

Б. И. Огородников^{1,2}, В. Е. Хан¹, В. П. Ковальчук¹, А. С. Лагуненко¹, С. А. Довыдьков¹

¹Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина

²«Физико-химический институт им. Л. Я. Карпова», пер. Обуха, д. 3-1/12, стр. 6, Москва, 105064, Россия

СОСТАВ И КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ОКОЛО СКОПЛЕНИЯ ЛАВООБРАЗНЫХ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ПОМЕЩЕНИИ 210/7 ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Представлены состав, концентрации и дисперсность радиоактивных аэрозолей в помещении 210/7 объекта «Укрытие» в 2013 г. Пробы отбирали на трехслойные фильтры Петрянова около юго-западного края лавообразных топливосодержащих материалов. Установлено, что суммарная концентрация аэрозолей-носителей $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ и ^{137}Cs колебалась в диапазоне 0,2 – 180 Бк/м³. При этом на долю ^{137}Cs приходилось до 50 %. Отношение концентраций $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ находилось в диапазоне 58 - 270, а $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ – в диапазоне 5,6 – 8,3. Носителями этих радионуклидов были аэрозоли крупнее 1 мкм. С помощью сейсмической радоновой станции СРС-05 определены содержания в воздухе радона и торона. Максимальная объемная активность радона достигала 100 Бк/м³. Концентрации ^{212}Pb – дочернего продукта торона – колебались от 0,5 до 36 Бк/м³. Носителями дочерних продуктов радона и торона были преимущественно частицы с активностным медианным аэродинамическим диаметром около 0,1 мкм.

Ключевые слова: объект «Укрытие», лавообразные топливосодержащие материалы, радиоактивные аэрозоли, концентрация, дисперсность, радон, торон, дочерние продукты радона и торона.

Введение

Лавообразные топливосодержащие материалы (ЛТСМ), образовавшиеся в результате взрыва реактора 4-го блока ЧАЭС весной 1986 г., являются источником ядерной, радиационной и радиоэкологической опасности. В результате растекания лавы радиоактивные материалы оказались во многих помещениях, в том числе в подапаратном помещении (на высотной отметке +9 м), в парораспределительном коридоре (на +6 м), в бассейне-барботере (на +3 и 0 м) и в других местах [1].

Хотя с момента аварии и образования ЛТСМ прошло более четверти века, сведений об их состоянии, а тем более разрушении, крайне мало [2]. Результаты первых исследований относятся к марту 1990 г. [3], когда с «языка» лавы у юго-западного входа в помещение 210/7 были взяты спиртовой мазок, мазок на беззольный фильтр и проба аэрозолей при прокачке воздуха через фильтр Петрянова. Измерения мазков свидетельствовали об обеднении «языка» цезием в три раза и рутением в 20 раз. Воздушный фильтр, наоборот, имел более чем полуторное обогащение изотопами цезия относительно среднетопливного состава. С тех пор аэрозольных исследований в помещении 210/7 и смежном с ним 210/6 не проводили.

За период 1995 – 2013 гг. были выполнены наблюдения за аэрозольной обстановкой еще в ряде помещений, где находятся ЛТСМ.

В 1995 г. аэрозоли отобрали на фильтр в помещении 305/2, откуда лава поступала в помещение 210/7 [4]. Около 70 % частиц были сферическими и имели диаметры 1 – 3 мкм. При этом присутствовали отдельные частицы неправильной формы размером до 50 мкм.

В 2008 – 2009 гг. под руководством А. Э. Меленевского проведены пробоотборы аэрозолей в подапаратных помещениях 304/3 и 305/2. Воздух из этих помещений прокачивали через трубы, на концах которых были установлены аналитические фильтры [5]. По результатам пробоотборов из помещения 304/3 в 2008 – 2009 гг. авторы [6] констатировали, что «отрывавшиеся от поверхности топливные частицы были связаны силами аутогезии с толстым слоем находящихся на поверхности ЛТСМ подобных им логнормально распределенных по размерам частиц с медианным аэродинамическим диаметром около 3,0 мкм». Обобщая результаты дальнейших исследований [7], авторы резюмировали, что «...за период 2009 – 2011 гг. максимум радиоактивности в распределении альфа-активных аэрозолей по аэродинамическим диаметрам сместился с интервала 2,0 – 10 мкм до 0,6 – 2 мкм». С осени 2011 г. исследования в помещении 304/3 были продолжены с использованием для подъема пыли с поверхности ЛТСМ воздушного потока, вырывавшегося из сопел со скоростью 41 м/с. В выводах по результатам этой работы [8] сказано, что «...относительная концентрация мелких (АД менее 0,8 мкм) частиц с альфа-активными радионуклидами росла с увеличением времени накопления пыли, а крупных частиц падала».

© Б. И. Огородников, В. Е. Хан, В. П. Ковальчук,
А. С. Лагуненко, С. А. Довыдьков, 2015

К сожалению, в публикациях [5 – 8] не приведены содержания и соотношения основных радионуклидов (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{155}Eu) в отобранных аэрозолях. Если бы они оказались такими же, как в ЛТСМ, то это свидетельствовало бы о деструкции лавы.

В этом плане важное исследование было проведено в 2011 г. в помещении 012/7, где находится скопление ЛТСМ на самой низкой высотной отметке объекта «Укрытие» [9]. Пробы аэрозолей отбирали на трехслойные фильтры Петрянова в 15 – 20 см от южного края ЛТСМ. Установлено, что суммарная концентрация аэрозолей-носителей $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ и ^{137}Cs колебалась в диапазоне 5 – 100 Бк/м³. При этом на долю ^{137}Cs приходилось не более 10 – 20 %. Отношение концентраций $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ было близко к 15. Носителями радионуклидов были аэрозоли крупнее 1 мкм. Состав и отношения радионуклидов-продуктов аварии 4-го блока ЧАЭС в аэрозольных пробах и образцах ЛТСМ оказались практически идентичными. Это свидетельствовало о деструкции ЛТСМ и его частичном переходе в аэрозольное состояние.

С целью дальнейших наблюдений за состоянием ЛТСМ с помощью контроля аэрозольной обстановки в 2013 г. были выполнены пробоотборы в помещении 210/7 парораспределительного коридора, где находится одно из скоплений ЛТСМ вертикального лавового потока [10]. Результаты этих исследований представлены ниже.

Описание помещений парораспределительного коридора и находящихся в них скоплений ЛТСМ

Расположение и описание помещений

Парораспределительный коридор (ПРК) расположен на нижних высотных отметках объекта «Укрытие». В него входят помещения 210/5, 210/6, 210/7, 210/8 (рис. 1). В плане его координаты: Ж/45 – Ж/49 и П/49 – П/45. Пол ПРК находится на отметке +6 м, потолок – на +8 м.

Помещение 210/5 расположено под выгородкой подреакторного пространства (под помещением 307/2) и связано с ним тремя паросбросными клапанами 1, 2, 3 (см. рис. 1). Помещение 210/6 находится под восточной частью помещения 305/2 (И/46 – И/47 и Н/47 – Н/46) и связано с ним четырьмя паросбросными клапанами (1, 2 – северные; 3, 4 – южные). Помещение 210/7 расположено под западной частью помещения 305/2 (И/47 – И/48 и Н/48 – Н/47) и связано с ним также четырьмя паросбросными клапанами.

Площадь помещений ПРК около 630 м². Свободный объем помещений за вычетом объема находящихся в нем металлоконструкций (конденсаторные батареи, паросбросные клапаны и др.), «свежего» бетона, проникшего в ПРК в 1986 г., и ЛТСМ составляет около 700 м³.

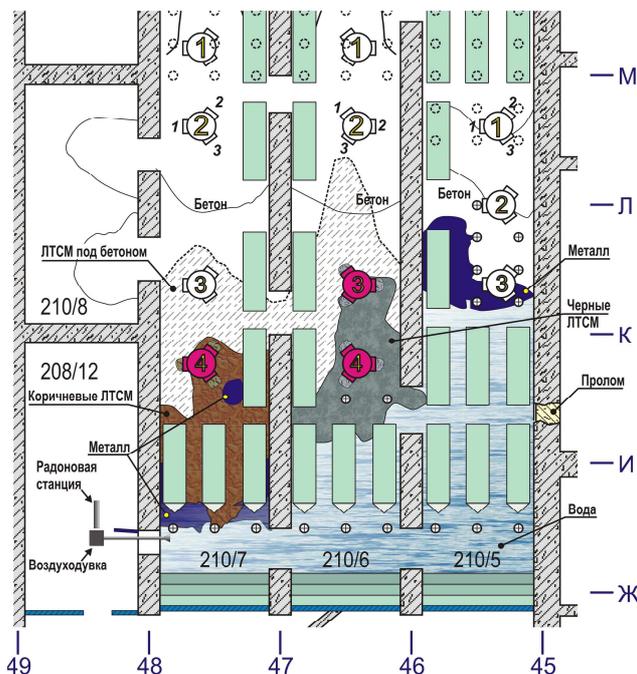


Рис.1. Южная часть ПРК: расположение скоплений ЛТСМ и место отбора аэрозолей.



Рис. 2. Южная часть ПРК в рядах Ж – И, залитая водой. Вдали видна дверь, на пороге которой размещали пробоотборную трубу с фильтрами Петрянова.

Пол южной части помещений 210/5, 210/6 и 210/7 залит водой. Ее глубина в 2013 г. в рядах И – Ж составляла 10 – 15 см (рис. 2). Вследствие этого южные края скопления ЛТСМ, расположенные в ПРК, постоянно контактируют с водой.

