

Б. И. Огородников^{1,2}, В. Е. Хан¹, В. П. Ковальчук¹

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

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В ПОМЕЩЕНИИ 211/2 ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» В 2012 г.

Представлены радионуклидный состав, дисперсность и концентрации аэрозолей в помещении 211/2 объекта «Укрытие» в 2012 г., измеренные с помощью трехслойных фильтров Петрянова. Установлено, что концентрация суммы долгоживущих бета-излучающих нуклидов-продуктов Чернобыльской аварии, как правило, колебалась в диапазоне 1 – 40 Бк/м³. Из соотношения концентраций $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,26$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 31$ следовало, что в помещение 211/2 поступал воздух из помещений, где происходит деструкция лавообразных топливосодержащих материалов и их частичный переход в аэрозольное состояние. Носителями радионуклидов-продуктов аварии были аэрозоли крупнее 1 мкм. Максимальное содержание радона достигало 100 Бк/м³. Носителями дочерних продуктов радона и торона были преимущественно частицы диаметром 0,1 – 0,3 мкм. Концентрации ^{212}Pb – дочернего продукта торона – колебались от 1 до 10 Бк/м³.

Ключевые слова: объект «Укрытие», лавообразные топливосодержащие материалы, трехслойные фильтры, радиоактивные аэрозоли, концентрация, дисперсность, соотношение радионуклидов.

Введение

При контроле радиационной обстановки в объекте «Укрытие» большое внимание уделено радиоактивным аэрозолям. Это связано с тем, что они представляют опасность для персонала, работающего во внутренних помещениях, а также служат источником загрязнения окружающей среды, поскольку поступают в атмосферу с вентиляционными потоками и через многочисленные щели и неплотности наружного ограждения разрушенного 4-го блока ЧАЭС. Аэрозоли образуются как при технологических операциях, так и самопроизвольно за счет деструкции и эрозии материалов.

В обслуживаемых помещениях объекта «Укрытие» наблюдения за радиоактивными аэрозолями проводят для соблюдения норм радиационной безопасности. В необслуживаемых помещениях их исследуют для мониторинга источников возникновения, определения физико-химических характеристик (концентрации, радионуклидный состав, дисперсность), а также понимания динамики и процессов переноса. В качестве источника образования радиоактивных аэрозолей в первую очередь представляют интерес лавообразные топливосодержащие материалы (ЛТСМ), образовавшиеся на ранней стадии Чернобыльской аварии и находящиеся в нескольких помещениях центральной части разрушенного реакторного отделения.

Хотя с момента аварии и образования ЛТСМ прошло более четверти века, сведений об их состоянии, а тем более разрушении, крайне мало. Результаты первых исследований относятся к марту 1990 г. [1], 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.

В 1995 г. аэрозоли отобрали на фильтр в помещении 305/2 вблизи наиболее крупного скопления ЛТСМ [2]. Около 70 % частиц были сферическими и имели диаметры 1 – 3 мкм. При этом присутствовали отдельные частицы неправильной формы размером до 50 мкм. Авторы публикации [2] приходят к выводу, что такие частицы, если и поднимаются в воздух, то не могут мигрировать на большие расстояния.

В 2006 – 2012 гг. под руководством А. Э. Меленевского были проведены исследования радиоактивных аэрозолей в помещениях 207/4 и 318/2 [3], затем в помещениях 304/3 и 305/2 [4 - 7].

В 2010 – 2011 гг. с помощью многослойных фильтров Петрянова была отобрана 71 проба аэрозолей в помещении 012/7 [8]. Гамма-спектрометрические измерения и радиохимические анализы показали, что состав и соотношения радионуклидов-продуктов аварии 4-го блока ЧАЭС в аэрозольных пробах и образцах ЛТСМ практически идентичны. Это свидетельствовало о деструкции ЛТСМ и их частичном переходе в аэрозольное состояние.

Из вышеизложенного следует, что необходим систематический контроль воздушной среды, в частности радиоактивных аэрозолей, как непосредственно в местах размещения ЛТСМ, так и в смеж-

© Б. И. Огородников, В. Е. Хан, В.П. Ковальчук, 2014

ных помещениях объекта «Укрытие» при фактических температурных, влажностных, воздухообменных, радиационных и других условиях. Этому посвящена данная работа, выполненная в 2012 г. в помещении 211/2.

Описание помещения 211/2

Помещение 211/2 – это бокс регенераторов и охладителя установки продувки и расхолаживания системы южного контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ). Хотя оно расположено на высотной отметке +6 м недалеко от взорвавшегося реактора, в нем разрушений нет. Помещение 211/2 имеет площадь 6×12 м и высоту 6 м. Доступ осуществляется из помещения 208/9 на высотной отметке +9 м через железную дверь и ведущую вниз металлическую лестницу. Внутри помещения расположены несколько вертикальных теплообменников.

С севера к боксу 211/2 примыкают несколько помещений, в которых находятся ЛТСМ. В нижней части (на высотной отметке +6 м) – это помещение 217/2 со скоплением «Слоновья нога», содержащим $0,4 \pm 0,2$ т урана, проникшего сюда с отметки +9 м из горизонтального потока лавы [9]. В 12 – 18 м северо-западнее расположены помещения 210/6 и 210/7, в которые проникла лава из большого вертикального потока. Здесь содержится 12 ± 6 т урана [9]. В верхней части (на отметке +9 м) к помещению 211/2 примыкают коридоры 301/5 и 301/6, по которым распространялся горизонтальный поток ЛТСМ и в которых находится $5 \pm 2,5$ т урана. В эти помещения пробурено несколько скважин из помещений 208/9 и 208/10 [10, 11]. Через них радиоактивные аэрозоли вследствие воздухообмена могут попадать в помещение 211/2.

По системе технологических проходов и трещин, положение которых неизвестно, помещение 211/2 связано с разрушенным центральным залом. Об этом свидетельствуют сильные протечки воды и капель в весенние месяцы и после интенсивных дождей. В нижней части помещения 211/2 также через проемы и трещины может быть связано с подреакторным пространством. По этим каналам вместе с воздушными потоками распространяются радиоактивные аэрозоли.

Методы отбора проб и измерений

Аэрозоли отбирали воздуходувкой Н810 RADeCO со скоростью около 100 л/мин. Использовали пакеты фильтров Петрянова площадью 20 см^2 , состоящие из слоев: ФПА-70-0,13 (голубой), ФПА-70-0,21 (розовый), АФА РСП-20 (белый) и АФА РМА-20 (белый). Два фильтра АФА использовали для полноты улавливания аэрозолей дочерних продуктов радона и торона. Воздух прокачивали около 2 ч. Затем фильтры демонтировали, осматривали и в бумажных конвертах отправляли на анализ. Воздуходувку подвешивали на высоте 1,5 м от пола около закрытой двери из помещения 211/2 в коридор 217/2 в точке со строительными координатами: ряд Д₃₀₀₀, ось 43₃₀₀₀.

