около 1,5 км (рис. 1). Рабочие параметры ФВУ-1 и основные данные четырех исследованных фрагментов фильтров приведены в табл. 1. Материал фильтра – ткань Петрянова.

По данным метеостанции ИПБ АЭС НАН Украины, расположенной на крыше административного корпуса, ветер на высоте 18 м (высота датчика метеостанции) – 0,3 - 1,5 м/с,

© В. К. Шинкаренко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк, 2014

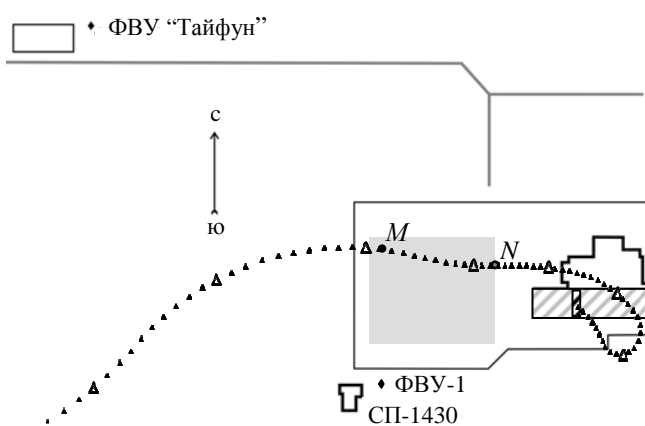


Рис.1. Схема расположения ФВУ и предполагаемая траектория движения центра клуба выброса:

- машинный зал 4-го блока;
- место обвала фрагмента крыши;
- зона строительства защитного сооружения над реактором 4-го блока;
- траектория, интервал времени 1 мин; - 10 мин.

направление ветра переменное, от северо-западного до юго-восточного. На рис. 1 приведена предполагаемая траектория движения центра клуба выброса, рассчитанная на основе метеоданных без учета аэродинамических эффектов, связанных с обтеканием строений, и изменения скорости ветра по высоте. Высота крыши машинного зала около 35 м, высота воздухозаборника ФВУ-1 примерно 1 м.

Измерения гамма-активности  $^{137}\text{Cs}$  проводили с помощью полупроводникового спектрометра фирмы ORTEC.

Кинетику растворения аэрозольных частиц в имитаторе легочной жидкости SLF исследовали по методике, описанной в [2 - 4], состав имитатора SLF приведен там же.

#### Получение автордиограмм

Автордиографические исследования воздушных фильтров проводили по методике, описанной в [5]. Фрагменты экспонированных воздушных фильтров размером  $18 \times 24 \text{ см}^2$  своим основанием крепили на жесткой подложке (картон), рабочую поверхность фильтра сверху закрывали защитным покрытием - обезжиренной конденсаторной бумагой с поверхностной плотностью  $11 \pm 0,5 \text{ г/м}^2$ . (Использование в качестве защитного покрытия полимерных пленок вносит существенные погрешности при последующем исследовании растворения "горячих" частиц. Вследствие электризации вместе с защитным покрытием с поверхности ткани Петрянова может быть снято до 80 % активности.) Медицинская рентгеновская фотопленка (Agfa CP-BU-new) была прижата к поверхности защитного покрытия с помощью специальной кассеты и выдерживалась в контакте с фрагментом фильтра на протяжении трех недель. Для построения калибровочной зависимости и последующего определения активности частиц в кассету была помещена линейка частиц известной активности с аналогичным защитным покрытием и соответствующим фрагментом рентгеновской пленки.

#### Подготовка набора частиц для построения калибровочной кривой

Для определения бета-активности частиц по их радиографическим изображениям строили калибровочную зависимость, полученную по данным автордиографии линейки частиц с известной активностью. В свое время (2002 – 2003 гг.) эти частицы были изолированы из воздушных фильтров, экспонированных вблизи объекта "Укрытие". Бета-активность каждой из выделенных частиц измеряли непосредственно перед получением автордиограмм с помощью мультidetектора IN-20 (Candberra). Найденные значения активностей приведены в табл. 2.

Таблица 1. Исходные данные аэрозольных фильтров

Параметр	Даты начала и окончания экспозиции (февраль 2013)			
	5 - 12	12 - 13	14 - 18	18 - 20
Время экспозиции фильтра, ч	166,6	24,2	99,7	42,9
Прокачанный объем воздуха, м <sup>3</sup>	179928	26136	107676	46332

Таблица 2. Активности "горячих" частиц калибровочной линейки

№ частицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Активность, Бк	116	20,3	14,6	7,2	5,6	1,7	1,0	0,51	0,32	0,22

#### Обработка изображений

Автордиограммы оцифровывали с помощью сканера Epson perfection-1670 "на отражение". В процессе сканирования был выбран режим компенсации синего цвета пленки-основания и разрешение 600 точек на дюйм. В результате были получены изображения радиографических пленок с прозрачным фоном и четкими изображениями радиографических пятен (рис. 2).

