

УДК 546.296:613.5:539.16.08:614.876

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОДОВЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ОТ РАДОНА НА ТЕРРИТОРИИ ГОМЕЛЬСКОЙ, МОГИЛЕВСКОЙ И ВИТЕБСКОЙ ОБЛАСТЕЙ

© 2020 г. А. Л. Чеховский^{1,*}, Д. Н. Дроздов¹, И. В. Жук², Л. А. Чунихин¹

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Республика Беларусь

²Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларусь, Минск, Республика Беларусь

*E-mail: chehovskii@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2019 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 20.11.2019 г.

В статье рассматривается проблема облучения населения естественным радиоактивным газом радоном и его дочерними продуктами распада. Показаны различия геологических и радиоэкологических условий, определяющие формирование объемной активности радона на территории восточных областей Республики Беларусь, количественно выраженные в комплексном радоновом показателе. Значения средних годовых эффективных доз облучения населения от радона, оцененные по моделям МКРЗ и НКДАР ООН, для Витебской области составляют 1.49 ± 0.09 мЗв/год и 2.45 ± 0.15 мЗв/год; для Гомельской области – 0.60 ± 0.04 мЗв/год и 0.99 ± 0.06 мЗв/год; для Могилевской области – 1.30 ± 0.09 мЗв/год и 2.14 ± 0.14 мЗв/год соответственно.

Ключевые слова: радон, дочерние продукты распада, объемная активность, эффективная доза, комплексный радоновый показатель

DOI: 10.31857/S0869803120030042

Радон – благородный радиоактивный газ, тяжелее воздуха, не имеющий вкуса, цвета и запаха, образующийся в радиоактивной цепочке в процессе распада естественных радионуклидов семейства урана и тория. Согласно оценке Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН, радон и его дочерние продукты распада (ДПР) определяют примерно 66% годовой индивидуальной эффективной дозы облучения, получаемой населением от земных источников радиации, и примерно 50% дозы от всех источников радиации [1]. Наиболее значимым и распространенным дозовым фактором является воздействие радона, содержащегося в воздухе помещений жилых и общественных зданий и на рабочих местах. Радон, являясь компонентом воздуха, попадает в легкие человека при дыхании. По данным Всемирной организации здравоохранения, воздействие радона повышает риск возникновения и развития рака легкого [2] вследствие воздействия высокоэнергетического α -излучения при распаде радона и его ДПР на высокочувствительные клетки дыхательной системы. Увеличение риска рака легкого отмечается как после контакта с радоном и его ДПР [3], так и в отношении воздействия характерного для радона излучения с низкой ли-

нейной потерей энергии [1]. По оценкам экспертов Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), облучение населения за счет радона обуславливает до 15% общего количества заболеваний раком легкого [4]. Представленные исследования разных международных организаций указывают на важность и актуальность “радоновой проблемы”.

Воздействие на человека радона и его ДПР всегда представляло определенные сложности для проведения дозиметрических оценок. Данное воздействие относится к внутреннему облучению и достаточно сложно поддается индивидуальному радиационному мониторингу, относительно легко проводимому в случае внешнего радиационного облучения. Вследствие малого периода полураспада ДПР радона мониторинг облучения радоном не может быть выполнен стандартными методами, применяемыми при мониторинге внутреннего облучения. При ингаляции ДПР радона происходит облучение исключительно тканей респираторного тракта, в то время как на остальные органы и ткани человека радиационное воздействие пренебрежимо мало. Перечисленные факторы приводят к тому, что все дозиметрические оценки облучения человека за счет ингаляци-

онного поступления ДПР радона производятся исключительно косвенными методами.

Необходимо подчеркнуть, что дозы облучения от естественных радионуклидов, представленных в основном радоном [1], важны при сопоставительном анализе последствий радиационных аварий или штатной деятельности предприятий ядерно-топливного цикла. Это особенно актуально для территории Беларуси в связи с аварией на Чернобыльской АЭС и скорым введением в эксплуатацию первой белорусской АЭС. Такой учет позволяет определить приоритеты реабилитационных мероприятий, направленных на снижение радиационных нагрузок на население, и позволяет уточнить существующую радиационную обстановку с учетом всех источников радиационного воздействия.

