

**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, строение 6, Москва, 105064, Россия*

### **ОБЪЕМНАЯ АКТИВНОСТЬ РАДОНА И ЕЕ ИЗМЕНЧИВОСТЬ В ДЕАЭРАТОРНОЙ ЭТАЖЕРКЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»**

Представлены результаты исследования объемной активности радона в помещениях Г564/1, Г365 и Г328/2 деаэрационной этажерки объекта "Укрытие" с помощью сейсмической радоновой станции СРС-05 "Торон-1". Его наибольшее среднее содержание 100 Бк/м<sup>3</sup> обнаружено в помещении Г564/1. При этом максимальные разовые концентрации достигали 300 Бк/м<sup>3</sup>. Одновременные измерения объемной активности радона и разности температур воздуха внутри помещения и снаружи показали, что наибольшие содержания радона соответствовали минимальным различиям температур. В помещениях Г365 и Г328/2 средние концентрации составляли соответственно 60 и 40 Бк/м<sup>3</sup> и практически не зависели от разности температур. В обследованных помещениях дополнительное облучение персонала вследствие вдыхания радона и его дочерних продуктов может составлять около 10 % от предельной эффективной допустимой 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: <sup>219</sup>Rn – актинон (период полураспада 3,96 с), <sup>220</sup>Rn – торон (55,6 с) и <sup>222</sup>Rn – собственно радон (3,82 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 вследствие высокой подвижности соединяются в воздухе с молекулами газов и парами воды. Далее эти кластеры оседают на атмосферных ядрах конденсации с образованием устойчивых аэрозольных систем с размерами частиц 0,1 – 0,3 мкм [1, 2]. Радон и короткоживущие ДПР влияют на радиационную обстановку в объекте «Укрытие» и детектирование аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии.

#### **Обнаружение радона и его дочерних продуктов 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]. По их данным объемная активность естественных радиоактивных аэрозолей в контролируемых помещениях составила в среднем 150 Бк/м<sup>3</sup>. Это приводило к тому, что при отборе проб аэрозолей внутри объекта «Укрытие» и определении суммы бета-излучающих нуклидов ( $\Sigma\beta$ )-продуктов Чернобыльской аварии фильтры приходилось выдерживать около 6 ч, чтобы примерно в 1000 раз уменьшилось содержание ДПР и около 4 сут, чтобы во столько же раз изменилось количество дочерних продуктов торона.

В подреакторных помещениях объекта «Укрытие» наблюдения за ДПР были впервые проведены в 2000 г. [4]. С 28 ноября на протяжении месяца в помещении 207/5 были отобраны 20 проб. Из них следовало, что концентрации радона превышали 100 Бк/м<sup>3</sup>. При этом временная динамика изменения содержания ДПР и аэрозольных продуктов аварии не совпадала.

Наблюдения были продолжены через два года [5]. В третьей декаде мая 2003 г. концентрации радона оказались примерно такими же, как в декабре 2000 г. Но уже 4 – 5 июня они снизились в 2 – 4 раза. Это было следствием понижения температуры в атмосфере и усилением тяги воздуха в вентиляционной трубе ВТ-2. Стало ясно, что концентрации радона зависят от многих факторов, среди которых существенными являются метеорологические условия.

В 2006 – 2010 гг. была выполнена программа из 8 циклов интегрального измерения радона в помещениях объекта «Укрытие» и локальной зоне с помощью трековых детекторов [5]. Приборы размещали на высотных отметках от 0 до +65 м в 12 помещениях бывшего реакторного отделения и деаэрационной этажерки. В каждом цикле их экспонировали 6 мес. Установлено, что в ряде помещений среднегодовая концентрация радона достигала 150 – 200 Бк/м<sup>3</sup>.

Представленные в [4, 5] результаты показали, что наличие радона и ДПР в объекте «Укрытие» является наряду с внешним облучением от остатков топлива и внутренним от вдыхания аэрозолей-

© Б. И. Огородников, В. Е. Хан, 2016

продуктов аварии серьезной опасностью для работающего персонала. Поскольку наибольшее количество персонала как в дневную, так и ночную смены находится в различных помещениях деаэрационной этажерки, то в 2010 г. было решено сосредоточить внимание на выявлении концентраций радона и влияющих на них факторов в нескольких знаковых помещениях: Г328/2, Г365 и Г564/1.

#### Описание деаэрационной этажерки и помещений Г328, Г365 и Г564/1

Деаэрационная этажерка (ДЭ) II очереди ЧАЭС (3-й и 4-й блоки) расположена в осях 1 – 68, рядах Б – В<sup>1</sup>. По оси 1 граничит с ДЭ второго блока, по ряду Б с машинным залом, по ряду В<sup>1</sup> примыкает реакторное отделение. Несущие конструкции ДЭ выполнены из монолитного или сборного железобетона. Перекрытия по этажам выполнены железобетонными или керамзитобетонными. В ДЭ находятся деаэрационные колонки для дополнительного подогрева и удаления из основного конденсата растворенных газов. В результате аварии в ДЭ произошли значительные разрушения. Каркас в осях 40 – 50 выше отметки +30,00 м получил большие деформации. Два верхних этажа ДЭ (выше +38,00 м) в осях 49 – 50 были разрушены полностью. В ДЭ разделительная стена между 3-м и 4-м энергоблоками была выполнена по оси 41 между рядами Б - В.

