

Аэрозоли-носители ^{212}Pb в подреакторных помещениях объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС

Б. И. Огородников^{а,б}, В. Е. Хан^{*б}

^а Физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, 105064, Москва, ул. Воронцово поле, д. 10

^б Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 07270, Чернобыль Киевской обл., ул. Кирова, д. 36а;

* e-mail: khanv@mail.ru

Получена 22.01.2018, после доработки 02.05.2018, принята к публикации 11.05.2018

УДК 621.039.1

Обобщены результаты пятилетних исследований в подреакторных помещениях объекта «Укрытие». Установлено, что на высотных отметках от 0 до 12 м средняя объемная активность (ОА) аэрозолей-носителей ^{212}Pb составляет около 10 Бк/м³. Основным источником ^{220}Rn и образующегося из него ^{212}Pb является ^{232}Th , содержащийся в строительных конструкциях. Максимальные ОА ^{212}Pb приходятся на теплый период года, а минимальные – на холодный. В вентиляционном выбросе через систему «Байпас» ОА ^{212}Pb в 4–5 раз меньше, чем в подреакторных помещениях. Активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) аэрозолей-носителей ^{212}Pb преимущественно находился в диапазоне 0.06–0.4 мкм. При работах в подреакторном пространстве облучение вследствие вдыхания ^{212}Pb может составлять 3–5% от предела годовой эффективной дозы (20 мЗв), принятой на Украине.

Ключевые слова: Чернобыльская авария, радиоактивные аэрозоли, радон-220, свинец-212, объемная активность, дисперсность аэрозолей, доза облучения.

DOI: 10.1134/S0033831119010118

Введение

В объекте «Укрытие» ^{222}Rn и его дочерние продукты (ДП) занимают особое место. Их наличие не связано со взрывом реактора в 1986 г., но они влияют на радиационную обстановку и мониторинг аэрозолей-продуктов аварии. Первыми на это обратили внимание в 1987 г. специалисты СНИИП (Москва) при создании подсистем радиационного контроля и диагностики [1]. Однако целенаправленные наблюдения за ^{222}Rn и его ДП стали проводить лишь с конца 2000 г. [2]. Уже при первых анализах были зарегистрированы еще аэрозоли-носители ^{212}Pb , что свидетельствовало о присутствии в воздухе ^{220}Rn – еще одного изотопа радона с периодом полураспада 55.6 с. В 2006–2010 гг. с помощью трековых детекторов ТДА-1, предоставленных Радиевым институтом им. В. Г. Хлопина (Санкт-Петербург), были проведены радоновые съемки [3]. Установлено, что в ряде помещений средняя объемная активность (ОА) превышала 150 Бк/м³ [2, 4].

Наличие ДП $^{220,222}\text{Rn}$ затрудняет быстрое получение сведений об искусственных радионуклидах (изотопы Pu, ^{241}Am , ^{90}Sr + ^{90}Y , ^{137}Cs и другие), поскольку их ОА превосходили содержание α - и β -активных продуктов Чернобыльской аварии. Необходимо выдерживать аэрозольные пробы не менее 3–4 ч, чтобы существенно снизилось содержание ДП ^{222}Rn , и 4 сут – ДП ^{220}Rn , в частности ^{212}Pb , имеющего период полураспада 10.6 ч.

Экспрессная оценка аэрозольной обстановки – одна из главных задач службы радиационной безопасности, особенно при возникновении нештатных

ситуаций, например возгораний. Кроме того, наличие ДП радона с ОА свыше 100 Бк/м³ – дополнительный фактор ингаляционного облучения персонала объекта «Укрытие». Естественно, радон и его ДП, в частности α -излучающие, приводят к ионизации воздушной среды, которую в объекте «Укрытие» никогда не исследовали и не контролировали.

Одна из научных и практических проблем связана с эманированием ^{220}Rn из топливосодержащих материалов (ТСМ), в том числе лавообразных (ЛТСМ), в которых содержится ^{232}U , накопившийся в топливе за два года работы 4-го энергоблока ЧАЭС перед аварией [5].

Ниже представлены данные об аэрозолях-носителях ^{212}Pb в подреакторных помещениях 012/7, 012/15, 210/7, 304/3 и 305/2, в которые в 1986 г. после взрыва реактора 4-го блока проникли ЛТСМ, требующие пристального внимания вследствие радиационной и ядерной опасности. Частично будут рассмотрены концентрации и физико-химические характеристики ДП ^{222}Rn , которые были затронуты в обзорах [2, 6].

Сведения о помещениях и ЛТСМ

Помещение 012/7 расположено на самой нижней высотной отметке (0 м) разрушенного реакторного здания (блок Б). Оно входит в систему бассейна-барботера (ББ-1) 4-го блока ЧАЭС. Его размеры в плане 6 × 72 м, высота около 3 м. С востока и запада к нему примыкают аналогичные по конфигурации и строительным материалам помещения 012/6 и 012/8. Между ними имеются проходы и технологические

проемы, по которым возможен доступ в различные точки и воздухообмен.

Пристальное внимание к помещению 012/7 после аварии 1986 г. связано с тем, что оно оказалось нижней точкой распространения лавы большого вертикального потока, который от места проплавления шахты реактора преодолел по вертикали около 10 м [7, 8]. Отметим, что в нижних помещениях объекта «Укрытие» начинается формирование воздушных потоков, которые выносят радиоактивные аэрозоли в свободную атмосферу через технологические отверстия и неплотности на верхних отметках объекта «Укрытие», а также систему «Байпас» и вентиляционную трубу.