Определение параметров пятен при выбранном уровне почернения проводили с помощью пакета обработки изображений Image-Pro Plus 5.0. Для каждого из пятен определяли интегральную оптическую плотность  $I$ , среднюю оптическую плотность, максимальный  $R$  и минимальный  $r$  радиусы пятна. Изображения фильтров в процессе обработки просматривали в ручном режиме с целью выявления и разделения слившихся пятен, что оказалось особо актуальным для фильтра с большой плотностью загрязнения (см. рис. 2, б). Неразделимые в Image-Pro Plus близко-

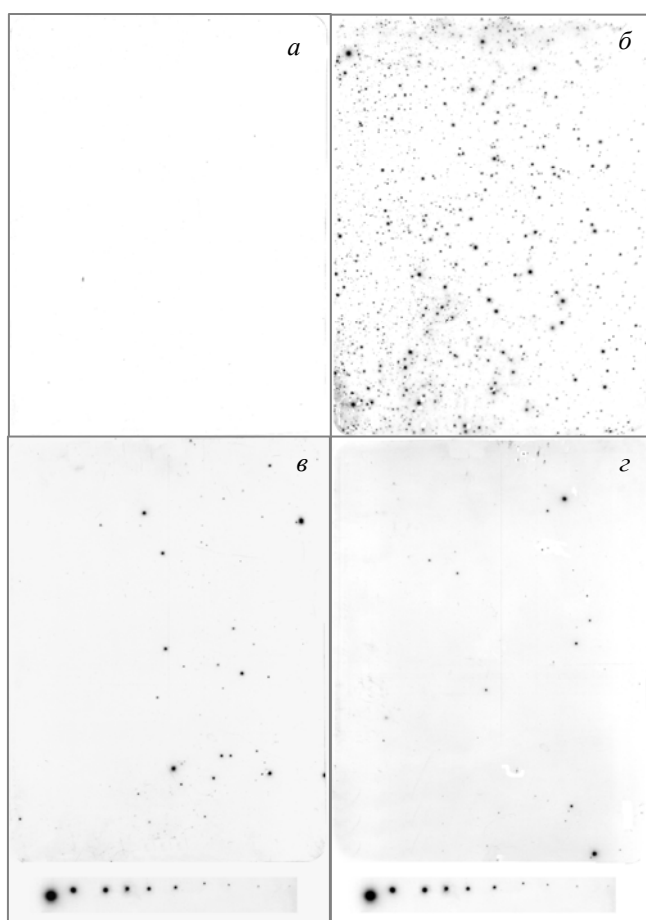


Рис. 2. Авторадиограммы фрагментов фильтров ФВУ-1:

*a* – 5 - 12.02.2013;      *б* – 12 - 13.02.2013;  
*в* – 14 - 18.02.2013;      *г* – 18 - 20.02.2013.

расположенные пятна разделяли в Photoshop'e путем переноса отдельных пятен на свободное место изображения.

В качестве критериев отбора ложных пятен использовали соотношение максимального и минимального радиусов  $R/r > 3$  (удаляются линейные объекты – царапины, края снимка и т.п.) и среднюю оптическую плотность – отбраковывались пятна со средней плотностью, не превышающей учетный уровень.

#### Построение калибровочной зависимости

Параметры радиографического пятна, в частности его размеры, плотность почернения и интегральная оптическая плотность как обобщенный показатель, зависят не только от свойств “горячей” частицы, но и от целого ряда других причин – длительности экспозиции, свойств фотослоя, состава и температуры проявляющего раствора, длительности проявления, параметров сканирования и т.п. Радиограмма набора частиц с известной активностью, полученная в аналогичных условиях, дает возможность построить калибровочный график и произвести его аппроксимацию подходящим аналитическим выражением, которое в дальнейшем можно использовать для вычисления активности исследуемых частиц. На рис. 3 такая зависимость представлена для линейки частиц, экспонированной вместе с фрагментом фильтра от 12 - 13.02.2013. В качестве аппрок-

симирующей функции для логарифма активности частицы использовали выражение

$$\text{Ln}A = a * (\text{Ln}I)^b + c, \quad (1)$$

где  $I$  – интеграл оптической плотности радиографического пятна;  $a$ ,  $b$  и  $c$  - неизвестные коэффициенты, которые были найдены методом наименьших квадратов в среде пакета Statistica-6. В результате была получена формула для определения логарифма активности<sup>1</sup>:

$$\text{Ln}A = 9,54 \cdot 10^{-4} \cdot (\text{Ln}I)^{3,43} - 2,31. \quad (2)$$

#### Результаты и их обсуждение

Сводные результаты определения гамма- и бета-активности фрагментов фильтров приведены в табл. 3. На рис. 4. показаны гистограммы распределений, здесь же приведены суммарные активности для каждого из интервалов.

