

**Б. И. Огородников<sup>1,2</sup>, В. Е. Хан<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, пер. Обуха, д. 3-1/12, стр. 6, Москва, 105064, Россия*

## **РАДОН В ПОДРЕАКТОРНОМ ПОМЕЩЕНИИ 012/7 ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»**

С помощью сейсмической радоновой станции СРС-05 в помещении 012/7 объекта «Укрытие» выполнено 12 сеансов наблюдений продолжительностью от 2 до 50 ч. Установлено, что при средней концентрации радона  $80 \text{ Бк/м}^3$  максимальные значения достигали  $400\text{--}500 \text{ Бк/м}^3$ . Параллельные пробоотборы в системе «Байпас» показали, что в воздушном потоке, выбрасываемом в свободную атмосферу из объекта «Укрытие», концентрация радона в 4 – 5 раз ниже, чем в помещении 012/7. Обнаружено, что в течение 2 – 3 сут динамика концентраций радона и торона может существенно различаться. Следовательно, в подреакторных помещениях имеются несколько источников эманирования радиоактивных газов, в частности бетонные конструкции, содержащие разное количество и соотношение  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Разность температур внутри помещения 012/7 и во внешней среде не влияет на концентрацию радона в помещении. Содержание радона зависит от ветра в окрестностях объекта «Укрытие». Наиболее высокие концентрации были зарегистрированы, когда средняя скорость ветра достигала  $4 \text{ м/с}$ , а максимальные порывы превышали  $9\text{--}10 \text{ м/с}$ . В результате вдыхания радона, торона и их дочерних продуктов облучение персонала в помещении 012/7 может составлять до 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). Радон – тяжелый газ без цвета и запаха, не вступающий в обычных условиях в химические реакции. 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  $0,1\text{--}0,3 \text{ мкм}$  [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»**

Первыми отметили присутствие аэрозолей ДПР в объекте «Укрытие» специалисты СНИИП (Москва) в 1987 г. при создании подсистем радиационного контроля и диагностики [3]. Целенаправленные наблюдения за ДПР в подреакторных помещениях были впервые проведены в 2000 г. [4]. Из измерения 20 проб из помещения 207/5 парораспределительного коридора следовало, что концентрации радона превышали  $100 \text{ Бк/м}^3$ . Наблюдения, продолженные через два года [5], показали, что концентрации радона зависят от многих факторов, в частности от внешних метеорологических условий.

В 2006 – 2010 гг. была выполнена программа измерения радона в объекте «Укрытие» и локальной зоне с помощью трековых детекторов [5]. Установлено, что в ряде помещений среднегодовая концентрация радона достигала  $150\text{--}200 \text{ Бк/м}^3$ .

Представленные в [4, 5] результаты показали, что наличие радона и его ДПР в объекте «Укрытие» является наряду с внешним облучением от остатков топлива и внутренним от вдыхания аэрозолей-продуктов аварии серьезной опасностью для работающего персонала. В связи с этим было решено провести наблюдения за концентрациями ДПР и попытаться выявить факторы, влияющие на их динамику. Для этого была использована сейсмическая радоновая станция СРС-05, разработанная в «НТМ-Защита» (Москва). В качестве объекта наблюдений было выбрано помещение 012/7.

### **Описание помещения 012/7**

Помещение 012/7 расположено в центре разрушенного реакторного здания (блок Б) на самой нижней высотной отметке (0,0 м). Оно входит в систему бассейна-барботера 4-го блока ЧАЭС и расположено между строительными осями 47 – 48 и рядами Г – Т. Его размеры в плане  $6 \times 72 \text{ м}$ , высота 2 м. Пол и стены плакированы листами нержавеющей стали. С востока и запада к нему примыкают

© Б. И. Огородников, В. Е. Хан, 2017

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. Две бетонные перемычки по осям Ж и П делят помещение 012/7 на три отсека. Из-за них свободное перемещение по помещению невозможно, но воздухообмен существует, поскольку в верхней части перемычек имеются каналы, через которые проложены без герметизации трубопроводы диаметром около 0,5 м.

Пристальное внимание к помещению 012/7 после аварии 1986 г. связано с тем, что оно оказалось конечной точкой распространения лавы большого вертикального потока, который от места проплавления шахты реактора преодолел по вертикали около 10 м [6]. В марте 2000 г. здесь был начат эксперимент по использованию для пылеподавления и локализации лавообразных топливосодержащих материалов (ЛТСМ) кремнийорганического компаунда «ЭКОР-25ММ» [7]. Отметим еще, что в нижних помещениях объекта «Укрытие» начинается формирование воздушных потоков, которые выносят радиоактивные аэрозоли в свободную атмосферу через подкровельное пространство объекта «Укрытие» и высотную трубу ВТ-2.

В соответствии с [8] лавовое скопление в помещении 012/7 расположено между рядами И – К и имеет в плане форму эллипса с меридиональной осью длиной ~ 3 м и широтной ~ 2 м. 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. [6] в этом скоплении, получившем название «Куча», содержится  $1,0 \pm 0,5$  т урана. В 2010 г. у южного конца скопления мощность экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД) составляла около 70 Р/ч. Доступ к скоплению ЛТСМ был организован из коридора 006/2 через помещения 009/4 и 012/8. Для прохода через помещение 009/4, которое всегда заполнено слоем воды глубиной около 30 см, были установлены слани. Помещения 012/7 и 012/8 в районе проведения работ оставались сухими.

#### Методы отбора проб

Аэрозоли отбирали воздуходувкой Н810 RadeCo со скоростью около 100 л/мин. Использовали пакеты фильтров Петрянова площадью  $20 \text{ см}^2$ , состоящие из слоев ФПА-70-0,13, ФПА-70-0,21, АФА РСП-20 и АФА РМА-20. Воздух прокачивали около 2 ч. Затем фильтры демонтировали, осматривали и в бумажных конвертах отправляли на анализ.

Концентрации радона и торона измеряли сейсмической радоновой станцией СРС-05 «Торон-1» [9, 10]. Она выполнена в виде автономного блока, размещенного в герметичном цилиндрическом корпусе диаметром 98 мм и длиной 800 мм. Работа прибора основана на измерении активности дочерних продуктов радона и торона ( $^{218}\text{Po}$  и  $^{216}\text{Po}$ ), оседающих под воздействием электрического поля на полупроводниковый детектор в камере объемом 0,25 л. В режиме «Радон» станция может производить за сутки до 60 циклов измерений и в режиме «Торон» – до 144. Воздух поступает в прибор через очистной фильтр АФА РСП-20 со скоростью около 0,8 л/мин. Его температура и относительная влажность измеряются на выходе. Там же находится датчик атмосферного давления.