Помещение Г328 расположено на высотной отметке +10 между строительными осями 65 и 66 практически в самой западной части ДЭ. Его размер в плане 6 × 6 м и высота 6 м. Оно имеет единственную дверь из холла Г350. Окон нет. Принудительная вентиляция отсутствует. В помещении располагается дежурная смена из 3 – 5 человек цеха радиационной безопасности. В дневное время в холле Г350 практически непрерывно находится персонал, оформляющий допуски к работам в объекте «Укрытие». Часто в помещение Г328 входят руководители бригад для оформления документов, а представители руководящих и контролирующих органов ЧАЭС – для получения дозиметров.

Помещение Г365 относится к 3-му блоку ЧАЭС и расположено также на отметке +10 м между осями 35 и 37. Размер помещения в плане 8 × 12 м и высота 6 м. Вход через единственную дверь из коридора Г324. Окон нет. Это помещение, как и все остальные на 3-м блоке, имеет принудительную вентиляцию. В помещении размещается щит радиационной безопасности. В связи с этим тут располагается дежурная смена из 3 – 4 человек цеха радиационной безопасности. Здесь происходит допуск персонала к работам и выдача дозиметров. Все операции производят через небольшое окошко-форточку, поэтому персонал из коридора в помещение не заходит.

Помещение Г564/1 находится на высотной отметке +19,5 между строительными осями 62,5 и 65 в западной части ДЭ. С юга к нему примыкает трубопроводный коридор Г553/2, а с севера – коммуникационный коридор Г526/2. Окон нет. Принудительная вентиляция отсутствует. Размер в плане 5 × 12,5 м, высота 5 м. Помещение разделено перегородками на две примерно равные части (западную и восточную) с небольшим тамбуром посередине, в котором находится дверь в коридор Г526/2. Помещение принадлежит цеху радиационной безопасности ЧАЭС. Здесь имеются несколько столов и химических шкафов для подготовки к отбору проб аэрозолей и воды в помещениях объекта «Укрытие» и его локальной зоне. Чаше других здесь бывают специалисты Института проблем безопасности АЭС НАН Украины, которые выполняют такие работы по техническим заданиям ЧАЭС.

#### Средства и методы исследования

В качестве монитора использовалась автоматическая сейсмическая радоновая станция СРС-05 «Торон-1» [6], разработанная и любезно предоставленная приборостроительной компанией «НТМ-Защита» (Москва). Для измерения объемной активности радона и торона в ней реализован метод электроосаждения [7]. При измерении объемной активности радона в диапазоне 20 – 20000 Бл/м<sup>3</sup> прибор имеет погрешность не более 5 %. Станция выполнена в виде автономного блока, размещенного в герметичном цилиндрическом корпусе диаметром 98 мм и длиной 800 мм (рис. 1). В корпусе расположена измерительная камера объемом 0,25 л с полупроводниковым детектором. Воздух в нее засасывается воздушодувкой через очистной аэрозольный фильтр АФА РМП-20. В корпусе находится плата питания и плата управления на базе микропроцессора, а также



Рис. 1. Сейсмическая радоновая станция СРС-05 «Торон-1».

климатический блок, в котором фиксируется температура воздуха, его относительная влажность и давление. Электропитание - от аккумулятора 17 В. Станция работает автоматически: накапливает, обрабатывает и сохраняет измеренные альфа-спектры проб. Их отбор и измерение выполняли в режиме «Радон», повторяя циклы через 24 мин. Продолжительность сеансов колебалась от нескольких часов до нескольких суток.

При выполнении исследований станцию размещали на высоте около 1 м от пола и на удалении 1 – 2 м от стен. В это время в помещениях Г328 и Г365 персонал работал в обычном режиме. Никаких ограничений на положение дверей (открыто-закрыто) и вентилирование не вводили. Для исследований в помещении Г564/1 выбирали периоды, когда там работы не проводились и персонал отсутствовал. Станцию СРС-05 всегда размещали в западной части помещения и все пробы маркировали как Г564/1. Двери в восточную часть помещения и в коридор Г526/2 были закрыты.

Температуру, относительную влажность воздуха и его давление в местах пробоотбора фиксировали с помощью блока климатконтроля станции СРС-05. Это происходило в каждом цикле, т.е. через 24 мин. Метеопараметры во внешней среде контролировали по показаниям (обновление через 5 мин) автоматического метеопункта, находившегося в 0,5 км южнее объекта «Укрытие», и метеостанции «Чернобыль», расположенной в 18 км на юго-восток от ЧАЭС, где замеры производят каждые 3 ч.

## Результаты и обсуждение

### Состояние воздушной среды вблизи объекта «Укрытие»

Температура воздуха на метеостанции «Чернобыль» в дни исследований с марта по октябрь 2010 г. представлена на рис. 2. Наиболее низкая  $-3,7^{\circ}\text{C}$  наблюдалась в 6 ч утра 23 марта. Еще отрицательные температуры зарегистрированы в ночное время 5, 6, 12 и 14 октября. Трижды в мае и четыре раза в сентябре дневные температуры превышали  $20^{\circ}\text{C}$ . Наиболее высокая температура (почти  $25^{\circ}\text{C}$ ) отмечена в 15 ч 14 сентября.

