

А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. А. Одинцов, А. К. Калиновский, В. П. Ковальчук, Т. А. Кравчук,  
А. В. Филиппов, М. Н. Попов

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина

## Радиоактивные аэрозоли около скопления лавообразных топливосодержащих материалов в помещении 012/15 объекта «Укрытие» в 2017–2018 гг.

### Ключевые слова:

объект «Укрытие», лавообразные топливосодержащие материалы, радиоактивные аэрозоли, объемная активность, соотношение радионуклидов, АМАД.

Представлены радионуклидный состав и объемные активности аэрозолей в 2017–2018 гг. в помещении 012/15 объекта «Укрытие». Пробы отбирали в 5 м от северного края лавообразных топливосодержащих материалов (ЛТСМ). Установлено, что суммарная концентрация аэрозолей-носителей  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  и  $^{137}\text{Cs}$  колебалась в диапазоне 0,025–4,5 Бк/м<sup>3</sup>. При этом на долю  $^{137}\text{Cs}$  приходилось 54%. Гамма-спектрометрические измерения и радиохимические анализы показали, что усредненные отношения труднолетучих радионуклидов-продуктов аварии 4-го блока Чернобыльской атомной электростанции в аэрозольных пробах соответствуют составу ЛТСМ в помещении. Это свидетельствует о процессе деструкции ЛТСМ и частичном переходе материалов в аэрозольное состояние. Их носителями были аэрозоли с активностным медианным аэродинамическим диаметром (АМАД) около 4 мкм.

### Введение

Лавообразные топливосодержащие материалы (ЛТСМ), образовавшиеся на второй стадии аварии на 4-м блоке Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) весной 1986 г., являются источником радиационной и радиоэкологической опасности. При растекании лава оказалась во многих помещениях, в том числе в подаппаратном помещении (на высотной отметке +9,00), в парораспределительном коридоре (на отметке +6,00), в бассейне-барботере (на отметках +3,00 и 0,00) и других местах [1]. И хотя с момента аварии и образования ЛТСМ прошло более 30 лет, сведений об их состоянии, а тем более динамике разрушения, все еще недостаточно.

27 ноября 2016 г. «Арка» нового безопасного конфайнмента (НБК) была установлена в проектное

положение над объектом «Укрытие». Завершение создания НБК в 2018 г. обуславливает кардинальное изменение ряда факторов внешнего влияния на ЛТСМ: прекращение поступления осадков из окружающей среды в помещения объекта «Укрытие», смещение средней сезонной температуры в объекте в положительную сторону. В результате изменения температурно-влажностного режима происходит постепенное высыхание водных скоплений и понижение влажности воздуха в помещениях с ЛТСМ. Это, в свою очередь, может привести к значительному повышению концентрации радиоактивного аэрозоля в помещениях объекта «Укрытие» в результате вторичного пылеподъема с поверхностей ЛТСМ. Вместе с тем отсутствует однозначное мнение о том, как изменение температурно-влажностного режима повлияет на скорость деградации ЛТСМ. В этом

© А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. А. Одинцов, А. К. Калиновский, В. П. Ковальчук, Т. А. Кравчук, А. В. Филиппов, М. Н. Попов, 2018

плане важные исследования радиоактивного аэрозоля были проведены в 2014 г. в помещении 012/15 бассейна-барботера на отметке +3,00 объекта «Укрытие», куда протекла лава [2]. Пробы аэрозоля отбирали на трехслойные фильтры Петрянова. Установлено, что суммарная объемная активность бета-излучающих аэрозолей ( $\Sigma\beta$ )-носителей  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  и  $^{137}\text{Cs}$  колебалась в диапазоне 0,2–3 Бк/м<sup>3</sup>. При этом на долю  $^{137}\text{Cs}$  приходилось 30–40%. Соотношение концентраций  $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} \sim 150$ . Носителями радионуклидов были аэрозоли крупнее 1 мкм. Средние соотношения радионуклидов-продуктов аварии 4-го блока ЧАЭС в аэрозольных пробах и образцах ЛТСМ существенно различались. По мнению авторов публикации, это указывало на незначительную деструкцию ЛТСМ в помещении 012/15.

Результаты, изложенные в публикации [2], служат отправной точкой для дальнейших систематических исследований воздушной среды, в частности радиоактивных аэрозолей, в помещении 012/15 при фактических температурных, влажностных, воздухообменных, радиационных и других условиях, существующих в объекте «Укрытие» после надвигки «Арки». Это позволит получить информацию о возможных негативных тенденциях поведения ЛТСМ, ухудшающих радиационную обстановку внутри объекта.

Предлагаемая работа выполнена в помещении 012/15 в 2017–2018 гг.