Лавовое скопление в помещении 012/7 имеет в плане форму эллипса с меридиональной осью длиной ~3 м и широтной – ~2 м [8]. Его наибольшая высота в куполе ~0.8 м. Нижняя часть скопления (~0.3 м) залита бетоном, поступавшим сюда в 1986 г. при возведении каскадной стены объекта «Укрытие». По оценке на сентябрь 2010 г. [7] в этом скоплении, получившем название «куча» ББ-1, содержится 1.0 ± 0.5 т урана. В это время у южного края скопления мощность экспозиционной дозы γ -излучения (МЭД) на расстоянии 0.1 м составляла около 70 Р/ч.

Помещение 012/15 расположено на высотной отметке +3 м и входит в систему бассейна-барботера (ББ-2). Лава стекала сюда по паросбросным трубам из помещения 210/7. Исследования ББ-2 и находящихся там ЛТСМ представлены в отчете Радиового института им. В. Г. Хлопина [9] и обобщены в работе [8]. Скопление ЛТСМ, получившее название «куча» ББ-2 [7], находится между осями 47₊₁₀₀₀–48₋₁₀₀₀ и рядами И₃₀₀₀–К. Ее северный край при сооружении объекта «Укрытие» был залит бетоном, который поднимается над полом примерно на 0.7 м. Поверхность скопления покрыта пемзообразным слоем толщиной около 0.1 м. ЛТСМ содержатся также в пяти паросбросных трубах диаметром 0.28 м, по которым лава поступала в помещение 012/15. В смежном помещении 012/14 ЛТСМ заполняют четыре паросбросные трубы, расположенные между осями 46–47 и рядами К–Л.

Согласно данным работы [8], объем «кучи» ББ-2 составляет 23 ± 6 м³. При плотности коричневой керамики 2.14 ± 0.34 т/м³ и содержании урана 9–13% его общее количество в «куче» близко к 3 т.

Помещение 210/7 и смежные 210/5, 210/6, 210/8 и 208/12 входят в систему парораспределительного коридора (ПРК). Площадь ПРК около 630 м². Пол находится на отметке +6, потолок – +8 м. Южные части помещений 210/5, 210/6 и 210/7 залиты водой. Ее глубина в 2013 г. составляла 10–15 см. Поэтому ЛТСМ постоянно контактируют с водой. Помеще-

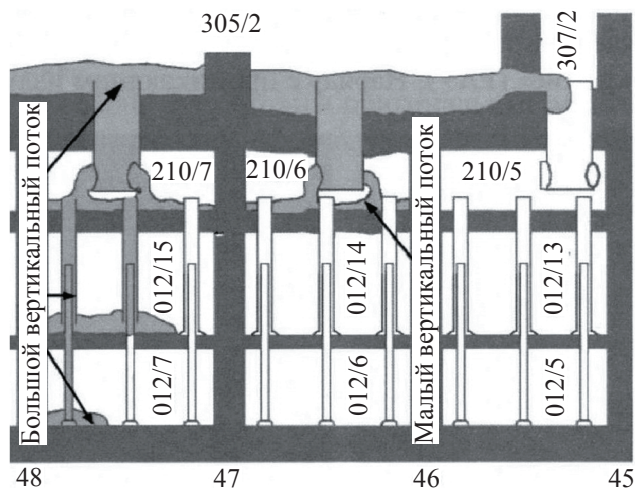


Рис. 1. Распространение лавы в подреакторных помещениях.

ние 208/12, в котором размещали пробоотборную аппаратуру, всегда сухое.

ЛТСМ попали в помещения 210/6 и 210/7 через 3-й и 4-й паросбросные клапаны из юго-восточной и юго-западной частей помещения 305/2. Через остальные клапаны во время строительства объекта «Укрытие» в помещения поступил «свежий» бетон. Общий объем ЛТСМ в ПРК составляет около 58 м³ [8]. Количество урана 12 ± 6 т.

Помещения 305/2 и 304/3 – ключевые по образованию и растеканию лавовых потоков (рис. 1). В первом находится схема ОР, на которую опирается шахта реактора. До аварии нижняя высотная отметка обоих помещений соответствовала +9, верхняя – +12 м. После взрыва реактора вследствие катастрофических разрушений помещения 305/2, 304/3, 301/5, шахта реактора и центральный зал стали общим пространством для воздухообмена и переноса аэрозолей.

Из-за больших величин МЭД и обрушений помещения 305/2 и 304/3 остаются практически необследованными. Основные сведения о количестве и расположении ЛТСМ базируются на результатах буровых работ, измерениях нейтронных и тепловых потоков, обследованиях с помощью видеокамер [7, 8, 10, 11]. В соответствии с расчетами [7] в помещении 305/2 находится 80 т урана, а в помещении 304/3 – 6 т урана.

