

ФІЗІКА-ХІМІЧНЫЯ ПРАБЛЕМЫ ЭКАЛОГІІ

УДК 577.346:57+504.064

*А. К. КАРАБАНОВ¹, А. В. МАТВЕЕВ¹, Н. Т. ГИНДЮК², В. В. ГИНДЮК², В. И. МИЦУРА³,
И. В. ЖУК⁴, Л. Л. ВАСИЛЕВСКИЙ⁴, Т. Г. ЛЕОНТЬЕВА⁴, Ж. А. ЛУКАШЕВИЧ⁴*

**РАДОН В ВОЗДУХЕ ЗДАНИЙ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ
БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ,
ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАДОНОМ-222 И ДОЧЕРНИМИ ПРОДУКТАМИ ЕГО РАСПАДА**

¹*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: karabanov@ecology.basnet.by, matveyev@nature.basnet.by,*

²*Брестский областной центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья, Брест, Беларусь,
e-mail: ocgie@brest.by*

³*Брестский зональный центр гигиены и эпидемиологии, Брест, Беларусь, e-mail: brestses@brest.by*

⁴*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси,
Минск, Беларусь, e-mail: zhuk@sosny.bas-net.by, lab13sosny@gmail.com, t.leontieva@tut.by*

Проведен анализ особенностей геологического строения территории Брестской области, на основе которого выбраны населенные пункты для мониторинга радона. Описана методика и представлены результаты исследований объемной активности радона в воздухе жилых, общественных и производственных зданий, эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА_{Rn}) и годовых эффективных доз (E_{Rn}) облучения населения, обусловленных радоном и его дочерними продуктами распада. Средние значения ЭРОА_{Rn} в различных административных районах Брестской области варьируются от 15 до 60 Бк/м³. Значение ЭРОА_{Rn} более 200 Бк/м³ определено в одном помещении Каменецкого района Брестской области. Максимальные значения среднегодовых эффективных доз облучения населения составляют от 6,8 до 13,9 мЗв/год.

Ключевые слова: радон, радиоактивное облучение, мониторинг радона, объемная активность радона, Брестская область.

*A. K. KARABANOV¹, A. V. MATVEYEV¹, N. T. GINDYUK², V. V. GINDYUK², V. I. MITSURA³, I. V. ZHUK⁴,
L. L. VASILEVSKIJ⁴, T. G. LEONTIEVA⁴, J. A. LUKASHEVICH⁴*

**RADON IN AIR INSIDE BUILDINGS IN SETTLEMENTS OF BREST REGION AND EFFECTIVE DOSES
OF POPULATION IRRADIATION CAUSED BY RADON-222 AND PRODUCTS OF ITS DECAY**

¹*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: karabanov@ecology.basnet.by, matveyev@nature.basnet.by,*

²*Brest Regional Centre of Hygiene, Epidemiology and Public Health Brest, Belarus, e-mail: ocgie@brest.by,*

³*Brest Zonal Center of Hygiene and Epidemiology, Brest, Belarus, e-mail: brestses@brest.by,*

⁴*Joint Institute for Power and Nuclear Research – “Sosny” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: zhuk@sosny.bas-net.by, lab13sosny@gmail.com, t.leontieva@tut.by*

The analysis of specific features of the geological structure within the Brest region territory has been performed, on the basis of which settlements for radon monitoring have been selected. The technique has been described and results of the volume activity of radon in air of living, public and industrial buildings, equivalent to equilibrium volume activity of radon (EROA_{Rn}) and annual effective doses (E_{Rn}) population's irradiation caused by radon and its decay products, have been shown. Average values in various administrative districts of Brest region are within the range from 15 to 60 Bq/m³. The value of 200 Bq/m³ has been determined in one building of Kamenets district of Brest region. The maximum average of annual effective doses of population's irradiation is from 6,8 to 13,9 mSv/year.

Keywords: radon, radiation exposure, radon monitoring, radon volume activity, Brest region.

Введение. Негативное воздействие радиоактивного облучения на здоровье человека общеизвестно. Степень этого воздействия определяется величиной дозы от всех природных (естественных) и техногенных (искусственных) источников ионизирующего излучения (ИИИ). Основной вклад в суммарную дозу облучения от всех природных и техногенных ИИИ (до 70%) вносит природный радон-222 и дочерние продукты его распада (ДПР): свинец-214, висмут-214, полоний-214, полоний-210, висмут-210 и др. [1]. Ограничение облучения населения радоном является одним из главных направлений в практике радиационной защиты населения.

