

Б. И. Огородников<sup>1,2</sup>, В. Е. Хан<sup>1</sup>, В. П. Ковальчук<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, ул. Воронцово поле, д. 10, стр. 1, Москва, 105064, Россия

## РАДОН В ПОДРЕАКТОРНОМ ПОМЕЩЕНИИ 210/7 ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

С помощью сейсмической радоновой станции СРС-05 в помещениях 210/7 и 208/12 объекта «Укрытие» выполнено 14 сеансов наблюдений продолжительностью от 70 до 155 ч и отобрано около 60 проб радиометром «Альфарад+А». Установлено, что при средней концентрации радона  $80 \text{ Бк/м}^3$  максимальные значения достигали  $450 \text{ Бк/м}^3$ . Обнаружены аэрозоли-носители  $^{212}\text{Pb}$  с объемной активностью до  $30 - 35 \text{ Бк/м}^3$ . Активный медианный аэродинамический диаметр аэрозолей-носителей дочерних продуктов радона и торона составляет около  $0,1 \text{ мкм}$ . Коэффициент равновесия радона и его дочерних продуктов составляет  $0,8$ , что свидетельствует о слабом воздухообмене в подреакторном пространстве объекта «Укрытие». При вдыхании радона, торона и их дочерних продуктов эффективная доза облучения персонала объекта «Укрытие» может достигать  $10 \%$  от предела эффективной дозы.

*Ключевые слова:* объект «Укрытие», радон, дочерние продукты радона, доза облучения.

### Введение

Среди радиоактивных веществ, присутствующих в объекте «Укрытие», особое место занимает радон (Rn) и его дочерние продукты (ДПР). Известны три радиоизотопа радона:  $^{219}\text{Rn}$  – актинон (период полураспада  $3,96 \text{ с}$ ),  $^{220}\text{Rn}$  – торон ( $55,6 \text{ с}$ ) и  $^{222}\text{Rn}$  – собственно радон ( $3,82 \text{ сут}$ ). При альфа-распаде каждого из изотопов материнского газа образуются дочерние продукты, которые в свою очередь испускают альфа- или бета-частицы, сопровождающиеся гамма-излучением. Возникающие при этом атомарные ДПР оседают на ядрах конденсации с образованием устойчивых аэрозолей с размерами частиц  $0,1 - 0,3 \text{ мкм}$  [1, 2]. Радон и короткоживущие ДПР влияют на радиационную обстановку в объекте «Укрытие» и детектирование аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии.

### Обнаружение радона и ДПР в объекте «Укрытие»

Высокие объемные активности (ОА) радона и ДПР в объекте «Укрытие» впервые были зарегистрированы в 1987 г. при создании подсистем радиационного контроля и диагностики [3]. Целенаправленные наблюдения за ними в подреакторных помещениях были проведены в 2000 г. [4]. Из измерения 20 проб, отобранных в помещении 207/5 парораспределительного коридора, следовало, что ОА превышали  $100 \text{ Бк/м}^3$ . Наблюдения, продолженные через два года [5], показали, что концентрации радона зависят от многих факторов, в частности от воздухообмена в помещениях объекта «Укрытие». В 2006 – 2010 гг. были выполнены измерения радона в объекте «Укрытие» и его локальной зоне с помощью трековых детекторов [5]. Установлено, что в ряде помещений среднегодовая ОА радона достигала  $150 - 200 \text{ Бк/м}^3$ , в то время как на промплощадке была на порядок величины меньше.

Представленные в [4, 5] результаты показали, что наличие радона и ДПР в объекте «Укрытие» наряду с внешним облучением от остатков топлива и внутренним от вдыхания аэрозолей-продуктов аварии является серьезной опасностью для персонала. В связи с этим было решено продолжить наблюдения и выявить факторы, влияющие на динамику радона и ДПР в подреакторных помещениях.

### Описание помещения 210/7

Помещение 210/7 расположено в центре разрушенного реакторного здания (блок Б) между высотными отметками  $+6 \text{ м}$  (пол) и  $+8 \text{ м}$  (потолок) и является частью парораспределительного коридора [6]. Через дверные проемы, отверстия и проходки в бетонных перегородках оно связано с помещениями 208/12, 210/5, 210/6 и 210/8. В них имеются лаваобразные топливосодержащие материалы (ЛТСМ), поступившие в 1986 г. из расположенного выше помещения 305/2.

### Методы отбора проб

Аэрозоли отбирали воздуходувкой H810 RadeCo со скоростью около  $100 \text{ л/мин}$ . Использовали пакеты фильтров Петрянова площадью  $20 \text{ см}^2$ , состоящие из слоев ФПА-70-0,12, ФПА-70-0,2, АФА РСР-20 и АФА РМП-20. Фильтры АФА использовали в паре для полноты улавливания аэрозо-

© Б. И. Огородников, В. Е. Хан, В. П. Ковальчук, 2018

лей ДПР. Пакет фильтров размещали в фильтродержателе (воронке), 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 (рис. 1). Другой конец трубы подсоединяли к воздуходувке, находящейся в помещении 208/12. К выходу потока воздуха из воздуходувки через пластмассовый диффузор подсоединяли сейсмическую радоновую станцию СРС-05 «Торон-1» [7, 8]. Работа прибора основана на измерении активности  $^{218}\text{Po}$  и  $^{216}\text{Po}$  (дочерних продуктов радона и торона), оседающих под действием электрического поля на полупроводниковый детектор в камере объемом 0,25 л. В режиме «Радон» можно провести за сутки до 60 циклов измерений, а в режиме «Торон» – до 144. Станция снабжена блоком климатконтроля.



Рис. 1. Расположение воздуходувки, радоновой станции СРС-05 и прибора «Альфарад+А» в помещении 208/12 при отборе аэрозолей из помещения 210/7.

Воздух прокачивали через пакет фильтров около 2 ч. Затем трубу отсоединяли от воздуходувки, пакет вынимали из фильтродержателя, осматривали, и фильтры отправляли на анализ. Воздуходувка и станция СРС-05 продолжали работать в помещении 208/12. На следующие сутки все операции повторяли с новым пакетом фильтров. Таким образом, радиоактивные аэрозоли контролировали раз в сутки, а газообразные концентрации радона и торона – непрерывно 3 – 5 сут.

С мая 2013 г. радон и ДПР начали контролировать еще прибором «Альфарад+А» [9]. Его размещали рядом со станцией СРС-05 (см. левую часть рис. 1) и включали одновременно с воздуходувкой Н810. Через 5 мин прибор автоматически отключался и переходил в режим измерения ДПР, накопившихся на его фильтре АФА РСП-3. Еще через 5 мин на табло появлялись данные об эффективных равновесных объемных активностях радона ( $\text{ЭРОА}_{\text{Rn}}$ ) и торона ( $\text{ЭРОА}_{\text{Tn}}$ ), а также о коэффициенте равновесия радона и ДПР ( $F_{\text{Rn}}$ ). Прибор «Альфарад+А» работал только раз в сутки.

и переходил в режим измерения ДПР, накопившихся на его фильтре АФА РСП-3. Еще через 5 мин на табло появлялись данные об эффективных равновесных объемных активностях радона ( $\text{ЭРОА}_{\text{Rn}}$ ) и торона ( $\text{ЭРОА}_{\text{Tn}}$ ), а также о коэффициенте равновесия радона и ДПР ( $F_{\text{Rn}}$ ). Прибор «Альфарад+А» работал только раз в сутки.