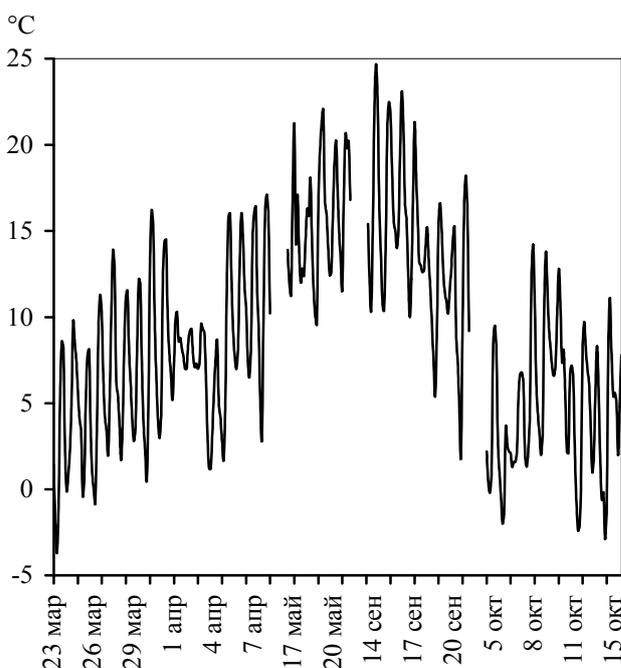


Рис. 2. Температура воздуха в Чернобыле 23 марта – 8 апреля, 17 – 21 мая, 14 – 21 сентября и 5 – 15 октября 2010 г.

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. Лишь 24 и 31 марта, 1 апреля, 17 мая и 12 октября в дневные часы скорость ветра увеличивалась до 3 – 4 м/с, а его максимальные порывы достигали 9 – 12 м/с.

### Концентрация радона в помещении Г564/1

Концентрация радона в помещении Г564/1 в марте – октябре 2010 г. представлена на рис. 3. Как видно на рисунке, содержание радона сильно варьировало от 10 до 250 – 300 Бк/м<sup>3</sup>. Причем колебания от малых до больших значений иногда происходили за 2 - 4 цикла пробоотбора, т. е. в течение 1 – 2 ч. Однако большинство

результатов попадало в диапазон 50 – 170 Бк/м<sup>3</sup>. В связи с тем, что при пробоотборах никаких работ в помещении не производили и его никто не посещал, подобные колебания концентраций связаны не с изменением воздухообмена в помещении из-за передвижения персонала или открывания дверей, а с чувствительностью станции. Содержания радона менее 10 Бк/м<sup>3</sup>, зафиксированные 11 – 13 октября, очевидно, являются как следствием отрицательных температур воздуха во внешней среде (см. рис. 2), так и больших ошибок при измерении низких концентраций.

### Концентрация радона в помещении Г328/2

Объемная активность радона в помещении Г328/2 при исследованиях в марте – сентябре 2010 г. представлена на рис. 4. Как видно, содержание радона сильно варьировало от 0 до 130 Бк/м<sup>3</sup>.

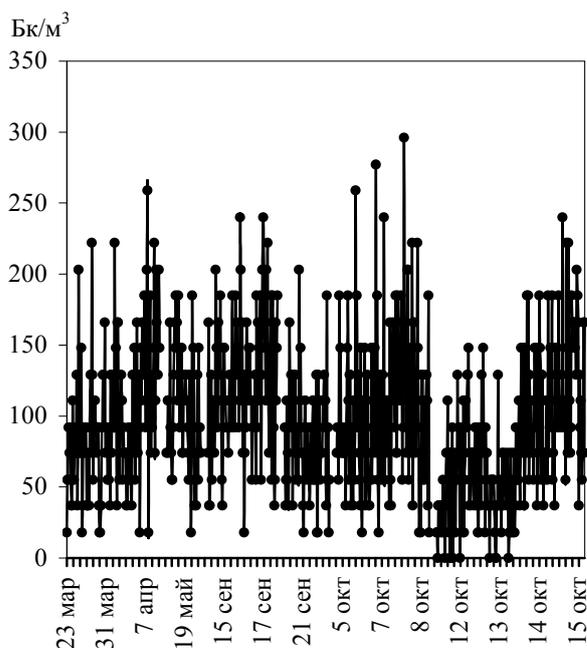


Рис. 3. Концентрация радона в помещении Г564/1 23 - 24 марта, 31 марта - 1 апреля, 6 - 7 апреля, 19 - 20 мая, 15 - 17 и 20 - 21 сентября, 6 - 8 и 11 - 15 октября 2010 г.

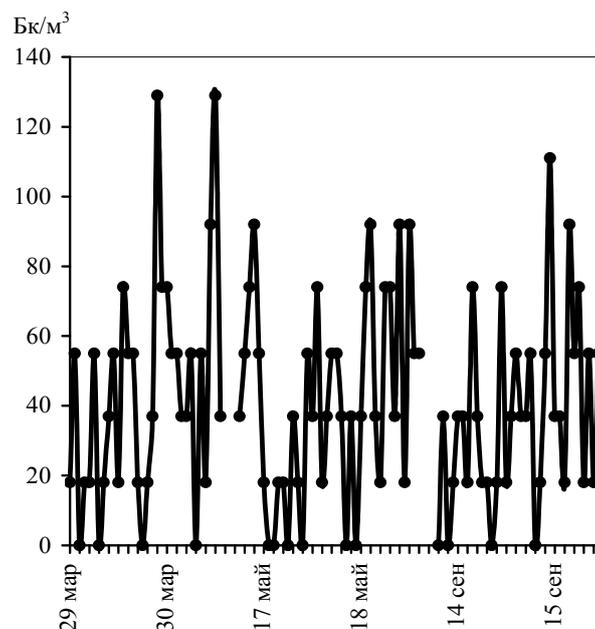


Рис. 4. Концентрация радона в помещении Г328/2 29 - 30 марта, 17 - 18 мая и 14, 15 сентября 2010 г.

