

**РАДОН И ЕГО ДОЧЕРНИЕ ПРОДУКТЫ В ОБЪЕКТЕ «УКРЫТИЕ»
В 2000 – 2010 гг.**© 2011 г. **Б. И. Огородников, В. Е. Хан, Э. М. Пазухин, В. А. Краснов***Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

С помощью трековых детекторов ТДА-01 и пакетов волоконистых фильтров Петрянова в 2000 – 2010 гг. измерены концентрации радона и его дочерних продуктов в помещениях объекта «Укрытие». Установлено, что активностный медианный аэродинамический диаметр аэрозолей дочерних продуктов радона и торона варьирует от 0,08 до 0,8 мкм. Радоновые съемки, выполненные в 2006 – 2010 гг. в помещениях объекта «Укрытие», показали, что среднегодовая концентрация радона превышает 150 Бк/м³. Наиболее высокое содержание радона (около 800 Бк/м³) обнаружено в помещении 012/7, где находится скопление лавообразных топливосодержащих материалов. При средних концентрациях радона 170 Бк/м³ и торона 10 Бк/м³ дополнительное ингаляционное облучение становится сопоставимо с внешним регламентированным облучением. Наличие дочерних продуктов радона и торона является негативным фактором состояния радиационной обстановки в объекте «Укрытие». Необходимо найти источники и пути поступления благородных газов и принять меры к их элиминации.

Ключевые слова: радон, торон, дочерние продукты, трековый детектор, аэрозоли, фильтры Петрянова, концентрация, ингаляционная доза, объект «Укрытие».

Введение

Среди радиоактивных веществ, присутствующих в объекте «Укрытие», особое место занимают радон (²²²Rn) и его дочерние продукты (ДПР). Их происхождение не связано с разрушением ядерного реактора и радиоактивными продуктами Чернобыльской аварии, поскольку радий (их материнское вещество), выводится из процесса изготовления ядерного топлива на стадии переработки урановой руды. Главные источники радона в объекте «Укрытие» – строительные конструкции, особенно бетон с гравием, и почва, в которую заглублены фундамент и нижние помещения энергоблока.

При распаде радона возникают атомы полония, которые в воздухе вследствие высокой подвижности соединяются 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]. Эффективный период полураспада ДПР составляет около 32 мин. Распад происходит с испусканием α - и β -частиц и сопровождается γ -излучением. Таким образом, короткоживущие ДПР влияют на радиационную обстановку в помещениях объекта «Укрытие» и детектирование аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии.

Обнаружение радона и его дочерних продуктов в объекте «Укрытие»

Присутствие аэрозолей дочерних продуктов радона и торона в объекте «Укрытие» первыми отметили в 1987 г. специалисты СНИИП (Москва) при создании подсистемы радиационного контроля и диагностики объекта «Укрытие» [3]. По их данным объемная активность естественных радиоактивных аэрозолей в контролируемых помещениях, измеренная методом двух точек, составляла в среднем 150 Бк/м³. Поэтому при отборе проб внутри объекта «Укрытие» и определении концентрации суммы β -излучающих нуклидов ($\Sigma\beta$) аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии фильтры приходится выдерживать около 6 ч, чтобы примерно в 1000 раз уменьшилось содержание дочерних продуктов радона, и около 4 сут, чтобы во столько же раз изменилось количество дочерних продуктов торона. Однако есть и положительный момент: дочерние продукты радона и торона являются своеобразной меткой субмикронных аэрозолей. Их можно, например, использовать для оценки эффективности работы фильтровальных установок и респираторов.

Содержание ДПР в помещении 207/5 в 2000 – 2007 гг.