Цель работы – оценить условия формирования эффективной дозы облучения населения от радона и его ДПР для территорий Гомельской, Могилевской и Витебской областей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Определение средних годовых эффективных доз облучения от радона и его ДПР проводится через объемную активность (ОА) радона. В исследованиях использованы результаты измерения ОА радона в жилых зданиях, проведенных коллективом авторов совместно с сотрудниками ГНУ “Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны” (г. Минск) в течение 2005–2016 гг. на территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей [5, 6]. Плотность размещения дозиметров обусловлена распределением населенных пунктов (НП) на данной территории. В рамках НП измерения проводились с учетом специфики жилищного фонда (процентное соотношение деревянных, кирпичных, панельных домов и т.д.; одно- и многоэтажных домов, конструктивных особенностей фундамента). Экспозиция каждого измерения составляла по 3 мес. в холодное и теплое время года. Такой подход позволял учитывать возможные колебания ОА радона. Количество измерений по областям: Витебская – 732 в 108 НП (охвачено 26.8% НП области), Гомельская – 1080 в 54 НП (охвачено 13.5% НП области), Могилевская – 705 в 95 НП (охвачено 29.4% НП области). Всего 2517 измерений в 257 НП.

Исследования были выполнены по методике МВИ. МН. 1111-99, позволяющей проводить мониторинг радона [7]. Суть метода состоит в том, что в некоторых диэлектрических материалах α -частицы радона и его ДПР (как и другие тяжелые ядерные частицы) производят радиационные повреждения (латентные треки), которые после протравливания в химических реагентах могут

быть подсчитаны с помощью оптического микроскопа или другим способом. В наших исследованиях в качестве детекторов была использована нитроцеллюлозная пленка LR-115 типа 2 производства фирмы DOSIRAD (Франция), позволяющая применить относительно простой искровой способ подсчета треков на детекторах. Расчет ОА радона в воздухе помещений проводился по формуле (1):

$$A = \frac{\bar{N} - N_0}{\varepsilon_0 T_3}, \quad (1)$$

где A – объемная активность радона, Бк m^{-3} ; \bar{N} – плотность треков на детекторе, трек cm^{-2} ; N_0 – уровень собственного фона трекового детектора, трек cm^{-2} ; ε_0 – чувствительность комплекса КСИОАР-01, трек cm^{-2} Бк $^{-1}$ m^3 сут $^{-1}$; T_3 – длительность экспозиции, сут.

Также использовались значения ОА радона, полученные методом комплексного радонового показателя (КРП). Обоснование, статистические показатели модели и метод расчета ОА радона по КРП представлены в работах [8–10]. Суть данного подхода состоит в использовании для расчета ОА радона ряда косвенных показателей: концентрации урана в почвах (%о), дочернобыльской мощности экспозиционной дозы (МЭД) (мкР/ч), коэффициента фильтрации почвы (м/сут) – аналога коэффициента диффузии радона, глубины залегания первого водоносного горизонта (м). Абсолютные величины указанных факторов нормируются на их максимальные значения для формирования единообразных шкал, различающихся по количественным характеристикам показателей, и перехода к относительной размерности величин для упрощения дальнейших вычислений. Подробное обоснование указанных косвенных факторов, а также литературные источники для их определения представлены в работе [10]. Далее проводится расчет значения КРП, который представляет собой произведение нормированных значений указанных косвенных факторов. После этого рассчитывается значение ОА радона согласно регрессионному уравнению (2):

$$OA = 6200 \text{ КРП} + 40, \quad (2)$$

где ОА – объемная активность радона, Бк m^{-3} ; КРП – значение комплексного радонового показателя, отн. ед.

Для построения регрессионного уравнения (2) использовались результаты измерения ОА радона в жилых зданиях [5, 6]. При проведении статистического анализа наибольшая точность модели и степень связи были показаны при использовании КРП ($r = 0.81 \pm 0.002$, $t_{эмп} > t_{крит}$ при $p < 0.05$; неопределенность модели 34%) [8]. Значения ОА радона, полученные по модели КРП, не имеют

достоверных различий со значениями ОА радона, полученных экспериментальным путем, и могут использоваться совместно [8–10].