Из табл. 3, рис. 2, б и 4 видно, что во время разрушение крыши машинного зала 4-го блока ЧАЭС в зоне нахождения воздухозаборника ФВУ-1 был зафиксирован существенный ( $\approx 2$ -3 порядка) рост числа аэрозольных “горячих” частиц и их суммарной активности. По сравнению с обычно встречающимися распределениями “горячих” частиц в ближней зоне объекта “Укрытие”, в которых основная активность приходится на небольшое число высокоактивных “крупных” частиц, в этом случае наблюдался примерно одинаковый вклад частиц с логарифмами активности в диапазоне от -1,85 до +1,0, что соответствует диапазону активностей  $\approx 0,15 \div 2,7$  Бк. Здесь необходимо отметить,

<sup>1</sup> Задача определения «истинного вида» аппроксимирующей функции математически некорректна. В принципе возможен выбор других функций, которые могут столь же успешно аппроксимировать имеющуюся группу точек. В данном случае аппроксимирующая функция играет роль своего рода математического лекала.

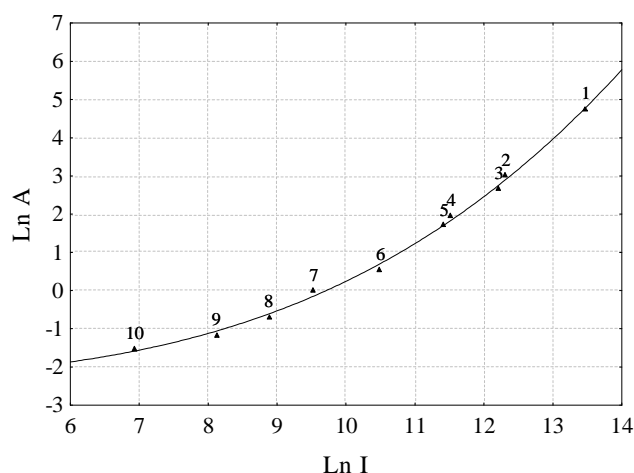


Рис. 3. Активность горячей частицы как функция интегральной оптической плотности радиографического пятна. Номера точек соответствуют номерам частиц из табл. 2, линия – выражению (2).

что использованный режим автордиографии не позволяет уверенно регистрировать менее активные частицы. Поскольку на ЧАЭС среди всех радиоактивных загрязнителей облученное топливо имеет максимальную удельную бета-активность, можно провести оценку минимально возможных размеров частиц, предполагая их топливную природу. На сегодня, спустя 28 лет после Чернобыльской аварии, удельная бета-активность топлива, рассчитанная согласно данным [6], составляет  $2,05 \cdot 10^9$  Бк/г  $UO_2$ . Следовательно, указанному диапазону активностей соответствует диапазон масс  $0,07 \div 1,3$  нг и диапазон диаметров “горячих” частиц:  $2,36 \div 6,19$  мкм, при этом диаметр частицы с максимальной зарегистрированной активностью (18,3 Бк) составляет 11,7 мкм.

Приведенные в табл. 3 среднесуточные значения удельной активности воздуха на первый взгляд не вызывают особого беспокойства, эти значения существенно ниже допустимых уровней для персонала (60 Бк/м<sup>3</sup> по <sup>137</sup>Cs [7]). Однако реальное время прохождения аэрозольного облака мимо воздухозаборника было существенно меньше, оно не превышало 20 мин. К тому же наш воздухозаборник находился в стороне от траектории прохождения центра облака, вследствие чего удельная активность по оси его следования была существенно выше.

Таблица 3. Сводные результаты автордиографических исследований аэрозольных фильтров

Параметр	Даты начала и окончания экспозиции (февраль 2013 г.)				
	5 - 12	12 - 13	14 - 18	18 - 20	
Суммарная бета-активность фрагмента, Бк	3,70	1154	65,7	37,3	
Суммарное число “горячих” частиц на фрагменте	19	2316	52	59	
Максимальная зарегистрированная активность “горячей” частицы на фрагменте, Бк	0,4	18,3	11,4	8,9	
Пересчитанная бета-активность фильтра, Бк	31	9616	548	310	
Пересчитанная гамма-активность фильтра, Бк	13	6534	377	64,9	
Соотношение бета/гамма	2,38	1,47	1,45	4,79	
Среднесуточная удельная активность воздуха, Бк/м <sup>3</sup>	бета	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$3,68 \cdot 10^{-1}$	$5,09 \cdot 10^{-3}$	$6,70 \cdot 10^{-3}$
	гамма	$7,20 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-1}$	$3,50 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-3}$