Причем изменение от малых до больших значений происходило, как и в помещении Г564/1, за 2 - 4 цикла пробоотбора, т.е. в течение 1 - 2 ч. Однако большинство результатов измерений попадало в диапазон 20 - 60 Бк/м<sup>3</sup>.

Наиболее высокие концентрации радона были зарегистрированы в ночное время: 130 Бк/м<sup>3</sup> - 30 марта в 03 ч 12 мин и 08 ч 24 мин, 90 Бк/м<sup>3</sup> - 18 мая в 04 ч, 06 ч 24 мин и 07 ч 12 мин, а также 110 Бк/м<sup>3</sup> - 15 сентября в 04 ч и 90 Бк/м<sup>3</sup> в ту же ночь в 05 ч 36 мин. Очевидно, это связано с уменьшением воздухообмена в помещении вследствие прекращения работ в ночное время бригадами подрядчиков и минимальным передвижением оперативного персонала объекта «Укрытие». Возможно, некоторое снижение концентрации радона 17 мая произошло из-за сильного ветра, средняя скорость которого в 15 ч достигала 5 м/с и в 18 ч - 3 м/с. При этом максимальные порывы ветра составляли 12 - 13 м/с. В другие дни, как марта, так и сентября, средняя скорость не превышала 2 м/с. Как видно из рис. 2, минимальная температура воздуха 0,5 °С наблюдалась в 6 ч утра 30 марта, 17 и 18 мая она держалась на уровне 12 - 17 °С, а 14 - 15 сентября - в диапазоне 11 - 23 °С.

#### Концентрация радона в помещении Г365

Объемная активность радона в помещении Г365, где размещен щит радиационной безопасности 3-го энергоблока ЧАЭС, была измерена 20 - 21 мая 2010 г. Как видно на рис. 5, содержание радона варьировало от 0 до 150 Бк/м<sup>3</sup>. Причем изменения от малых до больших значений происходили, как в помещениях Г564/1, так и Г328/2, за 2 - 4 цикла пробоотбора, т.е. в течение 1 - 2 ч. В 60 проведенных циклах измерений концентрации более 100 Бк/м<sup>3</sup> были зарегистрированы в 7 случаях, а менее 10 Бк/м<sup>3</sup> - лишь в четырех. Большинство результатов попадало в диапазон 20 - 90 Бк/м<sup>3</sup>. В дни отбора проб сильных ветров не наблюдалось. Температура воздуха была умеренная: в дневные часы поднималась до 20 °С, ночью опускалась до 12 °С (см. рис. 2).

Необходимо подчеркнуть, что помещение Г365 находится на 3-м энергоблоке, где осуществляется принудительное вентилирование воздуха. Напомним, что при строительстве объекта «Укрытие» между 4-м и 3-м блоками была возведена разделительная стена, которая в значительной мере предотвращает поступление воздуха из 4-го блока. Поскольку метеоусловия 20 - 21 мая были умеренные, то концентрации радона на уровне 50 - 60 Бк/м<sup>3</sup> можно считать присущими помещению Г365.

#### Связь концентрации радона в помещениях Г564/1, Г328/2 и Г365 с температурой воздуха

В периоды отбора проб в помещении Г564/1 единственная дверь, ведущая в коридор Г526/2, была закрыта, персонал отсутствовал и никакие приборы и аппараты не работали. Измерения с по-

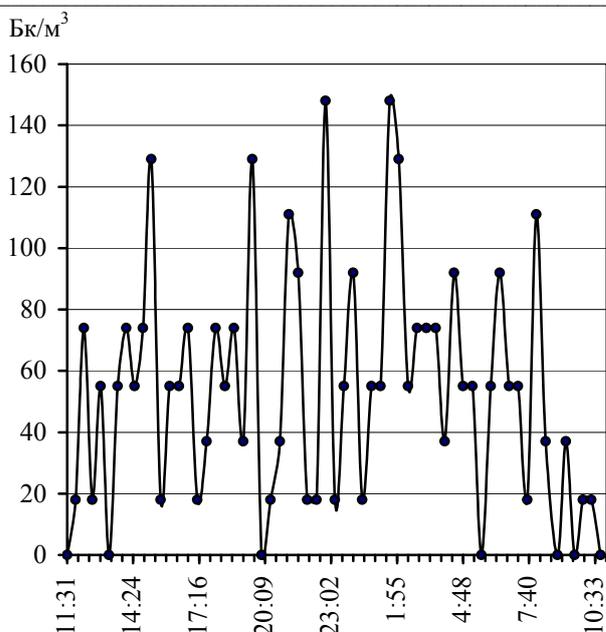


Рис. 5. Концентрация радона в помещении Г365 20 - 21 мая 2010 г.

ных наблюдений с лета 2006 г. до осени 2007 г., проведенных в Подмоскowie в здании с естественной вентиляцией [9], следовало, что наиболее низкие концентрации радона пришлись на зимний период. Диаграмма рассеяния одновременно измеренных значений объемной активности радона и разности температур воздуха внутри и снаружи показала, что наименьшие содержания радона соответствовали максимальным различиям температур. При этом в причердачном помещении при равенстве температур ( $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ ) концентрации были примерно втрое выше, чем при  $\Delta T$  около  $35^\circ\text{C}$ .