### Описание помещения 012/15 и находящегося там скопления ЛТСМ

Помещение 012/15 расположено на высотной отметке +3,00 и входит в систему ББ-2 (рис. 1). Лава проникла сюда из расположенного выше помещения 210/7. Исследования помещений ББ-2 и находящихся в них ЛТСМ представлены в публикациях [3–6]. Скопление ЛТСМ находится между осями  $47^{+1000} - 48_{-1000}$  и рядами И<sub>-3000</sub> — К. Его северный край при сооружении в 1986 г. объекта «Укрытие» был залит бетоном, который поднимается над полом примерно на 0,7 м. Видимая холмистая поверхность скопления покрыта пемзообразным слоем толщиной около 0,1 м. ЛТСМ содержатся также в пяти паросбросных трубах диаметром 0,28 м, по которым лава поступала в помещение 012/15. В смежном помещении 012/14 ЛТСМ заполняют четыре паросбросные трубы, расположенные между осями 46 и 47 и рядами К и Л.



Рис. 1. Скопление ЛТСМ в помещении 012/15

В соответствии с экспертной оценкой [5] объем скопления составляет  $23 \pm 6 \text{ м}^3$ . При плотности коричневых ЛТСМ  $2,14 \pm 0,34 \text{ т/м}^3$  и содержании урана 9–13% его общее количество в скоплении около 3 т.

### Методы и средства отбора проб и измерений

Аэрозоли отбирались с помощью воздухоотборника типа RadeCo H810 в течение суток со скоростью, обеспечивающей за время экспозиции около 100 м<sup>3</sup> прокачиваемого воздуха. Использовали пакеты, состоящие из фильтров АФА РСР-20 и АФА РМР-20 площадью 20 см<sup>2</sup>. Пакет устанавливали в фильтродержателе, который закрепляли на входе пластмассовой трубы с внутренним диаметром 2 см и длиной около 4 м (рис. 2 и 3). Трубу через решетку устанавливали в проходе между помещениями 012/16 и 012/15. В итоге фильтродержатель располагался в пространстве помещения 012/15 примерно в 5 м от северного края скопления, т.е. условия пробоотбора были такие же, как и в 2014 г. [2]. После окончания сеанса пробоотбора трубу вытаскивали, пакеты демонтировали, фильтры осматривали на предмет внешних повреждений и в полиэтиленовых пакетах отправляли на анализ.

Измерение бета-активности проб выполняли на приборе РКБ4–1еМ через 4–5 сут, когда полностью распадались дочерние продукты радона и торона. В результате определяли содержание  $\Sigma\beta$ .

Последующие измерения радиоактивных веществ выполняли на гамма-спектрометрическом комплексе, состоящем из полупроводникового детектора GL2020R из сверхчистого германия с бериллиевым окном толщиной 500 мкм и 8192-канального амплитудного анализатора импульсов. Измерительный диапазон охватывает энергии от

10 до 1400 кэВ. Детектор имеет разрешение 0,57 и 1,2 кэВ для энергий гамма-квантов 122 кэВ (гамма-линия  $^{57}\text{Co}$ ) и 661,6 кэВ (гамма-линия  $^{137}\text{Cs}$ ) соответственно. По результатам измерений рассчитывали содержание в фильтрах  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  и  $^{241}\text{Am}$ .