Воздуходувку и станцию СРС-05 размещали на шасси (рис. 1). Чтобы отбор аэрозолей и измерение концентраций радона и торона происходили из одного объема воздуха, заборное отверстие станции СРС-05 вставляли в воронку, через которую происходил выход потока из воздуходувки Н810. Для снижения дозовых затрат приборы монтировали на шасси за бетонной стеной в помещении 012/8, а затем подкатывали в помещение 012/7 к южному концу скопления ЛТСМ. Примерно через 2 ч экспозицию фильтров заканчивали, шасси вытягивали в помещение 012/8, фильтры демонтировали, а станцию СРС-05 возвращали в помещение 012/7 для продолжения мониторинга радона. На следующие сутки все операции повторяли с новым пакетом фильтров. Таким образом, радиоактивные аэрозоли контролировали раз в сутки, а динамику концентраций радона и торона – непрерывно в течение от 2 ч до 2 – 3 сут.



Рис. 1. Пробоотборный комплекс в помещении 012/7 объекта «Укрытие».

Для сопоставления радионуклидного состава и концентрации аэрозолей в помещении 012/7 и в выбросе из объекта «Укрытие» синхронно отбирали пробы в системе «Байпас», через которую воздушные потоки из развала 4-го блока по вентиляционной трубе ВТ-2 поступают в свободную атмосферу. Для пробоотбора использовали такие же, как в помещении 012/7, пакеты фильтров Петрянова и воздуходувку Н810. Несколько раз там же использовали станцию СРС-05 (результаты представлены в [11]).

#### Анализ радиоактивных веществ

Через 10 – 15 мин после окончания прокачки воздуха фильтры поступали в помещение Г328 объекта «Укрытие» для радиометрии. Пакеты разделяли на три слоя согласно их исходной окраске: голубой (ФПА-70-0,13), розовый (ФПА-70-0,21) и белый (АФА РСР-20 и АФА РМА-20). Композицию из двух фильтров в белом слое использовали для обеспечения практически полного улавливания субмикронных аэрозолей. Измерение бета-активности фильтров выполняли на приборе КРК-1. Слои поочередно измеряли в течение 100 с. Если скорость счета была свыше 100 имп/с, то экспозиция снижалась 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 полностью распадались не только ДПР, но и дочерние продукты торона, измерения повторяли. Каждый слой экспонировали, как правило, 1000 с. Вторая серия измерений позволяла рассчитать суммарную активность аэрозолей-носителей  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  и  $^{137}\text{Cs}$  ( $\Sigma\beta$ ), а также  $^{212}\text{Pb}$  – одного из дочерних продуктов торона с периодом полураспада 10,6 ч. Если требовалось определить содержание в фильтрах  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  и  $^{241}\text{Am}$ , то 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 помещении 012/7 определяли по показаниям блока климатконтроля станции СРС-05. Автоматическое измерение и запись показаний происходили при каждом цикле прокачки воздуха, т.е. через 10 мин при режиме «Торон» и через 22 мин при режиме «Радон». Кроме того, скорости и направления воздушных потоков периодически измеряли в дверных проемах из коридора 006/2 в помещение 009/4, из него – в помещение 012/8 и отсюда – в помещение 012/7. Использовали термоанемометр с автономным питанием ТАМ-1, обеспечивавший измерения в диапазоне 0,1 – 2 м/с.

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

##### Метеообстановка в помещении 012/7 и вблизи объекта «Укрытие»

Из показаний блока климатконтроля станции СРС-05 следовало, что температура воздуха в помещении 012/7 практически оставалась стабильной как в течение суток, так и всего периода исследований. Наиболее высокая температура 13 °С удерживалась в октябре - декабре 2010 г. В январе – феврале 2011 г. она опустилась до 10 °С, к лету снизилась еще немного и стабилизировалась до сентября на уровне 9 °С. Относительная влажность воздуха в осенний период 2010 г. составляла 65 – 75 %, а зимой опустилась до 30 – 40 %. Наибольшая относительная влажность воздуха (83 – 87 %) была в летне-осенний период 2011 г.

На метеостанции «Чернобыль» температура воздуха в дни исследований с октября 2010 г. по сентябрь 2011 г. представлена на рис. 2. Видно, что в течение первой зимней недели температура часто опускалась ниже -10 °С. Наиболее низкая -19,2 °С была 1 декабря 2010 г. в 8 ч утра. Затем лишь в середине февраля температура опускалась еще ниже до -21 °С.

Высокие температуры, достигавшие в дневные часы 20 °С и более, были зарегистрированы во второй половине мая. Максимальные температуры (между 27 и 28 °С) приходились на 15 ч 21, 22 и 29 мая. Давление воздуха обычно колебалось в диапазоне 740 – 760 мм рт. ст. Наиболее высокая относительная влажность воздуха 75 – 80 % наблюдалась в ночное время. При выпадении осадков она поднималась до 98 – 99 %.

Средняя скорость ветра, как правило, составляла 1 – 2 м/с (рис. 3). В октябре 2010 г. часто наблюдался штиль. Затишья обычно продолжались около трех часов. Периоды со средними скоростями выше 3 м/с и максимальными порывами более 9 – 10 м/с наблюдались сравнительно редко. Так было

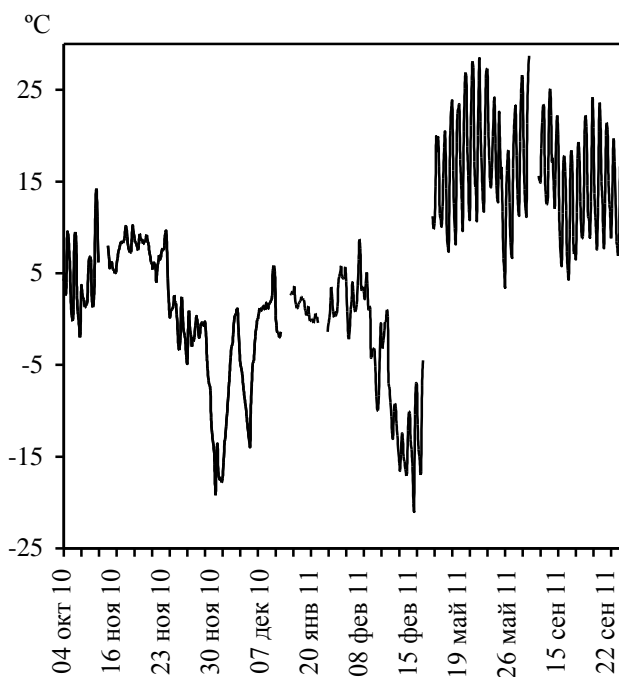


Рис. 2. Температура воздуха на метеостанции "Чернобыль" в октябре - декабре 2010 г., в январе, феврале, мае и сентябре 2011 г.