### Кинетика растворения “горячих” аэрозольных частиц

Для фрагмента фильтра от 12 - 13 февраля была исследована кинетика растворения <sup>137</sup>Cs в имитаторе легочной жидкости. На рис. 5 представлена зависимость активности <sup>137</sup>Cs в нерастворившейся части фрагмента фильтра от времени выщелачивания. Сплошная линия – аппроксимация экспериментальных точек суммой двух экспонент:

$$A_{unsol} = a_1 e^{-\frac{\ln 2t}{T_1}} + a_2 e^{-\frac{\ln 2t}{T_2}} + c = 0,096 \cdot e^{-\frac{\ln 2t}{1,29}} + 0,035 \cdot e^{-\frac{\ln 2t}{42,6}} + 0,87. \quad (3)$$

здесь  $A_{unsol}$  – остающаяся нерастворенной часть активности;  $a_1$  и  $a_2$  – доли фракций;  $c$  – постоянная составляющая, соответствующая доли медленнорастворимой фракции;  $a_1 + a_2 + c = 1$ ;  $T_1$  и  $T_2$  – времена полураспада, ч.

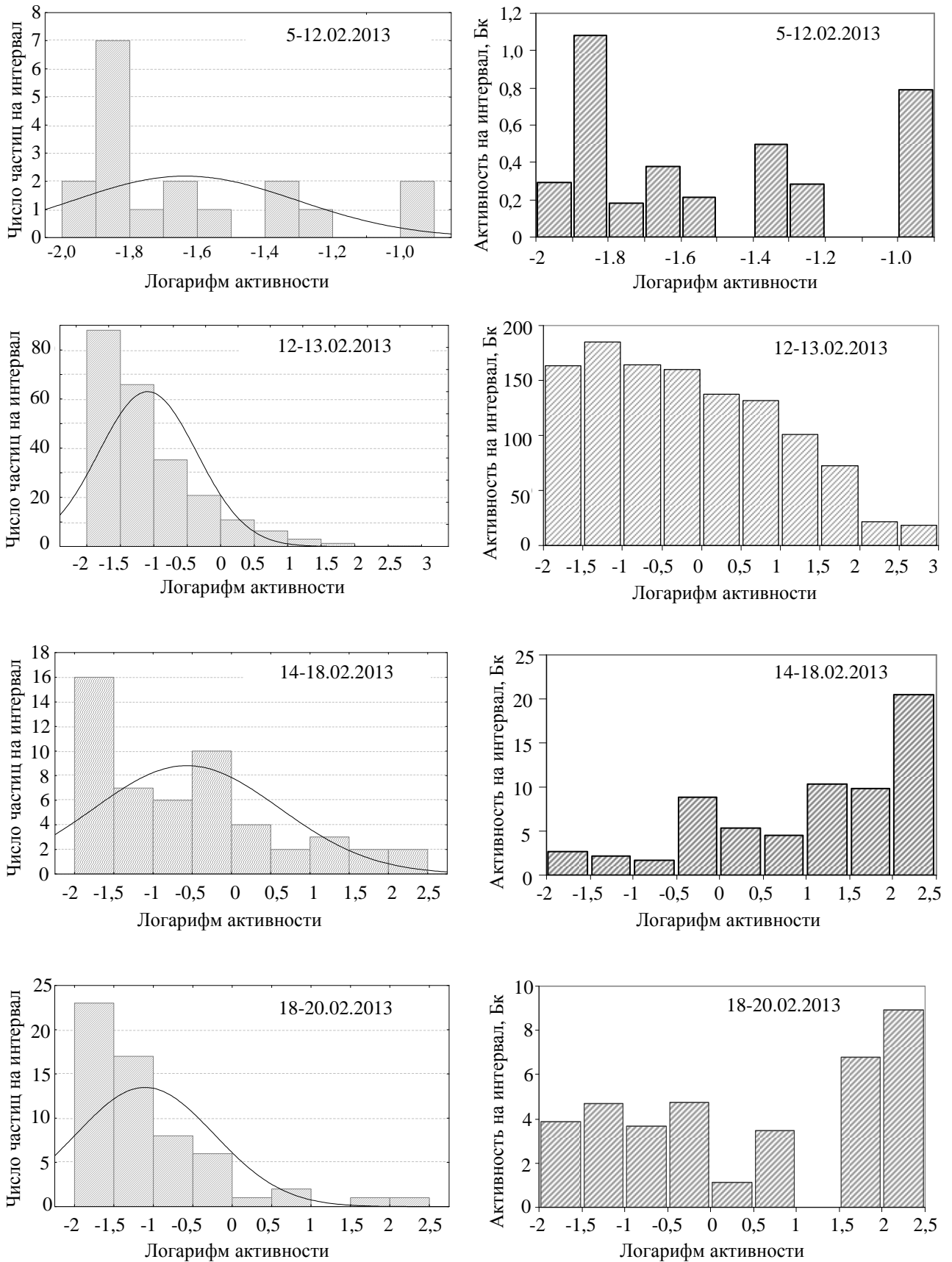


Рис. 4. Гистограммы распределения частиц по логарифму активности (слева) и суммарные активности частиц в выбранных интервалах (справа) для фрагментов фильтров.