Концентрации радона и торона измеряли сейсмической радоновой станцией СРС-05 «Торон-1» [12, 13], которую размещали вплотную к воздуходувке Н810. Работа прибора основана на измерении активности дочерних продуктов радона и торона (^{218}Po и ^{216}Po), оседающих под воздействием электрического поля на полупроводниковый детектор в камере объемом 0,25 л. Воздух поступал в прибор через фильтр АФА РСП-20 со скоростью около 0,8 л/мин. В станции имеется блок климат-контроля с измерением температуры и относительной влажности воздуха, а также атмосферного давления. Питание – от аккумуляторной батареи, которую заменяли через 50 ч. Диаметр станции 80 мм и длина 600 мм. Масса прибора 2 кг. В процессе работы было установлено, что при относительной влажности воздуха свыше 85 – 90 % станция начинала давать сбои из-за накопления в камере пленочной влаги. После просушки работоспособность станции восстанавливалась.

Чтобы отбор аэрозолей и измерение концентраций радона и торона происходили из одного объема воздуха, заборное отверстие станции СРС-05 соединяли с воронкой, через которую происходил выброс потока из воздуходувки Н810. Радиоактивные аэрозоли в помещении 211/2 контролировали раз в сутки, а динамику концентраций радона и торона – непрерывно 4 – 5 сут.

Для сопоставления радионуклидного состава и концентрации аэрозолей в помещении 211/2 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 поступали в свободную атмосферу. Для пробоотбора использовали такие же, как в помещении 211/2, пакеты фильтров Петрянова и воздуходувку Н810. Полученные результаты представлены в [14].

Через 10 – 15 мин после окончания прокачки воздуха фильтры поступали в помещение Г328 объекта «Укрытие» для радиометрии. Пакеты разделяли на три слоя согласно их исходной окраске: голубой, розовый и белый (АФА РСП-20 и АФА РМА-20). При осмотре фильтра АФА РСП-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 по 100 с. При активности свыше 100 имп/с экспозиция продолжалась 10 с. Общее время анализов составляло 60 – 90 мин. По кривым распада рассчитывали количество дочерних продуктов радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn) (ДПР) на момент окончания прокачки воздуха. Через 4 – 5 сут, когда полностью распадались не только дочерние продукты (ДП) радона, но и торона, измерения повторяли. При этом каждый слой экспонировали, как правило, 1000 с. В результате определяли суммарное содержание долгоживущих бета-излучающих нуклидов ($\Sigma\beta$)-продуктов Чернобыльской аварии, представленных $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{137}Cs , а также ^{212}Pb – одного из ДП 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 полупроводниковом гамма-спектрометре с детектором из сверхчистого германия GL2020R с бериллиевым окном толщиной 500 мкм. 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}Co) и 661,6 кэВ (гамма-линия ^{137}Cs) соответственно. По результатам измерений рассчитывали объемные активности.

Контроль воздушной среды

Температуру, относительную влажность воздуха и его давление в помещении 211/2 фиксировали автоматически через каждые 10 мин по показаниям датчиков климатконтроля прибора СРС-0,5. Скорости и направления воздушных потоков измеряли в дверном проеме между помещениями 208/9 и 211/2, а также в коридоре, соединяющем помещения 208/9 и 207/4. Использовали термоанемометр ТАМ-1, обеспечивавший измерения в диапазоне 0,1 – 2 м/с, и «колдунчик» – нитку, подвешенную в дверном проеме.

Метеопараметры во внешней среде контролировали по показаниям автоматического метеопункта (обновление через 5 мин), 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 облаков, осадки и т.д.).

Результаты и обсуждение Состояние воздушной среды

В помещении 211/2 относительная влажность воздуха на протяжении года варьировала от 25 до 95 % (рис. 1). Суточных колебаний не наблюдалось. Наиболее низкие значения (22 – 25 %) отмечены в феврале при отрицательных температурах во внешней среде (ниже -10°C). Высокая влажность (более 85 %) зафиксирована в мае – сентябре 2012 г., когда температура в атмосфере достигала $20 - 25^\circ\text{C}$.

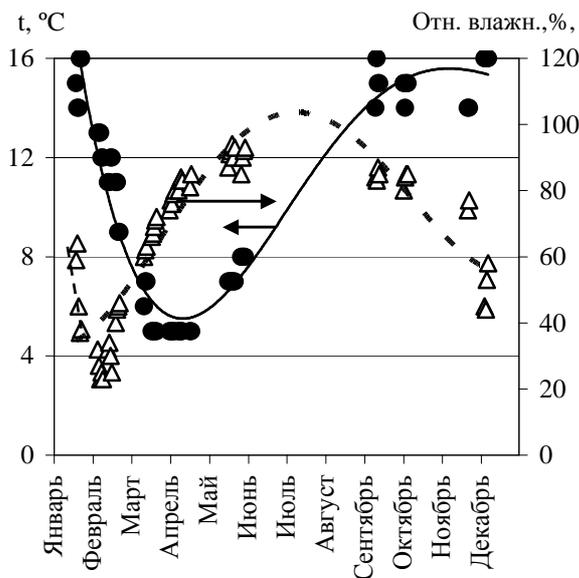


Рис. 1. Температура (●) и относительная влажность (Δ) воздуха в помещении 211/2 при отборе проб аэрозолей в 2012 г.

В марте – апреле в помещении 211/2 наблюдалась сильная капель с потолка. На полу стояла лужа. По стене помещения 208/9 перед входом в помещение 211/2 сбежали струйки воды. Это происходило из-за таяния снега и льда в объекте «Укрытие» при положительных дневных температурах наружного воздуха. В мае и сентябре – октябре наблюдалась редкая капель, которая усиливалась при дождях, например 8 октября, когда за сутки выпало 35 мм осадков. В ноябре-декабре капель практически прекратилась, но лужа на полу помещения 211/2 сохранялась.

В марте – апреле в помещении 211/2 наблюдалась сильная капель с потолка. На полу стояла лужа. По стене помещения 208/9 перед входом в помещение 211/2 сбежали струйки воды. Это происходило из-за таяния снега и льда в объекте «Укрытие» при положительных дневных температурах наружного воздуха. В мае и сентябре – октябре наблюдалась редкая капель, которая усиливалась при дождях, например 8 октября, когда за сутки выпало 35 мм осадков. В ноябре-декабре капель практически прекратилась, но лужа на полу помещения 211/2 сохранялась.