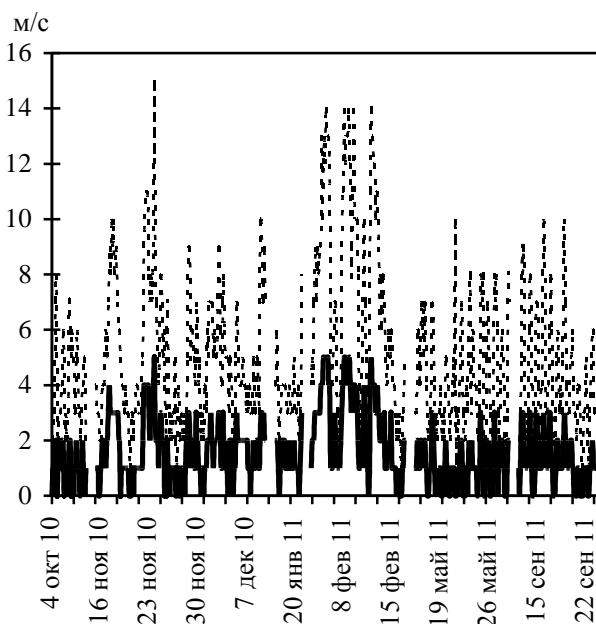


Рис. 3. Средние скорости ветра (сплошная кривая) и его максимальные порывы (пунктирная) на метеостанции «Чернобыль» в октябре - декабре 2010 г., январе, феврале, мае и сентябре 2011 г.

23 ноября 2010 г., когда с 2 до 17 ч средняя скорость ветра достигала 4 м/с, а порывы – 10 – 11 м/с. На следующий день в 14 ч зафиксировали порывы 15 м/с. Как оказалось в дальнейшем, это была наибольшая ветровая нагрузка за период исследований. В конце месяца (29 ноября) за час до начала пробоотбора и при прокачке воздуха в течение последующих двух часов средняя скорость ветра составляла 3 м/с, а порывы 9 м/с. Такие же порывы ветра наблюдали 3 – 4 и 9 – 10 декабря.

В 2011 г. ветреной выдалась первая половина февраля. В течение 10 сут (4 – 13 февраля) средние скорости ветра ежедневно достигали 4 – 5 м/с, а порывы – 10 – 14 м/с. В мае и сентябре порывы ветра 10 м/с были зарегистрированы лишь трижды. Длительные штилевые условия в периоды отбора проб в 2011 г. зарегистрированы в мае (19 – в 0 и 6 ч, 23 – в 0, 3, 6 и 15 ч, 25 – в 0 и 3 ч) и сентябре (15 – в 0, 3 и 6 ч, 21 – в 0, 6 и 9 ч, 22 – в 0, 3 и 6 ч).

#### Концентрация радона в помещении 012/7

Концентрации радона в помещении 012/7 в октябре – декабре 2010 г., январе - феврале, мае и сентябре 2011 г. представлены на рис. 4. Как видно, содержание радона сильно варьировало. Причем колебания от малых до больших величин иногда происходили за 2 – 4 цикла пробоотбора, т. е. в течение получаса. В связи с тем, что в процессе отбора проб и в промежутках между ними никаких работ в помещении не производилось и его никто не посещал, подобные колебания концентраций не связаны с передвижением персонала или открыванием дверей.

Максимальные концентрации радона были зафиксированы 22 – 23 ноября 2010 г. и составили 450 – 500 Бк/м<sup>3</sup>. Затем 10 – 11 февраля 2011 г. были зарегистрированы несколько раз концентрации 340 – 390 Бк/м<sup>3</sup>. Однако 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>.

Известно, что тяга воздуха в отопительных системах и зданиях зависит от  $\Delta T = T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}$ , т. е. разности внутренней ( $T_{\text{вн}}$ ) и наружной ( $T_{\text{нар}}$ ) температур [12]. Это сказывается на воздухообмене, а следовательно, на содержании радона внутри жилых помещений [13 - 17] и промышленных сооружений, в частности в объекте «Укрытие» [11, 18].

Результаты обработки измерений концентрации радона в помещении 012/7 в зависимости от  $\Delta T$  представлены на рис. 5. Хотя  $\Delta T$  достигала 50 °С, а разброс концентраций оказался высокий, тем не менее их взаимосвязь не выявлена. Таким образом, даже очень высокие суточные колебания тем-

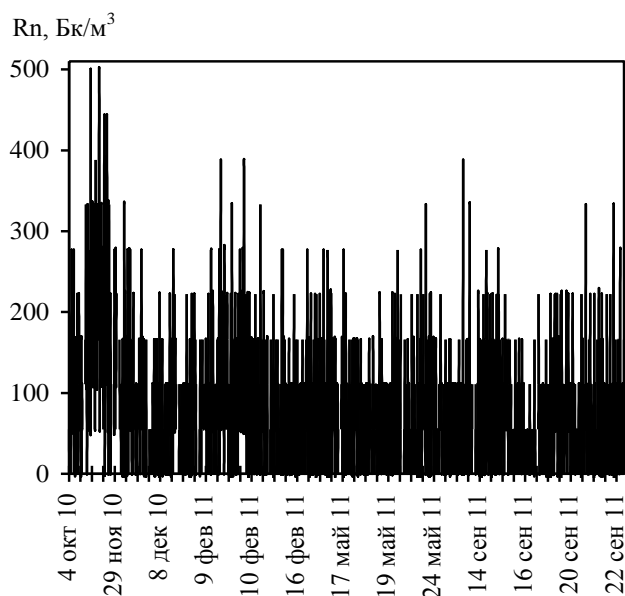


Рис. 4. Концентрации радона в помещении 012/7 в октябре – декабре 2010 г., январе, феврале, мае и сентябре 2011 г.