Помещение 210/8, в котором размещали пробоотборную аппаратуру, всегда сухое.

ЛТСМ в помещении 210/7

ЛТСМ попали в помещение 210/7 через 4-й паросбросный клапан из юго-западной части помещения 305/2. Через остальные три клапана в помещение поступил "свежий" бетон, залитый при строительстве объекта "Укрытие" в 1986 г. (см. рис. 1).



Рис. 3. Коричневые ЛТСМ в южной части помещения 210/7.

Открытолежащие ЛТСМ расположены между рядами И₋₂₅₀₀ – К. Толщина их слоя от ряда К до ряда И₊₁₉₀₀ (северные торцы конденсаторных батарей) достигает 0,5 м и южнее (И₋₂₅₀₀) между боковыми стенками конденсаторных батарей понижается примерно до уровня пола. Это юго-западный край ЛТСМ. От ряда И₊₂₀₀₀ вдоль западной стены до клапана 3 лава залита "свежим" бетоном.

Площадь горизонтальной проекции поверхности открытолежащих ЛТСМ составляет по экспертной оценке $17 \pm 2 \text{ м}^2$.

О состоянии поверхности ЛТСМ можно судить по фотографии на рис. 3. Как показывают наблюдения, в основном это сплошной массив лавы с небольшими включениями.

Общая площадь (открытые и закрытые поверхности) скопления ЛТСМ в помещении 210/7 составляет $82 \pm 17 \text{ м}^2$ [11].

ЛТСМ в помещении 210/6

В помещение 210/6 ЛТСМ попали через 3-й и 4-й паросбросные клапаны из юго-восточной части помещения 305/2.

Открытолежащие ЛТСМ расположены между рядами И – К₊₃₀₀₀ (см. рис. 1). Толщина их слоя у 2-го патрубка 3-го клапана достигает 0,6 м, в районе 4-го клапана – 0,4 – 0,5 м, в районе ряда И – около 0,1 м. Поскольку торцы телескопических паросбросных труб, расположенных вокруг 4-го клапана, выступают над поверхностью ЛТСМ на высоту 0,1 – 0,15 м, то толщина их слоя между 4-м клапаном и рядом И составляет 0,2 – 0,25 м. В районе 4-го клапана зафиксирован также переплавленный и застывший металл.



Рис. 4. Помещение 210/6: 4-й клапан, 2-й патрубок. Крупные фрагменты черных ЛТСМ.

От ряда К до ряда К₊₂₅₀₀ (3-й клапан) вдоль конденсаторных батарей, стоящих у западной стены, ЛТСМ залиты "свежим" бетоном.

Как показывают наблюдения, в скоплении черных ЛТСМ присутствует значительное количество отдельных крупных фрагментов, размеры которых достигают 20 см (рис. 4). Матовая керамика пронизана крупными газовыми пустотами.

Площадь горизонтальной проекции поверхности открыто лежащих ЛТСМ помещения 210/6 составляет по экспертной оценке $20 \pm 3 \text{ м}^2$, а общая площадь скопления (открытые и закрытые поверхности) – $82 \pm 17 \text{ м}^2$ [11].

Оценка количества топлива в помещениях ПРК

Результаты экспертных оценок [12, 13] количества ядерного топлива в помещениях ПРК приведены в табл. 1.

Таблица 1. Содержание ТСМ в ПРК

Помещение	Общая характеристика ТСМ	Объем ТСМ, м ³	Количество топлива (U), т
210/5	Застывший металл на полу помещения	–	–
210/6	ЛТСМ на полу помещения и в паросбросных клапанах, в основном черная керамика. Застывший металл	17 – 30	2,4 – 6,2
210/7	ЛТСМ на полу помещения и в паросбросном клапане, в основном коричневая керамика. Застывший металл	13 – 28	3,7 – 10,4
Всего		до 58	12 ± 6

Радиационная обстановка в зоне проведения работ

Перед началом исследований в помещении 210/8 и в дверном проеме, ведущем отсюда в помещение 210/7, были измерены мощности экспозиционных доз гамма-излучения (МЭД). Установлено, что около юго-западного языка ЛТСМ, где в дальнейшем размещали пробоотборные фильтры, МЭД составляла около 10 Р/ч. Около дверного проема МЭД была в пять раз меньше. Так сказывалось экранирование бетонной стеной толщиной около 1 м. В помещении 210/8 МЭД составляла от 0,1 до 0,25 Р/ч. Доступ к месту работ осуществлялся из помещения 207/4. За несколько дней до начала работ в помещении 210/8 было проведено пылеподавление.

Методы и средства отбора проб и измерений

Аэрозоли отбирали воздуходувкой Н810 RadeCo со скоростью около 100 л/мин. Использовали пакеты фильтров Петрянова площадью 20 см², состоящие из слоев: ФПА-70-0,12, ФПА-70-0,2, АФА РСР-20 и АФА РМА-20. Пакет устанавливали в пластмассовом стандартном фильтродержателе, который закрепляли на входе пластмассовой трубы с внутренним диаметром 2 см и длиной около 2,5 м. Трубу укладывали в дверном проеме так, чтобы фильтродержатель был примерно на 30 см заглублен в пространство помещения 210/7. Другой конец трубы подсоединяли к патрубку воздуходувки, находящейся в помещении 208/12 (см. рис. 1 и 5). Воздух прокачивали около 2 ч. Затем фильтры демонтировали, осматривали и в бумажных конвертах отправляли на анализ.

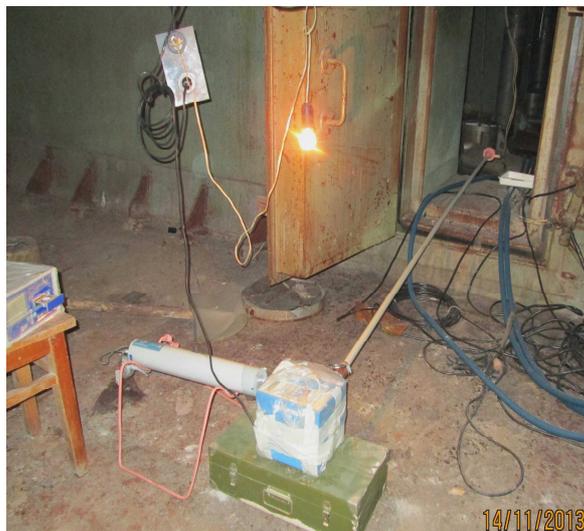


Рис. 5. Расположение воздуходувки, радоновой станции СРС-05 и прибора «Альфарад плюс А» в помещении 210/8 при отборе аэрозолей из помещения 210/7 в южной части ПРК.

Концентрации радона и торона измеряли сейсмической радоновой станцией СРС-05 «Торон-1» [14], которую размещали вплотную к воронке выхлопного патрубка воздуходувки Н810 на высоте примерно 0,3 м от пола (см. рис. 5). После окончания отбора аэрозолей станцию СРС-05 вынимали из воронки и продолжали прокачивать воздух помещения 210/8. Таким образом, радиоактивные аэрозоли в помещении 210/7 контролировали раз в сутки, а динамику концентраций радона и торона в течение 4 – 5 сут.

С мая 2013 г. радон и его дочерние продукты начали контролировать еще прибором «Альфарад плюс А» [15]. Его размещали рядом со станцией СРС-05 и включали одновременно с воздуходувкой Н810. Через 5 мин прибор автоматически отключался и переходил в режим измерения дочерних продуктов радона, накопившихся на его фильтре АФА РСР-3. Этот прибор работал только раз в сутки.

Для сопоставления радионуклидного состава и концентрации аэрозолей в помещении 210/7 и в выбросе из объекта «Укрытие» синхронно отбирали пробы в системе «Байпас», через которую воздушные потоки из развала 4-го блока по вентиляционной трубе ВТ-2 поступают в свободную атмосферу. Для пробоотбора использовали такие же, как в помещении 210/7, пакеты фильтров Петрянова и воздуходувку Н810. Полученные результаты представлены в [16].

Анализ радиоактивных веществ

Через 10 – 15 мин после окончания прокачки воздуха фильтры поступали в помещение Г328 объекта «Укрытие» для радиометрии. Пакеты разделяли на три слоя согласно их исходному цвету:

голубой (ФПА-70-0,12), розовый (ФПА-70-0,2) и белый (АФА РСР-20 и АФА РМА-20). Использование двух фильтров в белом слое обеспечивало практически полное улавливание субмикронных аэрозолей. При осмотре фильтра АФА РСР-20 оценивали изменение его окраски (оттенки серого цвета), что качественно характеризовало количество поступившей на него пыли.

Измерение бета-активности фильтров выполняли на приборе КРК-1. Слои поочередно измеряли при длительности экспозиции 100 с. Если скорость счета была выше 100 имп./с, то продолжительность экспозиции снижалась до 10 с. Общее время анализов составляло 60 – 90 мин. По кривым распада рассчитывали количество дочерних продуктов радона и торона (ДПР) на момент окончания прокачки воздуха. Через 4 – 5 сут, когда полностью распадались ДПР, измерения повторяли. При этом каждый слой экспонировали, как правило, 1000 с. В результате определяли суммарное содержание ($\Sigma\beta$) аэрозолей-носителей $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{137}Cs , а также ^{212}Pb – одного из дочерних продуктов торона с периодом полураспада 10,6 ч.

Для определения количества ^{137}Cs все фильтрующие пакеты измеряли на сцинтилляционном гамма-спектрометре. Некоторые наиболее активные пробы для выявления не только ^{137}Cs , но и ^{154}Eu и ^{241}Am , измеряли еще на гамма-спектрометрическом комплексе с полупроводниковым детектором GL2020R из сверхчистого германия. По результатам измерений рассчитывали объемные активности.