Температура воздуха в помещении 211/2 в течение суток оставалась неизменной. Однако годичный ход был сильно смещен относительно сезонных температур во внешней среде. Так, в холодный период года (январь – февраль и сентябрь – декабрь) она находилась на уровне $14 - 16^\circ\text{C}$, а весной (март – апрель) опускалась до 5°C , и затем летом постепенно повышалась. При этом с марта по сентябрь температура воздуха в помещении 211/2 поднялась лишь на 10°C (с 5 до 15°C). Эта инерционность была

следствием теплоемкости огромной массы бетонных и металлических сооружений объекта «Укрытие» и расположения помещения 211/2 в его нижней части, где воздухообмен был незначительный. Даже при многосуточных морозах в первой декаде февраля (до $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$) температура в помещении 211/2 снизилась только с 13 до $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как зимой, так и летом в середине дня, когда, как правило, отбирали пробы аэрозолей в помещении 211/2, различие температур внутри ($T_{\text{вн}}$) и снаружи ($T_{\text{нар}}$) достигало $20 - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Наблюдения за воздушными потоками в дверном проеме между помещениями 208/9 и 211/2 (площадь проема $\sim 2\text{ м}^2$) показали, что большую часть времени (с третьей декады февраля до первых чисел октября) воздух поступал из помещения 211/2 в 208/9. В остальные месяцы (холодные) поток шел в обратную сторону: из 208/9 в 211/2. При этом скорость потока зависела от разности температур ($\Delta T = T_{\text{нар}} - T_{\text{вн}}$) во внешней среде и в помещении 211/2. С ростом ΔT скорость втекания воздуха в помещение 211/2 (холодный период) увеличивалась. Такую динамику потока определяла не только температура в помещении 211/2, а сложное сочетание температур в объекте «Укрытие». Об этом свидетельствует, например, связь скорости потока в системе «Байпас» и разности температур во внешней среде и в центральном зале объекта «Укрытие» [15].

В ряде случаев были определены воздушные потоки в коридоре, соединяющем помещения 208/9 и 207/4. Проходное сечение коридора около 4 м^2 . Через него в феврале - мае слабый поток (скорость $0,1 - 0,2\text{ м/с}$) направлялся в сторону помещения 207/4. Таким образом, воздух, поступающий из помещения 211/2 в 208/9, частично истекал в помещение 207/4. В этот период аэрозоли из помещений 207/4 и 208/9, которые системой буровых скважин соединены с подреакторным пространством, не могли поступать в помещение 211/2. До середины февраля и в октябре - декабре воздушный поток был «перевернут» и все время шел из помещения 207/4 в 208/9 и далее - в 211/2. Это подтвердило появление на фильтрах аэрозолей латекса, с использованием которого 8 февраля проводили пылеподавление в помещении 208/9 и через день в помещении 207/5. Обычно скорости потока в коридоре составляли $0,4 - 0,5\text{ м/с}$. Лишь во вторую неделю октября скорости повысились до $0,8 - 2\text{ м/с}$. Однако это не привело к увеличению скорости потока в дверном проеме помещения 211/2. Очевидно, большая часть воздуха уходила из помещения 208/9 на верхние отметки объекта «Укрытие».

Осмотры слоев фильтров после окончания пробоотборов показали, что в ряде случаев накопление аэрозольного осадка приводило к изменению их цвета, особенно третьего слоя, где использовали АФА РСП-20. Иногда этот слой становился чуть-чуть серым, иногда - интенсивно серым. Всего было проанализировано 66 пробы. В 33-й пробе цвет АФА РСП-20 не изменился, в 28-й чуть-чуть посерел и в 5-й стал серым. Какой-либо связи изменения внешнего вида фильтров с направлением и скоростью воздушного потока в помещении 211/2, температурой и относительной влажностью не обнаружено. Метеоусловия во внешней среде также не сказывались на запылении фильтров. Например, 11 апреля и 20 ноября АФА РСП-20 посерели при штилевой погоде, причем в ноябре еще при наличии тумана. Следует отметить, что появление интенсивного пылевого осадка ни в одном из пяти случаев не было следствием значительного увеличения количества радионуклидов-продуктов Чернобыльской аварии или ДП радона. Не выявлено также какой-либо закономерности в появлении чуть-чуть серой окраски фильтров или сохранении их белого цвета.

Концентрация аэрозолей-носителей продуктов аварии

Результаты радиометрических и гамма-спектрометрических измерений отобранных в 2012 г. аэрозолей приведены в табл. 1. Всего проанализировано 66 проб.

На рис. 2 представлены концентрации аэрозолей-носителей $\Sigma\beta$, которые варьировали от $0,4$ до 230 Бк/м^3 . Максимальная концентрация зарегистрирована 20 января в период сильного юго-восточного ветра, когда его средняя скорость достигала $4 - 5\text{ м/с}$, а максимальные порывы - 12 м/с . Минимальная концентрация зафиксирована 21 ноября при сухой штилевой погоде. Однако большинство результатов находилось в диапазоне $1 - 40\text{ Бк/м}^3$, что хорошо видно на рисунке.

Как следует из рис. 1 и рис. 2, сильная капель, наблюдавшаяся в помещении 211/2 в марте и апреле, и постепенно увеличивающаяся относительная влажность воздуха с 60 до 85 % не отразились на величинах $\Sigma\beta$. В мае эта ситуация сохранилась, хотя капель практически прекратилась, а относительная влажность увеличилась до 90 - 95 %.

Выше было отмечено, что пробоотборы в помещении 211/2 происходили одновременно с исследованием концентраций радиоактивных аэрозолей, выбрасываемых в атмосферу из объекта «Укрытие» через систему «Байпас» [14]. Из сопоставления полученных результатов следует, что в помещении 211/2 величины $\Sigma\beta$ были выше, чем в системе «Байпас». Так, в помещении 211/2 концентрации $\Sigma\beta$ более 10 Бк/м^3 наблюдали в 31 % проб, а в выбросах через систему «Байпас» - лишь в 9 %.

Чтобы сопоставить результаты, полученные в помещении 211/2, с концентрациями аэрозолей в смежных помещениях, в марте - мае были отобраны несколько проб в помещениях 207/5, 208/9 и 515/2.

Таблица 1. Характеристики радиоактивных аэрозолей в помещении 211/2 объекта «Укрытие» в 2012 г.