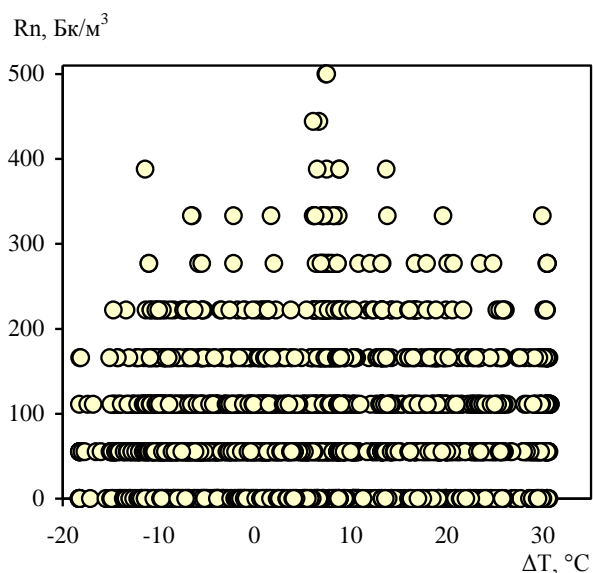


Рис. 5. Диаграмма рассеяния объемной активности радона в помещении 012/7 и разности температур воздуха внутри него и снаружи объекта «Укрытие» в октябре - декабре 2010 г., январе, феврале, мае и сентябре 2011 г.

пературы воздуха во внешней среде, достигавшие в летнее время  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2), практически не влияли на содержание радона в помещении 012/7.

#### Концентрация радона в системе «Байпас» объекта «Укрытие»

Система «Байпас» была обустроена осенью 1986 г. при завершении строительства объекта «Укрытие» [19]. Ее основное назначение – вентиляция внутренних полостей развала и сохранившихся помещений 4-го энергоблока. Это осуществляется за счет естественной тяги воздуха через высотную вентиляционную трубу ВТ-2. Было несколько попыток выявить, где формируются воздушные потоки на нижних отметках и как они распространяются до выхода в свободную атмосферу, в том числе через легкую кровлю объекта «Укрытие». Однако детально проследить маршруты не удалось вследствие многочисленных коммуникационных проходов и неплотностей по периметру и внутри сооружения на всех высотных отметках [20, 21].

С целью контроля выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в системе «Байпас» имеется непрерывно действующий комплекс «Калина» и штуцеры для разовых проб. В 2002 г. специалисты ИПБ АЭС НАН Украины организовали еще отбор проб, опуская воздухоудку Н810 в помещении 4004/1 непосредственно в воздуховод системы «Байпас» [19]. Но затем в связи с его модернизацией начали отбирать аэрозоли через штуцер с изокинетическим пробозаборником, размещенный на стенке воздуховода. Результаты измерений за 2010 – 2011 гг. приведены в [11, 22].

С февраля 2010 г. при отборе аэрозолей из системы «Байпас» стали периодически использовать станцию СРС-05. Как и в помещении 012/7, ее устанавливали в выхлопном потоке воздухоудки Н810. Поскольку сеанс пробоотбора длился около двух часов, станция успевала сделать 4 – 6 циклов прокачки и измерения радона.

На рис. 6 представлены результаты 20 сеансов, выполненных с сентября 2010 г. по февраль 2011 г. Как и в помещении 012/7, за время одного сеанса концентрация радона сильно варьировала. Максимальные концентрации достигали  $90 - 110\text{ Bq/m}^3$ . Однако, как следует из рисунка, большинство результатов не превышало  $40\text{ Bq/m}^3$ , а средняя величина составляла  $20\text{ Bq/m}^3$ . При сравнительно небольшом количестве сеансов сделать выводы о причинах большого разброса концентраций трудно. Так, 4 и 8 февраля 2011 г., когда были зарегистрированы очень низкие концентрации, наблюдались сильные ветры. Но примерно такие же ветры были 18 ноября 2010 г., когда при одном из измерений концентрация радона составила  $92\text{ Bq/m}^3$ . Тем не менее усредненные данные показывают, что содержание радона в воздушном потоке, поступающем в вентиляционную трубу, в 4 – 5 раз ниже, чем в помещении 012/7 (см. рис. 4). Следовательно, поднимаясь по помещениям объекта «Укрытие», воздушный поток разбавляется «чистым» воздухом.

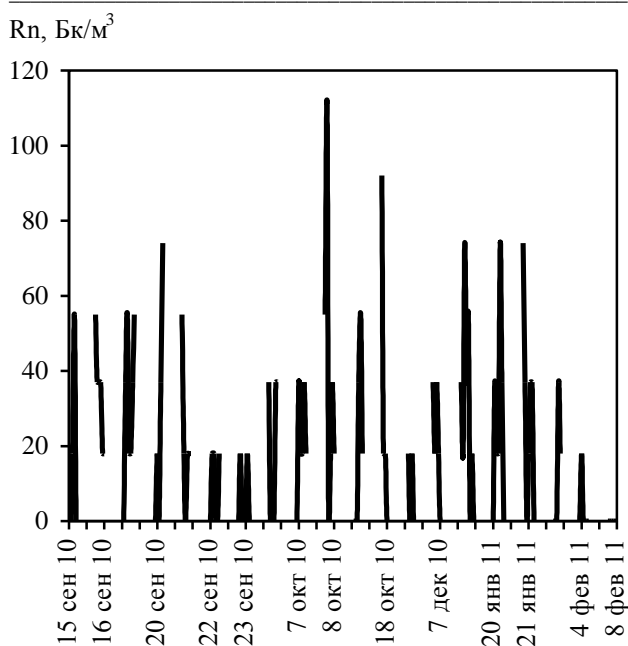


Рис. 6. Концентрации радона в системе «Байпас» в сентябре – декабре 2010 г. и январе – феврале 2011 г.

### Влияние скорости ветра во внешней среде на концентрацию радона в помещении 012/7

Наиболее высокие концентрации радона в помещении 012/7 были зарегистрированы 23 ноября 2010 г. (см. рис. 4). Максимальные значения достигали 400 – 500 Бк/м<sup>3</sup>. Станция СРС-05 начала работать 22 ноября в 15 ч 30 мин. Перед этим в течение суток средние скорости юго-восточного ветра не превышали 1 м/с, а порывы 4 м/с. Усиление ветра началось с 20 ч и в 2 ч ночи 23 ноября средняя скорость уже составила 4 м/с, а порывы 9 м/с. Направление ветра не менялось, но его порывы во время наблюдений в 8, 11 и 14 ч стали достигать 11 м/с. Отбор пробы закончился 23 ноября в 11 ч 09 мин. К концу этого дня (в 23 ч) средняя скорость ветра снизилась до 2 м/с, а порывы до 7 м/с. Как следует из рис. 3, через сутки вновь был сильный ветер, средняя скорость которого в 14 ч достигала 5 м/с, а порывы 15 м/с. Однако в этот день пробоотбор проводили не в помещении 012/7, а в системе «Байпас», где были зафиксированы низ-

кие концентрации радона (в среднем около 9 Бк/м<sup>3</sup> (см. рис. 6).