Результаты обработки измерений в помещении Г564/1 представлены на рис. 6. Как и в работе [9], разброс концентраций радона в зависимости от разности температур оказался высокий. Однако общая тенденция оказалась одинаковая: по мере выравнивания внутренней и наружной температур концентрации увеличивались. Представленные результаты были аппроксимированы линейным уравнением  $y = -1,44x + 111$ , где  $y$  – объемная активность радона ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) и  $x$  – разность температур ( $\Delta T = T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}$ ). Из рис. 6 следует, что при  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$  концентрация примерно в 1,5 раза выше, чем при  $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ . Отличие в динамике концентрации радона в зависимости от  $\Delta T$ , обнаруженное в публикации [9] и в помещении 564/1, очевидно, связано с тем, что чердачное помещение в работе [9] непосредственно через крышу контактировало с внешней средой, а помещение 564/1 расположено внутри ДЭ и со всех сторон окружено аналогичными по инфраструктуре и строительным материалам помещениями.

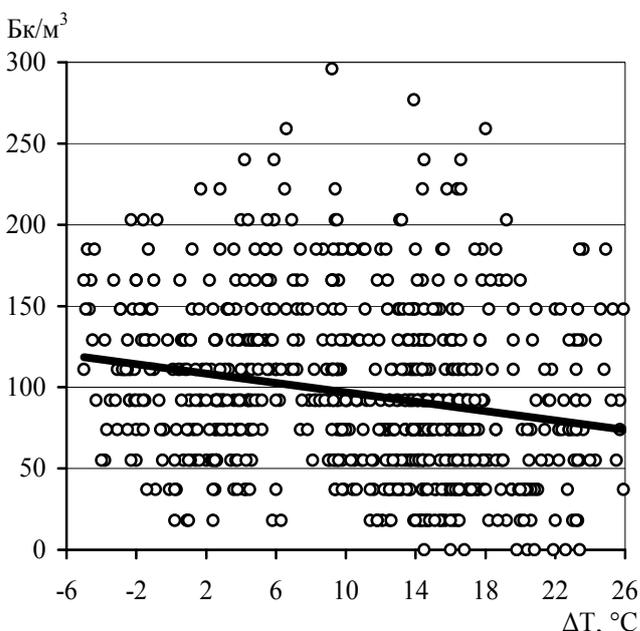


Рис. 6. Диаграмма рассеяния одновременно измеренных объемной активности радона в помещении Г564/1 и разности температур воздуха внутри него и снаружи 23 - 24 марта, 31 марта - 1 апреля, 6 - 7 апреля, 19 - 20 мая, 15 - 17 и 20 - 21 сентября, 6 - 8 и 11 - 15 октября 2010 г.

мощью блока климатконтроля СРС-05 показали, что температура в помещении в течение суток не только не изменялась, но и на протяжении всего периода исследования оставалась достаточно стабильной. Так, минимальная температура  $14^\circ\text{C}$  была зарегистрирована 6 – 7 апреля после выключения отопления в ДЭ, а максимальная  $22^\circ\text{C}$  – в середине октября, когда вновь начался отопительный сезон. Более значительные колебания температуры воздуха наблюдались во внешней среде. Как следует из рис. 2, суточные перепады регулярно составляли около  $10^\circ\text{C}$ , а иногда достигали  $15^\circ\text{C}$ .

Из теплотехники известно, что тяга воздуха в отопительных системах и зданиях зависит от разности внутренней ( $T_{\text{вн}}$ ) и наружной ( $T_{\text{нар}}$ ) температур [8]. Это сказывается на воздухообмене и, следовательно, на содержании радона внутри жилых помещений [9 - 13], в карстовых полостях (пещерах) [14, 15], а также промышленных сооружениях, в частности в объекте «Укрытие» [16, 17]. Так, из непрерыв-

Из рис. 6 следует, что средняя объемная активность радона в помещении 564/1 составляла около  $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$ .

Результаты измерений концентраций радона в помещении Г365 в зависимости от разности температур воздуха внутри него и снаружи ДЭ представлены на рис. 7. Как и в помещении Г564/1, разброс результатов оказался высоким. Полученные данные были аппрокси-

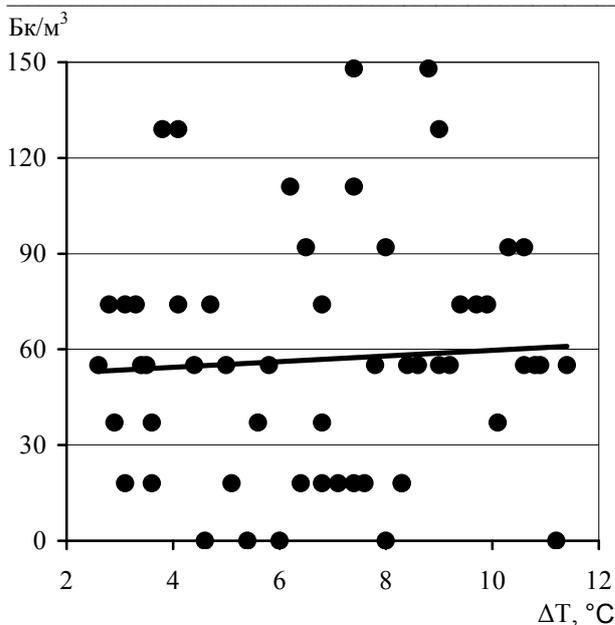


Рис. 7. Диаграмма рассеяния одновременно измеренных объемной активности радона в помещении Г365 (щит РБ 3-го блока ЧАЭС) и разности температур воздуха внутри него и снаружи 20 - 21 мая 2010 г.