Средства и методы контроля радиоактивных аэрозолей

Аэрозоли отбирали воздуходувкой Н810 RADĖCO со скоростью около 100 л/мин. Использовали пакеты фильтров Петрянова [12] площадью 20 см², состоящие из слоев ФПА-70-0,13 (голубой), ФПА-70-0,21 (розовый) и двух АФА РСП-20 (белый). Два фильтра АФА обеспечивали полноту улавливания аэрозолей ДП. В помещениях 012/7,

012/15, 210/7 воздухоудку размещали на расстоянии около 1 м от пола и стен. Поскольку в помещении 305/2 доступа не было, пробы отбирали через скважину В-12-76, пробуренную в помещение 304/3, присоединяя воздухоудку к обсадной трубе диаметром 10 см и длиной 2 м. Отбор каждой пробы продолжался около 2 ч. Затем общую β -активность фильтров измеряли на радиометре КРК-1, а ^{137}Cs определяли на γ -спектрометре. Многослойные пакеты фильтров позволяли определять ОА, радионуклидный состав и дисперсность аэрозолей [13].

На радиометре 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 ДП на момент окончания прокачки воздуха. Через 4–5 сут (после распада ДП Rn) измерения повторяли. При этом каждый слой экспонировали 1000 с. В результате определяли не только содержание ^{212}Pb и ДП Rn, но и суммарную β -активность ($\sum\beta$) нуклидов-продуктов Чернобыльской аварии: $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{137}Cs .

Объемная активность ^{212}Pb в подреакторных помещениях

Помещение 012/7. Систематические исследования радиоактивных аэрозолей в помещении 012/7 были начаты осенью 2010 г. и продолжались 13 мес. Отобрано 69 проб. Сведения об аэрозолях-носителях радионуклидов аварийного генезиса и ДП Rn представлены в работе [16]. γ -Спектрометрические и радиохимические измерения показали, что состав аэрозолей идентичен образцам коркового покрова лавы и ее коричневой керамики. Это свидетельствовало о разрушении последних и генерации аэрозолей с их поверхностей.

Результаты измерений ^{212}Pb представлены на рис. 2. ОА варьировала от 0.5 до 25 Бк/м³ при среднем значении 7.1 Бк/м³. Прослеживается сезонный ход: более высокие ОА в теплое время года, низкие – в холодное. Основная причина такой динамики – изменение тяги воздуха в вентиляционной трубе, которая в весенне-летний период может полностью прекращаться из-за большой разницы температур внутри объекта «Укрытие» и во внешней среде ($\Delta T \sim 20^\circ\text{C}$).

Помещение 012/15. Исследования аэрозолей в помещении 012/15 проводили с конца февраля до начала декабря 2014 г. Отобрано 68 проб. Сведения об аэрозолях-носителях радионуклидов аварийного генезиса, ОА Rn и его ДП представлены в работе [17]. Установлено, что соотношение ОА радионуклидов-продуктов Чернобыльской аварии было существенно иным, чем в помещении 012/7. Так, отношение $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ в аэрозолях из помещения 012/15 варьировало от 50 до 200, а в 012/7 было близко к

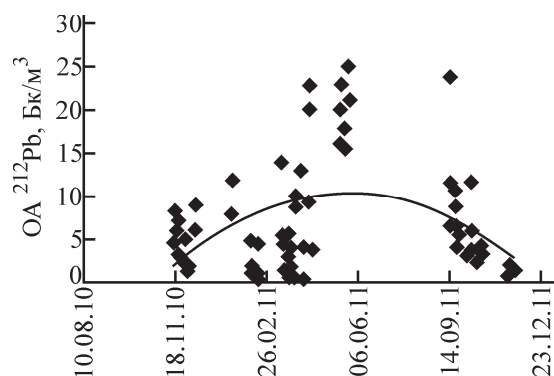


Рис. 2. ОА аэрозолей-носителей ^{212}Pb в помещении 012/7 в 2010–2011 гг.

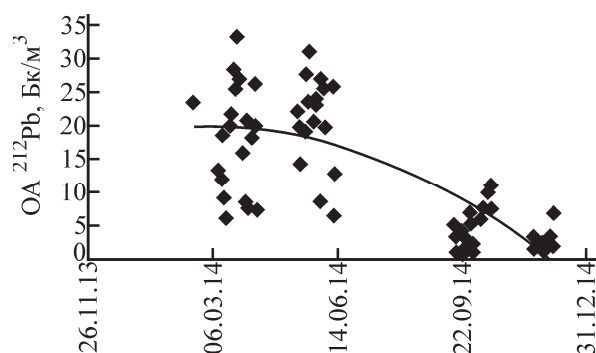


Рис. 3. ОА аэрозолей-носителей ^{212}Pb в помещении 012/15 в 2014 г.

15. Это показывало, что поступление аэрозолей с поверхности лавы не было определяющим механизмом при формировании радиоаэрозольной обстановки в помещении.

Результаты измерений ^{212}Pb представлены на рис. 3. ОА варьировала от 0.5 до 33 Бк/м³ при среднем значении 13 Бк/м³. Так же как и в помещении 012/7, имеется сезонный ход: более высокие ОА приходятся на теплое время года.