Еще один ветренный период пришелся на первую половину февраля 2011 г. (см. рис. 3). Ежедневно с 4 по 13 февраля (за исключением 7 февраля) почти в 75 % показаний средние скорости ветра составляли 3 – 5 м/с, а максимальные порывы 9 – 14 м/с. В течение всей десятидневки наблюдался устойчивый западный и северо-западный ветер. Станция СРС-5 в этот период работала только с 9 ч 08 мин 9 февраля до 11 ч 05 мин 11 февраля. Как видно из рис. 4, при этом были неоднократно зарегистрированы концентрации радона от 220 до 390 Бк/м<sup>3</sup>.

В остальные периоды исследований, как следует из рис. 3, средние скорости ветра лишь изредка достигали 3 – 4 м/с, а максимальные порывы 8 – 10 м/с. Средняя концентрация радона за 50 ч наблюдений 9 – 11 февраля составила около 100 Бк/м<sup>3</sup>. Два рассмотренных случая, хотя и не могут претендовать на высокую статистическую достоверность, показывают, что высокие скорости ветра в свободной атмосфере оказывают воздействие на состояние воздушной среды в объекте «Укрытие», в частности в помещении 012/7.

Ранее влияние ветра на аэрозольную обстановку в объекте «Укрытие» было рассмотрено в публикациях [19, 23 – 25]. Установлено, что средние скорости ветра выше 4 – 5 м/с и порывы свыше 10 – 11 м/с приводят к значительному увеличению (на порядок величины) объемной активности аэрозолей-носителей продуктов аварии в системе «Байпас». Однако анализ проб, отобранных 22 и 23 ноября 2010 г. и 9 – 11 февраля 2011 г., показал, что в помещении 012/7 не наблюдалось значительного изменения объемной активности аэрозолей-носителей продуктов аварии [26]. Из этого следовало, что механизмы генерации радона и аэрозолей-продуктов аварии различны. Поступление радона в ветренные дни происходило не с воздушными потоками из внешней среды, где концентрации намного ниже, чем в объекте «Укрытие», а из других помещений, расположенных около 012/7. Еще раз подчеркнем, что концентрации радона в ветренные дни увеличивались в помещении 012/7 не более чем в два-три раза относительно среднего уровня.

### Соотношение активностей радона и торона

Согласно [9] станция СРС-05 предназначена как для измерения концентраций радона, так и торона. В процессе ее работы в помещении 012/7 в измерительный канал поступали импульсы от дочерних продуктов обоих материнских веществ. Однако если для радона имелась калибровка и зафиксированные импульсы пересчитывались в единицы концентрации (Бк/м<sup>3</sup>), то для торонного канала такой калибровки не было. В связи с этим наличие и динамику торона можно было отслеживать лишь качественно.

На рис. 7 приведена запись показаний, полученных при работе станции 4 – 5 октября 2010 г. Видно, что динамика активностей радона и торона совпадает. Аналогичные результаты были получе-

ны в 9 из 12 сеансов отбора проб в 2010 – 2011 гг. В остальных трех из 12 сеансов наблюдалась качественно иная динамика. Например, 22 – 23 ноября 2010 г. активность радона оставалась практически неизменной, а торона непрерывно увеличивалась (рис. 8). К концу сеанса количество импульсов от торона за один цикл стало достигать 10 – 16, хотя при других пробоотборах 2010 – 2011 гг. находилось в диапазоне 0,4 – 1 имп.

Динамика, аналогичная представленной на рис. 8, наблюдалась также при пробоотборах 8 – 9 декабря 2010 г. и 18 – 19 января 2011 г. Во время этих сеансов, как следует из рис. 3, высоких скоростей ветра не было, поэтому объяснить такую динамику воздействием ветра нельзя.

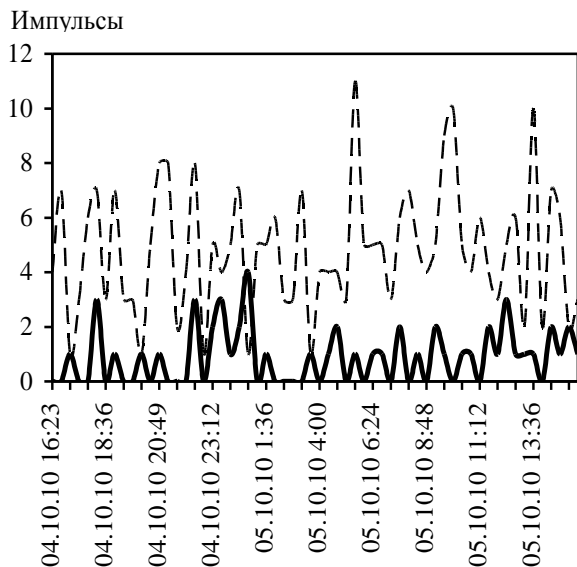


Рис. 7. Динамика активностей (имп.) радона (пунктирная) и торона (сплошная) в помещении 012/7 4 – 5 октября 2010 г.

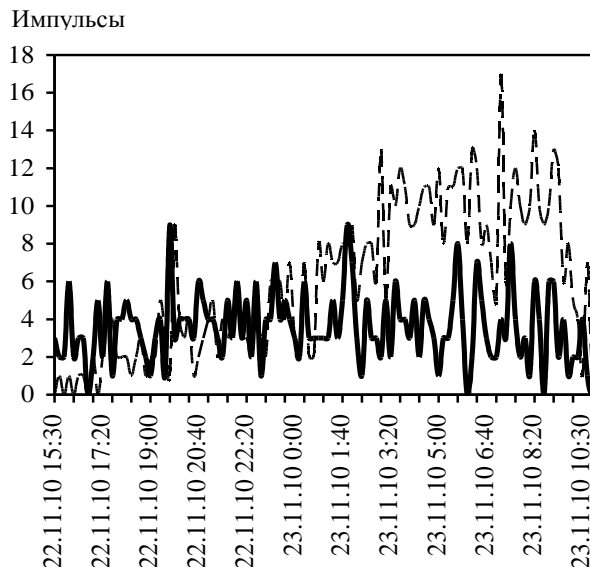


Рис. 8. Динамика активностей (имп.) радона (пунктирная) и торона (сплошная) в помещении 012/7 22 – 23 ноября 2010 г.