В радиозоологическом аспекте Республика Беларусь является наиболее пострадавшей из всех стран мира в результате аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Однако сейчас, спустя почти 30 лет, радиационная обстановка существенно улучшилась: средняя доза облучения населения снизилась с 0,97 до 0,24 мЗв/год. Количество населенных пунктов со средними значениями эффективной дозы облучения населения 1 мЗв/год и более только за последние 5 лет снизилось с 193 до 82 [2]. Вклад «чернобыльских» радионуклидов в суммарную дозу облучения населения Беларуси от всех природных и техногенных ИИИ в настоящее время не превышает 5%. Превышения установленных в Беларуси нормативов по отдельным видам продуктов питания, производимым в общественном секторе экономики Беларуси (сельскохозяйственных кооперативах), нет. В частном секторе (крестьянских подворьях) доля продуктов с содержанием радионуклидов выше нормативов не превышает 0,3%. Это обусловлено использованием так называемых аккумуляторов радионуклидов – грибов, клюквы, брусники, черники и др., а также единичными случаями радиоактивности молока у скота, пасущегося в лесных и луговых угодьях, загрязненных «чернобыльскими» радионуклидами.

На первой «пилотной» стадии мониторинга радона в Беларуси (до 2009–2010 гг.) основным критерием выбора населенных пунктов, в которых планировались измерения концентраций радона в воздухе помещений, являлось расположение населенных пунктов в зонах разрывных нарушений или вблизи них. Однако геологические особенности конкретных территорий указывают лишь на вероятность повышенных уровней радона в зданиях, важнейшую роль в реализации этой вероятности играют инженерно-планировочные особенности конкретных сооружений, определяющие вентиляцию помещений, а также образ жизни и поведение жителей. Например, более высокая активность ДПР радона наблюдается в пыльных и задымленных комнатах, а не в «чистых». Это объясняется тем, что ДПР радона обладают сильной склонностью присоединяться к пыли и другим частицам в воздухе, а не оседать на поверхности стен и штор, где вероятность их ингаляционного поступления в легкие человека меньше [3, 4].

Воздействие альфа-излучения радона и его ДПР на чувствительные клетки легкого – одна из причин возникновения рака. По оценкам экспертов Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) и Международного комитета по радиационной защите (МКРЗ) облучение населения за счет природного радона обуславливает до 20% всех случаев заболевания раком легкого. У курильщиков риск этого заболевания существенно возрастает. Поэтому проблема радона относится к важнейшим радиозоологическим проблемам, непосредственно касающимся населения многих стран, в том числе и Республики Беларусь, в которой не менее 40% территории является потенциально радоноопасной [5]. Это связано с многочисленными зонами активных тектонических нарушений, участками развития озерно-ледниковых, моренных и лессовидных отложений, в которых значения объемной активности радона (OARn) в поровом воздухе чаще всего превышает 20000–30000 Бк/м³, и территориями с неглубоким залеганием генерирующих радон кислых и сильновыветрелых пород кристаллического фундамента. В связи со всем сказанным выше следует подчеркнуть, что мониторинг радона в различных регионах Беларуси имеет важную социальную направленность, так как его результаты являются основой для создания базы данных по уровням объемной активности радона в воздухе зданий и годовым эффективным дозам облучения населения Беларуси, обусловленных радоном и его ДПР. Подобные исследования были выполнены в воздухе жилых и производственных помещений Брестской области. Полученные результаты приводятся в настоящей статье.

Основные особенности геологического строения Брестской области. На территории Брестской области выделены две крупные тектонические структуры с разной глубиной залегания

ния кристаллического фундамента и мощностью отложений платформенного чехла: восточная часть Подляско-Брестской впадины и Полесская седловина. Подляско-Брестская впадина на территории Беларуси простирается в субширотном направлении и имеет вид структурного залива, открывающегося к западу. Поверхность фундамента залегает на отметках от минус 0,4 км до минус 1,5 км. Субширотные разломы (Свислочский и Северо-Ратновский) ограничивают впадину с севера и юга. Внутри Подляско-Брестской впадины также выявлены разломы, наиболее значительными из которых по амплитуде и протяженности являются Высоковский и Дивинский, менее протяженными – Прибугский и Кустинский. С этими линейными структурами связано формирование локальных новейших поднятий [6].