Согласно приближению (3), на фильтре от 12 - 13.02.2013 около 13 %  $^{137}\text{Cs}$  находится в быстрорастворимой форме, что согласуется с обнаруженным нами ранее присутствием в под-

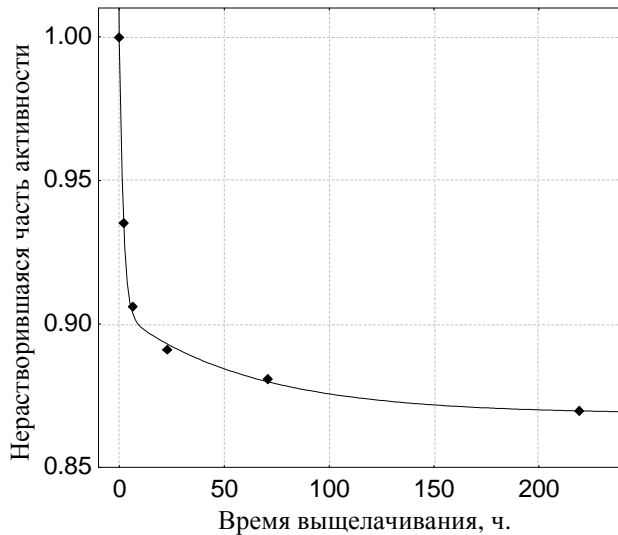


Рис. 5. Кинетика выщелачивания  $^{137}\text{Cs}$  из фрагмента фильтра от 12 - 13.02.2013 г.

кровельном пространстве машинного зала относительно быстрорастворимой фракции аэрозольных частиц, обогащенной  $^{137}\text{Cs}$  [1 – 4], и является дополнительным свидетельством привязки источника выброса к машинному залу 4-го энергоблока ЧАЭС.

Изменение соотношений бета/гамма-активностей фрагментов фильтров (см. табл. 3) во времени связано, по-видимому, с неоднородным распределением частиц по поверхности фильтра, поскольку измерения бета- и гамма-активностей проводились на различных фрагментах одного и того же фильтра. Отметим также, что, среди наблюдаемых изменений просматривается некоторая закономерность: до обрушения соотношение бета/гамма весьма близко к значению этой величины для облученного топлива 4-го энергоблока (2,67); в день разрушения крыши наблюдается резкое уменьшение этого коэффициента, что может быть связано с выбросом обогащенных  $^{137}\text{Cs}$  частиц.

пение этого коэффициента, что может быть связано с выбросом обогащенных  $^{137}\text{Cs}$  частиц.

**Оценка суммарной активности выброса**

На основании имеющихся данных, предполагая выброс моментальным и точечным, можно выполнить грубую оценку суммарной активности выброса и удельной активности воздуха в момент прохождения клуба выброса вблизи ФВУ. Будем исходить из предположения о гауссовом распределении объемной активности внутри выброшенного клуба, тогда на момент прохождения его центра возле ФВУ-1 (точка  $M$  на рис.1), объемную активность в произвольной точке  $K(x, y, z)$  можно представить в виде [8]

$$A_v = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \delta_x \delta_y \delta_z} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta_x^2+2\delta_y^2}} \cdot \left\{ e^{-\frac{(z-h)^2}{2\delta_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\delta_z^2}} \right\}, \tag{4}$$

где  $Q$  – суммарная активность выброшенного аэрозоля;  $\delta_{x-z}$  – дисперсии по соответствующим осям;  $h$  – высота центра клуба над поверхностью земли;  $x, y, z$  – эйлеровы координаты точки относительно центра клуба. Выброшенный клуб аэрозоля расширяется по мере удаления от точки выброса

$$\delta_x(S) \approx 0,1S, \tag{5}$$

где  $S$  – путь, пройденный центром клуба (в нашем случае  $S \approx 950$  м). Численные оценки показывают, что ошибка вычисленной активности на фильтре ФВУ при замене  $\delta_x(S)$  на его постоянное значение  $\delta_x$  в точке  $M$  чуть выше 3 %. Это позволяет представить выражение (4) в виде

$$A_v = A_0 e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta_x^2+2\delta_y^2}} \cdot \left( e^{-\frac{(z-h)^2}{2\delta_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\delta_z^2}} \right), \tag{6}$$