Различия в концентрациях и их динамике показывают, что содержание радона, торона и их и его дочерних продуктов в подреакторном помещении 012/7 определяются многофакторными процессами. Одна из причин может быть связана с различием наполнителей, использованных в бетоне. Как следует из публикации [27], в строительных бетонах содержание  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ , при радиоактивном распаде которых начинают эманировать радон и торон, может отличаться на порядок величины. Ранее различие в концентрациях дочерних продуктов радона и торона в помещении 012/7 было отмечено в [26].

#### Ингаляционные дозы при вдыхании радона и ДПР

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [28] расчет мощности ингаляционных доз ( $D$ , мкЗв/ч) от радона, торона и их дочерних продуктов проводят по уравнению

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

где  $F_{\text{Rn}}$  и  $F_{\text{Tn}}$  – коэффициенты равновесия соответственно радона и торона с их дочерними продуктами;  $C_{\text{Rn}}$  и  $C_{\text{Tn}}$  – средние концентрации радона и торона, Бк/м<sup>3</sup>. Среднюю концентрацию торона находят из измерения концентрации аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  ( $C_{\text{Pb}}$ ) и коэффициента равновесия  $F_{\text{Pb}}$  по выражению  $C_{\text{Tn}} = C_{\text{Pb}} / F_{\text{Pb}}$ .

На основании результатов измерений 2010 – 2011 гг. была рассчитана доза ингаляционного облучения, которую могли получить специалисты оперативного персонала, например из цеха радиационной безопасности, находящиеся в помещении 012/7 в течение 1800 ч, т.е. календарного рабочего года. При расчете содержания торона в соответствии с [26] было принято, что средняя концентрация аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  ( $C_{\text{Pb}}$ ) составляет 12 Бк/м<sup>3</sup> и согласно [29] в непрветриваемых помещениях  $F_{\text{Rn}} = F_{\text{Tn}} = 1,0$ . В связи с этим  $C_{\text{Tn}} = 12$  Бк/м<sup>3</sup>. Поскольку согласно данным, представленным на рис. 5, средняя величина  $C_{\text{Rn}} = 80$  Бк/м<sup>3</sup>, то годовая доза составит 2,2 мЗв/г. Это 11 % от предела эффективной дозы [30]. Следует заметить, что хотя наличие радона, торона и их дочерних продуктов в значительных количествах в воздушной среде объекта «Укрытие» замечено давно, однако систематические наблюдения за их содержанием и динамикой не проводятся, а ингаляционные дозы не контролируются и не учитываются.

### Заключение

С октября 2010 г. по сентябрь 2011 г. в помещении 012/7 объекта «Укрытие» выполнены наблюдения за концентрациями и динамикой радона и торона. Интерес к исследованиям в этом помещении связан с тем, что здесь остановился большой вертикальный поток ЛТСМ, образовавшийся в первые часы после разрушения шахты реактора при аварии 26 апреля 1986 г. Кроме того, отсюда (с самой нижней высотной отметки объекта «Укрытие») начинают формироваться воздушные потоки, которые поднимаются по помещениям разрушенного 4-го блока и выносят радиоактивные вещества в свободную атмосферу. Поскольку радон и торон являются инертными радиоактивными газами, наблюдение за ними позволяет получить более широкие представления о процессах, происходящих внутри объекта «Укрытие».

С помощью сейсмической радоновой станции СРС-05 было выполнено 12 сеансов наблюдений продолжительностью от 2 до 50 ч. Концентрации радона сильно варьировали. При средней величине  $80 \text{ Бк/м}^3$  максимальные значения достигали  $400 - 500 \text{ Бк/м}^3$ . Параллельные пробоотборы в системе «Байпас», через которую воздушные потоки из объекта «Укрытие» выбрасываются в свободную атмосферу, показали, что в них концентрации радона в среднем в 4 – 5 раз ниже, чем в помещении 012/7. Таким образом, по мере подъема воздуха из нижних помещений объекта «Укрытие» в верхние происходит его разбавление «чистым» воздухом.

Показано, что разность температур в помещении 012/7 и во внешней среде не влияет на концентрацию радона внутри помещения. Однако ветер в окрестностях объекта «Укрытие», очевидно, сказывается на содержании радона. Так, наиболее высокие концентрации были зарегистрированы, когда средняя скорость ветра достигала 4 м/с, а максимальные порывы превышали 9 – 10 м/с.

Обнаружено, что на протяжении длительного периода (2 – 3 сут) динамика концентраций радона и торона может существенно различаться. Это показывает, что в подреакторных помещениях имеются несколько источников эманирования радиоактивных газов, в частности бетонных конструкций, содержащих разное количество и соотношение  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ , после радиоактивного распада которых образуются радон и торон.

Наличие радона и его ДПР является негативным фактором радиационной обстановки в объекте «Укрытие». Вследствие их вдыхания в помещении 012/7 облучение персонала может достигать около 10 % от предельной эффективной допустимой дозы.

Авторы благодарят А. А. Котлярова и А. А. Афонина из приборостроительной компании «НТМ-Защита» за любезно предоставленный прибор СРС-05 «Торон-1».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Postendörfer J.* Properties and behaviour of radon and their decay products in air // *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 // *Атомная техника за рубежом.* – 2001. – № 5. – С. 14 – 25.
3. *Залманзон Ю. Е., Фертман Д. Е.* Оценка возможности автоматизированного контроля загрязнения радиоактивными аэрозолями воздуха объекта «Укрытие» // *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., Будыка А. К.* Мониторинг радиоактивных аэрозолей в объекте «Укрытие» // *Атомная энергия.* – 2001. – Т. 91, вып. 6. – С. 471 – 474.
5. *Огородников Б. И., Хан В. Е., Пазухин Э. М., Краснов В. А.* Радон и его дочерние продукты в объекте «Укрытие» в 2000 – 2010 гг. // *Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля.* – 2011. – Вип. 16. – С. 130 – 136.
6. *Объект «Укрытие»: 1986 – 2011. На пути к преобразованию: монография / А. А. Ключников, В. А. Краснов, В. М. Рудько, В. Н. Щербин – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2011. – 288 с.*
7. *Объект «Укрытие»: 1986 – 2006 / А. А. Ключников, В. А. Краснов, В. М. Рудько, В. Н. Щербин – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2006. – 168 с.*
8. *Арутюнян Р. Э., Большов Л. А., Боровой А. А. и др.* Ядерное топливо в объекте «Укрытие». – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2011.
9. *Сейсмическая радоновая станция СРС-05. Руководство по эксплуатации.* – М.: Приборостроительная компания «НТМ-Защита», 2009. – 20 с.
10. *Афонин А. А., Котляров А. А., Максимов А. Ю.* Установка для изучения характеристик переноса  $^{218}\text{Po}$  в воздухе // *Приборы и техника эксперимента.* – 2010. – № 1. – С. 139 – 143.



11. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К., Краснов В. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2011 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2012. – Вип. 19. – С. 94 – 103.
12. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания. Изд. 4-е. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 287.
13. Цапалов А. А., Кувшинников С. И. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха // АНРИ. – 2008. - № 2 (53). – С. 37 – 43.
14. Цапалов А. А. Системное исследование динамики ЭРОА радона в помещениях и принципы контроля // АНРИ. – 2010. - № 2 (61). – С. 2 – 14.
15. Цапалов А. А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона // АНРИ. – 2011. - № 3 (66). – С. 52 – 64.
16. Жуковский М. В., Васильев А. В. Определение механизмов и параметров поступления радона в помещение // АНРИ. – 2012. - № 1 (68). – С. 5 – 14.
17. Васильев А. В., Жуковский М. В. Характер и периодичность изменения объемной активности радона в помещении // АНРИ. – 2015. - № 2 (81). – С. 42 – 47.
18. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К., Краснов В. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2009 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2010. – Вип. 13. – С. 111 – 122.
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. Гевирц В. Г., Дубасов Ю. В. Определение расхода воздуха в реакторном пространстве 4-го блока ЧАЭС по гелиевой метке с применением газовой хроматографии: (Отчет) / РИ им. В. Г. Хлопина. – Инв. № 1227-И. – Л., 1989.
21. Гевирц В. Г., Козлов А. Е., Дубасов Ю. В. Определение воздушных потоков в реакторном пространстве объекта «Укрытие»: (Отчет) / РИ им. В. Г. Хлопина. – Инв. № 1375-И. – Л., 1990. (Фонды ИПБ АЭС НАН Украины, арх. № 1500).
22. 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. – Вип. 17. – С. 98 – 105.
23. Огородников Б. И., Будыка А. К., Павлюченко Н. И. Выброс радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» при сильных ветрах // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2005. – Т. 45, № 2. – С. 234 – 242.
24. Огородников Б. И., Скорбун А. Д. О возможности прогнозирования уровня активности аэрозолей в вентиляционной системе объекта «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2006. – Вип. 4. – С. 121 – 124.
25. Огородников Б. И., Скорбун А. Д. Связь выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» с метеорологической ситуацией. Влияние скорости ветра / Там же. – 2007. – Вип. 7. – С. 103 – 109.
26. Огородников Б. И., Хан В. Е., Ковальчук В. П. Аэрозоли – свидетели разрушения лавообразных топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» / Там же. – 2013. – Вип. 20. – С. 94 – 106.
27. Nuccetelli C., Pontikes Y., Leonardi F., Trevisi R. New perspectives and issues arising from the introduction of (NORM) residues in building materials: A critical assessment on the radiological behavior // Construction and Building Materials. – 2015. –Vol. 82. - P. 323 – 331.
28. 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.
29. Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97/Д-2000. – К., 2000.
30. Николаев В. А. Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012, - 283 с.

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

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чернобыль, 07270, Україна

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

#### **РАДОН У ПІДРЕАКТОРНОМУ ПРИМІЩЕННІ 012/7 ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»**

За допомогою сейсмічної радонової станції СРС-05 у приміщенні 012/7 об'єкта «Укриття» виконано 12 сеансів спостережень тривалістю від 2 до 50 год. Установлено, що при середній концентрації радону 80 Бк/м<sup>3</sup> максимальні значення досягали 400 - 500 Бк/м<sup>3</sup>. Паралельні пробовідбори у системі «Байпас» показали, що в повітряному потоці, що викидається в атмосферу з об'єкта «Укриття», концентрація радону в 4 - 5 разів нижче, ніж у приміщенні 012/7. Виявлено, що протягом 2 – 3 діб динаміка концентрацій радону і торону може мати відчутні відмінності. У підреакторних приміщеннях є кілька джерел еманції радіоактивних газів, зокрема бетонні конструкції, що містять різну кількість і співвідношення <sup>226</sup>Ra і <sup>232</sup>Th. Різниця температури всередині приміщення 012/7 і в зовнішньому середовищі не впливає на концентрацію радону у приміщенні. Вміст радону залежить від вітру зовні об'єкта «Укриття». Найбільш високі концентрації були, коли середня швидкість вітру

досягала 4 м/с, а максимальні пориви перевищували 9 – 10 м/с. Унаслідок вдихання радону, торону та їхніх дочірніх продуктів опромінення персоналу у приміщенні 012/7 може становити до 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>**

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

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

### **RADON IN SUB-REACTOR ROOM 012/7 OF “UKRYTTYA” OBJECT’S**

Survey sessions were made with using seismic radon station SRS-05 in «Ukryttya» object room 012/7, which lasted from 2 to 50 hours. It was stated that under average radon concentration being 80 Bq/m<sup>3</sup>, maximum values reached 400 – 500 Bq/m<sup>3</sup>. Parallel samplings in “Bypass” system have demonstrated that radon concentration in airflow being released into free atmosphere from «Ukryttya» object is in 4 – 5 fold lower than that in the room 012/7. It was established that during 2 – 3 days the dynamics of radon and thoron concentrations can essentially differ. Therefore, there are several sources in sub-reactor rooms for emanating radioactive gases, in particular, concrete structures containing diverse amount and ratio of <sup>226</sup>Ra and <sup>232</sup>Th. Temperature difference inside the room 012/7 and in outer environment does not influence radon concentration in this room. Radon content depends on wind within the «Ukryttya» object environs. The highest concentrations were registered when average wind velocity reached 4 m/s, and maximum gusts exceeded 9 – 10 m/s. As result of inhalation of radon, thoron and their daughter products, personnel exposure in room 012/7 can make up to 10 % of effective dose limit.

*Keywords:* «Ukryttya», object, radon, daughter products of radon, radiation dose.