Впервые длительные наблюдения за ДПР были проведены в объекте «Укрытие» в помещении 207/5 в декабре 2000 г. [4]. До аварии это помещение на отметке +6 м составляло часть коридора трубопроводов системы управления защитой. В конце 1980-х годов отсюда вели интенсивные буровые работы при поиске топливосодержащих материалов (ТСМ). С 28 ноября по 26 декабря 2000 г. в помещении 207/5 были отобраны 20 аэрозольных проб. Использовали многослойные фильтры Петрянова площадью 20 см², прокачивая 5 – 45 м³ воздуха в течение 0,5 – 2,5 ч. Затем фильтры дважды измеряли на β-радиометре КРК-1: первый раз через 40 – 120 мин после окончания пробоотбора, второй – через 3 сут. Таким способом выявляли активность дочерних продуктов радона и торона и активность аэрозоль-продуктов Чернобыльской аварии.

Было установлено, что с 14 по 21 декабря содержание дочерних продуктов радона и торона непрерывно снижалось и уменьшилось примерно в 10 раз. В последующие 3 сут концентрации повысились в 6 – 8 раз. Динамика содержания аэрозоль-продуктов Чернобыльской аварии была иной: наблюдалось несколько увеличений и снижений. Причина различия заключалась в источниках аэрозолей. Для дочерних продуктов – это эманирование радона из строительных конструкций, для продуктов аварии – производственные операции с образованием диспергационных частиц. Расчет по методике [5] показал, что активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) аэрозоль-носителей продуктов Чернобыльской аварии варьировал от 0,5 до 6 мкм, а дочерних продуктов радона и торона – от 0,08 до 0,8 мкм, т.е. на порядок величины меньше. Это подтверждало предположение о разных механизмах образования аэрозолей.

Через два года наблюдения за ДПР были продолжены. В мае 2003 г. специалисты отделения радиационных технологий, материаловедения и экологических исследований МНТЦ «Укрытие» НАН Украины в помещении 207/5 начали испытания пробоотборного устройства, основанного на комбинации методов виртуальной импакции и селективной фильтрации воздушного потока [6, 7]. Одновременно с помощью пакетов трехслойных фильтров Петрянова были продолжены исследования, начатые в декабре 2000 г. Результаты анализов трехслойных фильтров представлены в табл. 1.

Таблица 1. Данные мониторинга радиоактивных аэрозолей в помещении 207/5 объекта «Укрытие» в мае - июне 2003 г.

Отбор			Концентрация, Бк/м ³				¹³⁷ Cs/Σβ	АМАД, мкм		σ*	
Дата	Время	Q, м ³	¹³⁷ Cs	Σβ	ДПР	²¹² Pb		Σβ	ДПР	Σβ	ДПР
23.05	10 ¹⁰ -11 ²⁰	8,4	0,84	2,4	100	15	0,35	2,3	0,24	1,9	2,4
28.05	10 ³⁷ -11 ⁴³	8,0	0,84	1,6	80	7,4	0,54	2,3	0,24	3,0	2,4
04.06	10 ⁰⁰ -11 ⁰⁰	7,2	0,31	0,6	25	0,4	0,52	2,2	0,31	2,1	10,1
05.06	9 ⁵⁰ -10 ⁵⁰	7,2	0,44	1,36	45	0,55	0,33	3,4	0,21	1,1	3,9

* Стандартное геометрическое отклонение.

Как следует из табл. 1, в помещении 207/5 концентрации и дисперсный состав как ДПР, так и продуктов Чернобыльской аварии в мае – июне 2003 г. оказались примерно такими же, как в декабре 2000 г. Обращают на себя внимание концентрации ²¹²Pb – дочерних продуктов торона, которые 23 и 28 мая достигали 15 и 7,4 Бк/м³. Следовательно, в смеси «радон – торон» в эти дни вклад торона был значительный. Однако через неделю (4 и 5 июня) доля торона в смеси газов немного снизилась. Из этого можно предположить, что источники эманирования радона и торона различны. Возможно, они отличаются как материалами, из которых происходит эксхалация газов, так и местами их расположения в объекте «Укрытие». Как и в декабре 2000 г., носителями ДПР остались аэрозольные частицы с АМАД 0,2 – 0,3 мкм. При этом продукты Чернобыльской аварии по прежнему были связаны с более крупными частицами, имевшими АМАД 2 – 3 мкм.