Помещение 210/7. Исследования аэрозолей в помещении 210/7 проводили с середины февраля до начала декабря 2013 г. Отобрано 60 проб. Сведения об аэрозолях-носителях радионуклидов аварийного генезиса, ОА Rn и его ДП представлены в работе [18]. По результатам γ -спектрометрии 10 проб установлено следующее соотношение ОА радионуклидов: $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu} = 7.1$, $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} = 140$ (при минимальном значении 58 и максимальном 267) и $^{137}\text{Cs}/\sum\beta = 0.52$ (минимум 0.38, максимум 0.72). Из последнего соотношения следует, что вклад ^{137}Cs в $\sum\beta$ составлял около 50%. Таким образом, аэрозоли в помещении 210/7 были обогащены радиоцезием по сравнению с его содержанием в отработавшем ядерном топливе и ЛТСМ. Источником дополнительного цезия являлись аэрозоли-носители ^{137}Cs . Эти аэрозоли образуются в результате деструкции поверхностей, на которых ранее сорбировались частицы-носители конденсационного цезия. Следовательно,

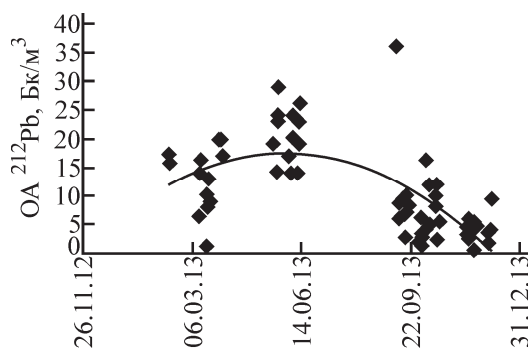


Рис. 4. ОА аэрозолей-носителей ^{212}Pb в помещении 210/7 в 2013 г.

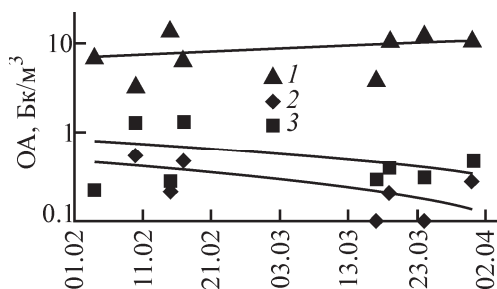


Рис. 5. ОА аэрозолей-носителей ^{212}Pb (1), а также $\Sigma\beta$ (2) и ^{137}Cs (3) в помещениях 304/3 и 305/2 в 2010 г.

поступление аэрозолей с поверхности лавы, как и в помещении 012/15, не было определяющим механизмом при формировании радиоаэрозольной обстановки в помещении 210/7. В этом было и различие с помещением 012/7.

Результаты измерений ^{212}Pb представлены на рис. 4. ОА варьировала от 0.5 до 36 $\text{Бк}/\text{м}^3$ при среднем значении 11.2 $\text{Бк}/\text{м}^3$. Как и в помещениях 012/7 и 012/15, имеется сезонный ход: более высокие ОА приходятся на теплое время года.

Помещения 304/3 и 305/2. Из-за трудности доступа и высоких значений МЭД в феврале–марте 2010 г. удалось отобрать лишь шесть проб из помещения 304/3 и две из 305/2. В 2008–2012 гг. из этих помещений, используя дистанционные средства, аэрозольные пробы отбирали также специалисты ИПБ АЭС НАН Украины из группы А. Э. Меленевского. Их интересовала динамика накопления радиоактивной пыли на поверхности ЛТСМ и ее дисперсность [19–22]. За четырехлетний период они отметили изменение дисперсного состава аэрозолей-носителей α -активных радионуклидов чернобыльского генезиса. К сожалению, в публикациях [19–22] не приведены их ОА, а также ОА ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ДП $^{220,222}\text{Rn}$.

Результаты исследований 8 проб, отобранных нами в феврале–марте 2010 г. с помощью трехслойных пакетов фильтров Петрянова, представлены на рис. 5. Видно, что величина $\Sigma\beta$ находилась в диапазоне 0.3–1.3 $\text{Бк}/\text{м}^3$. При этом примерно половина $\Sigma\beta$

приходилась на ^{137}Cs . Таким образом, состав и ОА продуктов Чернобыльской аварии практически не отличались от зафиксированных в помещениях 012/15 [17] и 210/7 [18]. Этот результат заслуживает особого внимания, поскольку масса и поверхность ЛТСМ в помещениях 304/3 и 305/2 на порядок величины больше, чем в 012/15 и 210/7 [8]. Причина низких ОА аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии, очевидно, связана с медленным разрушением лавы в помещениях 304/3, 305/2, 012/15, 210/7 и незначительным поступлением продуктов деструкции в воздух, хотя в помещении 012/7 такой процесс наблюдался [16].

Из рис. 5 видно, что в помещениях 304/3 и 305/2 ОА ^{212}Pb варьировала от 3 до 14 $\text{Бк}/\text{м}^3$ при среднем значении 8.6 $\text{Бк}/\text{м}^3$. Из-за короткого (2 мес) периода исследований четкая временная динамика не прослеживается, хотя некоторое увеличение ОА наблюдается.

Значения ОА ^{212}Pb в помещениях 304/3 и 305/2 оказались близки к тем, которые зарегистрированы в помещениях 012/7, 012/15 и 210/7, хотя объемы и поверхности ЛТСМ существенно различаются [8]. Из этого следует, что ЛТСМ не являются главными источниками ^{220}Rn и выхода в воздух ^{212}Pb . Следовательно, и ^{232}U не является его существенным поставщиком в подреакторное пространство.

Временная динамика ОА ^{212}Pb в подреакторных помещениях

Результаты измерений ОА ^{212}Pb в подреакторных помещениях в 2010–2014 гг. обобщены в табл. 1. Из табл. 1 следует, что, несмотря на огромные различия в количестве урана, который в составе лав попал в подреакторные помещения, средние ОА ^{212}Pb различались всего в два раза: минимальная 7.1 $\text{Бк}/\text{м}^3$ в помещении 012/7 и максимальная 13 $\text{Бк}/\text{м}^3$ в помещении 012/15. Средняя величина по измерениям 200 проб из всех помещений составила 10.2 $\text{Бк}/\text{м}^3$.