В пределах Полесской седловины поверхность фундамента залегает в основном на отметках минус 0,3–0,5 км, мощность чехла чаще всего не превышает 600 м. С востока к Полесской седловине примыкает Микашевичско-Житковичский выступ, кристаллический фундамент в его пределах перекрыт маломощной (до 10–50 м) осадочной толщей. Платформенный чехол в районе исследований сложен породами рифея, венда, палеозоя, мезозоя и кайнозоя, а в западной части и палеозоя, которые перекрываются четвертичными отложениями, как правило, небольшой (первые десятки метров) мощности с преобладанием водно-ледниковых песков, моренных супесей и суглинков, аллювиальных, озерно-аллювиальных и болотных отложений.

Таким образом, основные отличительные особенности геологического строения преобладающей части территории Брестской области определяются мощностью до 1500 м осадочных и вулканогенно-осадочных пород и отложений чехла, которые перекрывают радонопродуцирующие массивы кристаллических пород, а также относительно редкой сетью глубинных разломов. Эти особенности позволяют сделать заключение о сравнительно ограниченном распространении в пределах региона участков с аномально высоким содержанием радона в почвенном воздухе.

Методика исследований и аппаратура. Измерения объемной активности радона (OA_{Rn}) в воздухе помещений проводили интегральным методом с использованием твердотельных трековых ядерных детекторов (ТТЯД) альфа-частиц, согласно методике [7]. При проведении мониторинга радона в воздухе зданий Брестской области использовали интегральные радиометры радона трекового (ИРРТ), разработанные в Радиовом институте им. В. Г. Хлопина [8]. В рамках исследований выполнен следующий комплекс работ: изготовлены трековые детекторы для регистрации альфа-частиц радона-222 и его ДПП из нитроцеллюлозной пленки LR-115 тип 2 (DOSIRAD, Франция); организованы и проведены полевые экспедиции в выбранные населенные пункты Брестской области для размещения, длительной (1–3 месяца) экспозиции радиометров и их сбора после завершения измерений; выполнены химическая обработка трековых детекторов после их экспозиции в воздухе помещений, подсчет треков альфа-частиц на искровом счетчике и математическая обработка результатов измерений.