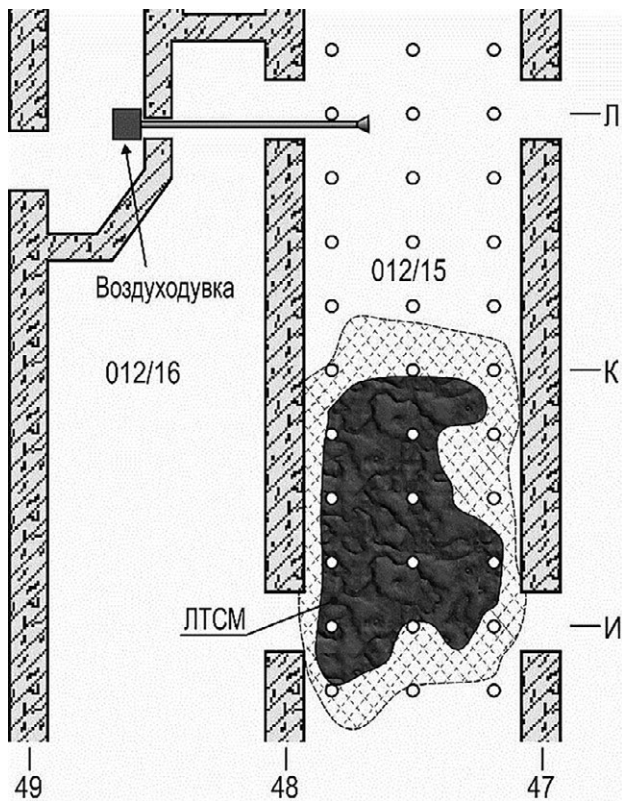


Рис. 2. Размещение средств отбора проб аэрозолей в помещениях 012/15 и 012/16

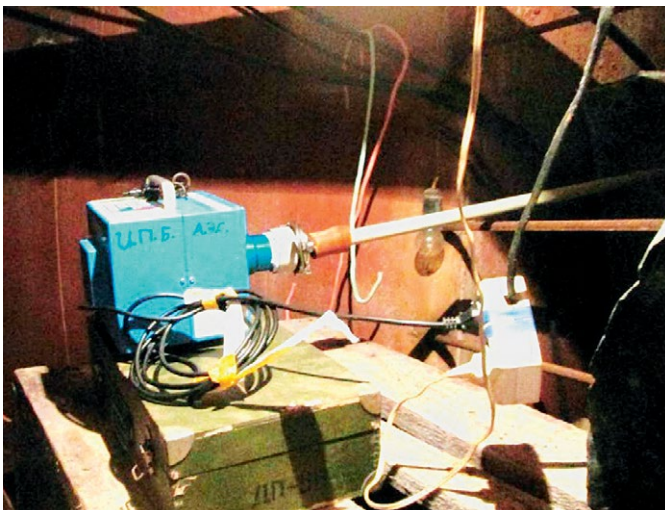


Рис. 3. Отбор проб аэрозоля из помещения 012/15

Две пробы аэрозоля, отобранные 20 апреля и 17 мая 2017 г., были еще проанализированы радиохимическими методами. После озонения проб, растворения зольных остатков и выделения элементов активность  $^{90}\text{Sr}$  определяли бета-радиометрическими измерениями, а  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  — с помощью альфа-спектрометрии.

В период проведения отборов проб аэрозоля (май 2017 г. — июль 2018 г.) осуществлялась непрерывная фиксация значений температуры и относительной влажности в помещении 012/15 посредством регистратора Elitech RC-4HA/C, установленного в координатах  $P^{+2500}/48_{-1000}$  (в 30 м от места пробоотбора). С марта по май 2017 г. контроль этих параметров выполнялся с помощью гигротермометра ТН-mini с выносным датчиком температуры-влажности.

### Результаты исследований

Результаты радиометрических и гамма-спектрометрических измерений проб аэрозолей, отобранных из помещения 012/15, приведены в табл. 1. За период март 2017 г. — сентябрь 2018 г. было отобрано 18 проб.

В период с марта 2017 г. по сентябрь 2018 г. наиболее высокие концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе помещения 012/15 зарегистрированы 22 февраля 2018 г., а наиболее низкие — 13 сентября 2017 г. За весь период наблюдения величина  $\Sigma\beta$  варьировала в диапазоне  $2,5 \cdot 10^{-2}$ – $4,5$  Бк/м<sup>3</sup>,  $^{137}\text{Cs}$  —  $1,0 \cdot 10^{-2}$ – $2,5$  Бк/м<sup>3</sup>. Таким образом, минимальные и максимальные значения активности как  $^{137}\text{Cs}$ , так и  $\Sigma\beta$  различались на два порядка величины. Из-за низких концентраций определить  $^{241}\text{Am}$  и  $^{154}\text{Eu}$  во всех отобранных пробах на полупроводниковом спектрометре не удалось. По результатам отдельных проб активность  $^{241}\text{Am}$  не превысила  $3,8 \cdot 10^{-2}$  Бк/м<sup>3</sup>, а  $^{154}\text{Eu}$  —  $5,6 \cdot 10^{-3}$  Бк/м<sup>3</sup>.

Усредненные значения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  за весь период наблюдения составили 0,29 Бк/м<sup>3</sup> и 0,49 Бк/м<sup>3</sup> соответственно. Для сравнения, в 2014 г. усредненное значение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  было 0,34 Бк/м<sup>3</sup>, а  $\Sigma\beta$  — 1,1 Бк/м<sup>3</sup> [2].

В 2017–2018 гг. среднее значение отношений концентраций  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,54$ . Из полученной величины отношения следует, что вклад  $^{137}\text{Cs}$  в сумму бета-излучающих нуклидов-продуктов Чернобыльской аварии составлял 54%. Причем в 2017 г. этот вклад составил 45%, а в 2018 г. — возрос до 64%. Для сравнения, в 2014 г. вклад  $^{137}\text{Cs}$  в сумму бета-излучающих нуклидов-продуктов Чернобыльской аварии составлял 37% [2].