Точки определения ОА радона методом КРП были равномерно распределены по территории трех областей (Гомельской, Могилевской и Витебской) с привязкой к географическим координатам реперных точек и представлены в виде сетки с размером ячейки 5×5 км. Объем данных, рассчитанный по модели КРП, составил 1395 значений ОА радона.

Для оценки средних эффективных доз облучения населения от ингаляционного поступления радона и его ДПР использовались две модели перехода от ОА радона к эффективной дозе: модель МКРЗ [11] и модель НКДАР ООН [1].

В Публикации № 65 МКРЗ было предложено использовать прямое сравнение ущерба, связанного с единицей эффективной дозы при внешнем облучении, с единицей экспозиции радона. Расчет проводился исходя из экспозиции по скрытой энергии радона в течение 7000 ч в год, которая составляет 1.56×10^{-2} МДж ч м⁻³ на 1 Бк м⁻³ ОА радона или 0.4 Бк м⁻³ эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона и его ДПР (с учетом коэффициента перехода от ОА к ЭРОА $F = 0.4$). Согласно Публикации № 60 МКРЗ, ущерб на единицу эффективной дозы для населения при внешнем облучении составляет 7.3×10^{-5} мЗв⁻¹ [12]. Это значение ущерба учитывает все вредные эффекты ионизирующего излучения на организм человека. Согласно Публикации № 65 МКРЗ, ущерб на единицу экспозиции радона составляет 8×10^{-5} (МДж ч м⁻³)⁻¹ [11]. Исходя из этого величина ущерба от единицы экспозиции радона к эффективной дозе составляет 1.1 мЗв/(МДж ч м⁻³). Таким образом, значение дозового коэффициента, рассчитанного по Публикации № 65 МКРЗ, составляет 0.017 мЗв год⁻¹/Бк м⁻³ ОА радона или 6.1 нЗв ч⁻¹/Бк м⁻³ ЭРОА радона при 7000 ч в год [11].

В дальнейшем НКДАР ООН была предложена аналогичная модель, которая, тем не менее, имела ряд существенных отличий [1]. В ней учитывалась ОА торона, которая или измеряется при проведении исследований, или принимается за постоянное значение (мировое значение). Коэффициент перехода от ОА радона к ЭРОА равен 0.5. Кроме того, была введена новая переменная — доля времени нахождения в помещении (0.8) и на открытом воздухе (0.2) с соответствующей корректировкой на стандартное число часов в году (общее число 8800 ч). В результате дозовый коэффициент этой модели несколько выше и составляет 9 нЗв ч⁻¹/Бк м⁻³ ЭРОА радона на стандартное число часов в году (8800 ч). При этом общий ход рассуждений и последовательность расчета перехода от ОА к эффективной дозе аналогичны для обеих моделей, при этом эффективные дозы от

радона и его ДПР, рассчитанные по модели НКДАР ООН, примерно в 1.5 раза больше, чем по модели МКРЗ.

В инструкции [13], являющейся нормативным документом для Республики Беларусь при оценке индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения, значение дозового коэффициента принято равным 0.028 мЗв год⁻¹/Бк м⁻³ ОА радона или 9 нЗв ч⁻¹/Бк м⁻³ ЭРОА радона, которое соответствует рекомендациям НКДАР ООН [1]. Однако модель, предложенная в Публикации № 65 МКРЗ [11], до сих пор не потеряла актуальности и активно используется в научных исследованиях. В публикации МКРЗ № 115 [4], посвященной проблеме радона, не предложена альтернатива данной модели. Таким образом, обе модели могут использоваться для расчета эффективных доз облучения от радона и его ДПР.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование более 50% дозы облучения от естественных радионуклидов определяется радонном и его ДПР, а значит рядом факторов, обуславливающих его ОА, вследствие чего характер распределения доз облучения от данного радионуклида зависит от характера распределения его ОА. Распределение ОА радона для разных областей территории Республики Беларусь имеет некоторые особенности, которые обуславливают различия в закономерностях как формирования, так и уровня дозы облучения населения, проживающего на этих территориях.