На рис. 2–5 видно, что временная динамика ОА ^{212}Pb во всех помещениях была сходная: максимальные содержания ^{212}Pb в теплый период года и минимальные – в холодный. Наряду с величинами ОА это указывает на то, что подреакторные помещения можно рассматривать как единое воздушное пространство, которое подпитывает единый источник. Исходя из этого результаты пятилетних исследований были объединены. На рис. 6 ОА представлены в зависимости от количества суток с начала года. Видно, что уравнение $y = -0.0005x^2 + 0.16x + 3.7$, где x – календарный день, хорошо описывает величины и временную динамику ОА в подреакторных помещениях объекта «Укрытие».

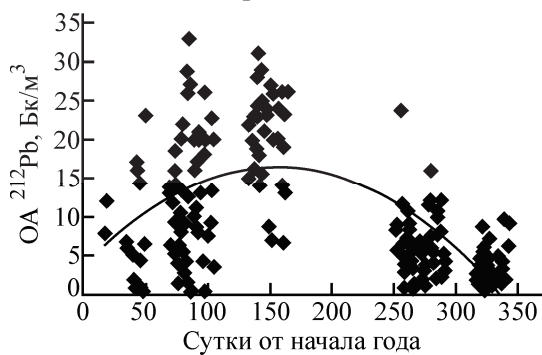
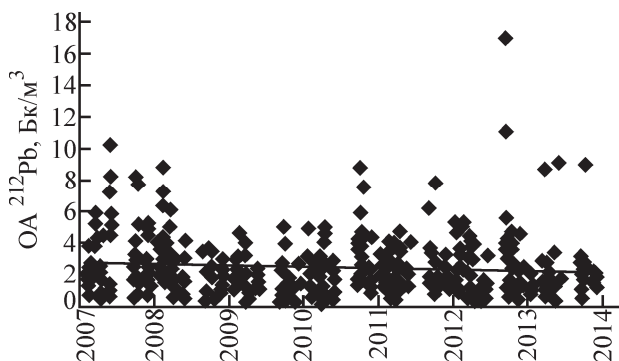
Таблица 1. Условия исследования аэрозолей ^{212}Pb в подреакторных помещениях

Помещение	Период пробоотбора	Количество проб	Масса U, т	Средняя ОА ^{212}Pb , Бк/м ³
012/7	Ноябрь 2010 г.–ноябрь 2011 г.	69	1	7.1
012/15	Февраль–декабрь 2014 г.	68	3	13.0
210/7	Февраль–декабрь 2013 г.	60	12	11.2
304/3 и 305/2	Февраль–март 2010 г.	8	80	8.6

Объемная активность ^{212}Pb в системе «Байпас»

Система «Байпас» была создана осенью 1986 г. при завершении строительства объекта «Укрытие» [4]. Ее основное назначение – вентиляция развала реактора и помещений 4-го блока за счет естественной тяги воздуха через высотную трубу ВТ-2. В систему «Байпас» воздух из развала блока поступает на отметке +43 м, где в стене центрального зала имеется ниша, а от нее далее проложен вентиляционный короб размером 1.5×1.5 м. На отметке +48 м из короба производится штатный отбор проб воздуха и измерение активности комплексом «Калина». Здесь же с 2003 г. было начато исследование аэрозолей с помощью средств, которые позже (2010–2014 гг.) использовали в подреакторных помещениях. Итоги исследований в системе «Байпас» в 2003–2012 гг. опубликованы в работах [14, 15].

На рис. 7 представлены результаты измерений 443 проб, отобранных в 2008–2014 гг. Видно, что содержание ^{212}Pb оставалось практически неизменным. В большинстве проб ОА находится в диапазо-

**Рис. 6.** ОА аэрозолей-носителей ^{212}Pb в подреакторных помещениях в 2010–2014 гг.**Рис. 7.** ОА аэрозолей-носителей ^{212}Pb в системе «Байпас» в 2008–2014 гг.

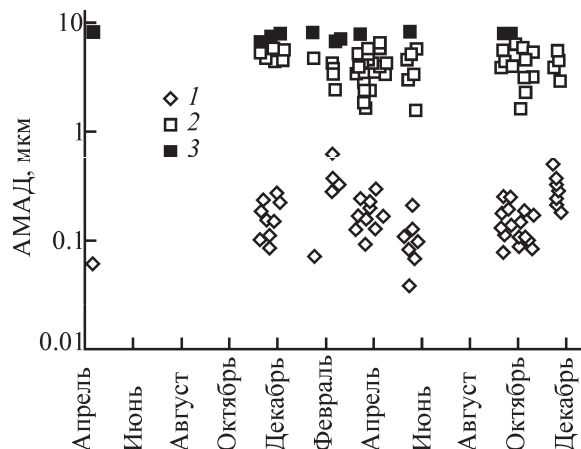
не 0.5–6 Бк/м³. Лишь в 9 случаях (2%) ОА превысила 8 Бк/м³. Средняя величина составила 2.4 Бк/м³. Таким образом, содержание ^{212}Pb в воздухе, забираемом из центрального зала для выброса в атмосферу, в 4–5 раз ниже, чем в подреакторных помещениях (рис. 2–6). Следовательно, поднимаясь по помещениям объекта «Укрытие», поток разбавляется «чистым» воздухом.