где  $A_0$  – удельная объемная активность в центре клуба, находящегося над точкой  $M$ . Интегрируя выражение (3) по объему клуба получим его суммарную активность, которая и является оценкой всей выброшенной аэрозольной активности

$$Q = \iiint A_v dx dy dz = A_0 (2\pi)^{\frac{3}{2}} \delta_x \delta_y \delta_z. \tag{7}$$

Оценим значение величины  $A_0$  по имеющимся данным активности фильтра. ФВУ-1 непрерывно прокачивала воздух от момента возникновения клуба выброса до его полного прохождения мимо установки. Следовательно, активность на фильтре  $A_f$  представляет собой суммарную активность частиц, собранных вдоль оси  $x$  на площадку с эффективным сечением  $\Delta S$ . После интегрирования выражения (5) вдоль оси  $x$  для точки с координатами  $(Y, Z)$  относительно центра клуба получим

$$A_f = A_0 \cdot \Delta S \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \delta_x \cdot e^{-\frac{Y^2}{2\delta_y^2}} \cdot \left( e^{-\frac{(Z-h)^2}{2\delta_z^2}} + e^{-\frac{(Z+h)^2}{2\delta_z^2}} \right). \quad (8)$$

Определив  $A_0$  из выражения (8) и подставив в (7), имеем

$$Q = \frac{2\pi \cdot A_f \cdot \delta_y \cdot \delta_z}{\Delta S \cdot e^{-\frac{Y^2}{2\delta_y^2}} \cdot \left( e^{-\frac{(Z-h)^2}{2\delta_z^2}} + e^{-\frac{(Z+h)^2}{2\delta_z^2}} \right)} \approx \frac{\pi \cdot A_f \cdot \delta_y \cdot \delta_z \cdot e^{-\frac{Y^2}{2\delta_y^2} - \frac{h^2}{2\delta_z^2}}}{\Delta S}. \quad (9)$$

Найдем значение  $\Delta S$ , исходя из секундного расхода через ФВУ-1 ( $q \approx 0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и средней скорости ветра  $\bar{v}_{\text{ветра}} \approx 0,5 \text{ м/с}$  на момент прохождения точки М, следовательно  $\Delta S = \frac{q}{\bar{v}_{\text{ветра}}} \approx 0,6 \text{ м}^2$ .

Для класса А устойчивости атмосферы и расстояния  $S = 950 \text{ м}$  по номограммам для городской застройки, приведенным в [8], определим  $\delta_y \approx \delta_z \approx 200 \text{ м}$ . Подставив эти значения, а также  $h = 35 \text{ м}$ ,  $Y = 280 \text{ м}$  (из рис. 1) и  $Z = 34 \text{ м}$  в (8) получим оценку суммарной бета-активности выброшенного аэрозоля  $Q_\beta \approx 5,4 \cdot 10^9 \text{ Бк} \approx 0,15 \text{ Ки}$  и, соответственно, для гамма-активности:  $Q_\gamma \approx 3,7 \cdot 10^9 \text{ Бк} \approx 0,1 \text{ Ки}$ . Подстановка этих значений в формулу (3) позволяет определить удельную активность в точке М на высоте  $1,5 \text{ м}$ :  $\approx 170 \text{ Бк/м}^3$  для бета-активности и  $\approx 120 \text{ Бк/м}^3$  для  $^{137}\text{Cs}$ . Оценим удельные активности воздуха по оси следования клуба на восточном краю строительной площадки (точка N на рис. 1). В этом случае  $S = 620 \text{ м}$ ,  $\delta_y \approx \delta_z \approx 150 \text{ м}$ . Подставив эти значения в выражение (3) и используя найденные ранее значения суммарных активностей выброса, получим:  $A_{N\beta} \approx 500 \text{ Бк/м}^3$  и  $A_{N\gamma} \approx 330 \text{ Бк/м}^3$ . Таким образом, согласно нашим оценкам, после обрушения фрагмента крыши машинного зала 4-го блока удельные активности воздуха на стройплощадке некоторое время существенно превышали предельно допустимые уровни.

#### Оценка дальности распространения выброса

Скорость падения сферических частиц микронных размеров в спокойном воздухе может быть найдена из соотношения Стокса

$$v = \frac{\rho g d^2}{18\mu}, \quad (10)$$

где  $\rho$  – плотность материала частицы;  $d$  – ее диаметр;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха. Для частиц с аэродинамическим диаметром  $d_{\text{аэрод}} < 29 \text{ мкм}$  ошибка, связанная с применением выражения (10), не превышает 1% [9]. Некоторое представление о масштабах факела выброса можно получить, рассмотрев дальность полета  $S$  аэрозольной частицы, падающей с высоты  $H$  в невозмущенном потоке воздуха, движущегося со скоростью ветра. Соответствующее выражение легко получить из соотношения (10):

$$S = \frac{18\mu \cdot v_{\text{eol}} \cdot H}{\rho \cdot g \cdot d^2}. \quad (11)$$