Контроль воздушной среды

Температуру, относительную влажность воздуха и его давление в помещениях 210/7 и 210/8 контролировали по показаниям датчиков станции СРС-0,5 и прибора «Альфарад плюс А». Они фиксировались автоматически при каждом цикле прокачки воздуха, т.е. через каждые 10 мин на станции СРС-05 при режиме «Торон» и за 5 мин при работе «Альфарад плюс А».

Кроме того, скорости и направления воздушных потоков периодически измеряли в дверном проеме помещений 210/7 и 210/8 и по маршруту следования из помещения 207/4 в помещение 210/8. Использовали термоанемометр ТАМ-1 с диапазоном измерения 0,1 – 2 м/с.

Метеопараметры во внешней среде контролировали по показаниям (обновление через 5 мин) автоматического метеопункта, размещенного в 500 м южнее объекта «Укрытие» на площадке ОРУ-750, и метеостанции «Чернобыль», находящейся в 18 км на юго-восток от ЧАЭС, где замеры проводят каждые 3 ч. Иногда эти данные дополняли собственными наблюдениями (туман, высота нижней кромки облачности, осадки, глубина снежного покрова и т.д.).

Результаты и обсуждение

Состояние воздушной среды

На рис. 6 показаны температура и относительная влажность воздуха в помещении 210/7 при отборе проб аэрозолей. Как видно, наиболее низкая температура 10 – 11 °С наблюдалась в марте. Затем воздух стал постепенно прогреваться. Максимальная температура 17 – 18 °С была зарегистрирована в сентябре. На этом уровне она держалась почти два месяца. В конце ноября – начале декабря температура стала понижаться. Суточные колебания температуры не наблюдались. Таким образом, различие между температурами в теплый и холодный периоды составляло всего 7 °С. Такая динамика, сдвинутая примерно на два месяца относительно внешней среды, объясняется огромной массой бетонных и металлических сооружений объекта «Укрытие» и расположением помещения 210/7 на высотной отметке +6 м, т.е. практически в центре подвала реакторного блока, где воздухообмен с внешней средой незначительный.

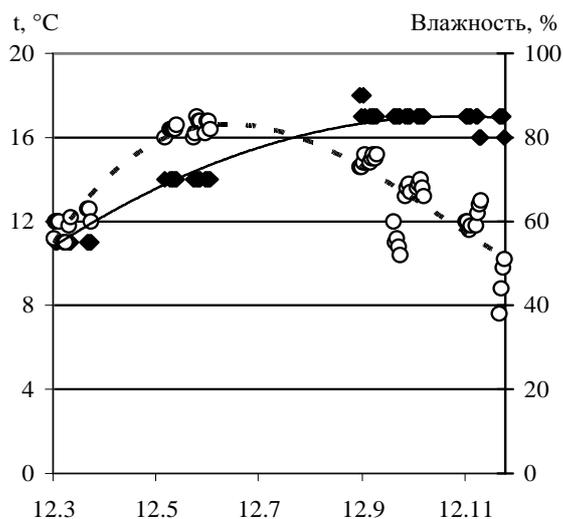


Рис. 6. Температура (◆) и относительная влажность (○) воздуха в помещении 210/7 при отборе проб аэрозолей в 2013 г.

Температура воздуха во внешней среде за период наблюдений колебалась существенно. Наиболее низкая -11,6 °С на метеостанции «Чернобыль» была ночью 17 марта, а наиболее высокие 28,1 и 28,6 °С – после полудня 20 мая и 10 июня соответственно. Разница температур снаружи и внутри достигала иногда 20 – 25 °С. Наибольшее различие приходилось на холодное время года.

Наиболее низкую относительную влажность воздуха (40 – 50 %) наблюдали в начале декабря и 55 – 60 % – в марте. Максимальная влажность 80 – 85 % зафиксирована в мае – июне, когда среднесуточная температура в атмосфере составляла около 20 °С

Динамика и величины температуры и относительной влажности воздуха в помещении 210/7 в 2013 г. оказались очень близки к результатам в помещении 012/7 в 2011 г. [9].

Воздухообмен в месте расположения ЛТСМ в помещении 210/7 был слабый. Об этом свидетельствуют измерения скоростей (термоанемометром) и направлений потоков (с помощью «колдунчиков») в дверных проемах между помещением 207/4 (площадь проема ~ 2 м²) и помещением 210/8 (~ 1,5 м²), а также между помещениями 210/8 и 210/7 (~ 1 м²). В последнем проеме в большинстве случаев движения воздуха не было, а максимальные скорости не превышали 0,3 м/с.

Осмотры слоев фильтров после окончания пробоотборов показали, что изменение их цвета вследствие накопления осадка происходило редко. Среди 61 пробы лишь в 14 на третьем слое (АФА РСП-20) образовался слегка серый налет. Практически все эти случаи пришлось на осенний период исследований (девять проб в октябре, две – в декабре и по одной пробе в сентябре, ноябре и апреле). Ни разу не было черного или серого цвета, что отмечалось ранее при проведении исследований в помещении 012/7 на высотной отметке 0 м в 2011 г. [9]. Цвет фильтрующих слоев не изменился даже 2 декабря 2013 г., когда около ЧАЭС максимальные порывы ветра достигали 17 м/с. Таким образом, воздухообмен в помещении 210/7 низкий, и воздух из внешней среды поступает сюда в малых количествах.

Концентрация аэрозолей-носителей продуктов аварии

Результаты измерений отобранных аэрозолей на радиометре КРК-1 приведены в табл. 2 и на рис. 7. Всего за 2013 г. была исследована 61 проба.

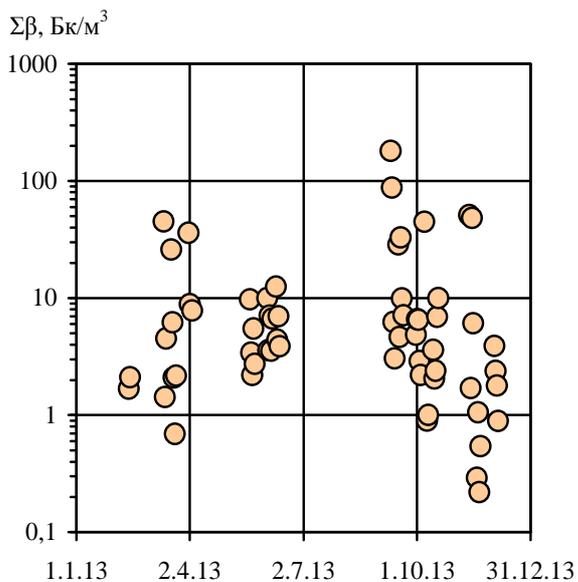


Рис. 7. Объемная активность аэрозолей-носителей суммы бета-излучающих нуклидов в помещении 210/7.

Как видно из представленных данных, величины $\Sigma\beta$ варьировали в диапазоне 0,2 – 180 Бк/м³. Таким образом, минимальные и максимальные значения различались на три порядка величины. Однако в большинстве проб (74 %) $\Sigma\beta$ составляла 1 – 10 Бк/м³. Всего 6 проб имели активность менее 1 Бк/м³ и 10 проб – более 10 Бк/м³.

Максимальная активность была зафиксирована 10 сентября, минимальная – 20 ноября. Вряд ли на радиоактивность этих проб повлияли метеорологические условия, которые были вполне умеренные: 10 сентября наблюдалась сухая штилевая погода с переменной облачностью и температурой 15 °С, а 20 ноября было пасмурно, небольшая морось при температуре 3 °С и юго-восточном ветре 2 – 3 м/с.

Интересно, что в пробе, отобранной на следующий день после 10 сентября, $\Sigma\beta$ вновь оказалась высокой (второй по величине среди всех). При этом погода существенно не изменялась, лишь утром добавился туман. Таким образом, высокие концентрации радиоактивных аэрозолей 10 и 11 сентября, очевидно, были связаны с какими-то процессами внутри

объекта «Укрытие». На это же указывает проба, отобранная в наиболее ветреный день 2 декабря, когда максимальные порывы достигали 17 м/с. Однако несмотря на такую экстремальную обстановку, величина $\Sigma\beta = 3,9$ Бк/м³, т.е. была близкой к средней концентрации в помещении 210/7 (см. рис. 7).

Необходимо отметить, что 10 сентября оказалась также наиболее высокой концентрация ²¹²Rb – дочернего продукта торона, о котором более подробно речь пойдет ниже.

Десять наиболее активных проб были измерены еще на полупроводниковом гамма-спектрометре. При этом идентифицированы ¹³⁷Cs, ¹⁵⁴Eu и ²⁴¹Am (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что концентрации ¹³⁷Cs, ¹⁵⁴Eu и ²⁴¹Am коррелировали с $\Sigma\beta$. Среднее значение ¹³⁷Cs/ $\Sigma\beta$ составило 0,52. Для сравнения укажем, что в аэрозолях, выбрасываемых из объекта «Укрытие» в атмосферу через систему «Байпас», по данным за 2009 г. среднее значение отношений

Таблица 2. Характеристики радиоактивных аэрозолей в помещении 210/7 объекта «Укрытие» в 2013 г.