Еще одно наблюдение за ДПР в помещении 207/5 было проведено в третьей декаде мая 2007 г. С 19 по 31 мая по данным метеостанции «Чернобыль» при средних ветрах, не превышавших 1 – 2 м/с, дневные температуры достигали 30 – 33 °С, ночные не опускались ниже 15 – 16 °С. Под влиянием метеорологических факторов внешней среды и низких температур в помещениях объекта «Укрытие», не успевших прогреться после зимы, прекратилась естественная тяга воздуха через систему «Байпас» в вентиляционную трубу ВТ-2. Во внутренних помещениях начали накапливаться ДПР. Результаты пробоотборов и измерения аэрозолей приведены в табл. 2.

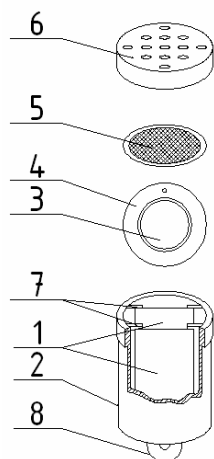
Таблица 2. Данные мониторинга радиоактивных аэрозолей в помещении 207/5 объекта «Укрытие» в мае 2007 г.

Отбор			Концентрация, Бк/м ³			АМАД, мкм		σ	
Дата	Период	Q, м ³	Σβ	ДПР	²¹² Pb	Σβ	ДПР	Σβ	ДПР
23.05	09 ³⁵ -11 ⁰⁵	10	0,33	84	12	2,0	0,11	2	4
24.05	09 ²² -10 ³⁷	10	0,39	110	13	2,8	0,13	1,8	4

Из табл. 2 следует, что, как и в мае 2003 г., при относительно низких концентрациях Σβ наблюдались высокие содержания ДПР. Поскольку перенос аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии в помещение 207/5 был умеренный, что подтверждается отсутствием воздухопотока в дверном проеме из помещения 207/5 в коридор 206/2, то высокие концентрации ДПР – это следствие их накопления в застойном воздухе внутренних помещений.

Наблюдения за содержанием радона с помощью трековых детекторов ТДА-01 в помещениях объекта «Укрытие» и его локальной зоне в 2006 – 2010 гг.

С мая 2006 г. в ряде помещений объекта «Укрытие» и в его локальной зоне были начаты радоновые съемки с помощью трековых детекторов ТДА-01, предоставленных НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (Санкт-Петербург). Этот прибор входит в комплекс средств измерений интегральной объемной активности ²²²Rn в воздухе трековым методом «КСИОАР-01» вместе с искровым счетчиком «Аист» и травильным устройством «Трал».



Конструкция интегрального трекового детектора ТДА-01.

Радиометр ТДА-01 выполнен в виде пластмассового цилиндра высотой 43 мм и диаметром 36 мм (рис. 1). Воздух с радона поступает в корпус 2 через семь отверстий в крышке 6. Для защиты от капельной влаги, отсечки аэрозолей и торона отверстия закрыты фильтром 5 из силиконовой резины. Альфа-частицы, образующиеся при распаде ²²²Rn и его дочерних продуктов, проходят через тормозящий фильтр 1, укрепленный на держателе 7, и регистрируются нитратцеллюлозной пленкой 3 (пленка LR-115-II фирмы Kodak). Пленка закреплена в держателе 4 по типу пялец. Кольцо 8 используется для крепления радиометра.

Приборы размещали на различных высотных отметках разрушенного 4-го энергоблока ЧАЭС. Проведено восемь циклов полугодовых экспозиций приборов (четыре «летних» и четыре «зимних»). После окончания экспозиции в кассетах с пленкой «Кодак» определяли количество треков и рассчитывали концентрацию радона. Результаты измерений представлены в табл. 3.

Из полученных результатов следует, что во всех обследованных помещениях объекта «Укрытие» среднегодовая концентрация радона превышала 150 Бк/м³. Наиболее высокое содержание радона оказалось в помещении 012/7 (бассейн-барботер), где находится скопление лавообразных ТСМ («куча»). При этом максимальная величина (около 800 Бк/м³) была зарегистрирована в летний период 2008 г.