#### Анализ радиоактивных веществ

Через 10 – 15 мин после окончания прокачки воздуха фильтры доставляли в помещение Г328 объекта «Укрытие» для радиометрии. Пакеты разделяли на три слоя согласно их исходной окраске: голубой (ФПА-70-0,12), розовый (ФПА-70-0,2) и белый (АФА РСП-20 и АФА РМА-20). Измерение бета-активности фильтров выполняли на приборе КРК-1. Слои поочередно измеряли по 100 с. Если скорость счета была свыше 100 имп./с, то экспозицию уменьшали до 10 с. Обычно за 60 – 90 мин выполняли 6 – 7 циклов измерений. По кривым распада рассчитывали количество ДПР на момент окончания прокачки воздуха. Через 4 – 5 сут, когда на фильтрах практически полностью распадались не только ДПР, но и дочерние продукты торона, измерения повторяли. При этом каждый слой экспонировали, как правило, 1000 с. Вторая серия измерений позволяла рассчитать суммарное содержание аэрозолей-носителей  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , а также  $^{212}\text{Pb}$  – одного из дочерних продуктов торона, имеющего период полураспада 10,6 ч. Для определения на фильтрах содержания  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  и  $^{241}\text{Am}$  использовали гамма-спектрометрический комплекс в составе полупроводникового детектора GL2020R из сверхчистого германия с бериллиевым окном толщиной 500 мкм и 8192-канального амплитудного анализатора импульсов.

#### Контроль воздушной среды

Температуру, относительную влажность воздуха и его давление в помещениях 210/7 и 208/12 фиксировали по показаниям блока климатконтроля станции СРС-05. Кроме того, скорость и направление воздушного потока периодически определяли в дверном проеме между этими помещениями. Использовали термоанемометр ТАМ-1 с диапазоном измерений 0,1 – 2 м/с или пушинки-колдунчики. Метеопараметры внешней среды контролировали по показаниям (обновление через 5 мин) автоматического метеопункта, размещенного в 500 м южнее объекта «Укрытие» на площадке ОРУ-750, и по данным метеостанции «Чернобыль», находящейся в 18 км на юго-восток от ЧАЭС, где замеры проводят каждые 3 ч. Иногда эти сведения дополняли собственными наблюдениями (туман, высота нижней кромки облаков, осадки и т.д.).

## Результаты и обсуждение

### Метеообстановка вблизи объекта «Укрытие» и в помещениях 210/7 и 208/12

В середине марта 2013 г. температура воздуха на метеостанции «Чернобыль» часто опускалась ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . В мае в дневные часы температура стала превышать  $15^{\circ}\text{C}$ . Максимальные значения  $27$  и  $28^{\circ}\text{C}$  пришлось на послеполуденные часы  $18$  и  $20$  мая. Столь же теплой оказалась и первая половина первого летнего месяца, когда  $10$  июня в  $15$  и  $18$  ч зарегистрировали  $28,6$  и  $28,1^{\circ}\text{C}$ . Наиболее высокая относительная влажность воздуха  $75 - 80\%$  наблюдалась летом в ночное время. При выпадении осадков она поднималась до  $98 - 99\%$ .

В помещениях  $210/7$  и  $208/12$  температура воздуха (рис. 2) оставалась практически стабильной как в течение суток, так и всего периода исследований. Наиболее низкая  $11 - 12^{\circ}\text{C}$  наблюдалась в марте – апреле 2013 г. В мае – июне она поднялась до  $14^{\circ}\text{C}$ . Наиболее высокая температура  $17 - 18^{\circ}\text{C}$  удерживалась в сентябре – ноябре. Из этого следует, что прогрев воздуха в помещении  $210/7$  примерно на два месяца отставал от динамики температуры во внешней среде. Наибольшая относительная влажность воздуха  $82 - 86\%$  была в мае – июне. До этого она находилась на уровне  $53 - 58\%$ . В сентябре влажность составляла  $72 - 76\%$ , в октябре – ноябре снизилась до  $56 - 68\%$ , а в начале декабря – до  $38 - 51\%$ .

Средняя скорость ветра в окрестностях ЧАЭС, как правило, составляла  $1 - 2$  м/с. Периоды со средними скоростями свыше  $3$  м/с и максимальными порывами более  $9 - 10$  м/с наблюдались сравнительно редко. Отметим  $15 - 16$  марта 2013 г., когда средняя скорость ветра достигала  $5$  м/с, а его порывы –  $13$  м/с. Наиболее ветренная погода сложилась  $1 - 3$  декабря, когда средняя скорость ветра была  $6 - 7$  м/с, а его порывы –  $15$  м/с.

### Концентрация радона

Результаты измерения ОА радона представлены на рис. 3. Видно, что она сильно варьировала. Причем колебания от малых до больших значений происходили за  $2 - 4$  цикла пробоотбора, т.е. в течение получаса. При отборе проб и в промежутках между ними работ в помещении не проводили и его никто не посещал. Поэтому подобные колебания ОА не связаны с антропогенным воздействием, например с передвижением персонала, открыванием дверей и др.

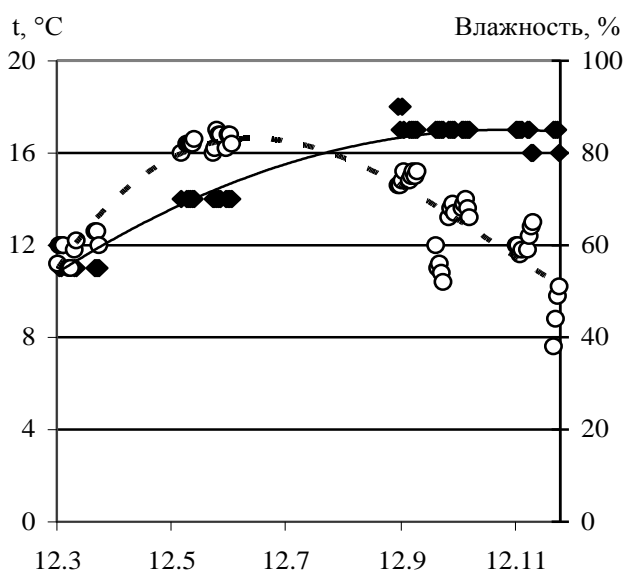


Рис. 2. Температура (♦) и относительная влажность (○) воздуха в помещении  $210/7$  и  $208/12$  при отборе проб аэрозоля в марте – декабре 2013 г.

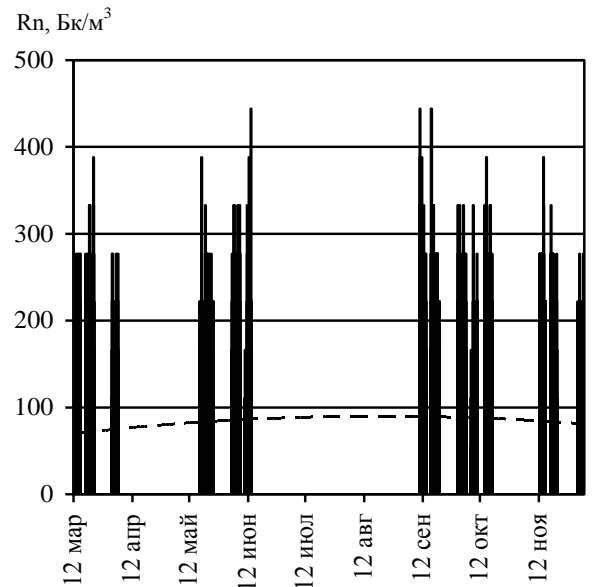


Рис. 3. ОА радона в помещениях  $210/7$  и  $208/12$  в марте – декабре 2013 г.