Дата отбора	Концентрация, Бк/м ³				¹³⁷ Cs Σβ	Σβ		ДПР		Условия отбора	Ветер		
	¹³⁷ Cs	Σβ	ДПР	²¹² Pb		АМАД, мкм	σ	АМАД, мкм	σ		средний, м/с	порывы, м/с	направ., град
12.02	0,72	1,7	65	17	0,43	1,8	1,2	0,17	3,0	туман, штиль	0,0	0,0	0,0
13.02	0,65	2,1	59	16	0,31	2,6	2,8	0,11	3,3	туман	1,5	4,0	90
12.03	19	45	110	6,5	0,43	2,5	2,3	0,06	12		2,0	4,0	90
13.03	0,64	1,4	49	14	0,45	1,6	1,9	0,15	2,0		2,0	6,5	135
14.03	2,1	4,5	49	16	0,46	1,8	1,5	0,16	1,2	туман	1,5	4,5	135
18.03	11	26	44	1,4	0,41	1,6	2,1	0,07	5,1	ясно, штиль	0,5	4,0	240
19.03	2,4	6,2	56	8,0	0,39	1,1	1,0	0,15	1,5		2,5	7,0	80
20.03	0,88	2,1	44	9,8	0,42	2,5	2,2	0,15	2,1	штиль	1,0	3,5	320
21.03	0,36	0,69	44	13	0,52	7,0	2,4	0,03	20	штиль	1,0	3,0	315
22.03	1,1	2,2	150	9,1	0,52	2,4	2,7	0,09	4,5		2,0	6,0	65
01.04	14	36	48	20	0,39	2,4	2,3	0,03	9,0		2,0	5,0	255
02.04	3,8	8,9	47	17	0,43	1,9	1,2	0,02	16	ясно	2,5	5,5	270
04.04	2,7	7,8	56	20	0,35	2,3	2,2	0,16	1,7		1,5	5,5	60
20.05	5,2	9,7	70	19	0,54	1,4	1,4	0,12	2,8	штиль	1,5	3,5	130
21.05	1,4	3,4	99	24	0,41	4,2	2,4	0,09	4,4		1,5	5,0	225
22.05	1,1	2,2	100	23	0,49	2,8	2,6	0,04	11		2,0	6,5	230
23.05	2,7	5,5	97	14	0,50	4,3	2,4	0,08	5,6		2,0	6,0	240
24.05	1,1	2,7	127	29	0,39	7,0	2,1	0,07	15		2,5	6,5	105
03.06	5,2	10	98	17	0,52	2,2	2,3	0,15	1,1		1,5	6,5	110
04.06	0,94	3,6	110	20	0,26	1,2	1,7	0,14	2,0		1,5	5,0	65
05.06	2,9	7,1	79	14	0,41	5,0	2,7	0,11	3,3		1,0	4,0	35
06.06	1,2	3,5	110	20	0,33	3,5	2,2	0,05	10		1,5	4,5	50
07.06	2,1	6,7	110	24	0,31	5,1	2,0	0,14	2,0	штиль	1,5	4,0	90
10.06	6,5	13	91	14	0,52	4,7	2,0	0,04	12				
11.06	2,1	4,4	93	19	0,47	3,5	2,3	0,16	1,5		1,5	4,5	195
12.06	3,0	7,0	100	23	0,42	2,7	2,5	0,08	5,1		1,5	4,5	215
13.06	1,7	3,9	95	26	0,43	4,8	2,4	0,13	1,5	штиль	1,0	5,5	50
10.09	120	180	170	36	0,66	2,4	1,2	0,07	7,9	штиль	0,5	2,0	80
11.09	52	88	190	8,9	0,59	5,6	1,7	0,38	1,2	туман, штиль	0,5	3,5	70
12.09	3,6	6,2	110	5,9	0,58	2,0	2,1	0,03	11	дождь	1,5	4,5	120
13.09	1,2	3,1	120	6,1	0,39	4,3	4,2	0,06	5,5	туман	2,0	6,0	140
16.09	15	29	200	10	0,53	3,1	2,2	0,09	3,7		1,0	4,0	320
17.09	2,3	4,7	130	2,9	0,48	2,1	2,1	0,04	18	туман	1,5	4,0	305
18.09	18	33	97	6,9	0,55	3,6	1,9	0,20	1,2		2,0	7,5	140
19.09	5,8	9,9	210	6,9	0,58	2,8	2,0	0,14	1,5	штиль	1,0	3,0	70
20.09	3,3	7,1	160	8,3	0,46	3,8	2,1	0,14	2,2	дождь	1,5	4,5	340
30.09	2,3	4,9	160	2,1	0,47	2,0	1,6	0,04	12		1,5	5,5	315
01.10	3,4	6,6	78	6,3	0,52	2,5	3,0	0,19	1,6	штиль	1,0	4,0	15
02.10	3,2	6,5	150	2,8	0,49	3,5	2,2	0,09	5,1		2,0	7,0	25
03.10	1,5	2,9	120	1,6	0,50	2,6	2,8	0,16	1,5		1,5	4,5	360
04.10	0,94	2,2	120	3,8	0,43	2,8	3,2	0,16	2,1		1,5	6,5	345
07.10	16	45	67	16	0,36	2,2	2,1	0,060	5,6	штиль	0,5	4,0	80
09.10	0,46	0,9	73	12	0,51	0,90	1,0	0,090	4,5	штиль	0,5	2,5	75
10.10	0,67	1,0	62	5,1	0,67	0,57	1,0	0,050	11		1,5	4,5	165
14.10	1,2	3,6	110	9,9	0,34	0,89	1,0	0,030	16	штиль	0,0	1,5	0
15.10	1,1	2,1	90	8,2	0,53	4,6	2,7	0,070	7,3		1,5	2,5	95
16.10	-	2,4	85	12	-	5,9	3,4	0,150	1,5		2,0	4,5	235
17.10	3,8	6,9	120	2,5	0,55	4,0	2,1	0,050	7,2	туман, штиль	1,0	3,0	360
18.10	4,3	10	130	5,5	0,43	3,4	2,7	0,070	5,9	штиль	1,0	3,0	250
12.11	25	51	120	5,9	0,49	1,94	2,2	0,15	4,3		2,0	6,0	330
13.11	0,71	1,7	7,1	2,8	0,42	1,6	2,7	0,10	4,4	туман, штиль	1,0	3,0	300
14.11	27	48	110	4,2	0,57	2,2	2,2	0,12	5,1	штиль	1,0	3,0	300
15.11	2,8	6,1	10	3,6	0,46	3,4	2,1	0,10	5,6		2,0	7,0	300
18.11	0,16	0,3	150	5,4	0,55	1,7	1,2	0,10	3,7	ясно, штиль	1,0	3,0	75
9.11	0,58	1,1	87	0,54	0,55	3,4	2,7	0,17	1,1		2,5	7,0	135

Продолжение табл. 2

Дата отбора	Концентрация, Бк/м ³				$\frac{^{137}\text{Cs}}{\Sigma\beta}$	$\Sigma\beta$		ДПР		Условия отбора	Ветер		
	¹³⁷ Cs	$\Sigma\beta$	ДПР	²¹² Pb		АМАД, мкм	σ	АМАД, мкм	σ		средний, м/с	порывы, м/с	направ., град
20.11	0,06	0,2	43	4,8	0,25	1,6	5,6	0,15	2,0	морось	3,0	8,0	125
21.11	0,23	0,5	63	4,7	0,43	0,8	1,1	0,18	1,5	морось	3,0	7,0	130
02.12	1,9	3,9	99	3,6	0,48	2,0	2,7	0,13	3,8	ветрено	4,0	14,5	315
03.12	1,0	2,4	65	2,1	0,42	1,2	1,2	0,16	2,0		1,5	4,5	265
04.12	0,82	1,8	56	4,0	0,46	3,0	2,0	0,17	1,2		2,5	6,0	250
05.12	0,52	0,9	86	9,5	0,58	4,7	3,4	0,11	3,3	ветрено	3,0	8,5	275

Таблица 3. Концентрации и соотношения радионуклидов в аэрозолях помещения 210/7 в 2013 г.

Дата отбора	Объем, м ³	Концентрация, Бк/м ³				Отношение концентраций		
		$\Sigma\beta^*$	¹³⁷ Cs**	²⁴¹ Am**	¹⁵⁴ Eu**	¹³⁷ Cs/ $\Sigma\beta$	¹³⁷ Cs/ ²⁴¹ Am	²⁴¹ Am/ ¹⁵⁴ Eu
12.03	12,1	45	18	0,22	0,039	0,40	82	5,6
18.03	14,2	26	11	0,19	-	0,42	58	-
01.04	13,6	36	14	0,12	-	0,39	120	-
10.09	9,3	180	130	0,49	0,071	0,72	270	6,9
11.09	13,3	88	56	0,34	0,054	0,64	160	6,3
16.09	11,6	29	17	0,10	-	0,59	170	-
18.09	13,4	33	20	0,13	0,021	0,61	150	6,2
07.10	12,8	45	17	0,20	-	0,38	85	-
12.11	11,3	51	25	0,19	0,023	0,49	130	8,3
14.11	13,7	48	29	0,17	-	0,60	170	-

* Измерено на КРК-1.

** Измерено на гамма-спектрометре.

$^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,36$ [17], в 2010 г. – 0,41 [18], в 2011 г. – 0,39 [19] и 0,43 в 2013 г. [16]. Таким образом, в помещении 210/7 аэрозоли обогащены ¹³⁷Cs примерно в 1,2 – 1,4 раза по сравнению с выбрасываемыми через систему «Байпас». Это совпадает с данными, полученными еще в 1990 г. [3], когда около «языка» лавы у юго-западного входа в помещение 210/7 была взята проба аэрозолей на фильтр Петрянова, в которой зафиксировано полуторное обогащение изотопами цезия относительно средне-топливного состава.