Дата отбора	Концентрация, Бк/м ³				$\frac{^{137}\text{Cs}}{\Sigma\beta}$	$\Sigma\beta$		ДПР		Условия отбора	Ветер по данным метео		
	^{137}Cs	$\Sigma\beta$	ДПР	^{212}Pb		АМАД, мкМ	σ	АМАД, мкМ	σ		средний, м/с	порывы, м/с	направ., град
20.01	58	227	19	4,6	0,26	1,3	2,6	0,26	1,8	метель	4,5	12,0	150
23.01	18	81	12	1,2	0,23	1,0	1,9	0,13	3,8		1,5	4,5	110
24.01	8,5	32	21	1,6	0,26	1,9	2,3	0,21	2,9		2,0	5,5	120
06.02	8,4	36	25	0,3	0,23	4,0	2,1	0,25	2,4	штиль	0,5	5	0
07.02	0,3	0,9	14	1,1	0,30	1,2	2,2	0,21	2		2,5	7,5	105
08.02	1,7	5,9	4,4	-	0,29	-	-	-	-		1,0	3,0	345
09.02	0,2	0,7	15	0,8	0,34	6,2	5,2	0,19	2,3	штиль	1,5	4,0	355
10.02	0,9	2,8	16	0,8	0,32	2,6	2,4	0,25	3,4		1,5	5,0	350
14.02	3,1	15	23	1,0	0,21	2,6	2,5	0,21	1,9		2,0	5,0	25
15.02	0,48	0,82	31	3,0	0,59	2,6	1,8	0,15	7		2,5	5,5	125
16.02	0,32	1,2	21	3,0	0,28	0,6	1,01	0,17	2,6	штиль	1,0	3,5	65
17.02	0,39	1,4	17	1,1	0,28	4,6	2,7	0,19	4,3	штиль	0,5	3,5	330
20.02	2,2	10	37	4,5	0,22	1,8	2,9	0,2	2,2		1,5	4,5	170
21.02	1,3	5,4	24	5,2	0,25	2,9	2,1	0,13	6	штиль	1,5	3,5	245
22.02	1,4	6,9	32	7,3	0,20	4,8	2,7	0,12	6,2		2,0	6	255
23.02	0,64	2,3	44	6,0	0,28	2,7	3,2	0,20	3,0		2,5	7,5	230
13.03	1,4	6,4	27	4,4	0,22	1,3	1,5	0,06	11	ветрено	3,5	10	270
15.03	3,5	14	32	1,9	0,25	3,8	3	0,21	4	ветрено	3,0	9,5	310
19.03	1,3	3,6	28	4,5	0,35	2,5	2	0,03	14	ветрено	4,0	9,0	240
20.03	0,4	0,8	32	2,4	0,49	1,1	1,9	0,13	5	ветрено	5,0	12	300
21.03	0,50	1,2	46	10	0,42	2,1	2,2	0,17	1,6		2,0	8,5	270
22.03	0,2	0,6	56	11	0,39	1,7	2	0,14	2,2		1,5	4,5	315
23.03	0,96	3,9	49	10	0,25	>8	-	0,18	2	ветрено	3,5	8,5	285
02.04	2,3	9,5	36	5,1	0,24	5,0	2,7	0,13	6	ветрено	5,0	14	225
03.04	0,4	0,79	40	6,6	0,49	3,0	3,1	0,12	4,0		2,5	6	245
04.04	0,37	0,75	48	7,0	0,49	1,5	2	0,08	6		3,0	7,5	125
05.04	0,60	1,5	53	11	0,41	2,8	2,2	0,06	10		2,0	6,5	300
06.04	0,71	1,9	51	7,5	0,38	4,9	2,8	0,24	2		2,0	4,5	50
09.04	6,6	20	34	1,5	0,33	4,0	2,2	0,03	14	ветрено	3,5	10,5	320
10.04	1,2	3,2	37	6,9	0,35	2,2	2,8	0,19	1,2		2,0	5,5	10
11.04	1,1	3,1	52	6,4	0,34	2,4	2,1	0,16	1,6	штиль	0,5	2,5	65
12.04	3,7	6,5	50	4,5	0,56	3,4	2,4	0,15	2,2		3,0	6,5	125
18.04	3,4	15	61	0,9	0,24	2,1	1,6	0,07	8		2,0	5,0	10
19.04	1,4	4,2	45	7,0	0,34	1,7	2,6	0,18	1,9		2,0	7,0	20
18.05	1,5	5,3	43	2,4	0,28	5,2	2,2	0,22	2,5	штиль	2,0	5,5	310
21.05	0,71	2,5	45	4,0	0,28	>8	-	0,14	4,4		2,0	7,0	85
22.05	0,57	2,7	53	9,8	0,21	5,3	2	0,14	5		1,5	5,0	125
23.05	0,58	1,4	54	8,3	0,40	6,2	2,1	0,12	5		2,0	5,5	35
24.05	0,74	2,4	73	6,2	0,31	4,4	1,6	0,56	2		2,5	8,0	30
28.05	0,33	0,81	59	9,0	0,41	5,4	2,2	0,29	2,4		1,5	6,0	150
29.05	1,5	4,8	66	10	0,32	5,1	1,6	0,35	1,1	штиль	0,5	3,0	105
31.05	0,83	2,3	54	1,4	0,37	>8	-	0,29	3,3		1,5	5,0	285
10.09	4,1	15	50	4,5	0,27	3,6	1,5	0,15	5,2		1,0	4,5	255
11.09	4,0	16	95	5,4	0,25	4,4	2	0,1	5,1		1,5	3,5	185
12.09	0,6	1,4	84	5,2	0,42	4,6	3,1	0,15	2,6		2,0	4,5	185
13.09	1,0	3,0	120	5,0	0,34	4,0	2,7	0,16	2,1		1,0	3,5	90
02.10	3,0	14	110	3,8	0,22	3,3	2,2	0,15	2,7		2,0	7,0	130
04.10	0,26	1,9	90	5,1	0,14	-	-	0,14	4,4		1,0	3,0	285
05.10	0,16	0,98	110	2,8	0,16	2,26	3,2	0,11	5,2		1,0	4,5	280
08.10	21	83	49	-	0,25	-	-	-	-		2,0	5,5	320
09.10	6,4	24	17	2,0	0,27	2,6	2,4	0,23	10		1,5	5,0	270
10.10	1,15	4,6	29	0,96	0,25	2,5	3,1	0,24	3,1		2,0	8,0	255

11.10	0,9	2,90	20	1,2	0,32	2,7	3,0	0,12	8,0		1,0	4,0	180
-------	-----	------	----	-----	------	-----	-----	------	-----	--	-----	-----	-----