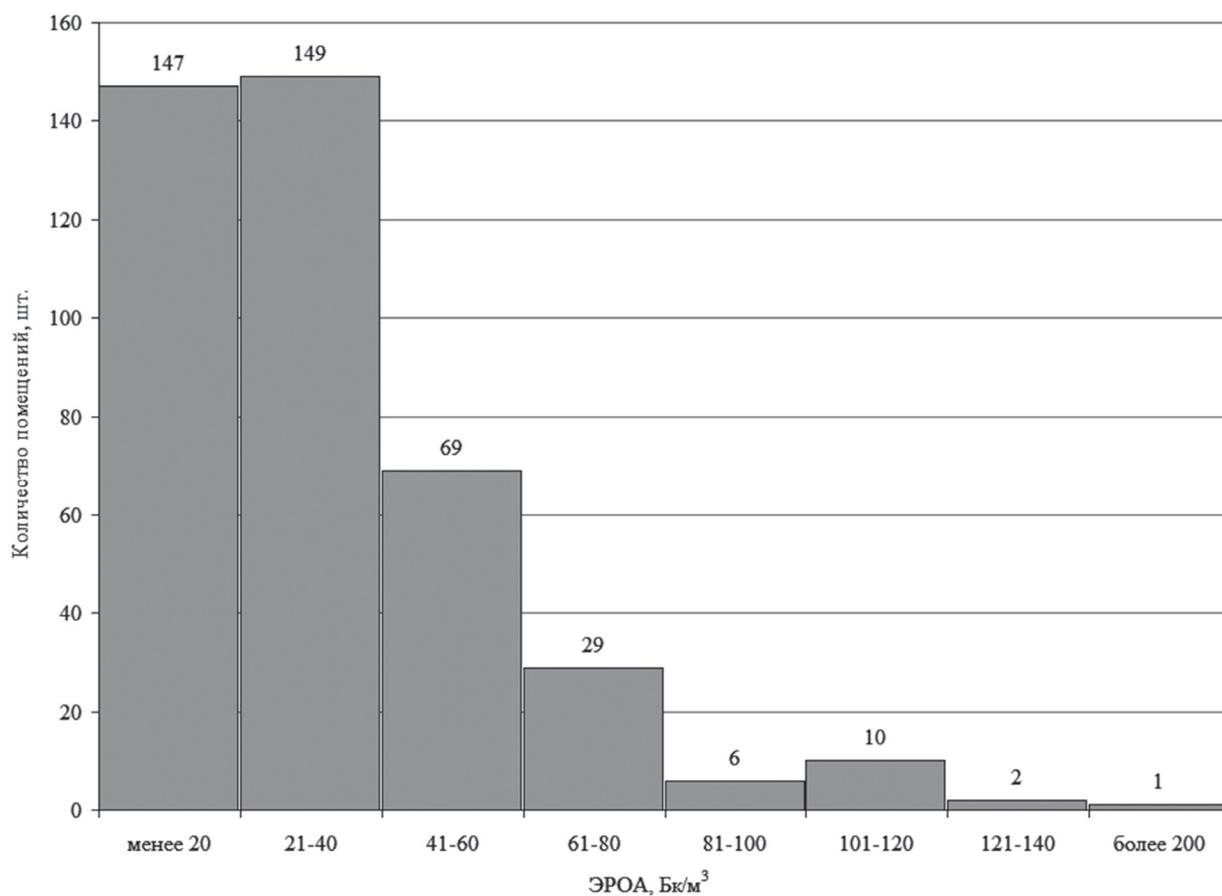
Результаты и анализ измерений объемной активности радона в воздухе зданий на территории Брестской области. Измеряемой величиной при мониторинге радона в помещениях является объемная активность радона (OA_{Rn}). Нормируемым в Республике Беларусь параметром является среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность радона ($\overline{ЭРОА}_{Rn}$), которая в эксплуатируемых жилых зданиях не должна превышать 200 Бк/м³, а в производственных и общественных зданиях – 310 Бк/м³ [9, 10]. При превышении указанных значений $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ необходимо проведение противорадионовых мероприятий.

Используя измеренные значения OA_{Rn} , в соответствии с методикой [11] определены среднегодовые значения $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ для каждого помещения. В табл. 1 приведены данные по уровням OA_{Rn} и $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ в воздухе помещений различных районов Брестской области.

Как видно из табл. 1, наибольшие уровни OA_{Rn} зафиксированы в Березовском, Жабинковском, Каменецком, Кобринском и Пружанском районах. Средние значения $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ в различных административных районах Брестской области варьируются от 15 до 60 Бк/м³. Максимальное значение $\overline{ЭРОА}_{Rn}$, превышающее норматив, установлено для одного помещения Каменецкого района (220 Бк/м³). В остальных районах значений $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ выше 200 Бк/м³ не зарегистрировано.

Таблица 1. Распределение значений OA_{Rn} и $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ в воздухе помещений в населенных пунктах Брестской области

Административный район	Количество обследованных населенных пунктов, шт.	Объем выборки исследованных помещений, шт.	Значение OA_{Rn} , Бк/м ³		Значение $\overline{ЭРОА}_{Rn}$, Бк/м ³		Доля помещений с $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ более 200 Бк/м ³ , %
			среднее	максимальное	среднее	максимальное	
Березовский	6	48	64	235	36	123	0
Жабинковский	3	37	82	255	44	128	0
Камянецкий	8	46	90	445	47	220	2,2
Кобринский	5	47	81	215	43	108	0
Брестский	6	39	36	110	21	57	0
Пружанский	5	45	87	225	45	113	0
Дрогичинский	3	30	66	135	35	69	0
Малоритский	4	10	37	65	21	35	0
Ивацевичский	4	9	29	70	18	39	0
Пинский	15	34	22	45	15	26	0
Ивановский	6	16	30	60	19	34	0
Барановичский	5	12	54	135	49	118	0
Ляховичский	4	9	71	135	60	111	0
Ганцевичский	2	6	22	30	21	29	0
Лунинецкий	6	13	43	100	39	86	0
Столинский	5	12	40	100	37	86	0
В целом по Брестской области	87	413	53	445	34	220	0,2



Гистограмма распределения $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ в воздухе помещений Брестской области

Распределение величин OA_{Rn} и $\overline{ЭРОА_{Rn}}$ подчиняется логнормальному закону (критерий χ^2 , $p > 0,05$). Гистограмма распределения $\overline{ЭРОА_{Rn}}$ для зданий, расположенных в Брестской области, представлена на рисунке. Объем выборки составил 413 зданий. Из рисунка видно, что для наибольшего количества зданий Брестской области наблюдается низкий уровень $\overline{ЭРОА_{Rn}}$ (до 40 Бк/м³).