**Таблица 1. Характеристики радиоактивных аэрозолей в помещении 012/15 объекта «Укрытие» в 2017–2018 гг.**

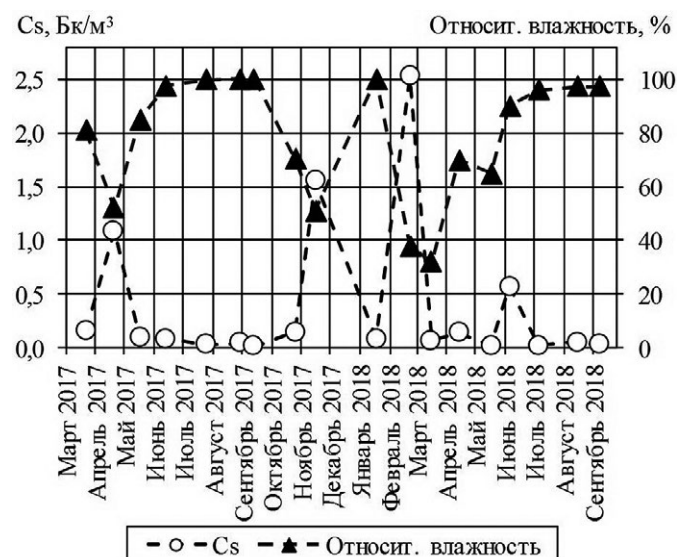
Дата отбора	Концентрация, Бк/м <sup>3</sup>				<sup>137</sup> Cs/Σβ
	<sup>137</sup> Cs	<sup>154</sup> Eu	<sup>241</sup> Am	Σβ	
2017 г.					
21–22.03	0,15	–	–	0,25	0,60
19–20.04	1,1	2,9 · 10 <sup>-4</sup>	3,9 · 10 <sup>-3</sup>	1,3	0,86
16–17.05	8,9 · 10 <sup>-2</sup>	3,0 · 10 <sup>-5</sup>	1,6 · 10 <sup>-3</sup>	0,20	0,45
13–19.06	8,1 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	0,30	0,27
24–25.07	3,0 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	8,5 · 10 <sup>-2</sup>	0,35
28–29.08	4,3 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	0,18	0,24
12–13.09	1,0 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	3,3 · 10 <sup>-2</sup>	0,30
25–26.10	0,15	–	–	0,47	0,32
15–16.11	6,1 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	9,5 · 10 <sup>-2</sup>	0,64
2018 г.					
17–18.01	8,8 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	0,21	0,42
21–22.02	2,5	5,6 · 10 <sup>-3</sup>	3,8 · 10 <sup>-2</sup>	4,5	0,56
15–16.03	6,7 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	7,4 · 10 <sup>-2</sup>	0,91
13–14.04	0,14	–	–	0,16	0,87
16–18.05*	1,8 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	2,6 · 10 <sup>-2</sup>	0,69
05–06.06	0,57	–	7,1 · 10 <sup>-3</sup>	0,61	0,93
05–06.07	2,2 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	6,5 · 10 <sup>-2</sup>	0,34
14–15.08	5,0 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	0,19	0,26
06–07.09	2,8 · 10 <sup>-2</sup>	–	–	3,7 · 10 <sup>-2</sup>	0,76

\*16–18.05.2018 аэрозоли отбирались в течение 2 сут (200 м<sup>3</sup> прокачанного воздуха).

Динамика объемной активности аэрозолей-носителей <sup>137</sup>Cs в воздухе помещения 012/15 и среднесуточные значения относительной влажности, наблюдаемые в периоды пробоотборов, представлены на рис. 4. Относительная влажность воздуха в помещении 012/7 в периоды пробоотборов варьировала от 50 до 97 %. Для сравнения, в период наблюдений в 2014 г. относительная влажность воздуха в помещении 012/15 варьировала от 30 до 90 %. Наиболее низкое значение относительной влажности зафиксировано в последней декаде февраля 2018 г. — 26 %. Высокая влажность (около 93–97 %) зафиксирована в августе–сентябре 2017 г. и в июне–июле 2018 г., когда среднесуточная температура в атмосфере окружающей среды достигала 24–27 °С.

Как следует из рис. 4, сравнительно малые значения влажности воздуха соответствовали в большинстве случаев высокой концентрации радиоактивного аэрозоля. Высокие значения влажности совпали по времени с низкими значениями концентрации радиоактивного аэрозоля.