Согласно результатам картирования территории Республики Беларусь по концентрации радона в жилых зданиях, наблюдаются различия как по разбросу значений, так и по характеру однородности территории в отношении ОА радона [14, 15]. На рис. 1 представлены распределения ОА радона для территории Витебской, Гомельской и Могилевской областей.

Из рис. 1 видно, что для трех областей имеет место классическая форма распределения ОА радона, которая соответствует логнормальному закону [1, 16]. Проверка формы распределения ОА радона выполнена с помощью критериев Колмогорова—Смирнова ($K-d < 0.15$ при $p < 0.01$) и Шапиро—Уилка ($W > 0.95$ при $p < 0.01$), центральные оценки представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что наибольшая дисперсия значений ОА радона наблюдается в Витебской обл., наименьшая — в Гомельской обл., кратность дисперсий равна 3. Величина 99%-ного квантиля для Витебской обл. составила 245 Бк/м³, в Гомельской — 90 Бк/м³ и в Могилевской обл. — 180 Бк/м³. Сравнительный анализ распределений ОА радона трех областей, выполненный с помо-

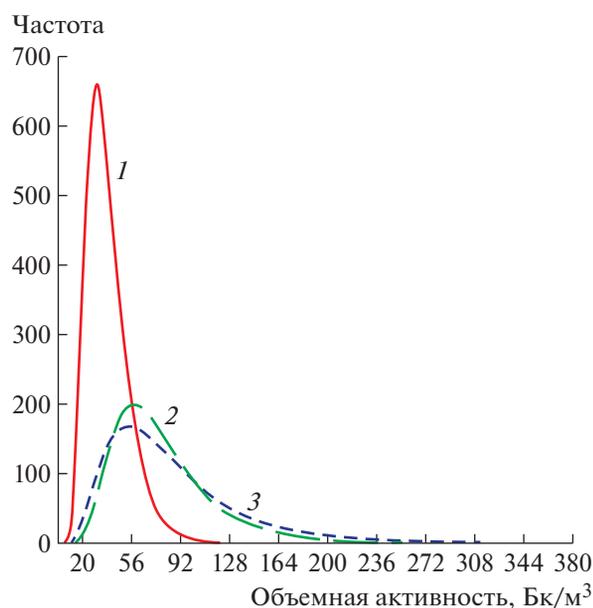


Рис. 1. Распределения ОА радона для территорий восточных областей Республики Беларусь (1 – Гомельская, 2 – Могилевская, 3 – Витебская).

Fig. 1. Distribution of VA of radon for the territories of the eastern regions of the Republic Belarus (1 – Gomel, 2 – Mogilev, 3 – Vitebsk).

стью критерия Колмогорова–Смирнова, показал достоверное различие средних значений ($p < 0.01$). Наблюдаемые различия можно увязать с особенностями геологических и радиоэкологических условий, в том числе содержанием урана в почвах, дочернобыльской мощностью экспозиционной дозы (МЭД), коэффициентом фильтрации почв для радона, глубиной залегания первого от поверхности водоносного горизонта. Обоснование применения данных показателей, лежащих в основе КРП, приводится в работе [8], где показано, что в качестве интегральной оценки геолого-экологических условий территории Республики Беларусь по радону можно использовать комплексный радоновый показатель.

Сравнительный анализ значений комплексного радонового показателя, рассчитанный для каждой области согласен [8, 10], показал достоверные различия геологических и радиоэкологических условий Гомельской области по отноше-

нию к Витебский и Могилевской областям на уровне значимости $p < 0.01$, между Витебской и Могилевской областью на уровне значимости $p < 0.07$. Из чего следует, что условия формирования ОА радона Гомельской области резко отличаются от условий Витебской и Могилевской области, что и объясняет 2-кратную разницу средних значений ОА радона.

Значения ОА радона позволяют определить среднюю годовую эффективную дозу (СГЭД) облучения населения. На рис. 2, а и б представлены распределения СГЭД облучения от ОА радона для районов Витебской, Гомельской и Могилевской областей, полученные по моделям условного дозового перехода МКРЗ и НКДАР ООН соответственно.