Необходимо также отметить, что в пробе, отобранной 10 сентября, оказалась не только наибольшая $\Sigma\beta$, но и наибольшие $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ (см. табл. 3). Это показывало, что всплеск концентрации радиоактивных аэрозолей связан не с разрушением лавы в помещении 210/7, а поступлением от иного источника, обогащенного радиоцезием.

Согласно табл. 3 отношения $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ находились в диапазоне 5,6 – 8,3 при среднем значении 6,7. Это близко к показателям для аэрозолей, выбрасываемым из объекта «Укрытие» через систему «Байпас», в которых среднее значение отношения в 2013 г. составило 7,1 [16].

Отношения $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ в аэрозолях помещения 210/7 сильно варьировали: от 58 до 270. Среднее значение составляло 140. Это примерно в два раза больше, чем в выбросах из объекта «Укрытие» через систему «Байпас» в 2013 г. [16].

Основываясь на данных, представленных в работе [20], произведен перерасчет радионуклидного состава ЛТСМ в помещениях 210/6 и 210/7 по состоянию на 1 июля 2013 г. По 15 пробам величина отношения $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ в ЛТСМ помещения 210/6 находилась в диапазоне 4,2 – 24 при среднем значении 14. Отношение $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ изменялось от 3,9 до 6,7 при среднем значении 5,6. По 24 пробам величина отношения $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ в ЛТСМ помещения 210/7 находилась в диапазоне 3,1 – 17 при среднем значении 11. Отношение $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ изменялось от 3,8 до 9,1 при среднем значении 6,1. Таким образом, величина отношения $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ в аэрозолях помещения 210/7 в пределах погрешности измерений совпадает с расчетным отношением в ЛТСМ, что может свидетельствовать об их эрозии и, как следствие, генерации аэрозоля. Вместе с тем на основании полученных значений $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ можно сделать вывод, что аэрозоли в помещении 210/7 были обогащены ¹³⁷Cs относительно состава находящихся здесь ЛТСМ. Поскольку ЛТСМ обеднены радиоцезием в процессе образования лавы и ее растекания по помещениям объекта «Укрытие», то источниками дополнительного цезия являются аэрозоли-носители ¹³⁷Cs. Эти аэрозоли, вероятно, образуются в результате деструкции поверхностей, на которых ранее сорбировались частицы-носители конденсационного цезия.

Полученные результаты необходимо сравнить с тем, что наблюдали двумя годами ранее в

помещении 012/7 при проведении аналогичных исследований. Здесь находится лава из того же вертикального потока, который прошел через помещения 210/7 и 012/15 [9]. Было установлено, что в аэрозолях в помещении 012/7 среднее значение $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,13$, а не 0,52, как в помещении 210/7. Кроме того, $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 15$ и $^{137}\text{Cs}/^{154}\text{Eu} = 75$. Эти данные практически совпадали с результатами анализов проб лавы, взятых из помещения 012/7, и свидетельствовали об ее эрозии.

Концентрации радона, торона и аэрозолей их дочерних продуктов

Интерес к ДПР обусловлен тем, что их носителями служат атмосферные ядра конденсации с преимущественным размером 0,1 – 0,3 мкм [21]. Вследствие этого ДПР являются трассерами субмикронных аэрозолей и могут использоваться для оценки переноса воздушных потоков и эффективности работы различных очистных систем. Из результатов, представленных в табл. 2 и на рис. 8, следует,

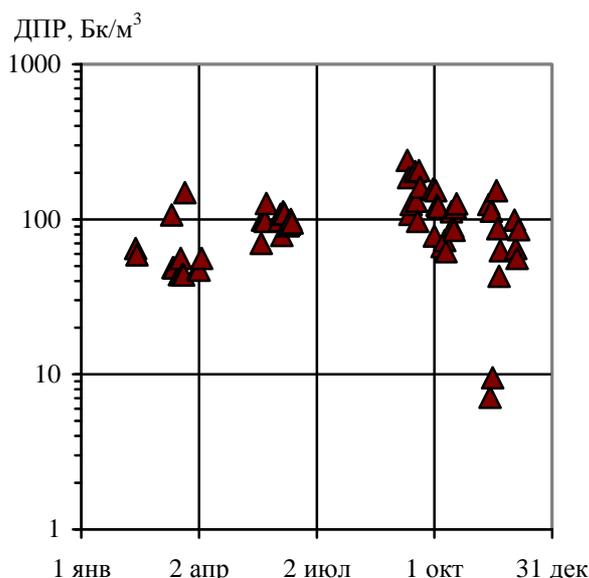


Рис. 8. Объемная активность аэрозоль-носителей ДПР в помещении 210/7.

что объемные активности ДПР находились в диапазоне 40 – 200 Бк/м³.

Поскольку на промплощадке объекта «Укрытие» концентрации ДПР на порядок величины ниже [22], то их высокое содержание в помещении 210/7 является следствием эманирования радона и торона из строительных конструкций объекта «Укрытие» и грунта, в который заглублен фундамент. Кроме того, частично торон может эманировать из ЛТСМ, в котором находится ^{232}U , накопленный в топливе реактора 4-го блока за время кампании, предшествующей аварии 1986 г. [23].

На рис. 8 нетрудно заметить, что концентрация ДПР проявляет сезонный ход: максимум приходится на сентябрь, а минимум – на зимние месяцы. Это коррелирует с температурой в помещении 210/7 (см. рис. 6).

Измерения ^{212}Pb , образующегося в цепочке радиоактивного распада торона, показали, что его концентрации находились в диапазоне 0,5 – 36 Бк/м³ (см. табл. 2). Наиболее часто объемная активность составляла 2 – 25 Бк/м³.

Из рис. 9 следует, что корреляции между концентрациями ДПР и ^{212}Pb нет. Точно также ее не было и при исследовании аэрозолей в помещении 012/7 [9]. Очевидно, ДПР поступают в помещения 210/7 и 012/7 из нескольких источников. Помимо бетонных стен и перекрытий, это может быть грунт в фундаменте объекта «Укрытие», а также перенос воздуха из других помещений.

Отсутствует также корреляция между концентрациями $\Sigma\beta$ и ^{212}Pb (рис. 10) – это ожидаемый результат, поскольку различны не только источники, но и механизмы генерации.

С помощью станции СРС-05 были отслежены концентрации и динамика радона и торона в помещении 210/7 во время отбора проб аэрозолей, а в остальное время – в помещении 210/8.

Как было изложено выше, интервал между измерениями станции составлял 10 мин. При этом наблюдалось значительное колебание результатов. Чтобы сгладить исходную кривую, было проведено пошаговое усреднение кривой за интервалы 1 ч (6 отсчетов). Математическая обработка данных проведена с помощью программы Microsoft Excel.

Поскольку при сглаживании путем линейной фильтрации учитываются предыдущие и последующие точки, то сглаженная кривая строится, начиная со второго шага исходного массива значений, и отображает усреднение по совокупности шести точек. Для соответствия точек по шкале времени со шкалой концентрации радона данная особенность учтена путем сдвига кривой на середину сглаживаемого интервала. В данном случае выполнен сдвиг на две точки вправо. Таким образом удалось корректно представить на одном графике линейную аппроксимирующую прямую и сглаженную по шести точкам кривую. На рис. 11 пунктиром представлена линейная аппроксимация, уравнение прямой и величина достоверности аппроксимации R^2 .

Как правило, за сеанс экспонирования СРС-05, продолжавшийся около 4 сут, средняя концентрация радона оставалась стабильной. Например, на рис. 11, а видно, что с 14 по 18 октября при флуктуациях от 30 до 170 Бк/м³ средняя концентрация сохранялась на уровне 80 – 100 Бк/м³. Однако

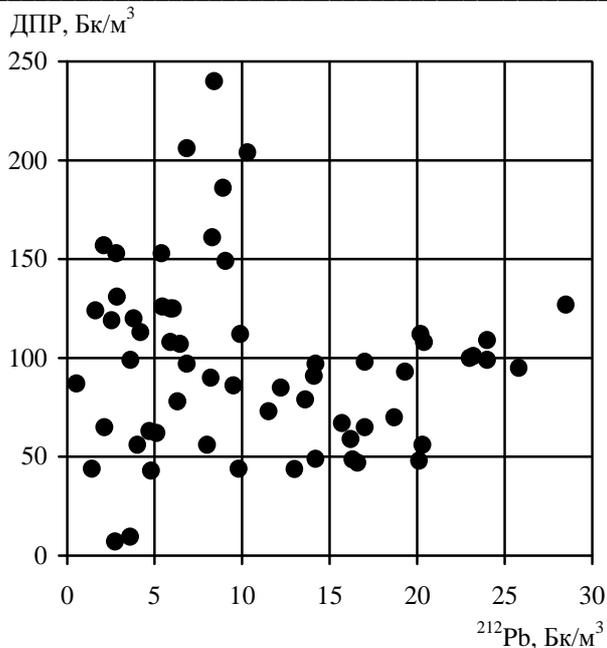


Рис. 9. Соотношения концентраций ДПР и ^{212}Pb в помещении 210/7.