ваны линейным уравнением  $y = 0,62x + 34$ . Из этого следует, что хотя принудительное вентилирование отсутствует, здесь проявилась такая же тенденция, как в помещении Г365: по мере выравнивания температур концентрации радона уменьшались. Однако, судя по численному коэффициенту при  $x$ , эта динамика оказалась еще слабее, чем в помещении Г365. Можно говорить о практическом отсутствии зависимости концентрации радона от разности температур. Даже при отсутствии принудительной вентиляции частое открывание - закрывание двери, ведущей в холл Г350, интенсивное движение персонала, направляющегося через этот холл на лестницу или на 3-й блок ЧАЭС, приводят к интенсивному воздухообмену, и содержание радона непрерывно варьирует. Однако в целом концентрация остается в квазистационарном состоянии. Хотя в марте, мае и сентябре в помещении Г328 за три серии было сделано около 110 измерений, нельзя уверенно интерпретировать динамику радона. Тем не менее, в соответствии с рис. 8 можно принять, что средняя объемная активность радона составляет около 40 Бк/м<sup>3</sup>. Причем, как следует из рис. 4, эта средняя концентрация наблюдалась как в марте, так в мае и сентябре.

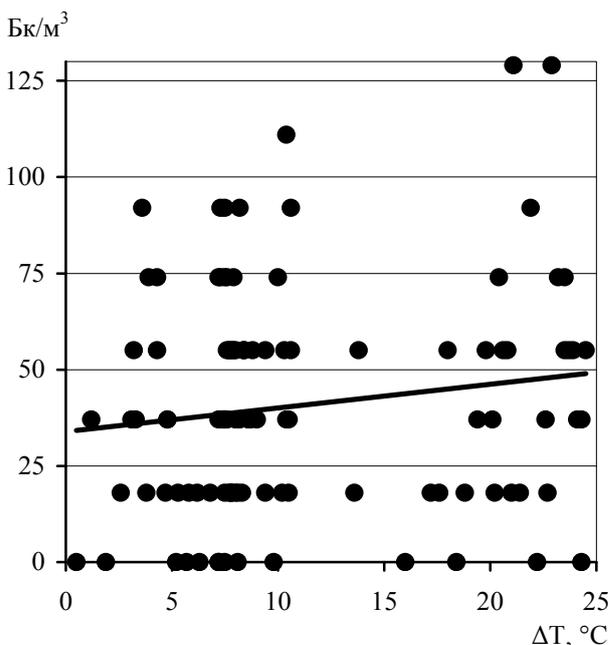


Рис. 8. Диаграмма рассеяния объемной активности радона в помещении Г328/2 и разности температур воздуха внутри него и снаружи 29 - 30 марта, 17 - 18 мая и 14 - 15 сентября 2010 г.

мированы линейным уравнением  $y = 0,89x + 51$ . Из этого следует, что здесь оказалась иная тенденция, чем в помещении Г564/1: по мере выравнивания температур концентрации радона уменьшались. Однако эта динамика очень «вялая». Скорее можно говорить об отсутствии зависимости концентрации радона от разности температур. Вероятнее всего, в этом помещении, имеющем принудительную вентиляцию, содержание радона остается неизменным, а если варьирует, то в значительной мере вследствие смены режимов проветривания. К сожалению, одна суточная серия наблюдений, во время которой было сделано около 60 измерений, не позволяет уверенно интерпретировать полученные данные. Тем не менее, согласно рис. 7, можно принять, что средняя объемная активность радона составляет около 60 Бк/м<sup>3</sup>.

Результаты измерений концентраций радона в помещении Г328/2 в зависимости от разности температур воздуха внутри него и снаружи ДЭ представлены на рис. 8. Как и в помещениях Г564/1 и Г365, разброс результатов оказался высоким. Полученные данные были аппроксимиро-

ваны линейным уравнением  $y = 0,62x + 34$ . Из этого следует, что хотя принудительное вентилирование отсутствует, здесь проявилась такая же тенденция, как в помещении Г365: по мере выравнивания температур концентрации радона уменьшались. Однако, судя по численному коэффициенту при  $x$ , эта динамика оказалась еще слабее, чем в помещении Г365. Можно говорить о практическом отсутствии зависимости концентрации радона от разности температур. Даже при отсутствии принудительной вентиляции частое открывание - закрывание двери, ведущей в холл Г350, интенсивное движение персонала, направляющегося через этот холл на лестницу или на 3-й блок ЧАЭС, приводят к интенсивному воздухообмену, и содержание радона непрерывно варьирует. Однако в целом концентрация остается в квазистационарном состоянии. Хотя в марте, мае и сентябре в помещении Г328 за три серии было сделано около 110 измерений, нельзя уверенно интерпретировать динамику радона. Тем не менее, в соответствии с рис. 8 можно принять, что средняя объемная активность радона составляет около 40 Бк/м<sup>3</sup>. Причем, как следует из рис. 4, эта средняя концентрация наблюдалась как в марте, так в мае и сентябре.

Как упоминалось выше, 17 мая на метеостанции «Чернобыль» с 17 до 22 ч были зарегистрированы высокие скорости ветра. При этом максимальные порывы достигали 12 - 13 м/с. Однако это не отразилось на содержании радона в помещении Г328/2. Когда результаты измерений 12 проб радона, отобранных в этот период, были исключены, то характер рассеяния на рис. 8 практически не изменился, и оставшиеся показания были аппроксимированы уравнением  $y = 0,62x + 34$ .