Из рис. 2 видно, что распределение СГЭД для Гомельской обл. имеет некоторые отличия, как по величине, так и по вариации значений СГЭД по районам. Распределения средних районных значений СГЭД от радона для Витебской, Гомельской и Могилевской области представлены в табл. 2.

Результаты табл. 2 показывают достоверные различия средних районных значений СГЭД Гомельской области от СГЭД Витебской ($t = 9.1$, $p < 0.01$) и Могилевской областей ($t = 7.4$, $p < 0.01$). Достоверного различия СГЭД между Витебской и Могилевской областями не установлено ($t = 1.5$, $p = 0.133$).

Критерием однородности геолого-экологических условий территории может служить модель КРП, позволяющая определить ОА, значения которых использованы для расчета СГЭД. Зависимости между средними районными СГЭД от радона, рассчитанными по моделям МКРЗ и НКДАР ООН, и значениями КРП, нормированными на максимальную величину по области, представлены на рис. 3, а и б соответственно.

Из рис. 3 видно, что значения СГЭД Витебской и Могилевской областей соответствуют одному распределению. Коэффициенты регрессии для регрессионных уравнений СГЭД для Витебской и Могилевской областей соотносятся как 1:1, для Витебской и Гомельской областей – 5:1 и для Могилевской и Гомельской областей – 4:1.

Таблица 1. Оценки параметров распределения ОА радона для территории восточных областей Республики Беларусь
Table 1. Estimates of the distribution of VA of radon for the territory of the eastern regions of the Republic Belarus

Область	Число измерений	$X \pm m_x$, Бк/м ³	SD, Бк/м ³	AS	ES
Витебская	732	85.68 ± 2.37	48.26	1.59 ± 0.12	4.71 ± 0.24
Гомельская	1080	38.19 ± 0.65	15.73	1.17 ± 0.10	2.04 ± 0.20
Могилевская	705	77.30 ± 1.73	34.38	1.06 ± 0.12	1.50 ± 0.25

Примечание. X – среднее арифметическое, m_x – стандартная ошибка, SD – стандартное отклонение, AS – асимметрия, ES – эксцесс.

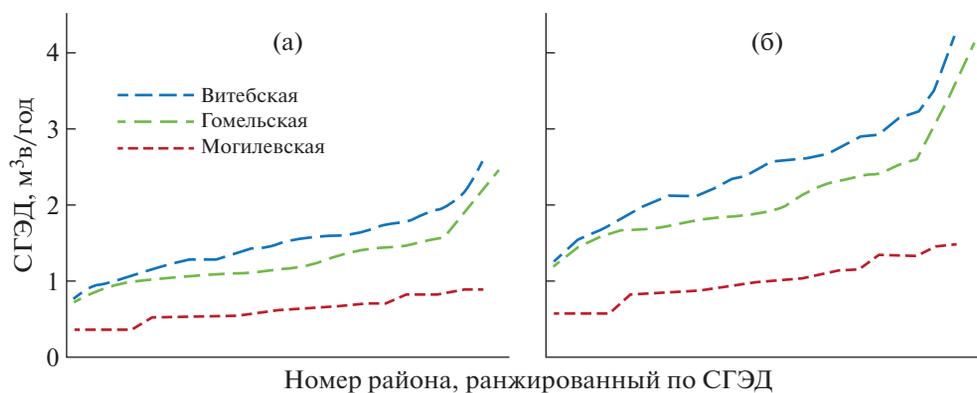


Рис. 2. Распределения СГЭД облучения от ОА радона для территорий восточных областей Республики Беларусь.
Fig. 2. Distributions of the AAED radiation from VA of radon for the territories of the eastern regions of the Republic Belarus.