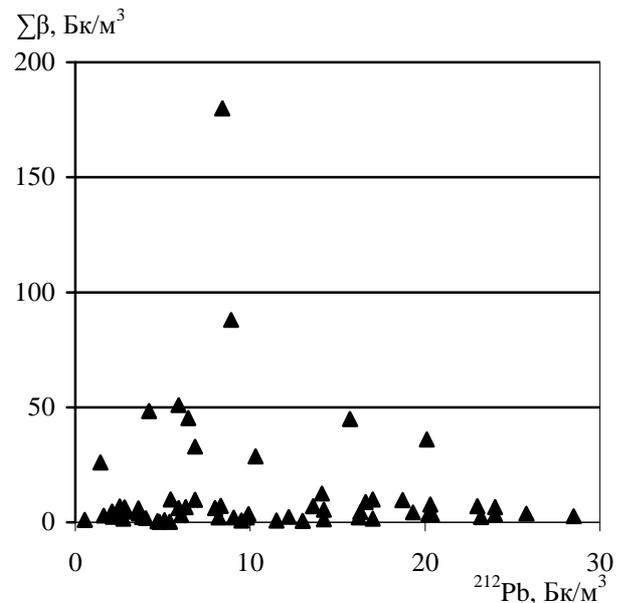


Рис. 10. Соотношения концентраций $\Sigma\beta$ и ^{212}Pb в помещении 210/7.

при экспозиции 12 – 15 ноября за первые двое суток концентрация снизилась со 120 – 140 Бк/м³ почти в три раза (см. рис. 11, б), а затем в течение 14 ноября поднялась с 40 – 60 Бк/м³ до прежнего уровня. Подобная динамика наблюдалась спустя 4 сут, когда с 18 ноября концентрация со 140 Бк/м³ за два дня снизилась до 30 – 40 Бк/м³, а затем 21 ноября увеличилась до 70 – 80 Бк/м³ (см. рис. 11, в).

Поскольку в ноябре температура и относительная влажность воздуха в помещениях 210/7 и 210/8 оставались практически неизменными (см. рис. 6), то, очевидно, суточные снижения концентраций радона были связаны с внешними факторами, которые пока не выявлены.

В целом результаты наблюдений с помощью станции СРС-05 на протяжении 2013 г. оказались синхронизованы с концентрациями ДПР, полученными при отборе аэрозолей на пакеты фильтров Петрянова (см. рис. 8). В том числе выявлен временной ход концентраций радона.

Дисперсность радиоактивных аэрозолей

Методика определения размеров аэрозолей изложена в [24]. Были рассчитаны активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) и стандартное геометрическое отклонение σ . Полученные результаты приведены в табл. 2 и на рис. 12. Наиболее часто носителями $\Sigma\beta$ были частицы с АМАД 1 – 7 мкм. Среди 61 пробы лишь четыре имели АМАД менее 1 мкм. Из этого следовало, что основным механизмом их возникновения был диспергационный. Вероятнее всего, они образовывались вследствие деструкции твердых поверхностей.

Существенно иную дисперсность имели аэрозоли-носители ДПР. На рис. 12 хорошо видно, что их АМАД находились в диапазоне 0,02 – 0,4 мкм. Однако наиболее часто ДПР были связаны с частицами около 0,1 мкм. Это обусловлено тем, что основным механизмом их образования был конденсационный, т.е. осаждение атомов свинца и висмута, возникающих при распаде радона и торона, на атмосферных ядрах конденсации.

Полученные результаты характерны для объекта «Укрытие» как при исследовании разрушения ЛТСМ в помещении 012/7 [9], так и выбросов через систему «Байпас» [16, 19, 25, 26].

Сопоставление аэрозолей в помещении 210/7 и в выбросах через систему «Байпас»

Важным элементом проведенных исследований был одновременный отбор аэрозолей в помещении 210/7 и системе «Байпас», через которую выбросы из объекта «Укрытие» поступают в свободную атмосферу [27]. Поскольку вентиляция помещений происходит только за счет естественной тяги в высотной трубе ВТ-2, воздушные потоки с нижних высотных отметок поступают на верхние и выходят наружу преимущественно через срез трубы ВТ-2 на +150 м, а также люки и щели легкой кровли объекта «Укрытие» (высотная отметка около +70 м). После перекрытия ВТ-2 в конце августа (в связи с ее демонтажем) выброс пошел через новую вентиляционную трубу, верхний срез которой находится на отметке +135 м. Однако, как показано в [16], это не повлияло на концентрации и дис-

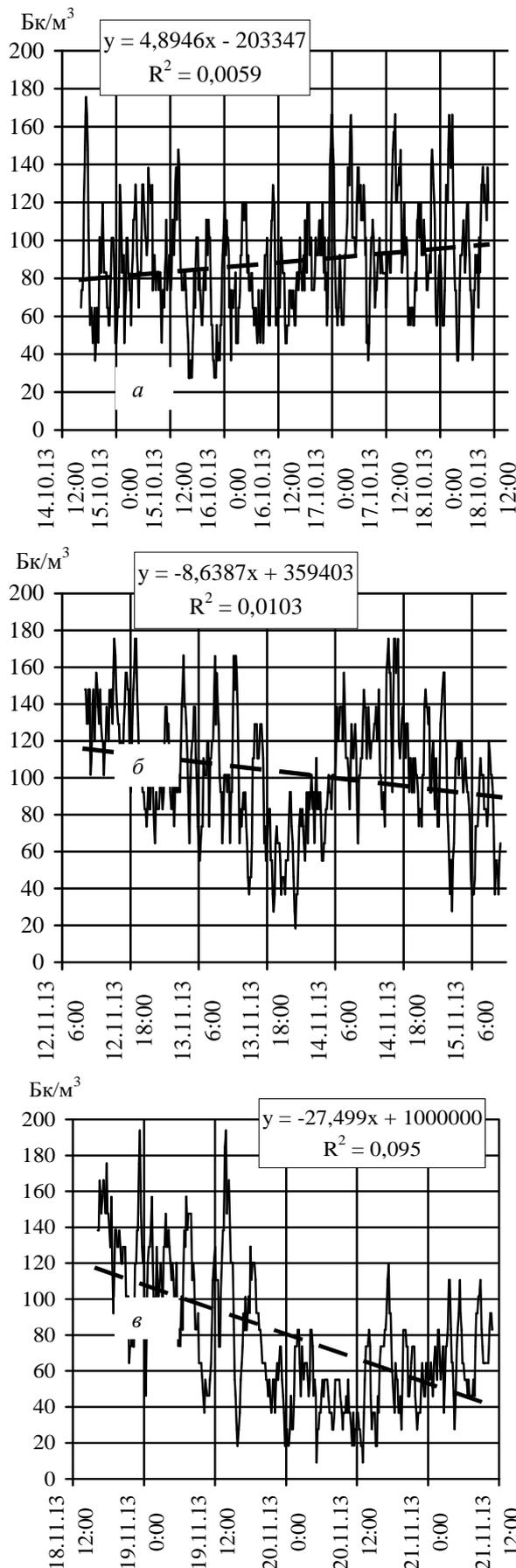


Рис. 11. Концентрация радона в помещении 210/7:
 а) 14 – 18 октября, б) 12 – 15 ноября,
 в) 18 – 21 ноября 2013 г.

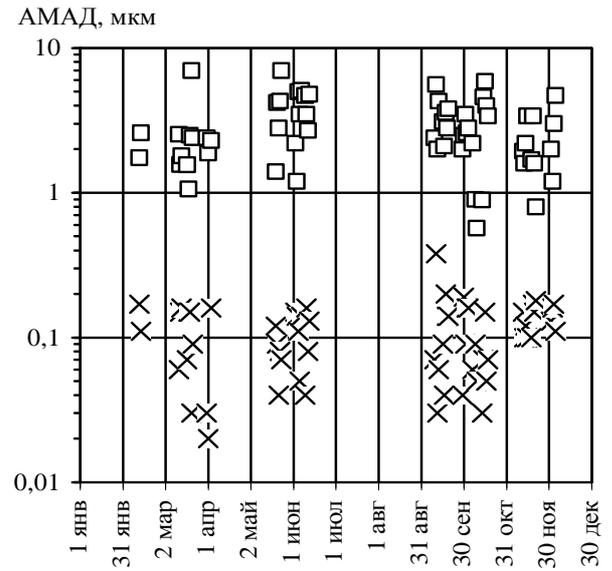


Рис. 12. АМАД аэрозолей-носителей $\Sigma\beta$ (\square) и ДПР (\times).

перность выбрасываемых в атмосферу аэрозолей.

Из сопоставления результатов, представленных в табл. 2 и [16], следует, что на протяжении 2013 г. средние концентрации аэрозолей $\Sigma\beta$, выбрасываемых через систему «Байпас» и находящихся в помещении 210/7, были практически одинаковыми. Но соотношения $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ в помещении 210/7 были в полтора-два раза выше, чем в выбросах в атмосферу. Более высокими (в 2 – 4 раза) оказались и концентрации ^{212}Pb . Следовательно, воздух, выходящий из помещения 210/7, по мере подъема в верхние помещения разбавлялся потоками, менее обогащенными ^{137}Cs и ДПР.

Выводы

1. В 2013 г. в ПРК объекта «Укрытие» был развернут комплекс приборов, с помощью которых отобрана и проанализирована 61 проба радиоактивных аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии и ДПР. Все пробы были взяты около юго-западного края скопления ЛТСМ в помещении 210/7.

2. Относительная влажность воздуха в помещении 210/7 варьировала от 45 % в осенне-зимний период до 85 % в весенне-летний. Температура воздуха в холодный период года находилась на уровне 12 – 13 °С, а в теплый – около 9 °С. Суточных изменений температуры не наблюдалось.

3. На протяжении года в помещении 210/7 сохранялось устойчивое содержание радиоактивных аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии. В большинстве проб (74 %) суммарная активность бета-излучающих нуклидов ($\Sigma\beta$) составляла 1 – 10 Бк/м³.