Подобная стабильность ОА смеси ДП $^{220,222}\text{Rn}$ за период 2003–2012 гг. была рассмотрена в публикациях [14, 15]. При этом было отмечено, что за это же время ОА аэрозолей-носителей радионуклидов чернобыльской аварии (^{137}Cs , $\Sigma\beta$, ^{241}Am) снизилась в 3.5 раза.

Дисперсность радиоактивных аэрозолей

Применение многослойных фильтров Петрянова позволило одновременно исследовать не только радионуклидный состав и ОА аэрозолей, но и их распределение по размерам (дисперсность). Активный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) и стандартное геометрическое отклонение σ рассчитывали по методике, изложенной в работе [13].

В помещении 012/7 (самое нижнее по растеканию лав) наиболее часто носителями ДП $^{220,222}\text{Rn}$ были частицы с АМАД 0.08–0.4 мкм, а продуктов Чернобыльской аварии – частицы с АМАД 2–7 мкм (рис. 8). В 8 случаях АМАД носителей аварийных нуклидов превышал 8 мкм и только в 4 оказался менее 2 мкм. Таким образом, имеется существенное различие в размерах аэрозолей радонового и аварийного происхождения.

**Рис. 8.** АМАД аэрозолей-носителей ДПР (1) и $\Sigma\beta$ (2) в помещении 012/7 (3 – пробы с АМАД > 8 мкм).

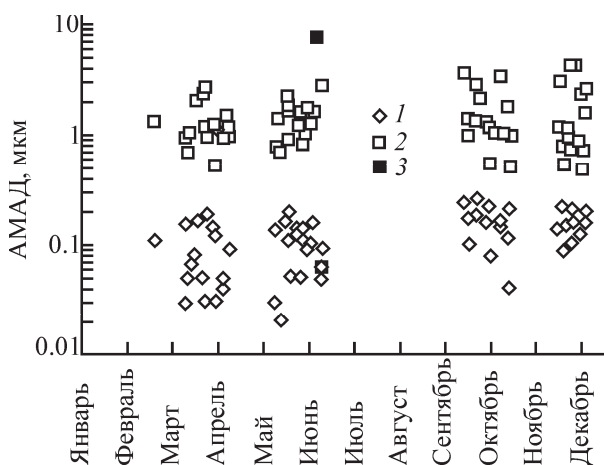


Рис. 9. АМАД аэрозолей-носителей ДПР (1) и $\Sigma\beta$ (2) в помещении 012/15 (3 – проба с АМАД > 8 мкм).

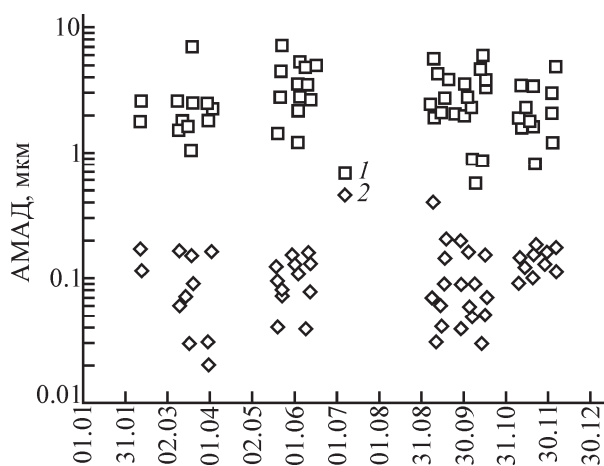


Рис. 10. АМАД аэрозолей-носителей ДПР (1) и $\Sigma\beta$ (2) в помещении 210/7.

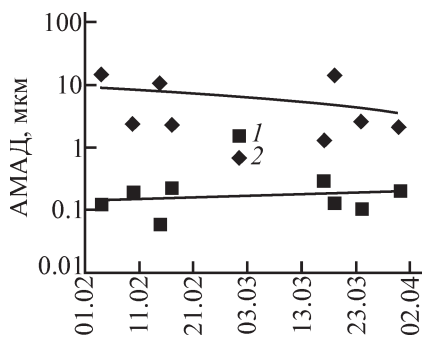


Рис. 11. АМАД аэрозолей-носителей ДПР (1) и $\Sigma\beta$ (2) в помещениях 304/3 и 305/2 в феврале–марте 2010 г.

В помещении 012/15 носителями ДП $^{220,222}\text{Rn}$ были частицы с АМАД 0.03–0.2 мкм, а радионуклидов чернобыльского генезиса – частицы с АМАД от 0.7 до 4 мкм. Лишь в одной пробе АМАД последних превышал 8 мкм, а в шести был 0.4 мкм и менее (рис. 9). Здесь также отчетливо проявилась разница в размерах аэрозолей-носителей радионуклидов различного генезиса.

Таблица 2. Ингаляционные дозы от ДП ^{220}Rn

Помещение	$C(^{212}\text{Pb})$, Бк/м ³	Доза облучения	
		мЗв/г	доля от предела годовой эффективной дозы, %
012/7	7.1	0.51	2.6
012/15	13.0	0.94	4.7
210/7	11.2	0.81	4.1
304/3 и 305/2	8.6	0.58	2.9

В помещении 210/7 наиболее часто носителями ДП $^{220,222}\text{Rn}$ были частицы с АМАД 0.04–0.2 мкм, а продуктов Чернобыльской аварии – частицы с АМАД 1–6 мкм (рис. 10). Лишь в четырех пробах АМАД последних был менее 1 мкм и в двух составлял 7 мкм. Здесь также имеется четкая разница в размерах аэрозолей-носителей радионуклидов различного генезиса.