Соответственно для приведенного выше диапазона размеров аэрозольных частиц ( $2,36 \div 6,19 \text{ мкм}$ ) имеем диапазон аэродинамических диаметров  $7,5 < d_{\text{аэрод}} < 19,6 \text{ мкм}$  и диапазон дальностей  $10,5 > S > 1,5 \text{ км}$ , полученный при  $H = 35 \text{ м}$  и скорости ветра  $0,5 \text{ м/с}$ . Отметим, что реальная картина выпадения частиц аэрозольного облака существенно сложнее, однако данные для более качественной оценки отсутствуют. Так, образование ассоциатов топливных частиц с более крупными частицами неактивной пыли может существенно ускорить их выпадение. С другой стороны, турбулентное перемешивание способствует замедлению падения некоторой части «горячих» частиц, что способствует увеличению дальности их полета.

$$d_{\text{аэрод}}^2 = d \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}}, \text{ где } d \text{ – диаметр частицы; } \rho \text{ – ее плотность; } \rho_{\text{H}_2\text{O}} \text{ – плотность воды.}$$

## Выводы

Зафіксовано виброс облака “горячих” аерозольних частиц во время обрушения части крыши машинного зала 12 февраля 2013 г. Факт выброса подтверждается гамма-спектроскопическими и радиографическими исследованиями аерозольных фильтров за соответствующие дни, а также сходной кинетикой растворения находящихся на фильтре и ранее исследованных частиц, отобранных в подкровельном пространстве машинного зала. Полученное распределение “горячих” частиц по активностям показывает примерно одинаковый вклад частиц с активностями  $\approx 0,15 \div 2,7$  Бк. Оценка общей активности выброшенного  $^{137}\text{Cs}$  составляет величину порядка 0,1 Ки при суммарной бета-активности около 0,15 Ки, в том числе доля бета-излучающих изотопов  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  - порядка 0,05 Ки.

Согласно имеющимся метеоданным, предполагаемый факел выброса прошел по территории строительной площадки защитного сооружения спустя  $\approx 30 \div 60$  мин после обрушения. При этом удельные активности воздуха по оси распространения составляли величину порядка  $120 - 330$  Бк/м<sup>3</sup> по  $^{137}\text{Cs}$  и  $\approx 170 - 500$  Бк/м<sup>3</sup> по суммарной бета-активности, что явно превышает предельно допустимые уровни.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Огородников Б.И., Павлюченко Н. И., Пазухин Э. М.* Радиоактивные аэрозоли объекта "Укрытие" (обзор). Ч. 2.2: Концентрации радиоактивных аэрозолей на промплощадке объекта "Укрытие". - Чернобыль, 2004. - 44с. – (Препр. / НАН України. Міжгалузевий науково-технічний центр "Укриття"; 04-1).
2. *Гаргер Е. К., Одинцов А. А., Шинкаренко В. К.* Оценка степени растворения радиоактивных аерозольных частиц из объекта «Укрытие» // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2009. - Вип. 12. - С. 125 - 136.
3. *Garger E. K., Meisenberg O., Odintsov O.O. et al.* Solubility of hot fuel particles from Chernobyl - Influencing parameters for individual radiation dose calculations // Talanta. – 2013. - Vol. 115. – P. 40 – 46.
4. *Гаргер Е. К., Одинцов А. А., Шинкаренко В. К. и др.* Поведение “горячих” аерозольных частиц из объекта «Укрытие» в имитаторах легочной жидкости // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2013. - Вип. 21. - С. 43-52.
5. *Шинкаренко В.К.* К определению активности “горячих” частиц радиографическим методом // Там же. – 2008. - Вип. 9. - С.130 – 139.
6. *Богатов С.А., Боровой А.А., Дубасов Ю.В. и др.* Форма и характеристики частиц топливного выброса при аварии на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. - 1990. - Т. 69, вып. 1. - С. 36 - 40.
7. *Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи.* – К., 1997. - 121 с.
8. *Гусев Н. Г., Беляев В. А.* Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 256 с.
9. *Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли - пыли, дымы и туманы. - Л.: Химия, 1972. - 428 с.

**В. К. Шинкаренко, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк**

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

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОЗОЛЬНИХ ФІЛЬТРІВ, ЕКСПОНОВАНИХ ДО, ПІД ЧАС ТА ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ ДАХУ МАШИНОГО ЗАЛУ 4-ГО ЕНЕРГОБЛОКА ЧОРНОБІЛЬСЬКОЇ АЕС