В отличие от влажности среднесуточная температура воздуха в помещении 012/15 была относительно стабильная в течение всего периода наблюдений. Вслед за наступлением холодного периода года она опускалась от 12 до 7 °С, а в теплый период, когда происходил прогрев объекта «Укрытие», возрастала до 11–12 °С. Такой режим обеспечивался огромной массой бетонных и металлических сооружений объекта «Укрытие» и расположением помещения 012/15 на высотной отметке +3,00, где воздухообмен был незначительный.



**Рис. 4.** Объемная активность аэрозолей-носителей <sup>137</sup>Cs и относительная влажность в помещении 012/15 в 2017–2018 гг.

Пробы аэрозоля, отобранные 20 апреля и 17 мая 2017 г., а также 22 февраля и 6 июня 2018 г., после гамма-спектрометрических измерений были проанализированы радиохимическим методом. Полученные результаты с неопределенностью измерения ±(10–30) % приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Содержание (Бк, на пробу) <sup>90</sup>Sr и трансурановых элементов в аэрозоле помещения 012/15 в 2017–2018 гг.**

Дата отбора	<sup>90</sup> Sr	<sup>238</sup> Pu	<sup>239</sup> + <sup>240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am
20.04.2017	5,4	5,8 · 10 <sup>-2</sup>	0,14	0,24
17.05.2017	2,5	2,6 · 10 <sup>-2</sup>	5,5 · 10 <sup>-2</sup>	0,11
22.02.2018	99	0,69	1,4	3,8
06.06.2018	21	0,12	0,26	0,71

Таблица 3. Соотношения радионуклидов в пробах аэрозоля из помещения 012/15

Дата отбора	$^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$	$^{137}\text{Cs}/^{154}\text{Eu}$	$^{241}\text{Am}/^{238}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$	$^{90}\text{Sr}/^{241}\text{Am}$	$^{90}\text{Sr}/^{154}\text{Eu}$	$^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$
20.04.2017	280	3800	4,1	1,7	8,3	22	190	0,86
17.05.2017	82	–	4,2	2,0	–	23	–	0,45
22.02.2018	66	450	5,5	2,7	6,8	26	180	0,56
06.06.2018	80	–	5,9	2,7	–	29	–	0,93

Таблица 4. Соотношения радионуклидов в ЛТСМ из помещения 012/15

Дата	$^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$	$^{137}\text{Cs}/^{154}\text{Eu}$	$^{241}\text{Am}/^{238}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$	$^{90}\text{Sr}/^{241}\text{Am}$	$^{90}\text{Sr}/^{154}\text{Eu}$	$^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$
01.07.2017	10	81	3,6	1,7	7,7	23	190	0,23
01.07.2018	9,7	86	3,7	1,7	8,4	22	200	0,23

По данным, приведенным в табл. 1 и 2, рассчитаны соотношения радионуклидов в некоторых пробах аэрозоля из помещения 012/15 (табл. 3).

Для сопоставления радионуклидных составов аэрозоля и скопления ЛТСМ в помещении 012/15 в табл. 4 приведены соотношения радионуклидов в ЛТСМ по состоянию на середину 2017 г. и середину 2018 г. Данные соотношения получены из базы данных отделения ядерной и радиационной безопасности ИПБ АЭС НАН Украины и [1].

Анализ данных, приведенных в табл. 1, 3 и 4, показывает, что в аэрозолях величины отношений труднолетучих радиоизотопов соответствуют составу лавы в помещении. Расхождения величин связаны как с неопределенностью измерения, так и неоднородностью состава ЛТСМ в помещении 012/15. На последний фактор было обращено внимание еще в публикациях [6, 7].

На основании указанных выше совпадений величин отношений можно сделать заключение о том, что в помещении 012/15 вследствие эрозии поверхности ЛТСМ происходит генерация радиоактивного аэрозоля, который попадает в воздушную среду помещения. Этот механизм подтверждается результатами определения дисперсности аэрозольных частиц, приведенными в работе [2].

Вместе с тем сопоставление соотношений  $^{137}\text{Cs}/^{154}\text{Eu}$ ,  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$  и  $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$  в ЛТСМ с радионуклидным составом аэрозоля показывает, что на протяжении 2017–2018 гг. аэрозоль в помещении 012/15 был обогащен  $^{137}\text{Cs}$  относительно состава находящихся здесь ЛТСМ, что наблюдалось и ранее [2].

Поскольку ЛТСМ были обеднены радиоцезием в процессе образования лавы и ее растекания по по-

мещениям объекта «Укрытие», то источниками дополнительного цезия являются аэрозоли-носители  $^{137}\text{Cs}$ . Эти аэрозоли, вероятно, образуются в результате деструкции поверхностей, на которые ранее сорбировались частицы-носители конденсационного цезия.