В помещениях 304/3 и 305/2 средняя величина АМАД аэрозолей-носителей ДП $^{220,222}\text{Rn}$ составила 0.17 мкм, а продуктов Чернобыльской аварии – 6 мкм (рис. 11).

Ингаляционные дозы от ДП ^{220}Rn в подреакторных помещениях

Согласно НРБ-99/2009 [12], содержание $^{220,222}\text{Rn}$ и их ДП в жилых и промышленных зданиях регламентируется величинами эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА), которые измеряют с помощью приборов или находят из концентраций аэрозолей короткоживущих ДП по уравнениям

$$\begin{aligned} \text{ЭРОА}(^{222}\text{Rn}) &= 0.10C(^{218}\text{Po}) + 0.51C(^{214}\text{Pb}) + 0.38C(^{214}\text{Bi}), \\ \text{ЭРОА}(^{220}\text{Rn}) &= 0.91C(^{212}\text{Pb}) + 0.09C(^{212}\text{Bi}). \end{aligned}$$

Поскольку период полураспада ^{212}Bi существенно меньше, чем у его предшественника по радиоактивной цепочке ^{212}Pb , то практически ЭРОА(^{220}Rn) зависит только от ОА ^{212}Pb .

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [24] мощность ингаляционной дозы (D , мкЗв/ч) от ^{220}Rn и его ДП рассчитывают по уравнению

$$D = 10^{-3}[0.11 + 40F(^{220}\text{Rn})]C(^{220}\text{Rn}),$$

где $F(^{220}\text{Rn})C(^{220}\text{Rn}) = C(^{212}\text{Pb}) \approx \text{ЭРОА}(^{220}\text{Rn})$. Из этого уравнения следует, что величина D практически полностью определяется содержанием ^{212}Pb . Исходя из средних величин ОА ^{212}Pb были рассчитаны годовые дозы дополнительного внутреннего облучения (рабочее время 1800 ч), которые мог получить оперативный персонал, например цеха радиационной безопасности, контролирующей аэрозоли, воду, ЛТСМ и т.д. (табл. 2).

Как следует из табл. 2, в обследованных (и

смежных) помещениях облучение вследствие вдыхания ^{220}Rn и его ДП может составлять 3–5% от предела годовой эффективной дозы (20 мЗв), принятой на Украине [25]. Заметим, что хотя наличие $^{220,222}\text{Rn}$ и их ДП в значительных количествах в объекте «Укрытие» обнаружено давно, регламентные наблюдения за ними не проводят, а ингаляционные дозы не учитывают.

Заключение

Наличие аэрозолей-носителей ^{212}Pb наряду с ^{222}Rn и его дочерними продуктами затрудняет радиационный контроль и экспрессные измерения аэрозольных продуктов аварии. В подреакторных помещениях на высотных отметках от 0 до 12 м средняя ОА аэрозолей-носителей ^{212}Pb составляет около 10 Бк/м³. При этом концентрация не зависит от количества топлива, поступившего с лавой в 1986 г., а также площади поверхности лавы. Основным источником ^{220}Rn и его ДП, очевидно, являются строительные конструкции и содержащийся в них ^{232}Th .

Временные динамики ОА ^{212}Pb во всех исследованных подреакторных помещениях оказались схожи: максимальные содержания в теплый период года и минимальные – в холодный. Средние минимальные ОА составляли около 5, а средние максимальные – 15–20 Бк/м³. Такая динамика обусловлена тем, что в объекте «Укрытие» имеется только естественная тяга воздуха. Она достигает максимальных значений в холодные месяцы, поскольку в подреакторных помещениях температура на протяжении года изменяется мало (на 4–6°C), удерживаясь на уровне 10°C. В летний период при высоких температурах во внешней среде тяга уменьшается и даже прекращается. Естественно, при этом ОА ^{212}Pb в помещениях увеличивается одновременно с ^{222}Rn и его ДП.

При 10-летнем мониторинге аэрозолей в системе «Байпас» получено, что ОА ^{212}Pb остается стабильной на уровне 2–3 Бк/м³, хотя ОА аэрозолей-носителей радионуклидов чернобыльской аварии ($\Sigma\beta$, ^{137}Cs , ^{241}Am) снизилась в 3–4 раза.

Отбор около 200 проб на многослойные фильтрующие материалы Петрянова показал, что АМАД дочерних продуктов $^{220,222}\text{Rn}$ практически не зависел от места пробоотбора и находился преимущественно в диапазоне 0.06–0.4 мкм. Это согласуется с тем, что наблюдается в пещерах, жилых и производственных зданиях и в свободной атмосфере. Из этого следует, что в подреакторных помещениях образование аэрозолей-носителей ^{212}Pb происходит по конденсационному механизму путем осаждения атомов Po, возникающих при радиоактивном распаде ^{220}Rn , на атмосферных ядрах конденсации. Такие аэрозоли устойчивы как в замкнутых пространствах, так и в атмосфере. Они могут существовать длительное время и

переноситься на большие расстояния. Одновременный отбор на многослойные фильтры аэрозолей-носителей ^{212}Pb и продуктов Чернобыльской аварии показал, что их дисперсность разительно отличается. Последние имели АМАД преимущественно в диапазоне 1–6 мкм. Такое различие объясняется диспергационным механизмом образования аэрозолей-носителей аварийных радионуклидов. Аэрозоли микронного класса возникают вследствие трения, эрозии, деструкции материалов и т.п. Различие в величинах АМАД позволило предложить для радиационного мониторинга в объекте «Укрытие» способ сепарации аэрозолей-носителей аварийных радионуклидов и ДП $^{220,222}\text{Rn}$ с помощью префильтра из крупных волокон диаметром около 10 мкм.