#### Ингаляционные дозы при вдыхании радона и ДПР

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [18] расчет мощности ингаляционных доз ( $D$ , мкЗв/ч) от радона, торона и ДПР проводят

по уравнению

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

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

На основании данных, представленных на рис. 6 - 8, были рассчитаны дозы ингаляционного облучения, которые могли получить специалисты оперативного персонала, например из цеха радиационной безопасности, находящиеся в помещениях Г564/1, Г365 и Г328/2 в течение 1800 ч, т.е. календарного рабочего года. Как в публикации [19], было принято, что в непрветриваемых помещениях  $F_{Rn}$  и  $F_{Tn}$  равны 1,0 и средняя концентрация торона  $C_{Tn} = 10$  Бк/м<sup>3</sup> (таблица).

**Ингаляционные дозы от радона и ДПР в помещениях ДЭ**

Помещение	$C_{Rn}$ , Бк/м <sup>3</sup>	$C_{Tn}$ , Бк/м <sup>3</sup>	Доза, мЗв/год
Г564/1	100	10	2,4
Г365	60	10	1,7
Г328/2	40	10	1,4

Как следует из табл. 1, в обследованных помещениях ДЭ облучение вследствие вдыхания радона и ДПР может составлять около 10 % от предельной эффективной допустимой дозы [20]. Следует заметить, что хотя наличие радона и ДПР в значительных количествах в объекте «Укрытие» замечено давно, однако систематические наблюдения за их содержанием и динамикой не проводятся, а ингаляционные дозы не контролируются и не учитываются.

### Заклучение

Наблюдения с помощью автоматической непрерывно действующей сейсмической радоновой станции СРС-05 «Торон-1» показали, что в помещениях ДЭ объекта «Укрытие» систематически присутствует радон. Так, наблюдения в помещении Г564/1 показали, что его средняя концентрация составляет 100 Бк/м<sup>3</sup>, а при отдельных измерениях достигает 300 Бк/м<sup>3</sup>. Одновременные измерения объемной активности радона и разности температур воздуха внутри помещения и снаружи показала, что наибольшие содержания радона соответствовали минимальным различиям температур. Таким образом, максимальные концентрации радона должны наблюдаться в летний период. После окончания сооружения «Арки» радиационная обстановка по радону может ухудшиться, поскольку произойдет выравнивание температур во внутренних помещениях объекта «Укрытие» и в подарочном пространстве.

Наличие радона и ДПР является негативным фактором радиационной обстановки в объекте «Укрытие». В обследованных помещениях ДЭ облучение персонала вследствие вдыхания радона и ДПР может составлять около 10 % от предельной эффективной допустимой дозы. Для выявления наиболее неблагоприятных по содержанию радона помещений и получения усредненных данных за месячный или кварталный периоды целесообразно проводить радоновые съемки с помощью твердотельных трековых детекторов [19, 21].

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. Сейсмическая радоновая станция СРС-05. Руководство по эксплуатации. – М.: Приборостроительная компания «НТМ-«Защита». 2009. – 20 с.
7. Афонин А. А., Котляров А. А., Максимов А. Ю. Методы и средства контроля объемной активности изотопов радона в различных средах на основе камер с электроосаждением // АНРИ. – 2008. - № 2 (53). – С. 82 – 86.
8. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания. Изд. 4-е. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 287.
9. 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.
10. Цапалов А. А. Системное исследование динамики ЭРОА радона в помещениях и принципы контроля // АНРИ. – 2010. - № 2 (61). – С. 2 – 14.
11. Цапалов А. А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона // АНРИ. – 2011. - № 3 (66). – С. 52 – 64.
12. Жуковский М. В., Васильев А. В. Определение механизмов и параметров поступления радона в помещение // АНРИ. – 2012. - № 1 (68). – С. 5 – 14.
13. Васильев А. В., Жуковский М. В. Характер и периодичность изменения объемной активности радона в помещении // АНРИ. – 2015. - № 2 (81). – С. 42 – 47.
14. Мавлюдов Б. Р. Климат пещер // Вопросы физической спелеологии. – М.: МФТИ, 1994. – С. 6 – 24.
15. Ляхницкий Ю. С., Назина Е. А. Исследование закономерностей локализации радона в карстовых полостях на примере Каповой пещеры // АНРИ. – 2010. - № 1 (60). – С. 43 – 50.
16. 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.
17. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К., Краснов В. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2011 г. // Там же. – 2012. – Вип. 19. – С. 94 – 103.
18. 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.
19. Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97/Д-2000. – К., 2000.
20. Николаев В. А. Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 283 с.