#### Дисперсность радиоактивных аэрозолей

Для определения дисперсного состава радиоактивного аэрозоля в помещении 012/15 был выполнен отбор пробы на 5-каскадный импактор ИБФ-5К. Это устройство осуществляет сортировку аэрозольных частиц по пяти диапазонам аэродинамического диаметра (АД): <0,5 мкм; 0,5–1,2 мкм; 1,2–3,7 мкм; 3,7–8,5 мкм; 8,5–17,0 мкм. В качестве пятой ступени (<0,5 мкм) используется аэрозольный аспирационный фильтр, что позволяет более полно улавливать аэрозоли субмикронного размера. Следует отметить, что суммарные значения активности аэрозоля, осевшего на поверхности пластин каждой ступени импактора, как правило, ниже значений, полученных с помощью аспирационных устройств. Это обусловлено конструктивными особенностями самого импактора, ограничивающего попадание в него крупных частиц респираторной фракции аэрозоля (для ИБФ-5К от 17 мкм и выше). В интегральных же аспирационных устройствах на фильтрах осаждается аэрозоль гораздо более широкого диапазона аэродинамического диаметра.

Исходя из активности радионуклидов, на каскадах импактора был рассчитан активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД). Полученные результаты приведены в табл. 5. Как следует из таблицы, распределение радиоактивного аэрозоля по размерам частиц характеризуется бимодальностью. Так, носите-

**Таблица 5. Дисперсный состав радиоактивного аэрозоля-носителя  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  в помещении 012/15 (за период 09.10–17.10)**

Нуклид	Объемная активность в диапазонах АД, Бк/м <sup>3</sup>					Суммарная объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>	АМАД, мкм	$\Sigma\beta$ , Бк/м <sup>3</sup>
	17–8,5 мкм	8,5–3,7 мкм	3,7–1,2 мкм	1,2–0,5 мкм	<0,5 мкм			
$^{137}\text{Cs}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	1,0	$5,0 \cdot 10^{-1}$
$^{241}\text{Am}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	3,5	

лями  $^{241}\text{Am}$  были частицы с АМАД 3,5 мкм, а носителями  $^{137}\text{Cs}$  — аэрозоли более чем в три раза мельче (АМАД 1 мкм). Частицы, содержащие  $^{241}\text{Am}$ , на основании представленных выше результатов радиохимических исследований следует рассматривать как продукты деструкции ЛТСМ, находящихся в помещении 012/15.

Наличие  $^{137}\text{Cs}$  на всех каскадах импактора, избыточного, относительно его содержания в лаве (см. табл. 4), объясняется присутствием его индивидуальных аэрозольных носителей в воздухе помещения. Как указано выше, такой аэрозоль, вероятно, образуется в результате деструкции поверхностей, на которые ранее сорбировались частицы-носители конденсационного цезия.

Естественно, разделить моды невозможно, поэтому вклад продуктов деструкции ЛТСМ в распределение аэрозоля-носителя  $^{137}\text{Cs}$  по размерам частиц смещает АМАД последнего в сторону большей величины. Поэтому, исходя из полученной величины АМАД и утверждения о дисперсионном механизме образования частиц микронного класса [8], можно предполагать, что источники образования аэрозоля-носителя цезия находятся за пределами помещения 012/15.

Исследования, проведенные в 2014 г., показали, что носителями  $\Sigma\beta$  наиболее часто были частицы с АМАД от 0,8 до 4 мкм. Лишь в одной пробе АМАД превышал 8 мкм, а в шести был 0,4 мкм и менее [2]. Результаты исследований, выполненных в 2018 г., показывают, что дисперсный состав носителей радионуклидов-продуктов Чернобыльской аварии не претерпел существенных изменений.

### Выводы

1. На протяжении 2017–2018 гг. в помещении 012/15 объекта «Укрытие» отобраны и проанализированы 17 проб радиоактивных аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии, при этом величина  $\Sigma\beta$  варьировала в диапазоне  $2,5 \cdot 10^{-2}$ – $4,5$  Бк/м<sup>3</sup>,

$^{137}\text{Cs}$  —  $1,0 \cdot 10^{-2}$ – $2,5$  Бк/м<sup>3</sup>, активность  $^{241}\text{Am}$  не превышала  $3,8 \cdot 10^{-2}$  Бк/м<sup>3</sup>, а  $^{154}\text{Eu}$  —  $5,6 \cdot 10^{-3}$  Бк/м<sup>3</sup>. Объемная активность аэрозоля по  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в помещении в 2017–2018 гг. примерно соответствует значениям, полученным при наблюдениях в 2014 г.