Оценка годовых эффективных доз облучения населения, обусловленных радоном-222 и его ДПР, в воздухе зданий населенных пунктов Брестской области и доз облучения населения за счет «чернобыльских» радионуклидов. Согласно инструкции [12], являющейся нормативным документом Республики Беларусь при оценке индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных ИИИ, значение коэффициента дозового перехода принято равным 9×10^{-6} мЗв·ч⁻¹/(Бк·м⁻³) или 0,063 мЗв·год⁻¹/(Бк·м⁻³), что соответствует рекомендациям НКДАР ООН [13, 14]. Для оценки влияния длительного радиационного воздействия радона-222 проведен расчет годовых эффективных доз облучения населения (E_{Rn}), обусловленных радоном и его ДПР [12]. Для расчета использованы полученные значения $\overline{ЭРОА_{Rn}}$ и коэффициент дозового перехода (0,063 мЗв·год⁻¹/(Бк·м⁻³)) при значении коэффициента равновесия $F = 0,5$ и условии пребывания людей в помещениях в течение 80% времени. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что средневзвешенная по 16 районам Брестской области годовая эффективная доза облучения населения, обусловленная радоном и его ДПР, составляет 2,2 мЗв/год, при вариации в отдельных районах в диапазоне от 0,9 до 3,8 мЗв/год. Максимальное значение E_{Rn} , составляющее 13,9 мЗв/год, зафиксировано в Каменецком районе.

Т а б л и ц а 2. Годовые эффективные дозы облучения населения (E_{Rn}), проживающего на территории Брестской области, обусловленные радоном и его ДПР, в воздухе помещений

Административный район	E_{Rn} , мЗв/год	
	средняя	максимальная
Березовский	2,3	7,7
Жабинковский	2,8	8,0
Каменецкий	3,0	13,9
Кобринский	2,7	6,8
Брестский	1,3	3,6
Пружанский	2,9	7,1
Дрогичинский	2,2	4,3
Малоритский	1,3	2,2
Ивацевичский	1,1	2,5
Пинский	0,9	1,6
Ивановский	1,2	2,1
Барановичский	3,1	7,4
Ляховичский	3,8	7,0
Ганцевичский	1,3	1,8
Лунинецкий	2,5	5,4
Столинский	2,3	5,4
В целом по Брестской области	2,2	13,9

Среднегодовые эффективные дозы облучения жителей населенных пунктов Брестской области «чернобыльскими» радионуклидами представлены в табл. 3 [2].

Т а б л и ц а 3. Средняя суммарная доза от внешнего и внутреннего облучения «чернобыльскими» радионуклидами по населенным пунктам Брестской области

Административный район	Средняя суммарная доза облучения, мЗв/год
Дрогичинский	0,16
Лунинецкий	0,45
Столинский	0,49
Пинский	0,37
В целом по Брестской области	0,37

Таким образом, сравнивая значения среднегодовых эффективных доз облучения (E_{Rn}) жителей, проживающих на территории Брестской области, обусловленные радоном и его ДПР в воздухе помещений, с аналогичными величинами, обусловленными «чернобыльскими» радионуклидами, можно сделать вывод, что E_{Rn} для 4 районов Брестской области превышает эффективную дозу облучения населения от «чернобыльских» радионуклидов в 2,4–13,8 раза, в целом по Брестской области – в 6 раз.

Как показали результаты проведенных в 2010–2015 гг. исследований, облучение населения радоном-222 и его ДПР для жителей, проживающих в Брестской области, является основным (от 50 до 70%) дозообразующим фактором по сравнению со всеми остальными компонентами природного и техногенного радиоактивных излучений, включая облучение от «чернобыльских» радионуклидов. Выявлена необходимость проведения комплекса исследований объемной активности радона-222 и его ДПР в различных регионах Беларуси для увеличения статистики измерений.