Продолжение табл. 1

Дата отбора	Концентрация, Бк/м ³				$\frac{^{137}\text{Cs}}{\Sigma\beta}$	$\Sigma\beta$		ДПР		Условия отбора	Ветер по данным метео		
	^{137}Cs	$\Sigma\beta$	ДПР	^{212}Pb		АМАД, мкм	σ	АМАД, мкм	σ		средний, м/с	порывы, м/с	направ., град
12.10	1,1	4,4	20	0,8	0,25	3,4	2,8	0,18	2,7		1,0	3,5	280
13.11	12	47,0	49	1,9	0,24	3,2	2,2	0,18	1,5	туман	1,5	4,0	280
14.11	0,86	3,0	40	1,6	0,29	2,9	2,1	0,18	3,8		2,0	4,5	290
15.11	4,0	13	19	2,3	0,31	4,9	2	0,28	9		2,0	6,5	270
16.11	3,6	14	35	2,1	0,25	1,7	1,8	0,26	3,8		1,5	3,5	260
19.11	0,59	2	48	5,3	0,31	4,8	2,8	0,18	3,6	туман, штиль	1,0	4,5	200
20.11	0,50	1,7	38	3,7	0,30	3,2	2,9	0,2	4,7	туман, штиль	1,5	3,5	90
21.11	0,17	0,4	51	3,0	0,44	6,2	2,5	0,26	2,2		1,0	4,0	90
22.11	0,4	1,0	51	3,6	0,35	5,2	3,6	0,22	1,5	штиль	2,5	5,0	110
4.12	9,0	38	23	1,0	0,24	3,3	2,3	0,31	4,6		3,5	8,5	300
5.12	2,4	7,5	44	0,9	0,32	3,0	2,4	0,25	2,5		1,5	5,0	150
6.12	1,6	5,5	48	1,5	0,29	3,8	2	0,28	4,3	штиль	1,0	4,5	110
7.12	0,54	1,9		0,7	0,28	4,4	2,0	0,26	2,6	штиль	0,0	3,0	0

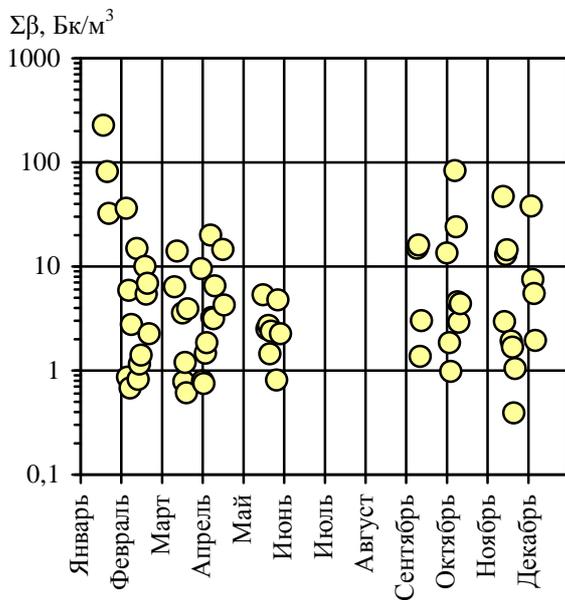


Рис. 2. Объемная активность аэрозоль-носителей суммы бета-излучающих нуклидов в помещении 211/2 объекта «Укрытие» в 2012 г.

$^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ составила 8,6. Это характерно для аэрозольных проб, отбирившихся в предыдущие годы в разных помещениях объекта «Укрытие» и системе «Байпас». Но средние значения $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,26$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 31$ оказались существенно ниже, чем в одновременно отбирившихся пробах из системы «Байпас» ($^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,42$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 50$) [14]. Из этого следует, что аэрозоли в помещении 211/2 были обеднены ^{137}Cs .

Таблица 2. Объемные активности аэрозолей в помещениях, смежных с помещением 211/2

Помещение	Дата отбора	Объемная активность, Бк/м ³				$\frac{^{137}\text{Cs}}{\Sigma\beta}$
		^{137}Cs	$\Sigma\beta$	ДПР	^{212}Pb	
207/5	21.05	0,22	0,67	36	5,1	0,33
208/9	19.03	0,57	1,4	20	3,6	0,41
	22.05	0,28	0,6	46	7,9	0,42
	23.05	0,20	0,47	45	6,7	0,43
	28.05	0,31	0,63	48	8,0	0,49
	30.05	5,3	8,4	95	11	0,63

515/2	12.04	0,73	2,1	50	3,2	0,35
-------	-------	------	-----	----	-----	------

Ранее низкие значения $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,13$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 15$ были зарегистрированы в 2011 г. при исследовании аэрозолей в помещении 012/7. Их присутствие было интерпретировано как свидетельство деструкции ЛТСМ [8]. Из табл. 3 также следует, что величины соотношений $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ мало зависели от направления воздушного потока в дверном проеме между помещениями 208/9 и 211/2. Выявленные соотношения $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ показали, что в помещение 211/2 постоянно поступают аэрозоли из каких-то источников, содержащих ЛТСМ, которые деструктируют и частично переходят в аэрозольное состояние. Можно предположить, что такие источники находились в ближайшем помещении 217/2 (на высотной отметке +6 м), а также в помещениях 301/5 и 304/3 (на +9 м).

Таблица 3. Соотношения радионуклидов в аэрозолях помещения 211/2 в 2012 г.

Дата	$^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$	$^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$	$^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$	Поток воздуха
20.01	0,26	31	5,6	-
23.01	0,23	25	-	-
24.01	0,26	23	-	-
6.02	0,23	24	14,8	-
14.02	0,21	26	6,8	208 → 211
20.02	0,22	16	-	211 → 208
21.02	0,25	27	-	211 → 208
22.02	0,20	23	-	211 → 208
13.03	0,22	20	-	211 → 208
15.03	0,25	25	-	208 → 211
9.04	0,33	98	-	208 → 211
12.04	0,56	47	-	211 → 208
18.04	0,26	28	-	211 → 208
19.04	0,34	64	-	211 → 208
21.05	0,28	50	-	211 → 208
22.05	0,21	46	-	211 → 208
11.09	0,25	24	8,2	211 → 208
8.10	0,25	24	7	208 → 211
9.10	0,26	29	-	208 → 211
13.11	0,24	26	-	застой
16.11	0,25	27	-	208 → 211
4.12	0,24	26	9,1	208 → 211
Среднее	0,26	31	8,6	

Концентрации аэрозолей ДПР

Интерес к ДПР обусловлен тем, что среди них имеются альфа-излучающие изотопы, которые вносят вклад во внутреннее облучение персонала объекта «Укрытие». Кроме того, они являются своеобразной меткой субмикронных аэрозолей, поскольку их носителями служат присутствующие в воздухе ядра конденсации, преимущественный размер которых 0,1 – 0,3 мкм [16].