2. Соотношения труднолетучих радионуклидов в пробах аэрозоля воздуха и в скоплении ЛТСМ в помещении 012/15 имеют совпадающие значения, что свидетельствует о разрушении лавы и спонтанном переходе продуктов деструкции в аэрозольное состояние.

3. На протяжении 2017–2018 гг. аэрозоль в помещении 012/15 был обогащен  $^{137}\text{Cs}$  относительно состава находящихся здесь ЛТСМ, что наблюдалось и ранее. Источниками дополнительного цезия являются аэрозоли-носители  $^{137}\text{Cs}$ , которые, вероятно, образуются в результате деструкции поверхностей, на которые ранее сорбировались частицы-носители конденсационного цезия.

### Список использованной литературы

1. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» / Р. Э. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой и др. — М.: Наука, 2010. — 240 с.
2. Огородников Б. И. Характеристики радиоактивных аэрозолей близ скопления ЛТСМ в помещении 012/15 объекта «Укрытие» / Б. И. Огородников, В. Е. Хан, В. П. Ковальчук // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2015. — Вып. 25. — С. 125–138.
3. Киселев А. Н. Результаты дополнительных исследований мест скоплений ЛТСМ на 4-м блоке ЧАЭС / А. Н. Киселев, А. И. Сурин, К. П. Чечеров. — М., 1994. — 59 с. — (Препринт / ИАЭ им. И. В. Курчатова; ИАЭ-5783/3).
4. Боровой А. А. Новые оценки количества ядерного топлива, находящегося на нижних отметках объекта «Укрытие» / А. А. Боровой, А. С. Лагуненко, Э. М. Пазухин // Проблемы Чернобиля. — 2000. — Вып. 6. — С. 13–16.

5. Лавообразные топливосодержащие материалы в бассейне-барботере и парораспределительном коридоре 4-го блока Чернобыльской АЭС / А. А. Боровой, А. А. Ключников, В. А. Краснов и др. // Проблемы Чернобиля. — 2001 — Вып. 7. — С. 181–193.
6. Пазухин Э. М. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования / Э. М. Пазухин // Радиохимия. — 1994. — Т. 36. — № 2. — С. 97–142.
7. Огородников Б. И. Аэрозоли — свидетели разрушения лавообразных топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» / Б. И. Огородников, В. Е. Хан, В. П. Ковальчук // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чернобиля. — 2013. — Вып. 20. — С. 94–106.
8. Фукс Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 353 с.

**О. С. Лагуненко, В. Е. Хан, О. О. Одінцов,  
О. К. Калиновський, В. П. Ковальчук,  
Т. А. Кравчук, О. В. Філіппов, М. М. Попов**

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

### **Радиоактивные аэрозоли біля скупчення лавоподібних паливовмісних матеріалів у приміщенні 012/15 об'єкта «Укриття» у 2017–2018 рр.**

Представлено радіонуклідний склад і об'ємні активності аерозолів та їхніх випадань у приміщенні 012/15 об'єкта «Укриття» у 2017–2018 рр. Проби відбирали в 5 м від північного краю скупчення лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ). Установлено, що сумарна концентрація аерозолів-носіїв  $^{90}\text{Sr}$  +  $^{90}\text{Y}$  і  $^{137}\text{Cs}$  коливалася в діапазоні 0,025–4,5 Бк/м<sup>3</sup>. При цьому на частку  $^{137}\text{Cs}$  припадало 54%. Гамма-спектрометричні вимірювання і радіохімічні аналізи показали, що середні співвідношення важколетких радіонуклідів-продуктів аварії 4-го блока ЧАЕС в аерозольних пробах відповідають складу ЛПВМ у приміщенні. Це свідчить про те, що відбувається деструкція ЛПВМ і частковий перехід матеріалів в аерозольний стан.

*Ключові слова:* об'єкт «Укриття», лавоподібні паливовмісні матеріали, аерозолі, об'ємна активність, співвідношення радіонуклідів.

**O. S. Lagunenکو, V. E. Khan, O. O. Odintsov,  
O. K. Kalinovskiy, V. P. Kovalchuk,  
T. A. Kravchuk, O. V. Filippov, M. M. Popov**

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

### **Radioactive Aerosols near Lava-Like Fuel-Containing Materials in Premise 012/15 of the Shelter Object in 2017–2018**