Максимальная ОА радона  $450$  Бк/м<sup>3</sup> была зафиксированы  $13$  июня,  $10$  и  $16$  сентября 2013 г. Большинство результатов попадало в диапазон  $50 - 250$  Бк/м<sup>3</sup>. Средняя концентрация за период исследований составила около  $80$  Бк/м<sup>3</sup>. Это практически совпало с тем, что наблюдали в помещении  $012/7$  в  $2010 - 2011$  гг. [10]. Согласно [11] в зданиях и сооружениях, эксплуатируемых с постоянным пребыванием людей, среднегодовое значение ЭРОА<sub>Rn</sub> не должно превышать  $100$  Бк/м<sup>3</sup>, а среднегодовое значение ЭРОА<sub>Tn</sub>  $6$  Бк/м<sup>3</sup>.

### Влияние метеословий во внешней среде на ОА радона

Тяга воздуха в отопительных системах и зданиях зависит от разности внутренней ( $T_{вн}$ ) и наружной ( $T_{нар}$ ) температур, т.е. от  $\Delta T = T_{вн} - T_{нар}$  [12]. Это сказывается на воздухообмене, а следовательно, на содержании радона внутри жилых помещений [13 - 17] и промышленных сооружений, в частности в объекте «Укрытие» [18, 19]. Результаты обработки измерений ОА радона в помещениях 210/7 и 208/12 в зависимости от  $\Delta T$  представлены на рис. 4. Аппроксимация показала, что концентрация оставалась практически неизменной, хотя величина  $\Delta T$  в зимний период достигала  $-25^\circ\text{C}$ , а в летний  $+18^\circ\text{C}$ . Таким образом, даже высокие суточные колебания  $\Delta T$  практически не влияли на содержание радона.

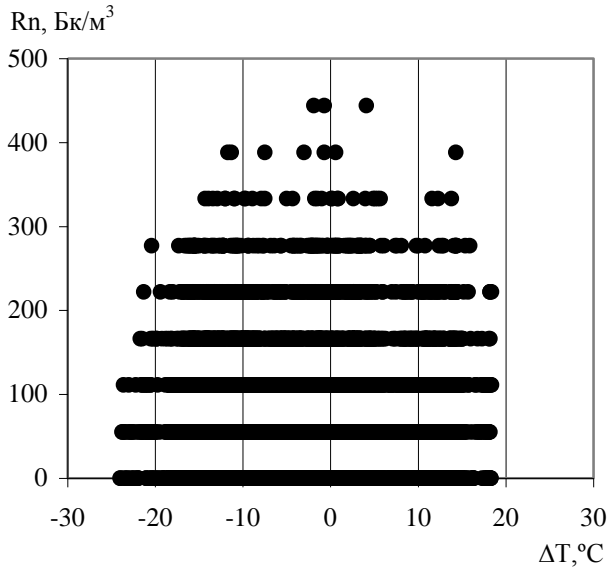


Рис. 4. Диаграмма рассеяния одновременно измеренных ОА радона и разности температур воздуха внутри помещений 210/7 и 208/12 и снаружи.

В то же время на рис. 4 видно, что распределение концентраций радона имеет форму колокола: наиболее высокие концентрации приходятся на область, где  $\Delta T$  близка к  $0^\circ\text{C}$ , т.е. когда отсутствуют конвективные потоки. Ранее такую зависимость наблюдали в помещении 012/7 [10].

При исследовании радона скорость ветра во внешней среде отслеживали по измерениям на метеостанции «Чернобыль». Ранее было установлено [20 – 23], что средние скорости ветра более  $4 - 5$  м/с и порывы свыше  $10 - 11$  м/с приводили к значительному увеличению (на порядок величины) ОА аэрозолей-носителей продуктов аварии, выбрасываемых в атмосферу через систему «Байпас». Однако переносить эту закономерность на радон нельзя, поскольку различаются механизмы генерации этих веществ: радон в виде газа эмигрирует из бетона, а аэрозоли-носители продуктов аварии возникают при разрушении (эрозии) материалов.

В марте – мае 2013 г. было четыре ветреных дня, но, к сожалению, станция СРС-05 при этом не работала. В сентябре и октябре сильных ветров не наблюдали. В ноябре средние скорости ветра хотя и были высокие, но порывы не превышали  $9$  м/с. Наиболее ветреным выдалось начало декабря. Так, со второй половины дня 1 декабря и до рассвета 3 декабря максимальные порывы ветра превышали  $9$  м/с. При этом 2 декабря в два срока наблюдения отмечены порывы  $15$  м/с. Однако, как видно на рис. 2, это не привело к существенному изменению ОА радона. Итак, малая статистика наблюдений не позволяет сделать обоснованные выводы о влиянии ветра на содержание радона в помещении 210/7.

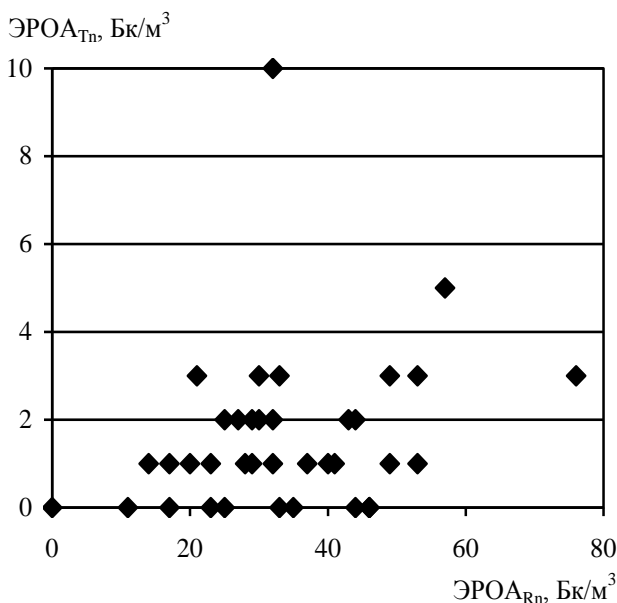


Рис. 5. Соотношение  $\text{ЭРОА}_{Rn}$  и  $\text{ЭРОА}_{Tn}$ .

### ЭРОА радона и торона

В мае – декабре 2013 г. прибором «Альфа-рад+А» были отобраны 36 проб для определения ЭРОА радона и торона, а также коэффициента  $F_{Rn}$ , характеризующего сдвиг радиоактивного равновесия радона и ДПР [24]. Полученные значения  $\text{ЭРОА}_{Rn}$  и  $\text{ЭРОА}_{Tn}$  приведены на рис. 5. Средняя величина  $\text{ЭРОА}_{Rn}$  составляла  $30 - 40$  Бк/м<sup>3</sup>. Из рис. 5 следует, что  $\text{ЭРОА}_{Rn}$  примерно в 20 раз превышала  $\text{ЭРОА}_{Tn}$ . Ранее наличие торона в объекте «Укрытие» отмечалось в [25].

По величинам  $\text{ЭРОА}_{Rn}$  рассчитали ОА радона ( $A_{Rn}$ ), поскольку  $\text{ЭРОА}_{Rn} = A_{Rn} \cdot F_{Rn}$ . Полученные значения приведены на рис. 6. Они несколько отличаются от того, что представлено на рис. 3. Очевидно, это связано с различием в калибровках приборов, а также с тем, что  $A_{Rn}$  получены путем пересчета из  $\text{ЭРОА}_{Rn}$ .