### **REFERENCES**

1. *Postendörfer J.* Properties and behaviour of radon and their decay products in air // *J. Aerosol Sci.* – 1994. – Vol. 25. – P. 263.
2. *Ogorodnikov B. I.* Properties, behavior and monitoring of radon and thoron and their daughter's products in air // *Atomnaya tekhnika za rubezhom.* – 2001. – № 5. – P. 14 – 25. (Rus)
3. *Zalmanzon Yu. E., Fertman D. E.* An estimation of automated control of object "Ukryttya" air radioactive aerosol contamination // *Chernobyl-88. Rep. I Vsesoyuz. nauch.-techn. soveshch. on Chernobyl NPP accident consequences elimination.* – Chernobyl, 1989. – Vol. 7, part 1. – P. 471 – 475. (Rus)
4. *Ogorodnikov B. I., Budyka A. K.* Radioactive aerosols monitoring in "Ukryttya" object // *Atomnaya energiya.* – 2001. – Vol. 91. - Iss. 6. – P. 471 – 474. (Rus)
5. *Ogorodnikov B. I., Khan V. E., Pazukhin E. M., Krasnov V. A.* Radon and his daughter's products in an "Ukryttya" object in 2000 - 2010 // *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chernobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chernobyl).* – 2011. – Iss. 16. – P. 130 – 136. (Rus)
6. *"Ukryttya" object: 1986 – 2011. On a way to transformation: monograph / A. A. Klyuchnikov, V. A. Krasnov, V. M. Rudko, V. N. Shcherbin.* – Chernobyl: In-t for safety problems of NPP NAS Ukraine, 2011. – 288 p. (Rus)
7. *"Ukryttya" object: 1986 – 2011. On a way to transformation: monograph / A. A. Klyuchnikov, V. A. Krasnov, V. M. Rudko, V. N. Shcherbin* – Chernobyl: In-t for safety problems of NPP NAS Ukraine, 2006. – 168 p. (Rus)
8. *Arutyunyan R. E., Bolshov L. A., Borovoi A. A. et. al.* Nuclear fuel at "Ukryttya" object. – Moskva: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2011. (Rus)
9. *Seismic radon station CPC-05. The exploitation guide.* – Moskva: The device-constructing company «NTM-Zashchita», 2009. – 20 p. (Rus)
10. *Aphonin A. A., Kotlyarov A. A., Maximov A. Yu.* <sup>218</sup>Po air transfer study device // *Pribory i tekhnika experimenta.* – 2010. – № 1. – P. 139 – 143. (Rus)
11. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* "Ukryttya" object radioactive aerosols exhaustion control in 2011 // *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chernobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chernobyl).* – 2012. – Iss. 19. – P. 94 – 103. (Rus)
12. *Fokin K. F.* Constructing heat-engineering of fencing parts for building. Iss. 4. – Moskva: Stroyizdat, 1973. – 287 p. (Rus)
13. *Zapalov A. A., Kuvshinnikov S. I.* Dependence of radon activity in apartments from an internal and external air temperatures difference // *ANRI.* – 2008. - № 2 (53). – P. 37 – 43. (Rus)
14. *Zapalov A. A.* System research of radon EROA dynamics in apartments and control principles // *ANRI.* – 2010. - № 2 (61). – P. 2 – 14. (Rus)
15. *Zapalov A. A.* Long duration researches results for behavior of radon OA and EROA in Moscow region buildings // *ANRI.* – 2011. - № 3 (66). – P. 52 – 64. (Rus)
16. *Zhukovskiy M. V., Vasiliev A. V.* Determination of mechanisms and parameters for radon entering in an apartment // *ANRI.* – 2012. - № 1 (68). – P. 5 – 14. (Rus)

17. *Vasiliev A. V., Zhukovskiy M. V.* Character and periodicity of radon volume activity changing in an apartment // ANRI. – 2015. - № 2 (81). – P. 42 – 47. (Rus)
18. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* "Ukryttya" object radioactive aerosols exhaustion control in 2009 // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2010. – Iss. 13. – P. 111 – 122. (Rus)
19. *Ogorodnikov B. I., Pazukhin E. M., Klyuchnikov A. A.* "Ukryttya" object radioactive aerosols: 1986 – 2006: monography. – Chernobyl, In-t for safety problems of NPP NAS Ukraine. – 2008. – 456 p. (Rus)
20. *Gevirz V. G., Dubasov Yu. V.* ChNPP 4-th block reactor space air expense determination on a helium mark with the gas chromatography applying: (Report) / RI im. V. G. Khlopina. – Inv. № 1227-I. – Leningrad, 1989. (Rus)
21. *Gevirz V. G., Kozlov A. E., Dubasov Yu. V.* ChNPP 4-th block reactor space air expense determination: (Report) / RI im. V. G. Khlopina. – Inv. № 1375-I. – Leningrad, 1990. (ISP NPP NAS Ukraine Fonds, arch. № 1500). (Rus)
22. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* "Ukryttya" object radioactive aerosols exhaustion control in 2010 // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2011. – Iss. 17. – P. 98 – 105. (Rus)
23. *Ogorodnikov B. I., Budyka A. K., Pavlyuchenko N. I.* "Ukryttya" object radioactive aerosols exhaustion at strong winds // Radiazionnaya biologiya. Radioecologiya. – 2005. – Vol. 45, № 2. – P. 234 – 242. (Rus)
24. *Ogorodnikov B. I., Skorbun A. D.* About possibility of aerosols activity level prognostication in "Ukryttya" object vent system // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2006. – Iss. 4. – P. 121 – 124. (Rus)
25. *Ogorodnikov B. I., Skorbun A. D.* "Ukryttya" object radioactive aerosols exhaustion connection with a meteorological situation. Wind speed influence // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2007. – Iss. 7. – P. 103 – 109. (Rus)
26. *Ogorodnikov B. I., Khan V. E., Kovalchuk V. P.* Aerosols are witnesses of lavalike fuel-containing materials destruction at "Ukryttya" object // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2013. – Iss. 20. – P. 94 – 106. (Rus)
27. *Nucetelli C., Pontikes Y., Leonardi F., Trevisi R.* New perspectives and issues arising from the introduction of (NORM) residues in building materials: A critical assessment on the radiological behavior // Construction and Building Materials. – 2015. - Vol. 82. - P. 323 – 331.
28. *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.
29. *Ukraine' radiation safety standarts* NRBUS-97/D-2000. – Kyiv, 2000. (Rus)
30. *Solidmass track detectors at radiation investigations.* – St.-Petersburg: Politechn. un-ty Publishing, 2012. – 283 p. (Rus)

Надійшла 16.02.2017  
Received 16.02.2017