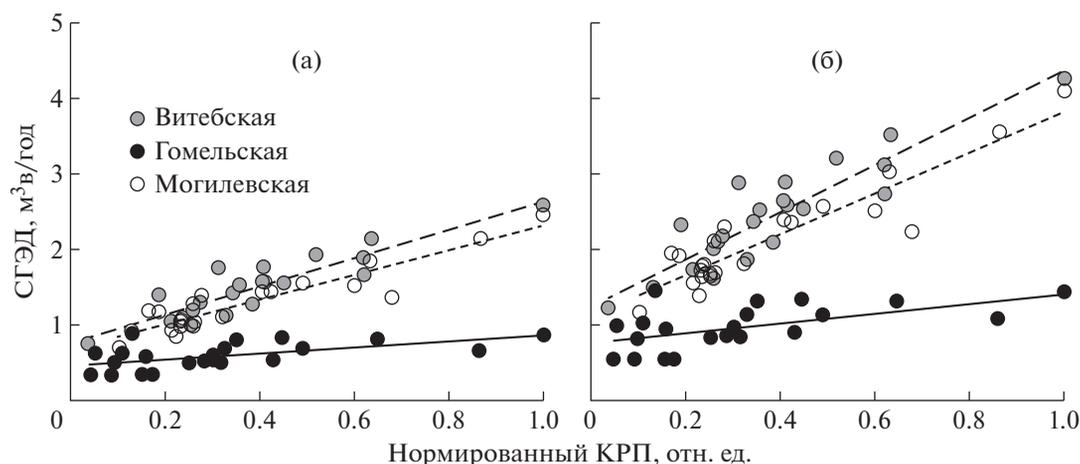


Рис. 3. Зависимость средних районных СГЭД от радона и его ДПР, от нормированных по области значений КРП.
Fig. 3. Dependence of average regional AAED on radon and its DPD, on normalized values in the region CRI.

Значения параметров регрессионных уравнений приведены в табл. 3.

Для территорий Витебской и Могилевской областей наблюдается сильная корреляционная связь между СГЭД и нормированным КРП ($r > 0.9$ при $p < 0.05$), для Гомельской области имеет место средняя корреляционная связь (для модели МКРЗ $r = 0.68$ при $p < 0.05$; для НКДАР ООН $r = 0.52$ при $p < 0.05$). Полученные значения коэффициентов корреляции можно объяснить контрастом геологических и радиоэкологических условий на территории Витебской и Могилевской областей, выраженных в факторах модели КРП. В отношении Гомельской области не наблюдается резких изменений факторов дозоформирования, что указывает на относительную однородность территории. В этой связи для условий Гомельской области может быть получено среднее значение, которое можно распространить на всю территорию. Как показано в ранее проведен-

ных исследованиях [9, 14], для Гомельской области не характерны критические зоны радоноопасности.

Необходимо отметить, что зависимость ОА радона (и, как следствие, СГЭД) от ряда косвенных

Таблица 2. Оценки средних районных значений СГЭД (мЗв/год) от ОА радона для территории восточных областей Республики Беларусь

Table 2. Estimates of the distribution of the average regional values of AAED from VA of radon for the territory of the eastern regions of the Republic Belarus

Область	N	Модель МКРЗ		Модель НКДАР	
		$X \pm m_x$	SD	$X \pm m_x$	SD
Витебская	21	1.49 ± 0.09	0.43	2.45 ± 0.15	0.70
Гомельская	21	0.60 ± 0.04	0.17	0.99 ± 0.06	0.28
Могилевская	21	1.30 ± 0.09	0.41	2.14 ± 0.14	0.68
Всего	63	1.13 ± 0.06	0.52	1.86 ± 0.10	0.86

Таблица 3. Параметры регрессионных уравнений СГЭД для Витебской, Гомельской и Могилевской областей
Table 3. Parameters of regression equations of AAED for Vitebsk, Gomel and Mogilev regions

Область	Модель МКРЗ				Модель НКДАР			
	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>R</i> ²	SER	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>R</i> ²	SER
Витебская	1.88 ± 0.19	0.77 ± 0.08	0.83	0.18	3.09 ± 0.31	1.27 ± 0.14	0.83	0.30
Гомельская	0.45 ± 0.11	0.44 ± 0.04	0.48	0.12	0.57 ± 0.02	0.81 ± 0.04	0.27	0.20
Могилевская	1.64 ± 0.10	0.68 ± 0.04	0.85	0.48	2.69 ± 0.37	1.13 ± 0.13	0.85	0.26

Примечание. SER – стандартная ошибка регрессионной модели.