4. По результатам гамма-спектрометрических измерений 10 проб установлено, что соотношения концентраций радионуклидов $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu} = 7,1$, $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 140$ (при минимальном значении 58 и максимальном 267) и $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,52$ (минимум 0,38, максимум 0,72). Из последнего соотношения следует, что вклад ^{137}Cs в сумму бета-излучающих нуклидов-продуктов Чернобыльской аварии составлял около 50 %. Таким образом, аэрозоли в помещении 210/7 были обогащены радиоцезием относительно его содержания в отработавшем ядерном топливе и ЛТСМ. Это свидетельствует об отсутствии или незначительной деструкции ЛТСМ в помещении 210/7.

5. Одновременный отбор аэрозолей в помещении 210/7 и системе «Байпас» показал, что средние концентрации аэрозолей $\Sigma\beta$ были практически одинаковые. Однако соотношения $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ в помещении 210/7 были в полтора-два раза выше, чем в выбросах в атмосферу. Более высокими (в 2 – 4 раза) в помещении 210/7 оказались и концентрации ^{212}Pb . Следовательно, воздух, выходящий из помещения 210/7, по мере подъема в верхние помещения разбавлялся потоками, содержащими аэрозоли, менее обогащенные ^{137}Cs и ДПР.

6. Использование многослойных фильтров Петрянова позволило определить дисперсность аэрозолей. Наиболее часто носителями продуктов аварии ($\Sigma\beta$) были частицы с АМАД 1 – 7 мкм. Это показало, что основным механизмом их возникновения был диспергационный.

7. В большинстве проб объемные активности дочерних продуктов радона в помещении 210/7 находились в диапазоне 40 – 200 Бк/м³ и ^{212}Pb – 2 – 25 Бк/м³. Величина АМАД их носителей была около 0,1 мкм, что характерно для конденсационного механизма образования аэрозолей и наблюдалось ранее в других помещениях объекта «Укрытие».

8. Работа станции СРС-05 с циклами пробоотбора 10 мин в течение 4 – 5 сут показала, что средняя суточная концентрация радона, как правило, оставалась стабильной. Результаты наблюдений на протяжении 2013 г. коррелировали с концентрациями ДПР, полученными при отборе аэрозолей на пакеты фильтров Петрянова. Обнаружен сезонный ход концентраций радона и ДПР с максимумом в сентябре и минимумом в зимние месяцы.

Авторы благодарят А. А. Котлярова и А. А. Афонина из приборостроительной компании «НТМ-Защита» (Россия, Москва) за любезно предоставленные сейсмическую радоновую станцию СРС-05 и измерительный комплекс «Альфарад плюс А».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнян Р. Э., Большов Л. А., Боровой А. А. и др. Ядерное топливо в объекте «Укрытие». - М.: Наука, 2010. - 240 с.
2. Богатов С. А., Боровой А. А., Киселев А. Н. и др. Оценка скорости эрозии топливосодержащих масс внутри «Саркофага» и характеристики образующихся частиц. – Москва, 1991. - 21 с. - (Препр. / Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова; 5434/3).
3. Богатов С. А., Боровой А. А., Евстратенко А. С., Херувимов А. Н. Динамика поведения топливных масс в объекте «Укрытие». – Киев, 1992. - 20 с. - (Препр. АН УССР. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова; 92-29).
4. Кузьмина И. Е., Токаревский В. В. Частицы дисперсной фазы аэрозолей объекта «Укрытие» // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. - 1996. - Вип. 4. - с. 141 - 150.
5. Бадовский В. П., Ключников А. А., Кравчук Т. А. и др. Исследование характеристик аэрозолей в содержащих топливо помещениях объекта «Укрытие» // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2009. – Вип. 12. - С. 103 - 112.
6. Бадовский В. П., Ключников А. А., Меленевский А. Э. и др. Оценка состояния поверхности ЛТСМ в реальных условиях объекта «Укрытие» // Междунар. конф. «Двадцать пять лет Чернобыльской катастрофы. Безопасность будущего», 20 – 22 апреля 2011 г. Киев, Украина. (Сб. докл. Выводы и рекомендации). - Ч. 2.- К., 2011. - С. 46 - 50.
7. Меленевский А. Э., Ушаков И. А., Бадовский В. П. Дослідження пилогенеруючої здатності ПВМ об'єкта «Укриття» // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2012 - Вип. 18. - С. 119 - 120.
8. Бадовский В. П., Ключников А. А., Меленевский А. Э. и др. Генерация топливосодержащей пыли лавообразными материалами объекта «Укрытие» // Там же. – 2013. – Вип. 20. - С. 68 - 76.
9. Огородников Б. И., Хан В. Е., Ковальчук В. П. Аэрозоли – свидетели разрушения лавообразных топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» // Там же. - С. 94 - 106.
10. Объект «Укрытие»: 1986 – 2011. На пути к преобразованию: монография / А. А. Ключников, В. А. Краснов, В. М. Рудько, В. Н. Щербин; - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2011. - 288 с.
11. Исследование влияния изменений свойств топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» на его ядерную, радиационную и радиозоологическую безопасность. Т. 2: Изучение поведения топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» как фактора ядерной, радиационной и радиозоологической опасности под

- воздействием внешних и внутренних факторов: (Отчет о НИР) / ИПБ АЭС НАН Украины. - Арх. № 4003. - Чернобыль, 2011. - 216 с.
12. Пазухин Э. М., Боровой А. А., Ключников А. А. и др. Бассейн-барботер и парораспределительный коридор 4-го блока Чернобыльской АЭС. Новые данные // Радиохимия - 2003 - Т. 45, № 2 - С. 184 - 190.
 13. Боровой А. А., Ключников А. А., Краснов В. А. и др. Лавообразные топливосодержащие материалы в бассейне-барботере и парораспределительном коридора 4-го блока Чернобыльской АЭС // Проблемы Чернобыля. - 2001 - Вып. 7. - С. 181 - 193.
 14. Сейсмическая радоновая станция СРС-05. Руководство по эксплуатации. - М.: Приборостроительная компания «НТМ-Защита», 2009. - 20 с.
 15. Афонин А.А., Котляров А.А., Максимов А.Ю. Установка для изучения характеристик переноса ^{218}Po в воздухе // Приборы и техника эксперимента. - 2010. - № 1. - С. 139 - 143.
 16. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К., Краснов В. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2013 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобыля. - 2014. - Вып. 22. - С. 110 - 121.
 17. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К., Краснов В.А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2009 г. // Там же. - 2010. - Вып. 13. - С. 111 - 122.
 18. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К., Краснов В. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2010 г. // Там же. - 2011. - Вып. 17. - С. 98 - 105.
 19. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К., Краснов В. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2011 г. // Там же. - 2012. - Вып. 19. - С. 94 - 103.
 20. Богатов С. А., Боровой А. А., Гаврилов С. Л. и др. База данных по местонахождению и состоянию ядерного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС до и после аварии. Проект № 2916 «Разработка модели поведения ядерного топлива во время активной стадии аварии» - Москва, 2007. - 147 с. - (Препр. / РНЦ «Курчатовский институт; № 130-11/2).
 21. Porstendörfer J. Properties and behaviour of radon and their decay products in air // J. of Aerosol Sci. - 1994. - Vol. 25. - P. 219 - 263.
 22. Огородников Б. И., Хан В. Е., Пазухин Э. М., Краснов В. А. Радон и его дочерние продукты в объекте «Укрытие» в 2003 - 2010 гг. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобыля. - 2011 - Вып. 16. - С. 130 - 136.
 23. Огородников Б. И., Будыка А.К., Хан В. Е. и др. Дополнительный фактор радиационной опасности в объекте «Укрытие» - ^{220}Rn // Радиохимия. - 2009. - Т. 51. - № 4. - С. 344 - 352.
 24. Vidyka A. K., Ogorodnikov B. I., Skitovich V. I. Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes // J. of Aerosol Sci. - 1993. - Vol. 24. - Suppl. 1. - P. S205 - S206.
 25. Хомутинин Ю. В., Процак В. П., Хан В. Е., Огородников Б. И. Статистический анализ многолетних наблюдений характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» объекта «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобыля. - 2012. - Вып. 19. - С. 81 - 93.
 26. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К., Краснов В. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2012 г. // Там же. - 2013. - Вып. 21. - С. 107 - 116.
 27. Огородников Б. И., Пазухин Э. М., Ключников А. А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986 - 2006 гг. - Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины. - 2008. - 456 с.

Б. И. Огородников^{1,2}, В. Е. Хан¹, В. П. Ковальчук¹, О. С. Лагуненко¹, С. А. Довидьков¹

¹ *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, вул. Кірова, 36а, Чернобыль, 07270, Україна*

² *Фізико-хімічний інститут ім. Л. Я. Карпова, пров. Обуха, б3-1/12, буд. 6, Москва, 105064, Росія*

СКЛАД ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ РАДІОАКТИВНИХ АЕРОЗОЛІВ БЛЯ СКУПЧЕННЯ ЛАВОПОДІБНИХ ПАЛИВОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРИМІЩЕННІ 210/7 ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

Представлено склад, концентрації і дисперсність радіоактивних аерозолів у приміщенні 210/7 об'єкта «Укриття» у 2013 р. Проби відбирали на тришарові фільтри Петрянова біля південно-західного краю лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ). Установлено, що сумарна концентрація аерозолів-носіїв $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ і ^{137}Cs коливалася в діапазоні 0,2 – 180 Бк/м³. При цьому на частку ^{137}Cs припадало до 50 %. Співвідношення концентрацій $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ було близько до 140, а $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ - до 6 - 7. Носіями цих радіонуклідів були аерозолі крупніше 1 мкм. Гамма-спектрометричні вимірювання показали, що склад і співвідношення радіонуклідів в аерозольних пробах відрізняються від зразків ЛПВМ. Це свідчить про відсутність або незначну деструкцію ЛПВМ та їхнього переходу в аерозольний стан. За допомогою сейсмічної радонової станції СРС-05 визначено вміст у повітрі радону і торону, а комплексом «Альфарад плюс А» - концентрацію радону і коефіцієнт рівноваги його дочірніх продуктів. Максимальна об'ємна активність радону досягала 100 Бк/м³. Концентрації ^{212}Pb - дочірнього продукту торону - коливалися від 0,5 до 36 Бк/м³. Носіями дочірніх продуктів радону і торону були переважно частинки з медіанним за активністю аеродинамічним діаметром близько 0,1 мкм.