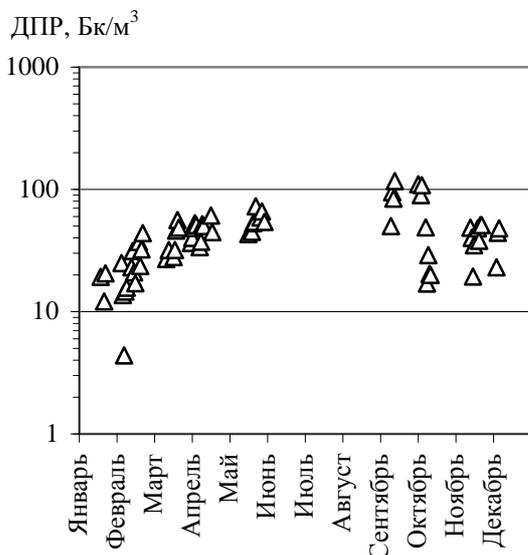


Рис. 3. Объемная активность аэрозолей-носителей ДПР в помещении 211/2 в 2012 г.

Из результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 3, следует, что в помещении 211/2 содержание ДПР находилось в диапазоне 10 – 100 Бк/м³. При этом наблюдался годичный ход концентрации: минимум в холодный период и максимум в сентябре-октябре. Максимальная концентрация 120 Бк/м³ была зарегистрирована 13 сентября. Примерно такая же картина наблюдалась год назад в помещении 012/7 [8].

Измерения ^{212}Pb , образующегося в цепочке радиоактивного распада торона, показали, что его концентрации находились, как правило, в диапазоне 1 – 10 Бк/м³ (рис. 4).

Исходя из физико-химических характеристик радона и торона, можно было ожидать корреляции

между концентрациями ДПР и ^{212}Pb . Однако, как следует из рис. 5, это предположение оправдалось лишь отчасти. Аналогичная ситуация сложилась годом ранее в помещении 012/7. Очевидно, ДПР поступают в помещения 012/7 и 211/2 из нескольких источников. Помимо бетонных стен и перекрытий самих помещений, это может быть грунт в фундаменте объекта «Укрытие», перенос воздуха из других помещений, а также эманирование торона из ЛТСМ при распаде имеющегося там ^{232}U [17].

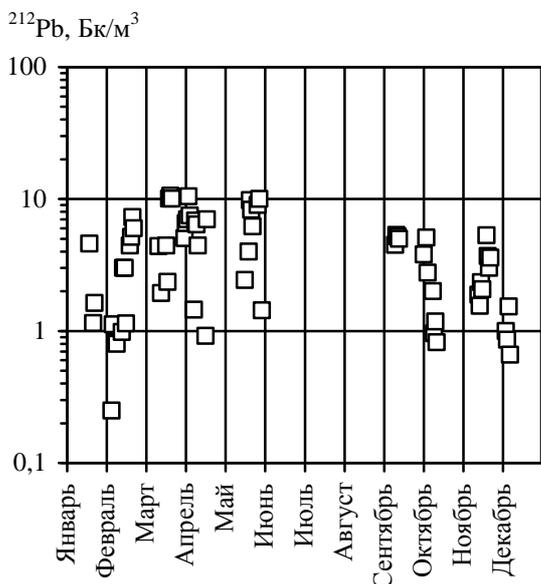


Рис. 4. Объемная активность аэрозолей-носителей ^{212}Pb в помещении 211/2 в 2012 г.

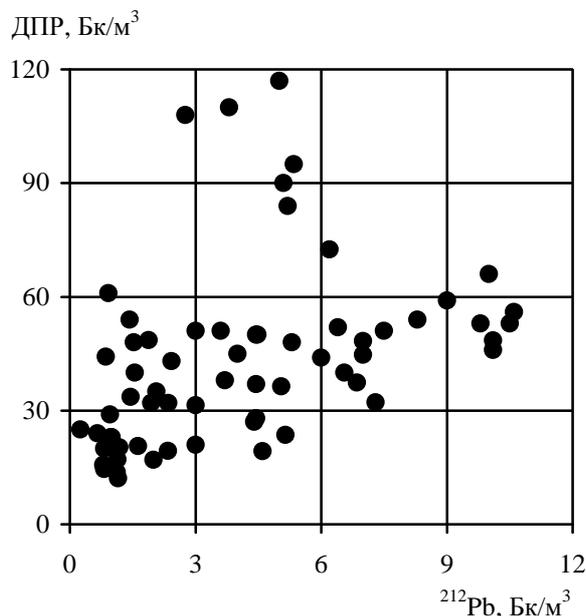


Рис. 5. Соотношения концентраций ДПР и ^{212}Pb в помещении 211/2.

Подобно $\Sigma\beta$ объемные активности ^{212}Pb в системе «Байпас» оказались в 2 – 3 раза ниже, чем в помещении 211/2. Это подтверждает высказанное выше предположение, что ДПР, эманлирующие из бетонных конструкций объекта «Укрытие», поступают в вентиляционный поток на всех высотных отметках.

Дисперсность радиоактивных аэрозолей

Применение многослойных фильтров Петрянова позволило одновременно исследовать не только радионуклидный состав и объемные активности аэрозолей, но и их распределение по размерам (дисперсность). Методика определения размеров аэрозолей изложена в [18].

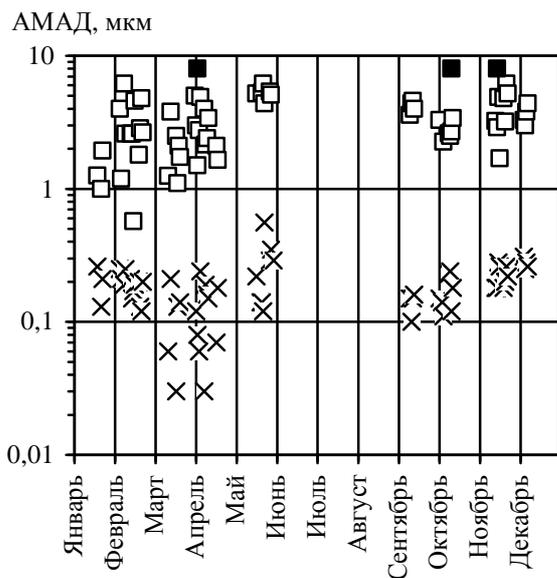


Рис. 6. АМАД аэрозолей-носителей $\Sigma\beta$ (\square) и ДПР (\times) в помещении 211/2 в 2012 г.; \blacksquare – выделены пробы с АМАД больше 8 мкм.

Исходя из априорной информации об их логарифмически нормальном распределении, были рассчитаны активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) и стандартное геометрическое отклонение σ . Полученные результаты приведены в табл. 1 и на рис. 6. Как видно на рисунке, наиболее часто носителями $\Sigma\beta$ были частицы с АМАД 1 – 8 мкм. Среди 66 измеренных проб лишь три имели АМАД менее 1 мкм и столько же – свыше 8 мкм. Такое распределение свидетельствовало, что основным механизмом их возникновения был дисперсионный. Вероятнее всего, они образовывались вследствие деструкции поверхностей ЛТСМ, на что указывают приведенные выше низкие значения соотношений $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$.