Значения  $F_{Rn}$  представлены на рис. 7. Большинство их находится в диапазоне 0,6 – 0,9 при среднем значении 0,8. Поскольку  $F_{Rn} < 1$ , то, следовательно, равновесие радона с ДПР не достигается. Это может быть только вследствие поступления «чистого» воздуха (с малой концентрацией радона) из внешней среды. Таким образом, в подреакторном пространстве существует небольшой воздухообмен с внешней средой. Исходя из динамики аппроксимирующей кривой на рис. 7 и ее уравнения  $F_{Rn} = 0,11 \ln(A_{Rn}) + 0,36$ , следует, что при  $F_{Rn} = 1$  ОА радона может составить около 200 Бк/м<sup>3</sup>.

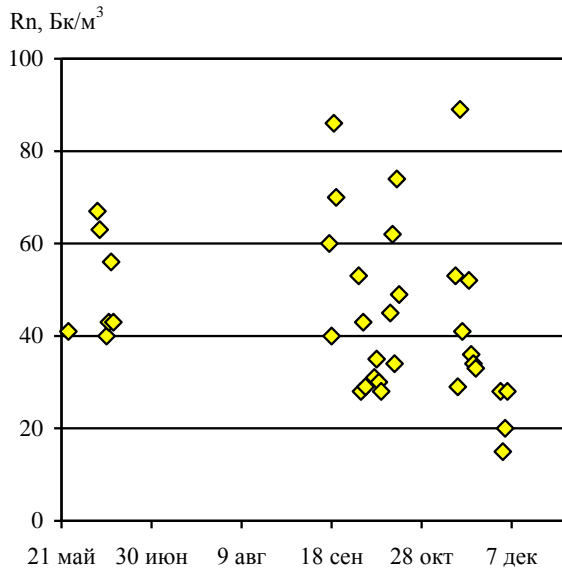


Рис. 6. ОА радона в помещении 208/12 в мае – декабре 2013 г. по измерениям прибором «Альфарад+А».

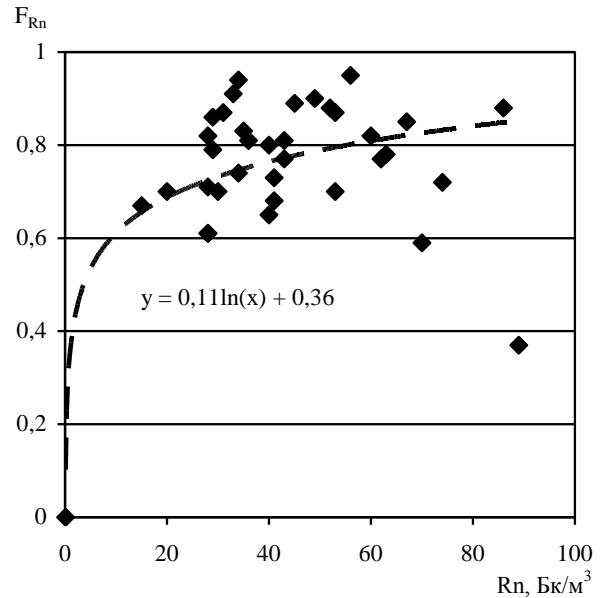


Рис. 7. Связь ОА радона с коэффициентом равновесия.

Была рассмотрена также связь  $F_{Rn}$  с разностью температур  $\Delta T$  внутри помещения и за пределами объекта «Укрытие». Из рис. 8 следует, что коэффициент равновесия практически мало зависит от  $\Delta T$ . Максимальные значения  $F_{Rn}$ , тяготеют к области  $\Delta T = 0$ , что соответствует отсутствию конвективных потоков воздуха. Об этом уже упоминалось выше при рассмотрении данных на рис. 4.

**Кратность воздухообмена**

Определить кратность воздухообмена ( $\lambda_v$ ) можно на основе расчетов, представленных в [26, 27]. Воспользовавшись табл. 4.11 из [26], был построен график (рис. 9) для всех  $F_{Rn}$ , измеренных в помещении 208/12. Полученные данные аппроксимируются уравнением  $y = 5,5x^2 - 10,4x + 5$ .

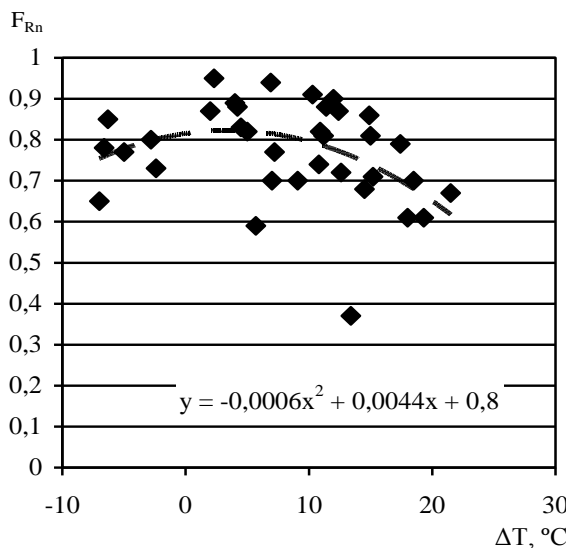


Рис. 8. Зависимость коэффициента равновесия ДПР ( $F_{Rn}$ ) от разности температур воздуха внутри помещения и во внешней среде ( $\Delta T$ ).

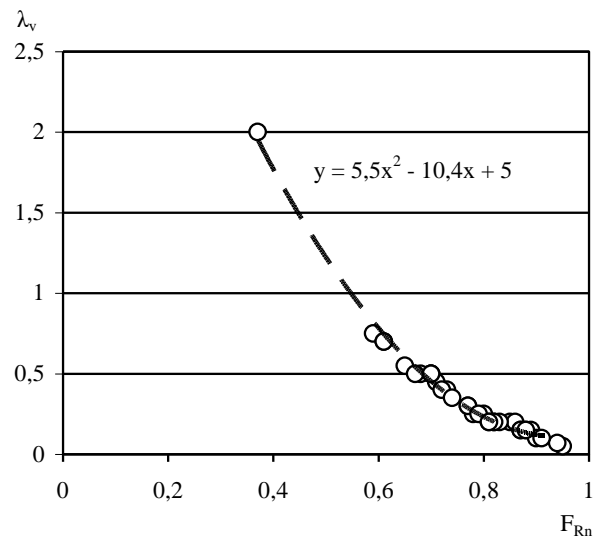


Рис. 9. Связь  $\lambda_v$  с  $F_{Rn}$ .

Связь  $\lambda_v$  с  $F_{Rn}$  была представлена также в полулогарифмических координатах (рис. 10). Видно, что в диапазоне  $F_{Rn}$  от 0,4 до 0,9, в котором находятся практически все результаты, полученные с помощью прибора «Альфарад+А» (см. рис. 8), зависимость  $\lambda_v$  от  $F_{Rn}$  можно аппроксимировать линией, соответствующей экспоненциальному уравнению  $y = 30e^{-6x}$  или полиномиальному  $y = 5,5x^2 - 10,4x + 5$ .

Для помещений, где помимо радона имеется торон, важно определить еще  $F_{Tn}$ . Зная  $\lambda_v$ , сделать это можно по табл. 4.14, представленной в [26], или по рис. 11, построенному по данным этой таблицы. Видно, что связь  $\lambda_v$  с  $F_{Tn}$  аналогична приведенной на рис. 9, но имеет более крутой ход. Благодаря этой «находке» при расчете доз можно не измерять концентрацию торона, а определять только содержание аэрозолей  $^{212}Pb$  – одного из дочерних продуктов торона. Сделать это достаточно просто, поскольку он является бета-, гамма-излучателем с периодом полураспада 10,6 ч.