Наведено результати досліджень аерозольних фільтрів, експонованих в ближній зоні ЧАЕС до і після руйнування даху машинного залу 4-го енергоблока в лютому 2013 р. На фільтрах, що відносяться до часу руйнування, зареєстровано сильне (більш ніж на 3 порядки) зростання бета- і гамма-активностей. Авторадіограми фрагментів цих фільтрів демонструють значне ( $\approx 2$  порядки) зростання числа “горячих” частинок. Дисперсійний аналіз виявлених “горячих” частинок свідчить про істотний вклад в загальну активність великого числа відносно малоактивних частинок ( $0,15 \div 3$  Бк). У наближенні миттєвого точкового викиду побудована гадана траєкторія руху центра клубу викиду, виконано оцінки сумарної активності викиду, дальності польоту частинок та питомої активності повітря по осі траєкторії. Досліджено кінетику розчинення “горячих” аерозольних частинок в імітанті легеневої рідини. Показано, що близько 13 %  $^{137}\text{Cs}$  знаходиться у вигляді швидко розчинної фракції, характерної для простору під покрівлею машинного залу.

*Ключові слова:* об'єкт «Укриття», “горячі” частинки, авторадіографія, питома активність повітря, кінетика розчинення в легеневій рідині.



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

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

**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**

Results of researches of aerosol filters exposed in the near region of the Chernobyl atomic power station before destruction of the machine house roof of 4-th block in February 2013 are presented. Significant rise of beta and gamma activity (more than on 3 orders) that refer to time of destruction was registered on filters. Autoradiograms of the filters' fragments show great rise ( $\approx 2$  orders) of the "hot" particles amount. Dispersion analysis of the found "hot" particles indicates considerable contribution of great number of particles with rather small activities ( $0,15 \div 3$  Bk) to the general activity. At present time corresponding activity have particles of irradiated nuclear fuel  $2,36 \div 6,19$  microns in diameter. Taking into account the meteorological data received near the Object "Ukryttya", prospective motion trajectory of the centre of cloud of exhaust was calculated. Assessments of the total beta and gamma activities of exhaust were made in approach of an instant point source. Estimation of specific activity of air on an axis of a trajectory of cloud in a region of building of a protective construction over the reactor of 4-th block was made. It was shown that received values essentially exceed maximum permissible levels. Ranges of flight of "hot" particles were also calculated. The kinetic of dissolution of "hot" aerosol particles in the simulant lung fluid was investigated. It was shown that about 13 %  $^{137}\text{Cs}$  aerosol particles is in a kind of instant fraction, that is typical for space under machine house roofing.

*Keywords:* object "Ukryttya", "hot" particles, autoradiography, specific activity of air, dissolution kinetics in lung fluid.

REFERENCES

1. *Ogorodnikov B.I., Pavlyuchenko N.I., Pazukhin E.M.* Radioactive aerosols of the "Ukryttya" object (a review). Part 2.2. Concentrations of radioactive aerosols in industrial site of the "Ukryttya" object // Chernobyl, 2004. - 44 c. - (Prepr. / NAS of Ukraine. Interdisciplinary Scientific and Technical Centre "Shelter"; 04-1). (Rus)
2. *Garger E. K., Odintsov O. O., Shynkarenko V. K.* Estimation of the degree of dissolution radioactive aerosols particles from object «Ukryttya» // Problemy bezpeky atomnyh elektrostansiy i Chornobylya (Problems of nuclear power plants and of Chernobyl). - 2009. - Iss. 12. - P. 125 - 136. (Rus)
3. *Garger E. K., Meisenberg O., Odintsov O. O. et al.* Solubility of hot fuel particles from Chernobyl - Influencing parameters for individual radiation dose calculations // Talanta. - 2013. - Iss. 115. - P. 40 - 46.
4. *Garger E. K., Odintsov O. O., Shynkarenko V. K.* Behaviour of "hot" aerosol particles from object "Ukryttya" in simulators of a pulmonary liquid // Problemy bezpeky atomnyh elektrostansiy i Chornobylya (Problems of nuclear power plants and of Chernobyl). - 2013. - Iss. 21. - P. 43 - 52. (Rus)
5. *Shynkarenko V. K.* To definition of activity of hot particles by a radiographic method // Ibid. - 2008. - Iss. 9. - P. 130 - 139. (Rus)
6. *Bogatov S. A., Borovoi A. A., Dubasov Yu. V. et al.* Form and parameters of the particles of the fuel ejection in the Chernobyl reactor accident // Soviet Atomic Energy. - 1990. - Vol. 69, Iss. 1. - P. 595 - 601.
7. *Norms of radiation safety of Ukraine (NRBU-97).* State hygienic standards. Official edition. - Kyiv, 1997. - 121 p. (Ukr)
8. *Gusev N. G., Belyaev V. A.* Handbook of Radioactive Emissions in the Biosphere. - Moskva: Energoatomizdat, 1991. - 256 p. (Rus)
9. *Green H.L., Lane W.R.* Particulate Clouds: Dusts, Smokes and Mists. 2-d ed. - London, 1964. - 471 p.

Надійшла 02.06.2014  
Received 02.06.2014