Существенно иную дисперсность имели аэрозоли-носители ДПР. Их АМАД находились в диапазоне 0,03 – 0,6 мкм (см. рис. 6). Однако наиболее часто ДПР были связаны с частицами 0,1 – 0,3 мкм с преимущественным значением около 0,15 мкм. Это обусловлено тем, что основным механизмом их обра-

зования был конденсационный, т.е. осаждение атомов свинца и висмута, возникающих при радиоактивном распаде радона и торона, на атмосферных ядрах конденсации [16]. Представленные здесь результаты характерны для объекта «Укрытие» и уже обсуждались в публикациях [14, 15, 19, 20]

Выводы

1. На протяжении 2012 г. в помещении 211/2 объекта «Укрытие» отобраны и проанализированы 66 проб радиоактивных аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии и ДПР.

2. Относительная влажность воздуха в помещении 211/2 в зависимости от сезона года варьировала от 25 до 95 %: минимальные значения в феврале и максимальные в мае – июне. В течение суток изменялась не более чем на 3 – 5 %. Суточная температура воздуха в помещении 211/2 была очень стабильная, хотя имелся годичный ход, смещенный относительно внешней среды. Наиболее высокие температуры 15 – 17 °С наблюдались в холодный период года, а наиболее низкие (около 5 °С) – в весенний (март – апрель).

3. Концентрации аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии варьировали от 0,4 до 230 Бк/м³. Однако большинство результатов находилось в диапазоне 1 – 40 Бк/м³. Одновременные исследования концентраций радиоактивных аэрозолей в помещении 211/2 и выбрасываемых в атмосферу из объекта «Укрытие» через систему «Байпас» показали, что между величинами $\Sigma\beta$ корреляции нет.

4. Выявленные по 22 пробам соотношения $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,26$ и $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 31$ оказались существенно ниже, чем в одновременно отбировавшихся пробах из системы «Байпас», в которых они были соответственно 0,42 и 50. Из этого следовало, что в помещение 211/2 постоянно поступали аэрозоли из каких-то источников, содержавших ЛТСМ, которые деструктурировали и частично переходили в аэрозольное состояние. Можно предположить, что они находились в ближайших помещениях 217/2 (на высотной отметке +6 м), а также в 301/5 и 304/3 (на +9 м).

5. Средняя величина $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu} = 8,6$, что характерно для аэрозольных проб, отбировавшихся в предыдущие годы в разных помещениях объекта «Укрытие» и системе «Байпас».

6. С помощью многослойных фильтров Петрянова показано, что наиболее часто носителями продуктов аварии были частицы с АМАД 1 – 8 мкм. Из этого следует, что основным механизмом их возникновения был диспергационный, в частности вследствие деструкции поверхности ЛТСМ.

7. В помещении 211/2 объемные активности ДПР находились в диапазоне 10 – 100 Бк/м³. Максимальная концентрация составила 120 Бк/м³ и была зарегистрирована 13 сентября. Концентрации ^{212}Pb , образующегося в цепочке радиоактивного распада торона, находились, как правило, в диапазоне 1 – 10 Бк/м³. При этом как для ДПР, так и для ^{212}Pb наблюдался годичный ход объемной активности: минимум в холодный период и максимум в сентябре - октябре. Высокое содержание этих радиоактивных веществ в помещениях объекта «Укрытие» обусловлено эминированием радона и торона из строительных конструкций и грунта, в который заглублен фундамент сооружения.

8. Величина АМАД аэрозолей-носителей ДПР была, как правило, 0,1 – 0,3 мкм (преимущественно 0,15 мкм). Такой размер указывает на конденсационный механизм образования аэрозолей ДПР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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).
2. Кузьмина И.Е., Токаревский В.В. Частицы дисперсной фазы аэрозолей объекта «Укрытие» // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. – 1996. – Вип. 4. – С. 141 – 150.
3. Бадовский В.П., Ключников А.А., Кравчук Т.А. и др. Мониторинг аэрозольной обстановки в некоторых подреакторных помещениях объекта «Укрытие». – Чернобыль, 2008. – 16 с. – (Препр. / НАН Украины. Ин-т проблем безопасности АЭС; 08-1).
4. 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.
5. Бадовский В.П., Ключников А.А., Меленевский А.Э. и др. Оценка состояния поверхности ЛТСМ в реальных условиях объекта «Укрытие» // Международная 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
6. 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.

7. Бадовский В.П., Ключников А.А., Меленевский А.Э. и др. Генерация топливосодержащей пыли лавообразными материалами объекта «Укрытие» // Там же. – 2013 – Вып. 20. – С. 68 – 76.
8. Огородников Б.И., Хан В.Е., Ковальчук В.П. Аэрозоли – свидетели разрушения лавообразных топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» // Там же. – С. 94 – 105.
9. Ключников А.А., Краснов В.А., Рудько В.М., Щербин В.Н. Объект «Укрытие»: 1986 – 2006. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2006. – 168 с.
10. Высотский Е.Д., Довыдьков А.И., Довыдьков С.А. и др. Анализ путей доступа к скоплениям топливосодержащих материалов в помещении 305/2 объекта «Укрытие». – Ч. 3. Исследовательские скважины на высотных отметках 10 – 11 м и в ПРК. – Чернобыль, 2012. – 30 с. – (Препр. / НАН Украины. ИПБ АЭС; 12-2).
11. Высотский Е.Д., Довыдьков А.И., Довыдьков С.А. и др. Анализ путей доступа к скоплениям топливосодержащих материалов в помещении 305/2 объекта «Укрытие». – Ч. 4. Исследовательские скважины на высотных отметках 12 – 15 м. – Чернобыль, 2012. – 36 с. – (Препр. / НАН Украины. ИПБ АЭС; 12-3).
12. Сейсмическая радоновая станция СРС-05. Руководство по эксплуатации. – М.: Приборостроительная компания «НТМ-Защита», 2009. – 20 с.
13. 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.
14. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К., Краснов В.А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2012 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2013. – Вып. 21. – С. 107 – 116.
15. 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.
16. Postendörfer J. Properties and behaviour of radon and their decay products in air // J. Aerosol Sci. – 1994. – Vol. 25. – P. 219 – 263.
17. 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.
18. 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.
19. Огородников Б.И., Пазухин Э.М., Ключников А.А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986 – 2006 гг. Монография. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины.– 2008. – 456 с.
20. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К., Краснов В.А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2010 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2011. – Вып. 17. – С. 98 – 105.