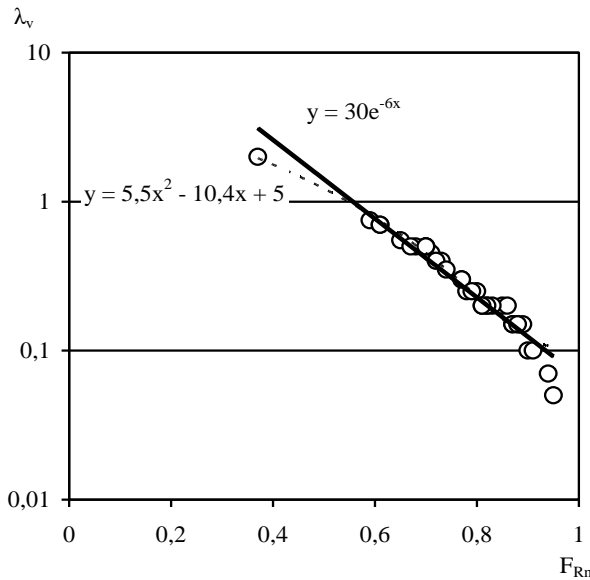


Рис. 10. Связь кратности воздухообмена ( $\lambda_v$ ) с коэффициентом равновесия ДПР ( $F_{Rn}$ ).

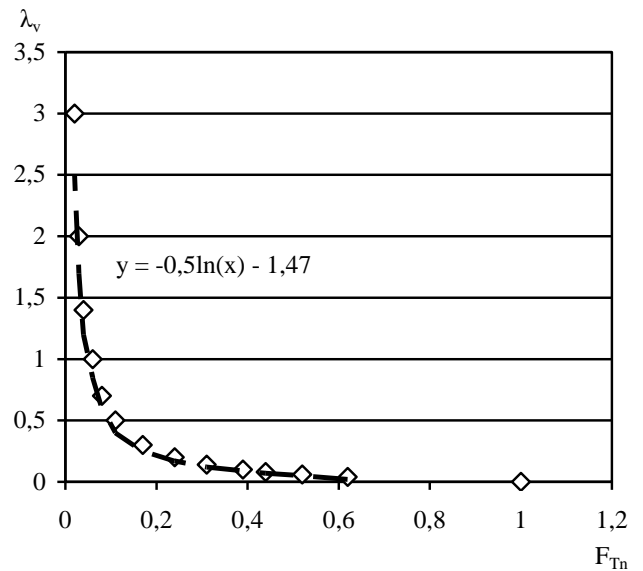


Рис. 11. Связь  $\lambda_v$  с  $F_{Tn}$ .

### Содержание аэрозолей $^{212}Pb$

Аэрозоли-носители  $^{212}Pb$  отбирали из помещения 210/7 на многослойные фильтры Петрянова одновременно с продуктами Чернобыльской аварии. Всего получили 61 пробу. Содержание  $^{212}Pb$  и ДПР рассчитывали по кривым распада бета-активности фильтров. Для этого измерения на радиометре КРК-1 выполняли дважды: через несколько минут после окончания пробоотбора и затем через 4 – 5 сут, когда практически полностью распадались ДПР и сам  $^{212}Pb$ . Первое измерение позволяло определить содержание ДПР, а повторное – бета-активных нуклидов-продуктов аварии ( $^{90}Sr + ^{90}Y, ^{137}Cs$ ) и  $^{212}Pb$ .

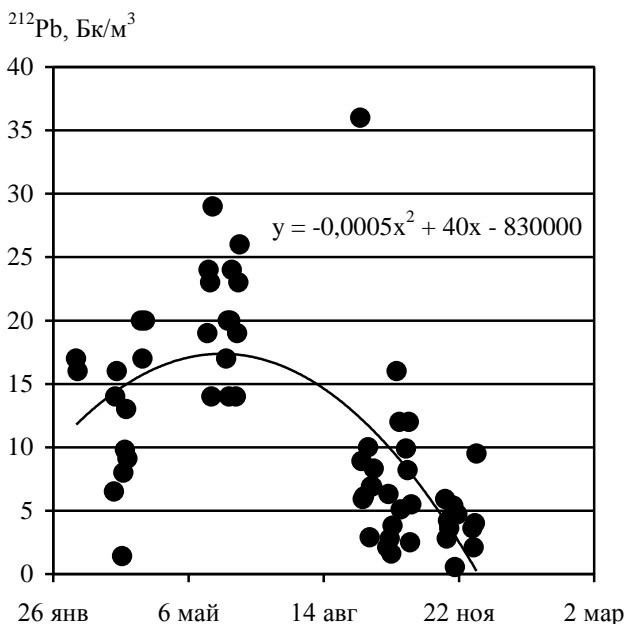


Рис. 12. ОА  $^{212}Pb$  в помещении 210/7 в 2013 г.

Как видно на рис. 12, ОА  $^{212}Pb$  значительно варьировала, достигая 30 – 35 Бк/м<sup>3</sup> при среднем значении 11,2 Бк/м<sup>3</sup>. Наблюдался сезонный ход концентрации: минимум в холодный период года и максимум – в теплый.

Временная динамика ОА  $^{212}Pb$  положительно коррелировала с ДПР (рис. 13) и самим радоном (см. рис. 3 и 6). Из данных, представленных на рис. 13, также следует, что средняя ОА ДПР составила 96 Бк/м<sup>3</sup>.

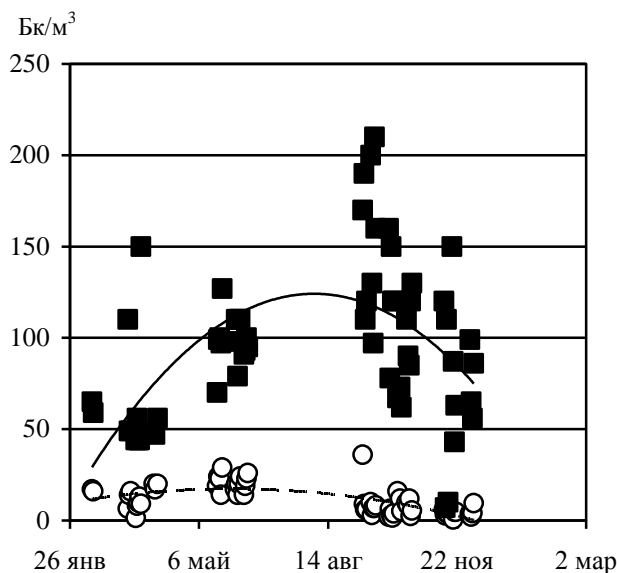


Рис. 13. ОА аэрозолей <sup>212</sup>Pb (○) и ДПР (■) в помещении 210/7 в 2013 г.

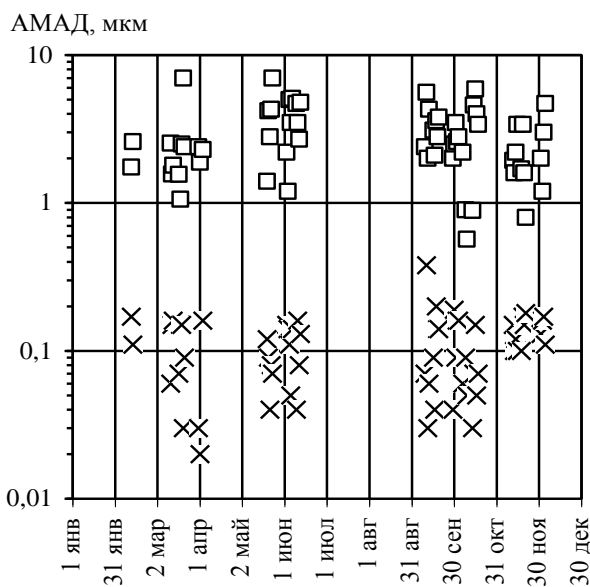


Рис. 14. АМАД аэрозолей-носителей ДПР (x) и продуктов Чернобыльской аварии (□) в помещении 210/7 в 2013 г.