Таблица 3. Концентрация радона в объекте «Укрытие» (Бк/м³)

Период экспозиции	Помещение												
	002/2	012/7	01/3	061/2	207/5	208/10	Г328	402/3	605/2	805/3	Байпас	Подкровельное пространство	Локальная зона
	Высотная отметка, м												
	0	0	3	6	6,3	6,6	6	24	24	31,5	49	65	0
2006 г. V - IX	260	190	190	120	120	260	-	90	210	140	90	210	120
2006 г. XII - 2007 г. IV	170	420	190	300	300	66	-	350	84	430	-	140	230
2007 г. IX - 2008 г. III	82	380	190	230	62	150	-	390	240	600	400	130	90
2008 г. IV - VIII	160	800	270	140	210	480	-	200	360	66	86	140	-
2008 г. XI - 2009 г. IV	440	-	180	240	170	110	-	120	96	81	70	-	78
2009 г. IV - X	140	120	230	420	60	92	-	280	150	85	68	40	17
2009 г. X - 2010 г. IV	45	150	160	140	100	110	-	110	280	180	-	230	260
2010 г. IV - X	84	190	230	410	200	-	170	34	81	91	-	37	18
Средняя годовая	170	320	210	250	150	180	170	200	190	210	140	130	120
Средняя летняя	160	330	230	270	150	280	170	150	200	96	81	110	52
Средняя зимняя	180	310	180	230	160	110	-	240	180	320	240	170	200
Лето/Зима	0,9	1,0	1,3	1,2	0,9	2,5	-	0,6	1,1	0,3	0,4	0,6	0,3

Как и следовало ожидать, наиболее низкое содержание радона зафиксировано в локальной зоне промплощадки объекта «Укрытие», где среднегодовая концентрация составила 120 Бк/м³. При этом летом 2009 и 2010 гг. средние значения составляли всего 17 – 18 Бк/м³. Наличие радона здесь определялось присутствием большого бетонного сооружения (берма) и толстого слоя гравия, которым в 1986 г. были засыпаны радиоактивные фрагменты, выброшенные из реактора. В связи со строительством в 2009 и 2010 гг. фундамента для нового безопасного конфайнмента берма была ликвидирована и большое количество гравия вывезено. Очевидно, это способствовало снижению содержания радона в локальной зоне близ места экспонирования детектора.

Во всех помещениях на нижних отметках объекта «Укрытие» средние летние и зимние концентрации радона мало отличались друг от друга. Вероятнее всего, это связано с небольшими различиями температур в летний и зимний периоды вследствие большой массы бетонных сооружений и слабого воздухообмена с внешней средой. Исключение составляет помещение 208/10, где в зимний период постоянно работает тепловая пушка, которая создает направленный из помещения воздухопоток.

Как известно, объект «Укрытие» вентилируется только за счет естественной тяги воздуха через неплотности строительных конструкций на верхних отметках, в том числе на кровле, а также систему «Байпас» и высотную трубу ВТ-2. Как видно из табл. 3, в подкровельном пространстве и в системе «Байпас» среднегодовые концентрации радона составили около 140 Бк/м³, т.е. лишь немного ниже, чем в других помещениях объекта «Укрытие». Это свидетельствует о том, что потоки радона, при подъеме из нижних помещений в верхние, незначительно разбавляются свежим воздухом.

Сопоставления средних летних и зимних концентраций радона в проветриваемых помещениях на верхних отметках объект «Укрытие», а также в системе «Байпас» и в подкровельном пространстве, представленных в табл. 3, показывают их существенные отличия. Это обусловлено зависимостью направления воздушных потоков от сезонной разности температур внутри и снаружи объекта «Укрытие». В летний период в результате прогрева воздуха во внешней среде и низких температур в помещениях объекта снижается, а иногда и полностью прекращается, естественная тяга воздуха во внешнюю среду через систему «Байпас» и ВТ-2. Поскольку принудительная вентиляция в объекте «Укрытие» не функционирует, то, очевидно, в этот период в помещениях на нижних отметках начинается накопление радона, торона и их дочерних продуктов, а на верхних – соответственно их снижение.