показателей, в том числе почвенных и геологических, находит отражение в современных научных источниках [17, 18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования показаны различия геологических и радиэкологических условий, определяющие формирование ОА радона, количественно выраженные в комплексном радоновом показателе. Закономерности формирования ОА радона для территории Витебской и Могилевской области отличаются от закономерностей Гомельской области, что выражается в особенностях распределения. Среднее значение ОА радона для Гомельской области составляет 38.19 ± 0.65 Бк/м³ (SD 15.73; 99% квантиль 90 Бк/м³), для Могилевской области – 77.30 ± 1.73 Бк/м³ (SD 34.38; 99% квантиль 180 Бк/м³), для Витебской области – 85.68 ± 2.37 Бк/м³ (SD 48.26; 99% квантиль 245 Бк/м³). Последующая оценка эффективных доз по значениям ОА радона для исследуемых областей показала достоверные различия средних районных значений СГЭД Гомельской области от СГЭД Витебской ($t = 9.1, p < 0.01$) и Могилевской областей ($t = 7.4, p < 0.01$). Достоверного различия СГЭД между Витебской и Могилевской областями не установлено ($t = 1.5, p = 0.133$). Среднее значение СГЭД по моделям МКРЗ и НКДАР ООН для Витебской области составляет 1.49 ± 0.09 мЗв/год (SD 0.43) и 2.45 ± 0.15 мЗв/год (SD 0.70); для Гомельской области составляет 0.60 ± 0.04 мЗв/год (SD 0.17) и 0.99 ± 0.06 мЗв/год (SD 0.28); для Могилевской области – 1.30 ± 0.09 мЗв/год (SD 0.41) и 2.14 ± 0.14 мЗв/год (SD 0.68), соответственно.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования, представленные в публикации, выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Б18М-115 “Оценка распределения объемной активности радона на территории Гомельской области” от 30.05.2018 г., науч. рук. А.Л. Чеховский).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Источники и эффекты ионизирующего излучения // Отчет НКДАР ООН 2000 года с научными приложениями. 2002. 319 с. [Istochniki i efekty ioniziruyushchego izlucheniya // Otchet NKDAR OON 2000 goda s nauchnymi prilozheniyami. 2002. 319 s.].
2. Радон и рак: информационный бюллетень // Всемирная организация здравоохранения. 2005. № 291. 4 с. [Radon i rak: informacionnyj byulleten' // Vsemirnaya organizaciya zdnavoohraneniya. 2005. № 291. 4 s.].
3. Health Effects of Exposure to Radon // Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI). 1999. 432 p.
4. ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40 (1).
5. Карabanов А.К., Чунихин Л.А., Чеховский А.Л. и др. Карта радонового риска Беларуси // Природные ресурсы. 2015. № 2. С. 73–78. [Karabanov A.K., Chunihin L.A., Chekhovskij A.L. et al. Karta radonovogo riska Belarusi // Prirodnye resursy. 2015. № 2. S. 73–78. (In Russian)]
6. Карabanов А.К., Чунихин Л.А., Чеховский А.Л. и др. Радон и дочерние продукты распада в воздухе зданий на территории Беларуси // Природопользование. 2015. Вып 27. С. 49–53. [Karabanov A.K., Chunihin L.A., Chekhovskij A.L. et al. Radon i dochernie produkty raspada v vozduhe zdaniy na territorii Belarusi // Prirodopol'zovanie. 2015. Vyp. 27. S. 49–53. (In Russian)]
7. Методика определения объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений с использованием интегральных радонометров на основе твердотельных трековых детекторов альфа-частиц. МВИ. МН 1111-99. 2002. 19 с. [Metodika opredeleniya ob'emnoj aktivnosti radona v vozduhe zhilyh i proizvodstvennyh pomeshchenij s ispol'zovaniem integral'nyh radonometrov na osnove tverdetel'nyh trekovyh detektorov al'fa-chastic. MVI. MN 1111-99. 2002. 19 s. (In Russian)]
8. Чеховский А.Л. Оценка радоновой опасности по косвенным показателям радона (на примере восточных областей Беларуси): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Минск: БГУ, 2017. [Chekhovskij A.L. Ocenka radonovoj opasnosti po kosvennym pokazatelyam radona (na primere vostochnyh oblastej Belarusi): Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Minsk: BGU, 2017. (In Russian)]