### Дисперсность аэрозолей-носителей ДПР

Использование многослойных композиций фильтров Петрянова [28] позволило одновременно определить в подреакторном пространстве радионуклидный состав, ОА аэрозолей и распределение по размерам (дисперсность) [29]. Исходя из количества радионуклидов, уловленных в слоях, рассчитывали активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) и стандартное геометрическое отклонение  $\sigma$ . На рис. 14 приведены результаты, полученные в помещении 210/7 [6], из которых следует, что АМАД аэрозолей-носителей ДПР широко варьировал, но наиболее часто соответствовал 0,03 – 0,2 мкм. Это согласуется с измерениями, выполненными в различных воздушных средах [1, 2, 10, 30]. Какой-либо временной динамики АМАД в помещении 210/7 не обнаружено. Необходимо отметить существенное различие в величинах АМАД носителей ДПР и продуктов Чернобыльской аварии. Последние всегда находились на более крупных аэрозолях диаметром 1 – 10 мкм. Это связано с тем, что они образуются при диспергационных процессах (измельчение, трение, эрозия и др.). Аэрозоли-носители ДПР возникают при конденсационных процессах (осаждение атомов полония и висмута на атмосферных ядрах конденсации после распада материнского газа) и поэтому имеют субмикронные размеры.

### Ингаляционные дозы от радона, торона и их дочерних продуктов

Согласно [24] содержания радона, торона и их дочерних продуктов в жилых и промышленных зданиях в величинах ЭРОА находят из концентраций аэрозолей короткоживущих дочерних продуктов по уравнениям

$$\begin{aligned} \text{ЭРОА}_{\text{Rn}} &= 0,10A_{\text{Po-218}} + 0,51A_{\text{Pb-214}} + 0,38A_{\text{Bi-214}}, \\ \text{ЭРОА}_{\text{Tn}} &= 0,91 \cdot A_{\text{Pb-212}} + 0,09 \cdot A_{\text{Bi-212}}, \end{aligned}$$

где  $A_i$  – объемные активности дочерних продуктов радона и торона.

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [31] мощность ингаляционной дозы ( $D$ , мкЗв/ч) рассчитывают по уравнению

$$D = 10^{-3}[(0,17 + 9F_{\text{Rn}})A_{\text{Rn}} + (0,11 + 40F_{\text{Tn}})A_{\text{Tn}}].$$

На основании представленных выше измерений была рассчитана величина  $D$ , которую мог получить персонал в подреакторных помещениях в 1988 – 1992 гг. при поиске остатков ядерного топлива [32] или персонал, находящийся в объекте «Укрытие» в течение 1800 ч (рабочее время за год). Было принято:  $A_{\text{Rn}} = 80 \text{ Бк/м}^3$ ,  $F_{\text{Rn}} = 0,8$ ,  $A_{\text{Pb-212}} = 11 \text{ Бк/м}^3$ . Получено  $D = 1,8 \text{ мЗв/год}$ , что составляет 9 % от предела годовой эффективной дозы персонала категории А (20 мЗв) [11].

Следует заметить, что хотя наличие радона и ДПР в значительных количествах в объекте «Укрытие» обнаружено давно, однако регламентных наблюдений за ними не проводили, а ингаляционные дозы не учитывали.

### Заключение

В помещении 210/7, в которое в 1986 г. проник лавовый поток, и в смежном помещении 208/12 зарегистрированы разовые ОА радона  $450 \text{ Бк/м}^3$ . В 2013 г. средняя концентрация составляла  $80 \text{ Бк/м}^3$ . Обнаружение аэрозолей-носителей  $^{212}\text{Pb}$  с ОА до  $30 - 35 \text{ Бк/м}^3$  свидетельствовало, что из бетонных конструкций подреакторного пространства эмануирует также торон. Наличие радона, торона и их дочерних продуктов затрудняет радиационный контроль и экспрессные измерения аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии. Кроме того, это приводит к дополнительному облучению персонала: расчетная годовая ингаляционная доза достигает 10 % от предела годовой эффективной дозы. С помощью пакетов трехслойных волоконистых фильтров Петрянова найдено, что аэрозолями-носителями дочерних продуктов радона и торона являются аэрозоли с АМАД около  $0,1 \text{ мкм}$ . В соответствии с рекомендациям МАГАТЭ это необходимо учитывать при выборе дозовых коэффициентов для расчета ингаляционных доз. Установлено, что среднее значение коэффициента равновесия радона и ДПР составляет  $0,8$ . Это свидетельствует о слабом воздухообмене в подреакторном пространстве объекта «Укрытие», которое вентилируется только за счет естественной тяги. После возведения «Арки» над объектом «Укрытие» радиационная обстановка по радону может ухудшиться из-за снижения естественного проветривания.

Авторы благодарят А. А. Котлярова и А. А. Афонина из приборостроительной компании «НТМ-Защита» за любезно предоставленные радоновую станцию СРС-05 и радиометр «Альфа-рад+А».

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Postendyrfer J.* Properties and behaviour of radon and their decay products in air / J. Postendyrfer // J. Aerosol Sci. - 1994. - Vol. 25. - P. 263.
2. *Огородников Б. И.* Свойства, поведение и мониторинг радона и торона и их дочерних продуктов в воздухе / Б. И. Огородников // Атомная техника за рубежом. - 2001. - № 5. - С. 14 - 25.
3. *Залманзон Ю. Е.* Оценка возможности автоматизированного контроля загрязнения радиоактивными аэрозолями воздуха объекта «Укрытие» / Ю. Е. Залманзон, Д. Е. Фертман // Чернобыль-88. Докл. I Всесоюз. науч.-техн. совещ. по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. - Чернобыль, 1989. - Т. 7, ч. 1. - С. 471 - 475.
4. *Огородников Б. И.* Мониторинг радиоактивных аэрозолей в объекте «Укрытие» / Б. И. Огородников, А. К. Будыка // Атомная энергия. - 2001. - Т. 91, вып. 6. - С. 471 - 474.
5. *Радон и его дочерние продукты в объекте «Укрытие» в 2000 – 2010 гг.* / Б. И. Огородников, В. Е. Хан, Э. М. Пазухин, В. А. Краснов // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2011. - Вип. 16. - С. 130 - 136.
6. *Состав и концентрации радиоактивных аэрозолей около скопления ЛТСМ в помещении 210/7 объекта «Укрытие»* / Б. И. Огородников, В. Е. Хан, В. П. Ковальчук и др. // Там же - 2015. - Вип. 24. - С. 70 - 84.
7. *Сейсмическая радоновая станция СРС-05.* Руководство по эксплуатации. – М. : Приборостроительная компания «НТМ-Защита», 2009. - 20 с.
8. *Афонин А. А.* Установка для изучения характеристик переноса  $^{218}\text{Po}$  в воздухе / А. А. Афонин, А. А. Котляров, А. Ю. Максимов // Приборы и техника эксперимента. - 2010. - № 1. - С. 139 - 143.
9. *Радиометр радона и торона «Альфарад+А».* Руководство по эксплуатации. - М. : Приборостроительная компания «НТМ-Защита», 2009. - 20 с.
10. *Огородников Б. И.* Радон в подреакторном помещении 012/7 объекта «Укрытие» / Б. И. Огородников, В. Е. Хан // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2017. - Вип. 28. - С. 82 - 92.
11. *Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97.* - К., 1997.
12. *Фокин К. Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей здания / К. Ф. Фокин. - 4-е изд. - М. : Стройиздат, 1973. - С. 287.
13. *Цапалов А. А.* Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха / А. А. Цапалов, С. И. Кувшинников // АНРИ. - 2008. - № 2 (53). - С. 37 - 43.
14. *Цапалов А. А.* Системное исследование динамики ЭРОА радона в помещениях и принципы контроля / А. А. Цапалов // АНРИ. – 2010. – № 2 (61). - С. 2 - 14.
15. *Цапалов А. А.* Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона / А. А. Цапалов // АНРИ. - 2011. - № 3 (66). - С. 52 - 64.
16. *Жуковский М. В.* Определение механизмов и параметров поступления радона в помещение / М. В. Жуковский, А. В. Васильев // АНРИ. - 2012. - № 1 (68). - С. 5 - 14.
17. *Васильев А. В.* Характер и периодичность изменения объемной активности радона в помещении / А. В. Васильев, М. В. Жуковский // АНРИ. - 2015. - № 2 (81). - С. 42 - 47.