Ингаляционные дозы при вдыхании радона и его дочерних продуктов

При проведении радоновой съемки в летний период 2010 г. один детектор был размещен в помещении Г328, которое относится к категории «постоянно обслуживаемых». В нем круглосуточно находится дежурная смена цеха радиационной безопасности. В дневное время здесь оформляют наряды специалисты различных цехов ЧАЭС и подрядных организаций. Обнаруженная в этом помещении средняя концентрация радона 173 Бк/м^3 свидетельствует о неблагоприятной радиационной обстановке.

В соответствии с рекомендациями [8] расчет мощности ингаляционных доз (D , мкЗв/ч) от радона, торона и их дочерних продуктов 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 соответственно радона и торона с их дочерними продуктами; C_{Rn} и C_{Tn} – средние концентрации радона и торона, Бк/м^3 . Последнюю находят из измерения концентрации аэрозолей ^{212}Pb (C_{Pb}) и коэффициента равновесия F_{Pb} по выражению $C_{Tn} = C_{Pb} / F_{Pb}$.

На основании данных, представленных в табл. 3, была рассчитана доза, полученная человеком, находящимся в объекте «Укрытие» в течение 1800 ч, т.е. календарного рабочего года. Было принято, что в непроветриваемых помещениях F_{Rn} и F_{Tn} равны 1,0, средняя концентрация радона $C_{Rn} = 170 \text{ Бк/м}^3$, т.е. как в помещении Г328 и средняя концентрация торона $C_{Tn} = 10 \text{ Бк/м}^3$. Тогда $D = 3,5 \text{ мЗв/год}$, что составляет 17,5 % от предела эффективной дозы для персонала категории А (20 мЗв/г.). Естественно, что в тех помещениях, где концентрации радона достигают 400 Бк/м^3 , дозы от радона, торона и их дочерних продуктов могут превысить 9 мЗв/г. Такие дозы требуют всестороннего выяснения источников и путей поступления благородных газов в помещения объекта «Укрытие», а также принятия мер по их элиминации.

Следует отметить, что до этой работы измерений концентраций благородных радиоактивных газов в объекте «Укрытие» не проводили и негативное влияние радона, торона и аэрозолей их дочерних продуктов при мониторинге радиационной обстановки не учитывали.

Заключение

Наблюдения, выполненные с помощью многослойных фильтров Петрянова, показали, что в объекте «Укрытие» систематически присутствуют аэрозоли дочерних продуктов радона и торона. В помещении 207/5 их концентрация в весенне-летний период достигает 100 Бк/м^3 и более.

Установлено, что АМАД аэрозолей дочерних продуктов радона и торона варьировал от 0,08 до 0,8 мкм, а аэрозолей-продуктов Чернобыльской аварии – от 0,5 до 6 мкм. Это свидетельствует о различиях механизмов образования аэрозолей - конденсационном для первых и диспергационном для вторых.

Радоновые съемки, выполненные в помещениях объекта «Укрытие» с помощью трековых детекторов ТДА-01 в 2006 – 2010 гг., показали, что среднегодовая концентрация ра-

дона превышала 150 Бк/м^3 . Наиболее высокое содержание радона оказалось в помещении 012/7 (бассейн-барботер), где находится скопление лавообразных ТСМ. При этом максимальная величина (около 800 Бк/м^3) была зарегистрирована в летний период 2008 г.

Наличие дочерних продуктов радона и торона является негативным фактором состояния радиационной обстановки в объекте «Укрытие».