Б. І. Огородников^{1,2}, В. Є. Хан¹, В. П. Ковальчук¹

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

² Фізико-хімічний інститут ім. Л. Я. Карпова, пров. Обуха, 63-1/12, буд. 6, Москва, 105064, Росія

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОАКТИВНИХ АЭРОЗОЛІВ У ПРИМІЩЕННІ 211/2 ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» У 2012 Р.

Представлено радіонуклідний склад, дисперсність і концентрації аерозолів у приміщенні 211/2 об'єкта «Укриття» у 2012 р. Проби відбирали на тришарові фільтри Петрянова. Установлено, що концентрація суми довгоіснуючих бета-випромінюючих нуклідів-продуктів Чорнобильської аварії коливалася в діапазоні 1 – 40 Бк/м³. Зі співвідношення концентрацій $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,26$ і $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 31$ випливало, що до приміщення 211/2 надходило повітря з приміщень, де відбувається деструкція лавоподібних паливовмісних матеріалів та їхній частковий перехід в аерозольний стан. Носіями радіонуклідів були аерозолі крупніше 1 мкм. Максимальний вміст радону досягав 100 Бк/м³. Носіями дочірніх продуктів радону і торону були переважно частинки діаметром 0,1 - 0,3 мкм. Концентрації ^{212}Pb - дочірнього продукту торону - коливалися від 1 до 10 Бк/м³.

Ключові слова: об'єкт «Укриття», лавоподібні паливовмісні матеріали, тришарові фільтри, радіоактивні аерозолі, концентрація, дисперсність, співвідношення радіонуклідів.

B. I. Ogorodnikov^{1,2}, V. E. Khan¹, V. P. Kovalchuk¹

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

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

CHARACTERISTICS OF RADIOACTIVE AEROSOLS IN PREMISE 211/2 OF THE OBJECT “UKRYTTYA” IN 2012

Radionuclide composition, volume activity and dispersity are presented in “Ukryttya” object premise 211/2 in 2012 year. The samples were taken with using Petryanov's three-layer filters. It was stated that concentration of beta-radiating aerosol-carriers ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ and ^{137}Cs), as a rule, was fluctuating within the range of 1 – 40 Bq/m³. The ratio of $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta = 0,26$ and $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 31$ had indicated that the air came in premise 211/2 from premises, where the de-

struction of lava-like fuel materials and a partial transfer in the aerosol state. Their carriers were the particles with active median aerodynamic diameter 1–8 μm . Maximal concentration of radon made near 100 Bq/m^3 . The carriers of daughter products of radon and thoron were the particles with active median aerodynamic diameter 0,1 – 0,3 μm . Volumetric activity of ^{212}Pb was fluctuating within the range of 1 – 10 Bq/m^3 .

Keywords: "Ukryttya" object, lava-like fuel-containing materials, three-layer filters of radioactive aerosols, volumetric activity, dispersity, ratio of radionuclides.

REFERENCES

1. *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. - Moscow, 1991. - 21 p. - (Prepr. / I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, 5434/3). (Rus)
2. *Kuzmina, I. E., Tokarevskiy V. V.* Aerosol particles dispersed phase "Shelter" // Problems Chornobyl exclusion zone. - 1996. - Iss. 4. - P. 141 - 150. (Rus)
3. *Badovsky V. P., Klyuchnikov A. A., Kravchuk T. A. et al.* Aerosol situation monitoring in some under-reactor premises at object "Ukryttya". - Chernobyl, 2008. - 16 p. - (Prepr. / National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Problems of NPP safety, 08-1). (Rus)
4. *Badovsky V. P., Klyuchnikov A. A., Kravchuk T. A. et al.* Aerosol characteristic researching in basic fuel-containing at object "Ukryttya" // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2009. - Iss. 12. - P. 103 – 11. (Rus)
5. *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)
6. *Melenevsky A. E., Ushakov I. A., Badovsky V. P.* Research FCM dust generating ability of object "Ukryttya" // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2012. - Iss. 18. - P. 119 – 120. (Ukr)
7. *Badovsky V. P., Klyuchnikov A. A., Melenevsky A. E. et al.* Fuel containing dust generated by object "Ukryttya" lava materials // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2013 - Iss. 20. - P. 68 - 76. (Rus)
8. *Ogorodnikov B. I., Khan V. E., Kovalchuk V. P.* Aerosols as evidences of destruction in the object "Ukryttya" // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2013 - Iss. 20.- P. 94 - 105. (Rus)
9. "Shelter" object: 1986 - 2011. On the way to conversation: monograph / A. A. Klyuchnikov, V. A. Krasnov, V. M. Rudko, V. N. Scherbin. - Chernobyl: Institute of Problems of NPP safety 2011. – 288 p. (Rus)
10. *Vysotsky E. D., Dovydkov A. I., Dovydkov S. A. et al.* Analysis of access pathes to agglomeration of fuel-containing materials in object "Ukryttya" 305/2 room. - Part 3. Research well on high-altitude marks of 10 - 11 m and PRK. - Chernobyl, 2012. - 30. - (Prepr. / National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Problems of NPP safety, 12-2). (Rus)
11. *Vysotsky E. D., Dovydkov A. I., Dovydkov S. A. et al.* Analysis of access pathes to agglomeration of fuel-containing materials in object "Ukryttya" 305/2 room.i. - Part 4. Research well on high-altitude marks 12 - 15 m - Chernobyl, 2012. - 36. – (Prepr. / National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Problems of NPP safety, 12-3). (Rus)
12. *Radon seismic station CPC-05. Operating manual.* - Moscow: Instrument company "NTM-zaschita", 2009. – 20 p. (Rus)
13. *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)
14. *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 Chornobuy). - 2013. - Iss. 21. - P. 107 – 116. (Rus)
15. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2011 // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2012. - Iss. 19. - P. 94 – 103. (Rus)
16. *Postendörfer J.* Properties and behaviour of radon and their decay products in air // J. Aerosol Sci. – 1994. – Vol. 25. – P. 219 – 263.
17. *Ogorodnikov B. I., Budyka A K., Khan V. E. et al.* ^{220}Rn as an additional factor of radiation hazard in the Shelter // Radiokhimiya (Radiochemistry). – 2009. – Vol. 51, № 4. – P. 344 - 352. (Rus)
18. *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.
19. *Ogorodnikov B. I., Pazukhin E. M., Klyuchnikov A. A.* Radioactive aerosols of the Shelter: 1986 - 2006 years. Monograph. – Chernobyl: National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Problems of NPP safety, 2008. - 456. (Rus)
20. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2010 // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobuy). - 2011. - Iss. 17. - P. 98 – 105. (Rus)