18. *Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2009 г.* / В. Е. Хан, Б. И. Огородников, А. К. Калиновский, В. А. Краснов // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2010. - Вип. 13. - С. 111 – 122.
19. *Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2011 г.* / В. Е. Хан, Б. И. Огородников, А. К. Калиновский, В. А. Краснов // Там же. - 2012. - Вип. 19. - С. 94 - 103.
20. *Огородников Б. И.* Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986 – 2006 гг. / Б. И. Огородников, Э. М. Пазухин, А. А. Ключников. – Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2008. - 456 с.
21. *Огородников Б. И.* Выброс радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» при сильных ветрах / Б. И. Огородников, А. К. Бudyка, Н. И. Павлюченко // Радиационная биология. Радиоэкология. - 2005. - Т. 45, № 2. - С. 234 - 242.
22. *Огородников Б. И.* О возможности прогнозирования уровня активности аэрозолей в вентиляционной системе объекта «Укрытие» / Б. И. Огородников, А. Д. Скорбун // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2006. - Вип. 4. - С. 121 - 124.
23. *Огородников Б. И.* Связь выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» с метеорологической ситуацией. Влияние скорости ветра / Б. И. Огородников, А. Д. Скорбун // Там же. - 2007. - Вип. 7. - С. 103 - 109.
24. *Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий.* Методические указания МУ 2.6.1.715-98. - Санкт-Петербург, 1998.
25. *Огородников Б. И.* Мониторинг объемной активности радона в помещениях объекта «Укрытие» / Б. И. Огородников, А. А. Афонин, А. А. Котляров // Девятыя Петряновские чтения. Москва, 18 – 20 июня 2013 г. : Тез. докл. - М. : МГИУ, 2013. - С. 81 - 82.
26. *Крисюк Э. М.* Радиационный фон помещений / Э. М. Крисюк. - М. : Энергоатомиздат, 1989. - 120 с.
27. *Хультквист Б.* Ионизирующее излучение естественных источников / Б. Хультквист. - М. : Изд-во иностр. лит. 1959. - 200 с.
28. *Волокнистые фильтрующие материалы ФП* / И. В. Петрянов, В. И. Козлов, П. И. Басманов, Б. И. Огородников. - М. : Знание. 1968.
29. *Budyka A. K.* Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes / A. K. Budyka, V. I. Ogorodnikov, V. I. Skitovich // J. Aerosol Sci. - 1993. - Vol. 24, suppl. 1. - P. S205 - S206.
30. *Papastefanou C.* Radioactive aerosols / C. Papastefanou. - Elsevier, 2008. - 187 p.
31. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.* Sources, effects and risks of ionizing radiation // Report of the General Assembly, United Nations. - New York, 2000.
32. *Ядерное топливо в объекте «Укрытие»* / Р. Э. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой и др.. - М. : Наука, 2010. - 240 с.

**Б. И. Огородников<sup>1,2</sup>, В. Е. Хан<sup>1</sup>, В. П. Ковальчук<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*

<sup>2</sup> *Фізико-хімічний інститут ім. Л. Я. Карпова, вул. Воронцове поле, б. 10, буд. 1, Москва, 105064, Росія*

#### **РАДОН У ПІДРЕАКТОРНОМУ ПРИМІЩЕННІ 210/7 ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»**

За допомогою сейсмічної радонової станції СРС-05 у приміщеннях 210/7 і 208/12 об'єкта «Укриття» виконано 14 сеансів спостережень тривалістю від 70 до 155 годин і відібрано близько 60 проб радіометром «Альфарад+А». Установлено, що при середній концентрації радону 80 Бк/м<sup>3</sup> максимальні значення досягали 450 Бк/м<sup>3</sup>. Виявлено аерозолі-носії <sup>212</sup>Pb з об'ємною активністю до 30 – 35 Бк/м<sup>3</sup>. Медіанний за активністю аеродинамічний діаметр аерозолів-носіїв дочірніх продуктів радону і торону становить близько 0,1 мкм. Коефіцієнт рівноваги радону і його дочірніх продуктів 0,8, що свідчить про слабкий повітряний обмін у підреакторному просторі об'єкта «Укриття». При вдиханні радону, торону та їхніх дочірніх продуктів ефективна доза опромінення персоналу об'єкта «Укриття» може досягати 10 % від ліміту ефективної дози.

*Ключові слова:* об'єкт «Укриття», радон, дочірні продукти радону, доза опромінення.

**B. I. Ogorodnikov<sup>1,2</sup>, V. E. Khan<sup>1</sup>, V. P. Kovalchuk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, 36a, Kirova str., Chornobyl, 07270, Ukraine*

<sup>2</sup> *Karpov Institute of Physical Chemistry, Vorontsovo pole str., 10, build 1, Moscow, 105064, Russia*

#### **RADON IN SUB-REACTOR ROOM 210/7 OF “UKRYTTYA” OBJECT**

Characterization of radon, thoron and their daughter products in steam-distributing corridor rooms of Chornobyl NPP “Ukryttya” object, is described. In rooms 210/7 and 208/12 of the “Ukryttya” object, 14 sessions with using seismic radon station SRS-05 were made, which lasted from 70 to 155 hours, and sampled near 60 aerosol samples with radiometer “Alfarad+A”. It was stated that under average radon concentration 80 Bq/m<sup>3</sup>, maximum values reached 450 Bq/m<sup>3</sup>. The aerosol-carriers of <sup>212</sup>Pb had volumetric activity up to 30 – 35 Bq/m<sup>3</sup>. Availability of radon, thoron and their daughter products impedes radiation monitoring and express measurements of aerosols-products of Chernobyl ac-

cident. The use of multi-layer Petryanov's filters allowed simultaneously researching the aerosol activities and their in-size distribution. Based on amount of radionuclides retained in the layers, activity median aerodynamic diameter and standard geometry error was calculated. Average active median aerodynamic diameter of daughter products of radon and thoron was 0.1  $\mu\text{m}$ . Middle value of equilibrium coefficient of radon and its daughter products was 0.8. It evidence, that air change in sub-reactor rooms of the "Ukryttya" object is week. In the surveyed rooms, additional personnel exposure due to radon and its daughter products inhalation can make around 10 % of limiting effective admissible dose. After the Arch is installed over the "Ukryttya" object, radiation situation for radon could deteriorate due to reduced natural airing.