Расчет показал, что при средней концентрации радона 170 Бк/м^3 и торона 10 Бк/м^3 человек, находящийся в объекте «Укрытие» в течение 1800 ч, получает дозу $3,5 \text{ мЗв/г}$. Это составляет 17,5 % от разрешенной за год предельной эффективной дозы 20 мЗв . В тех помещениях, где концентрации радона достигают 400 Бк/м^3 , дозы от радона, торона и их дочерних продуктов могут превысить 9 мЗв/г . Такие дозы требуют всестороннего выяснения источников и путей поступления благородных газов в помещения объекта «Укрытие», а также принятия мер по их элиминации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Postendörfer J.* Properties and behaviour of radon and their decay products in air // *J. Aerosol Sci.* – 1994. – Vol. 25. – P. 219 – 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. 61 – 65.
4. *Огородников Б.И., Будыка А.К.* Мониторинг радиоактивных аэрозолей в объекте «Укрытие» // *Атомная энергия.* – 2001. – Т. 91, вып. 6. – С. 471 – 475.
5. *Vudyka A.K., Ogorodnikov B.I., Skitovich V.I.* Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes // *J. Aerosol Sci.* – 1993, – Vol. 24. – Suppl. 1. – P. S205 – S206.
6. *Меленевский А.Э.* Экспрессное измерение концентраций и дисперсного состава радиоактивных аэрозолей объекта «Укрытие» // *Проблемы Чернобиля.* – 2002. – Вып. 11. – С. 102 – 110.
7. *Меленевский А.Э., Кравчук Т.А., Бадковский В.П. и др.* Создание прибора для мониторинга доз ингаляционного облучения в условиях объекта «Укрытие» с учетом субмикронных аэрозолей // *Там же.* – 2003. – Вып. 12. – С. 162 – 170.
8. *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.

РАДОН І ЙОГО ДОЧІРНІ ПРОДУКТИ В ОБ'ЄКТІ «УКРИТТЯ» У 2000 - 2010 рр.

Б. І. Огородников, В. Є. Хан, Е. М. Пазухін, В. О. Краснов

За допомогою трекових детекторів ТДА-01 і пакетів волокнистих фільтрів Петрянова в 2000 – 2010 рр. виміряно концентрації радону та його дочірніх продуктів (ДП) у приміщеннях об'єкта «Укриття». Установлено, що медіанний за активністю аеродинамічний діаметр аерозолів ДП радону й торону варіює від 0,08 до 0,8 мкм.

Радонові зйомки, виконані в 2006 – 2010 рр. в приміщеннях об'єкта «Укриття», показали, що середньорічна концентрація радону перевищує 150 Бк/м^3 . Найбільш високий вміст радону (близько 800 Бк/м^3) виявлено в приміщенні 012/7, де знаходиться скупчення лавоподібних паливовмісних матеріалів. При середніх концентраціях радону 170 Бк/м^3 і торону 10 Бк/м^3 додаткове інгаляційне опромінення стає порівняним із зовнішнім регламентованим опроміненням. Наявність дочірніх продуктів радону й торону є негативним чинником стану радіаційної обстановки в об'єкті «Укриття». Необхідно знайти джерела та шляхи надходження благородних газів і вжити заходів щодо їхньої елімінації.

Ключові слова: радон, торон, дочірні продукти, трековий детектор, аерозолі, фільтри Петрянова, концентрація, інгаляційна доза, об'єкт «Укриття».

RADON AND ITS DAUGHTER PRODUCTS IN "UKRYTTYA" OBJECT IN 2000 – 2010

B. I. Ogorodnikov, V. E. Khan, E. M. Pazukhin, V. A. Krasnov

At use of track detectors TDA-01 and Petryanov's fibre filters in 2000 – 2010 were measured concentrations of radon and its daughter products (DP) in rooms of "Ukryttya" object. Was established that active median aerodynamic diameter of aerosol-carrires of DP have diapason 0.08 – 0.8 mkm. The radon monitoring in 2006 – 2010 in rooms of "Ukryttya" object showed that average annual radon concentration exceed 150 Bq/m³. The largest concentration 800 Bq/m³ was detected in room 012/7, were be found lava lace fuel-containing materials. At the middle radon concentrations 170 Bq/m³ and thoron concentrations 10 Bq/m³ supplementary inhalation radiation stand comparable to regulation standard. Presence of DP in rooms of "Ukryttya" object is the negative factor of radiation situation.

Keywords: radon, thoron, daughter products, track detector, aerosols, Petryanov's fibre filters, concentrations, inhalation dose, "Ukryttya" object.

Поступила в редакцию 08.12.10