**Б. І. Огородников<sup>1,2</sup>, В. Є. Хан<sup>1</sup>**

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

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

### **ОБЪЕМНА АКТИВНОСТЬ РАДОНОУ ТА ЙОГО МІНЛИВІСТЬ У ДЕАЕРАТОРНІЙ ЕТАЖЕРЦІ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»**

Представлено результати дослідження об'ємної активності радону в приміщеннях Г564/1, Г365 і Г328/2 деаераторної етажерки об'єкта "Укриття" за допомогою сейсмічної радонової станції СРС-05 "Торон-1". Його найбільший середній вміст 100 Бк/м<sup>3</sup> виявлено у приміщенні Г564/1. При цьому максимальні разові концентрації досягали 300 Бк/м<sup>3</sup>. Одночасні вимірювання об'ємної активності радону і різниці температур повітря всередині приміщення і зовні показали, що найбільший вміст радону відповідав мінімальним відмінностям температур. У приміщеннях Г365 і Г328/2 середні концентрації становили відповідно 60 і 40 Бк/м<sup>3</sup> і практично не залежали від різниці температур. В обстежених приміщеннях додаткове опромінення персоналу внаслідок вдихання радону та його дочірніх продуктів може становити близько 10 % від граничної ефективної допустимої 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., Chornobyl, 07270, Ukraine

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

### **RADON VOLUMETRIC ACTIVITY AND ITS CHANGEABILITY IN "UKRYTTYA" OBJECT'S DEAERATING STACK**

Radon volumetric activity was measured with using seismic radon station SRS-05 "Thoron-1" in rooms Г564/1, Г365 and Г328/2 of "Ukryttya" object's deaerating stack. Its highest average content being 100 Bq/m<sup>3</sup> was detected in room Г564/1. On top of that, maximum single concentrations achieved 300 Bq/m<sup>3</sup>. Simultaneous measure-

ments of radon volumetric activity and air temperature difference inside and outside the above room have demonstrated that the highest radon content was observed during the minimum temperature difference. In rooms Г365 and Г328/2, average concentrations made, accordingly, 60 and 40 Bq/m<sup>3</sup>, and did not, practically, depend on temperature difference. In the surveyed rooms, additional personnel exposure due to radon and its daughter products inhalation can make around 10 % of limiting effective admissible dose.

*Keywords:* "Ukryttya" object, radon, daughter products of radon, concentration, temperature of air, radiation doze.

## REFERENCES

1. *Porstendörfer J.* Properties and behaviour of radon and their decay products in air // *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 // *Atomnaya tehnika za rubezhom.* – 2001. № 5. – P. 14 – 25. (Rus)
3. *Zalmanzon U. E., Fertman D. E.* Evaluation of the possibility of automated control air contamination by radioactive aerosols of the object "Shelter" // *Chernobyl-88 Dokl. I All-Union. scientific and engineering. soveshch 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., Budyka A K.* Monitoring of radioactive aerosols in the "Ukryttya" object // *Atomnaya Energiya.* – 2001. – Vol. 91, - Iss. 6. – H. 471 – 474. (Rus)
5. *Ogorodnikov B. I., Khan V. E., Pazukhin E. M., Krasnov V. A.* Radon and their decay products in the object "Ukryttya" in 2000 – 2010 // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobyly).* - 2011. - Iss. 16. - P. 130 – 136. (Rus)
6. *Radon seismic station CPC-05. Operating manual.* - Moskwa: Instrument company "NTM-Zaschita", 2009. – 20. (Rus)
7. *Afonin A. A., Kotlyarov A. A., Maksimov A. Y.* Methods and hardware of radon volume activity monitoring in difference mediums with the electrodeposition camera // *ANRI.* – 2008. - № 2 (53). – P. 82 – 86. (Rus)
8. *Fokin K. F* Building heat engineering enclosing parts of building. Ed. 4th. – M. : Stroyizdat, 1973. - P. 287. (Rus)
9. *Tsapalov A. A, Kyvshinnikov S. I.* Dependence of volume activity of radon in the premises of the difference between the indoor and outdoor air temperatures // *ANRI.* - 2008. - № 2 (53). - P. 37 - 43. (Rus)
10. *Tsapalov A. A.* System study of the dynamics EEVA of radon indoors and control principles // *Ibid.* - 2010. - № 2 (61). - P. 2 - 14. (Rus)
11. *Tsapalov A. A.* Rresults of long-term studies of behavior of VA and EEVA of radon in buildings of Moscow region // *Ibid.* - 2011. - № 3 (66). - P. 52 - 64. (Rus)
12. *Zhukovsky M. V., Vasiliev A. V.* Definition of mechanisms and parameters of radon indoors // *Ibid.* - 2012. - № 1 (68). - P. 5 - 14. (Rus)
13. *Vasiliev A. V, Zhukovskiy M. V* The nature and frequency of changes in the volume activity of radon in indoor // *Ibid.* - 2015. - № 2 (81). - P. 42 - 47. (Rus)
14. *Mavlyudov B. P.* Climate caves // *Voprosy physical speleologiy.* - M.: MIPT, 1994. - P. 6 - 24. (Rus)
15. *Lyakhnitsky Y. S., Nazina E. A.* Studies patterns of localization of radon in karst cavities in the example of Kapova cave // *ANRI.* - 2010. - № 1 (60). - P. 43 - 50. (Rus)
16. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2009 // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyly (Problems of nuclear power plants and of Chornobyly).* - 2010. - Iss. 13. - P. 111 – 122. (Rus)
17. *Khan V. E., Ogorodnikov B. I., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A.* Control of releases of radioactive aerosols from "Ukryttya" object in 2011 // *Ibid.* - 2012. - Iss. 19. - P. 94 – 103. (Rus)
18. *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.
19. *Safety norms radiation of Ukraine NRBU-97 / D-2000.* –Kyiv, 2000 (Ukr).
20. *Nikolaev V. A.* Solid-state track detectors in radiation research. – SPb.: Publishing House of the Polytechnic. University, 2012. - 283 p. (Rus)

Надійшла 16.02.2016  
Received 16.02.2016