*Keywords:* "Ukryttya" object, radon, daughter products of radon, activity median aerodynamic diameter, radiation doze.

#### REFERENCES

1. *Porstendurfer J.* Properties and behaviour of radon and their decay products in air / J. Porstendurfer // J. Aerosol Sci. - 1994. - Vol. 25. - P. 219 - 263.
2. *Ogorodnikov B. I.* Properties, behaviour and monitoring of radon and thoron and their decay products in air / B. I. Ogorodnikov // Atomic equipment abroad. - 2001. № 5. - P. 14 - 25. (Rus)
3. *Zalmanzon U. E.* Evaluation of the possibility of automated control air contamination by radioactive aerosols of the object "Shelter" / U. E. Zalmanzon, D. E. Fertman // Chernobyl-88 Dokl. I All-Union. scientific and engineering. symposium on the results of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. - Chernobyl, 1989. - Vol. 7, № 1. - P. 471 - 475. (Rus)
4. *Ogorodnikov B. I.* Monitoring of radioactive aerosols in the "Ukryttya" object / B. I. Ogorodnikov, A. K. Budyka // Atomic Energy. - 2001. - Vol. 91, - Iss. 6. - H. 471 - 474. (Rus)
5. *Radon and their decay products in the object "Ukryttya" in 2000 – 2010* / B. I. Ogorodnikov, V. E. Khan, E. M. Pazukhin, V. A. Krasnov // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2011. - Iss. 16. - P. 130 - 136. (Rus)
6. *Composition and concentrations of radioactive aerosols near lavaliked fuel contained materials in premise 210/7 of the object "Ukryttya"* / B. I. Ogorodnikov, V. E. Khan, V. P. Kovalchuk, A. S. Lagunenkov, S. A. Dovid // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2015. - Iss. 24. - P. 70 - 84. (Rus)
7. *Radon seismic station CPC-05. Operating manual.* – Moskva : Instrument company "NTM-Zaschita", 2009. - 20. (Rus)
8. *Afonin A. A.*  $^{218}\text{Po}$  air transfer study device / A. A. Afonin, A. A. Kotlyarov, A. Yu. Maksimov // Pribory i tehnika experimenta. - 2010. - № 1. - P. 139 - 143. (Rus)
9. *Radiometr of radon and thoron "Alfarad+A". Operating manual.* – Moskva : Instrument company "NTM-Zaschita", 2009. - 20. (Rus)
10. *Ogorodnikov B. I.* Radon in sub-reactor room 012/7 of the Object "Ukryttya" / B. I. Ogorodnikov, V. E. Khan // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2017. - Iss. 28. - P. 82 - 92. (Rus)
11. *Safety norms radiation of Ukraine NRB-97 / D-2000.* (Ukr).
12. *Fokin K. F.* Building heat engineering enclosing parts of building / K. F. Fokin. - Ed. 4th. – Moskva : Stroyizdat, 1973. – 287 p. (Rus)
13. *Tsapalov A. A.* Dependence of volume activity of radon in the premises of the difference between the indoor and outdoor air temperatures / A. A. Tsapalov, S. I. Kyvshinnikov // ANRI. - 2008. - № 2 (53). - P. 37 - 43. (Rus)
14. *Tsapalov A. A.* System study of the dynamics EEVA of radon indoors and control principles / A. A. Tsapalov // Ibid. - 2010. - № 2 (61). - P. 2 - 14. (Rus)
15. *Tsapalov A. A.* Results of long-term studies of behavior of VA and EEVA of radon in buildings of Moscow region / A. A. Tsapalov // Ibid. - 2011. - № 3 (66). - P. 52 - 64. (Rus)
16. *Zhukovsky M. V.* Definition of mechanisms and parameters of radon indoors / M. V. Zhukovsky, A. V. Vasiliev // Ibid. - 2012. - № 1 (68). - P. 5 - 14. (Rus)
17. *Vasiliev A. V.* The nature and frequency of changes in the volume activity of radon in indoor / A. V. Vasiliev, M. V. Zhukovskiy // Ibid. - 2015. - № 2 (81). - P. 42 - 47. (Rus)
18. *Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2009* / V. E. Khan, B. I. Ogorodnikov, A. K. Kalinovskiy, V. A. Krasnov // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2010. - Iss. 13. - P. 111 - 122. (Rus)
19. *Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2011* / V. E. Khan, B. I. Ogorodnikov, A. K. Kalinovskiy, V. A. Krasnov // Ibid. - 2012. - Iss. 19. - P. 94 - 103. (Rus)
20. *Ogorodnikov B. I.* Radioactive aerosols of the Shelter: 1986 – 2006 / B. I. Ogorodnikov, E. M. Pazukhin, A. A. Klyuchnikov. - Chernobyl: National Academy of Sciences of Ukraine. Institute for Safety Problems of NPP, 2008. - 456 p. (Rus)

21. *Ogorodnikov B. I.* "Ukryttya" object radioactive aerosols exhaust at strong winds / B. I. Ogorodnikov, A. K. Budyka, N. I. Pavlyuchenko // Radiazionnaya biologiya. Radioecologiya. - 2005. - Vol. 45, № 2. - P. 234 – 242. (Rus)
22. *Ogorodnikov B. I.* About possibility of forecasting of the level of aerosols activity in ventilating system of “Ukryttya” object / B. I. Ogorodnikov, A. D. Skorbun // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2006. - Iss. 4. - P. 121 - 124. (Rus)
23. *Ogorodnikov B. I.* Relationship of radioactive aerosols emission from “Ukryttya” object with meteorological situation. Wind velocity influence / B. I. Ogorodnikov, A. D. Skorbun // Ibid. - 2007. - Iss. 7. - P. 103 - 109. (Rus)
24. *Realisation* of radiation control in dwellings and public buildings. Methodical instructions МУ 2.6.1.715-98. St.-Petersburg, 1998. (Rus)
25. *Ogorodnikov B. I.* Monitoring of volume radon activity in rooms of “Ukryttya” object / B. I. Ogorodnikov, A. A. Afonin, A. A. Kotlyarov // Devjatie Ptrjanov. Chteniya. - Moskva, 18 - 20 June 2013. Thesis of reports. - Moskva : MGIU, 2013. –P. 81 - 82. (Rus)
26. *Krisyuk E. M.* Background radiation areas / E. M. Krisyuk. – Moskva : Energoatomizdat, 1989. - 120 p. (Rus)
27. *Hultqvist B.* Studies on naturally occurring ionizing radiations / B. Hultqvist. - Moskva : Izdat. Inostr. Liter., 1959. - 200 p. (Rus)
28. *Fibre filter materials FP* / I. V. Petrjanov, V. I. Kozlov, P. I. Basmanov, B. I. Ogorodnikov. – Moskva : Izdat. Znanie, 1968. - 96 p. (Rus)
29. *Budyka A. K.* Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes / A. K. Budyka, B. I. Ogorodnikov, V. I. Skitovich // J. Aerosol Sci. – 1993. - Vol. 24, suppl. 1. - P. S205 – S206.
30. *Papastefanou C.* Radioactive aerosols / C. Papastefanou. - Elsevier, 2008. - 187 p.
31. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.* Sources, effects and risks of ionizing radiation. – Report of the General Assembly, United Nations. - New York, 2000.
32. *Nuclear fuel in the object "Ukryttya"* / R. E. Arutyunyan, L. A. Bolshov, A. A. Borovoy et al. – Moskva : Nauka, 2010. – 240 p. (Rus)

Надійшла 29.01.2018  
Received 29.01.2018