Ключові слова: об'єкт «Укриття», лавоподібні паливовмісні матеріали, радіоактивні аерозолі, концентрація, дисперсність, радон, торон, дочірні продукти торону і радону.

B. I. Ogorodnikov^{1,2}, V. E. Khan¹, V. P. Kovalchuk¹, A. S. Lagunenکو¹, S. A. Dovid'kov¹

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, 36a, Kirova str., Chornobyl, 07270, Ukraine

² Karpov Institute of Physical Chemistry, Obuha pereulok, 3-1/12, build 6, Moscow, 105064, Russia

COMPOSITION AND CONCENTRATIONS OF RADIOACTIVE AEROSOLS NEAR LAVALIKED FUEL CONTAINED MATERIALS IN PREMISE 210/7 OF THE OBJECT "UKRYTTYA"

Composition, concentrations and dispersity of radioactive aerosols in premise 210/7 of the "Ukryttya" object in 2013 are presented. The samples were taken on Petryanov three-layer filters near south-west side of lavaliked fuel contained materials. It was stated that concentration of beta-radiating ($\Sigma\beta$) aerosol-carriers ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ and ^{137}Cs) was fluctuating with the range 0.2 – 180 Bq/m³. Besides, ^{137}Cs share made 50 %. Ratio $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ concentrations was close to 140 and $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ – to 6 – 7. Their carriers were the particles of size more than 1 μm . Gamma-spectrometric measurements have demonstrated that content and ratio of radionuclides in aerosols were other than in samples of the lavaliked fuel contained materials. Maximum volume activity of radon reached 100 Bq/m³. ^{212}Pb concentrations – thoron daughter products were fluctuating with the range 0.5 – 36 Bq/m³. Their carriers were the particles of size, prevailing, 0.1 μm .

Keywords: "Ukryttya" object, lavaliked fuel contained materials, radioactive materials, concentration, dispersity, radon, thoron, daughter products of radon and thoron.

REFERENCES

1. Arutyunyan R. E., Bolshov L. A., Borovoy A. A. et al. Nuclear fuel in the object "Ukryttya". - Moskva: Nauka, 2010. – 240 p. (Rus.)
2. Bogatov S. A., Borovoy A. A., Kiselev A. N. et al. Estimates of the rate of erosion of fuel mass inside the "Sarcophagus" and characteristics of the particles. - Moskva, 1991. - 21 p. - (Prepr. / I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, 5434/3). (Rus.)
3. Bogatov S. A., Borovoy A. A., Evstratenko A. C., Kheruvimov A. N. "Shelter" object fuel-containing mass' behaviour dynamics. – Kyiv, 1992. - 20 p. - (Prepr. NAS of Ukraine. In-t of cybernetics by V. M. Glushkov; 92-29).
4. Kuzmina, I. E., Tokarevskiy V. V. Aerosol particles dispersed phase "Shelter" // Problems Chornobyl exclusion zone. - 1996. - Iss. 4. - P. 141 - 150. (Rus.)
5. Badovsky V. P., Klyuchnikov A. A., Kravchuk T. A. et al. Aerosol characteristic researching in basic fuel-containing rooms of object "Ukryttya" // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyl (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2009. - Iss. 12. - P. 103 - 112. (Rus.)
6. Badovsky V. P., Klyuchnikov A. A., Melenevsky A. E. et al. Estimating of surface LFCM in real conditions at object "Ukryttya" // Intern. Conf. "Twenty-five years after Chernobyl Accident. Safer for the Future." April 20 - 22, 2011, Kyiv, Ukraine: Reports proceeding. Conclusions and recommendations. - Part 2. - Kyiv, 2011. - P. 46 – 50. (Rus.)
7. Melenevsky A. E., Ushakov I. A., Badovsky V. P. Research FCM dust generating ability of object "Ukryttya" // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyl (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2012. - Iss. 18. - P. 119 - 120. (Ukr.)
8. Badovsky V. P., Klyuchnikov A. A., Melenevsky A. E. etc. Fuel containing dust generated by object "Ukryttya" lava materials // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyl (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2013 - Iss. 20. - P. 68 - 76. (Rus.)
9. Ogorodnikov B. I., Khan V. E., Kovalchuk V. P. Aerosols as evidences of destruction in the object "Ukryttya" // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyl (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2013 - Iss. 20. - P. 94 - 105. (Rus.)
10. "Shelter" object: 1986 - 2011. On the way to conversion: monograph / A. A. Klyuchnikov, V. A. Krasnov, V. M. Rudko, V. N. Scherbin. - Chornobyl: Institute for Safety Problems of NPP. 2011. - 288. (Rus.)
11. The researching of "Shelter" object fuel-containing materials properties changing influence on it's nuclear, radiational and radioecological safety. Vol. 2: The study of "Shelter" object fuel-containing materials behaviour as nuclear, radiational and radioecological danger factor at influence by outer and inner factors // Report for SRW / ISP NPP NAS Ukraine. - Arch. № 4003. - Chornobyl, 2011. - 216 p. (Rus)
12. Pazukhin E. M., Borovoy A. A., Klyuchnikov A. A., Krasnov V. A., Lagunenکو A. S., Gavrilov C. L. Chernobyl NPP 4-th block' pool-barboter and steam-distributing permise. New data // Radiokhimiya. - 2003, - T. 45, № 2, - P. 184 - 190. (Rus)
13. Borovoy A. A., Klyuchnikov A. A., Krasnov V. A., Lagunenکو A. S., Pazukhin E. M., Gavrilov C. L. Lavalike fuel-containing materials at Chernobyl NPP 4-th block' pool-barboter and steam-distributing permise // Problemy Chornobyl (Problems of Chornobuy). – 2001 – Iss. 7. - P. 181 - 193. (Rus)
14. Radon seismic station CPC-05. Operating manual. - Moscow: Instrument company "NTM-zaschita", 2009. – 20 p. (Rus.)
15. Afonin A. A., Kotlyarov A. A., Maksimov A. Y. Research unit of the properties of the air transport ^{218}Po // Pribori i tekhnika eksperimenta (Instruments and Experimental Techniques). - 2010. - № 1. - P. 139 - 143. (Rus)

16. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2013 // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl)*. - 2014. - Iss. 22. - P. 110 - 121. (Rus.)
17. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2009 // *Ibid.* - 2010. - Iss. 13. - P. 111 - 122. (Rus.)
18. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2010 // *Ibid.* - 2011. - Iss. 17. - P. 98 - 105. (Rus.)
19. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2011 // *Ibid.* - 2012. - Iss. 19. - P. 94 - 103. (Rus.)
20. *Bogatov S. A., Borovoy A. A., Gavrilov S. L. et al.* Chernobyl NPP 4-th block' nuclear fuel placement and condition database for before-accident and after-accident times. Project № 2916 «Nuclear fuel behaviour model' development for the active stage of accident». - M., 2007. - 147 p. (Prepr. / RSC «Kurchatov' Institute; № 130-11/2). (Rus)
21. *Porstendörfer J.* Properties and behaviour of radon and their decay products in air // *J. of Aerosol Sci.* - 1994. - Vol. 25. - P. 219 - 263.
22. *Ogorodnikov B. I., Khan V. E., Pazukhin E. M., Krasnov V. A.* Radon and their decay products in the object "Ukryttya" in 2003 - 2010 // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl)*. - 2011. - Iss. 16. - P. 130 - 136. (Rus.)
23. *Ogorodnikov B. I., Budyka A K., Khan V. E. etc.* ²²⁰Rn as an additional factor of radiation hazard in the Shelter // *Radiohimiya (Radiochemistry)*. - 2009. - Vol. 51, № 4. - P. 344 - 352. (Rus.)
24. *Budyka A K., Ogorodnikov B I., Skitovich V.I.* Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes // *J. of Aerosol Sci.* - 1993. - Vol. 24. - Suppl. 1. - P. S205 - S206.
25. *Homutinina Yu. V., Protsak V. P., Khan V. E., Ogorodnikov B. I.* The statistic analysis for "Shelter" object "Bypass" system' radioactive aerosol characteristics long-term studies // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl)*. - 2012. - Iss. 19. - P. 81 - 93. (Rus.)
26. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2012 // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl)*. - 2013. - Iss. 21. - P. 107 - 116. (Rus)
27. *Ogorodnikov B. I., Pazukhin E. M., Klyuchnikov A. A.* Radioactive aerosols of the Shelter: 1986 - 2006 years. Monograph. - Chornobyl: National Academy of Sciences of Ukraine. Institute for Safety Problems of NPP, 2008. - 456. (Rus.)

Надійшла 11.12.2014
Received 11.12.2014