Заключение. С использованием рекомендуемого МКРЗ и НКДАР ООН пассивного интегрального метода и твердотельных трековых ядерных детекторов проведены широкомасштабные экспериментальные исследования по определению объемной активности радона-222 и его ДПР в воздухе жилых, производственных и общественных зданий 87 населенных пунктов 16 административных районов Брестской области. Результаты исследований объемной активности радона показали сильную вариабельность уровней концентрации радона в воздухе отдельных зданий в различных административных районах Брестской области (от 20 до 445 Бк/м³). Средние значения эквивалентной равновесной объемной активности радона $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ варьируются от 15 до 60 Бк/м³. Значение $\overline{ЭРОА}_{Rn}$ более 200 Бк/м³ зафиксировано в одном помещении Каменецкого района, что предполагает проведение там противорадиационных защитных мероприятий. Максимальные значения среднегодовых эффективных доз облучения населения составляют от 6,8 до 13,9 мЗв/год.

Проведенные радоновые исследования имеют важную социальную направленность и нацелены на уменьшение доз радиоактивного облучения населения от управляемой радоновой компоненты – основного дозообразующего фактора облучения населения Беларуси в настоящее время. Их результаты являются основой для создания базы данных по уровням объемной активности радона и его ДПР и годовым эффективным дозам облучения жителей Беларуси.

Список использованной литературы

1. Charles, M. UNSCEAR Report 2000: Sources and Effects of Ionizing Radiation / M. Charles // Journal of Radiological Protection. – 2001. – N 21(1). – P. 83–85.
2. Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь / Н. Г. Власова [и др.] // Республ. науч.-практ. центр радиац. медицины и экологии человека, М-во здравоохран. Респ. Беларусь. – Гомель, 2014. – 114 с.
3. Павленко, Т. А. Рівні радону в повітрі будинків України / Т. А. Павленко // Довкілля та здоров'я. – 2007. – № 2. – С. 22–25.
4. Павленко, Т. А. Существующие дозы облучения населения Украины / Т. А. Павленко, И. П. Лось // Ядерна та радіаційна безпека. – 2009. – Т. 12, вып. 1. – С. 18–21.
5. Радон в природных и техногенных комплексах Беларуси / А.В. Матвеев [и др.] // Літасфера. – 1996. – № 5. – С. 156–160.
6. Карабанов, А. К. Неотектоника и неогеодинимика запада Восточно-Европейской платформы / А. К. Карабанов, Р. Г. Гарецкий, Р. Е. Айзберг. – Минск: Белорус. наука, 2009. – 258 с.
7. Методика определения объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений с использованием интегральных радонометров на основе твердотельных трековых детекторов альфа-частиц: МВИ. Минск, 1808–2002. – Минск, 2002. – 18 с.
8. Application of the track method for radon measurements in Ukraine / V. A. Nikolaev, M. G. Buzynniy, I. V. Vorobiev [et al.] // Nuclear Tracks and Radiation Measurements. – 1979. – Vol. 159. – P. 395–400.
9. Гигиенический норматив: Критерии оценки радиационного воздействия. Введ. 28.12.2012. – Минск: М-во здравоохран. Респ. Беларусь, 2012. – 230 с.
10. Санитарные нормы и правила: Требования к радиационной безопасности. Введ. 28.12.2012. – Минск: М-во здравоохран. Респ. Беларусь, 2012. – 37 с.
11. Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий: Метод. указания МУК РБ №11-8-6-2002. – Минск, 2002. – 21 с.

12. Оценка индивидуальных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: инструкция 2.6.1 М-ва здравоохранения Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – 20 с.
13. Источники и эффекты ионизирующего излучения: отчет НКДАР ООН 2000 года Генеральной Ассамблее с научными приложениями. Т. 1: источники (Ч. 1) / Пер. с англ.; под ред. акад. РАМН Л. А. Ильина и проф. С. П. Ярмоненко. – М.: Радэкон, 2002. – 306 с.
14. *Vanmarcke, H.* Radon: A special case in radiation protection / H. Vanmarce // Radiation Protection Dosimetry. – 2008. – N 130. – P. 1–5.

Поступила в редакцию 03.03.2016