Data on the radionuclide composition, volume activity and dispersity of radioactive aerosols taken in 2017–2018 in room 012/15 of the Shelter object, into which the lava-like fuel-containing materials (LFCM) flew after the accident, are presented. Relative air humidity in the room 012/15, depending on a year season, was varying from 50 to 97%. During a day, sometimes it was changing at 5–10%. High humidity (about 93–97 °C) was registered in summer period, when mean daily temperature in the environmental air reached 24–27 °C. In majority of cases, relatively small value of air humidity corresponded to high concentration of radioactive aerosols. High humidity values coincided in time with low values of radioactive aerosol concentrations. Mean daily temperature of room 012/15 air was relatively stable during all survey period. After cold period of year came, it dropped from 12 to 7 °C, and in warm period, when the Shelter object was heated, it grew up to 11–12 °C. Such a mode was provided by a huge mass of concrete and metal structures of the Shelter object, and due to the fact that the room 012/15 is located at height elevation +3.00, where air exchange is negligible. It was stated that concentration of beta-radiating aerosol-carriers ( $^{90}\text{Sr}$  +  $^{90}\text{Y}$  and  $^{137}\text{Cs}$ ) was fluctuating with the range 0.025–4.5 Bq/m<sup>3</sup>. Besides,  $^{137}\text{Cs}$  share made 54%. Gamma-spectrometry measurements and radiochemical analyses have demonstrated that average ratios of semi-volatile radionuclide-products of Chornobyl Nuclear Power Plant Unit 4 accident in aerosol samples comply with LFCM content in the Shelter object rooms. It testifies that LFCM destruction and particular transfer of materials in aerosol state occurs. Their carriers were the aerosols with activity median aerodynamic diameter (AMAD) larger than 4 μm. During 2017–2018, aerosols in room 012/15 were enriched by  $^{137}\text{Cs}$  relatively to LFCM located in this place, as it was observed earlier. The sources of additional cesium are  $^{137}\text{Cs}$  aerosol-carriers producible, apparently, as result of destruction of surfaces, on which, particles-carriers of condensation cesium were sorbed earlier. Their carriers were the aerosols with AMAD 1 μm.

*Keywords:* Shelter object, aerosols, volume activity, lava-like fuel-containing materials, radionuclide ratios, dispersity.

### References

1. Arutyunyan R. E., Bolshov L. A., Borovoi A. A., Velikhov Ye. P., Klyuchnikov A. A. (2010). *Yadernoe toplivo v obekte «Ukrytie»* [Nuclear fuel in the Shelter object]. Moscow: Nauka, 240 p. (in Russ.)
2. Ogorodnikov B. I., Khan V. E., Kovalchuk V. P. (2015). Kharakteristiki radioaktivnykh aerorozley bliz skopleniya LTSM v pomeshchenii 012/15 obekta «Ukrytie» [Characteristics of radioactive aerosols in 2014 near lava-like fuel-contained materials in premise 012/15 of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 25, pp. 125–138. (in Russ.)
3. Kiselev A. N., Surin A. I., Checherov K. P. (1994). *Rezultaty dopolnitelnykh issledovaniy mest skopleniy LTSM na 4-m bloke ChAES* [The results of additional studies of the locations of LTSM clusters at the 4th unit of the Chernobyl Nuclear Power Plant]. Moscow: I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, 59 p. (in Russ.)
4. Borovoy A. A., Lagunencko A. S., Pazukhin E. M. (2000). Novye otsenki kolichestva yadernogo topliva, nakhodyashchegosya na nizhnikh otmetkakh obekta «Ukrytie» [The new estimations of the nuclear fuel quantity allocated into the Shelter object low floor levels]. *Problemy Chornobylya* [Problems of Chornobyl], vol. 6, pp. 13–16. (in Russ.)
5. Borovoy A. A., Klyuchnikov A. A., Krasnov V. A., Lagunencko A. S., Pazukhin E. M., Gavrilov S. L. (2001). Lavoobraznye toplivosoderzhashchie materialy v bassejne-barbotere i paroraspredeletelnom koridore 4-go bloka Chernobylskoy AES [Lava-like fuel-containing materials in the pool-barboter and the steam-distributing corridor of the 4th block of the Chernobyl NPP]. *Problemy Chornobylya* [Problems of Chornobyl], vol. 7, pp. 181–193. (in Russ.)
6. Pazukhin E. M. (1994). Lava fuel containing materials of the Chernobyl NPP unit 4: topography, physical-chemical properties, scenario of formation. *Radiohimiya* [Radiochemistry], vol. 36, no. 2, pp. 97–142. (in Russ.)
7. Ogorodnikov B. I., Khan V. E., Kovalchuk V. P. (2013). Aerorozli — svideteli razrusheniya lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov v obekte «Ukrytie» [Aerosols as evidences of destruction in the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 20, pp. 94–106. (in Russ.)
8. Fuks N. A. (1955). *Mekhanika aerorozley* [Mechanics of aerosols]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 353 p. (in Russ.)

Надійшла 08.11.2018

Received 08.11.2018