В конце 2016 г. на объект «Укрытие» была надвинута «Арка» – защитное сооружение, которое должно предотвратить загрязнение окружающей среды в случае обрушения нестабильных строительных конструкций и стать защитной оболочкой на этапе демонтажа объекта и извлечения остатков аварийного ядерного топлива. В течение 2017 г. шел монтаж ограждающего контура (торцевых конструкций) этого сооружения. После завершения герметизации «Арки» радиационная аэрозольная обстановка может ухудшиться вследствие уменьшения естественного вентилирования и увеличения генерации пыли с различных поверхностей из-за снижения поступления влаги. Дальнейшие наблюдения за ^{212}Pb как аэрозольным трассером будут способствовать отслеживанию радиационной обстановки и принятию обоснованных организационных и технических решений.

Авторы благодарят персонал цеха радиационной безопасности ГСП «Чернобыльская АЭС» за содействие при проведении исследований.

Список литературы

- [1] Залманзон Ю. Е., Фертман Д. Е. // Чернобыль-88: Докл. I Всесоюз. науч.-техн. совещания по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Чернобыль, 1989. Т. 7, ч. 1. С. 61–65.
- [2] Огородников Б. И., Хан В. Е., Пазухин Э. М., Краснов В. А. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2011. Вип. 16. С. 130–136.
- [3] Николаев В. А. Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях. СПб.: Изд-во политехн. унта, 2012. 283 с.
- [4] Огородников Б. И., Пазухин Э. М., Ключников А. А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986–2006 гг.: монография. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. 456 с.
- [5] Огородников Б. И., Будыка А. К., Хан В. Е. и др. // Радиохимия. 2009. Т. 51, N 4. С. 344–352.
- [6] Огородников Б. И., Хан В. Е. // Атом. энергия. 2018. Т. 125, вып. 1. С. 44–51.
- [7] Ключников А. А., Краснов В. А., Рудько В. М., Щербин В. Н. Объект «Укрытие»: 1986–2011. На пути к преобразова-

- нию: монография. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2011. 288 с.
- [8] Арутюнян Р. Э., Большой Л. А., Боровой А. А. и др. Ядерное топливо в объекте «Укрытие». М.: Наука/Интерпериодика, 2011.
- [9] Бассейн-барботер 4-го блока ЧАЭС: радиационная обстановка, физические и химические характеристики топливосодержащих масс, оценка количества топлива: Отчет Радиевого ин-та им. В. Г. Хлопина. СПб, 1990. Инв. N 1420-И. 3 с.
- [10] Лагуненко А. С. Поиск и исследование скрытых скопленных топливосодержащих материалов разрушенного 4-го блока Чернобыльской АЭС: Дис ... к.т.н. Киев, 2008. 148 с.
- [11] Высокский Е. Д., Краснов В. А., Лагуненко А. С., Пазухин Э. М. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. 2007. Вып. 8. С. 77–85.
- [12] Петрянов И. В., Козлов В. И., Басманов П. И., Огородников Б. И. Волокнистые фильтрующие материалы ФП. М.: Знание, 1968.
- [13] Видука А. К., Ogorodnikov B. I., Skitovich V. I. // J. Aerosol Sci. 1993. Vol. 24, Suppl. 1. P. S205–S206.
- [14] Хомутигин Ю. В., Процак В. П., Хан В. Е., Огородников Б. И. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. 2012. Вып. 19. С. 81–93.
- [15] Хомутигин Ю. В., Процак В. П., Хан В. Е., Огородников Б. И. // Ядерная физика та енергетика. 2014. Т. 15, N 4. С. 380–388.
- [16] Огородников Б. И., Хан В. Е., Ковальчук В. П. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. 2013. Вып. 20. С. 94–106.
- [17] Огородников Б. И., Хан В. Е., Ковальчук В. П. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. 2015. Вып. 25. С. 125–138.
- [18] Огородников Б. И., Хан В. Е., Ковальчук В. П. и др. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. 2015. Вып. 24. С. 70–84.
- [19] Бадковский В. П., Ключников А. А., Кравчук Т. А. и др. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. 2009. Вып. 12. С. 103–112.
- [20] Меленевский А. Э., Ушаков И. А., Бадковский В. П. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. 2012. Вып. 18. С. 119–120.
- [21] Бадковский В. П., Ключников А. А., Меленевский А. Э. и др. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. 2013. Вып. 20. С. 68–76.
- [22] Бадковский В. П., Меленевский А. Э., Морозов Ю. В. и др. // Радиохимия. 2014. Т. 56, N 3. С. 264–270.
- [23] СанПиН 2.6.1.2523–09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
- [24] Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR Report to the General Assembly. New York: UN, 2000.
- [25] Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97/Д-2000. Київ, 2000.