9. *Чеховский А.Л.* Определение критических зон радоноопасности по методу комплексного радонового показателя и картированию радонового риска // Изв. Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. 2015. № 6 (93). С. 46–52. [*Chekhovskij A.L.* Opredelenie kriticheskikh zon radonoopasnosti po metodu kompleksnogo radonovogo pokazatelya i kartirovaniyu radonovogo riska // Izv. Gomel'skogo gos. universiteta im. F. Skoriny. 2015. № 6 (93). S. 46–52. (In Russian)]
10. *Чунихин Л.А., Чеховский А.Л., Дроздов Д.Н.* Методический подход по оценке радоновой опасности территории // АНРИ. 2017. № 1. С. 50–54. [*Chunihin L.A., Chekhovskij A.L., Drozdov D.N.* Metodicheskij podhod po ocenke radonovoj opasnosti territorii // ANRI. 2017. № 1. S. 50–54. (In Russian)]
11. ICRP, 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2).
12. ICRP, 1991. Annual Limits on Intake of Radionuclides by Workers Based on the 1990 Recommendations. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1–3).
13. Оценка индивидуальных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. Инструкция 2.6.1. Минздрава Республики Беларусь, 2006. 20 с. [Оценка individual'nyh doz oblucheniya naseleniya za schet prirodnyh istochnikov ioniziruyushchego izlucheniya. Instrukciya 2.6.1. Minzdrava Respubliki Belarus', 2006. 20 s. (In Russian)]
14. *Чеховский А.Л., Дроздов Д.Н.* Картирование территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей по комплексному радоновому показателю и объемной активности радона в жилых зданиях // Радиация и риск. 2016. Т. 25. № 4. С. 126–136. [*Chekhovskij A.L., Drozdov D.N.* Kartirovanie territorii Gomel'skoj, Mogilevskoj i Vitebskoj oblastej po kompleksnomu radonovomu pokazatelyu i ob'emnoj aktivnosti radona v zhilyh zdaniyah // Radiaciya i risk. 2016. T. 25. № 4. S. 126–136. (In Russian)]
15. *Чунихин Л.А., Чеховский А.Л., Дроздов Д.Н.* Карта радоновой опасности территории Республики Беларусь // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9. № 4. С. 43–46. [*Chunihin L.A., Chekhovskij A.L., Drozdov D.N.* Karta radonovoj opasnosti territorii Respubliki Belarus' // Radiac. gigena. 2016. T. 9. № 4. S. 43–46. (In Russian)]
16. *Крисяк Э.М., Стамат И.П.* Организация и проведение выборочного обследования уровней облучения населения за счет радона в жилых домах // АНРИ. 1997. № 3. С. 25–30. [*Krisjuk E.M., Stamat I.P.* Organizaciya i provedenie vyborochnogo obsledovaniya urovnej oblucheniya naseleniya za schet radona v zhilyh domah // ANRI. 1997. № 3. S. 25–30. (In Russian)]
17. *Branion-Calles M.C., Nelson T.A., Henderson S.B.* A geospatial approach to the prediction of indoor radon vulnerability in British Columbia, Canada // J. Exposure Sci. & Environ. Epidemiol. 2016. Т. 26. P. 554–565.
18. *Chen J., Ford K.L.* A study on the correlation between soil radon potential and average indoor radon potential in Canadian cities // J. Environ. Radioactiv. 2017. Т. 166. P. 152–156.

Determination of Annual Effective Doses of Irradiation of Population from Radon on Territory of Gomel, Mogilev and Vitebsk Regions

A. L. Chekhovskiy^{a, #}, D. N. Drozdov^a, I. V. Zhuk^b, and L. A. Chunikhin^a

^a Francis Skaryna Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus

^b Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny, Minsk, Republic of Belarus

[#] E-mail: chehovskii@mail.ru

The article considered problem of exposure of population to natural radioactive gas radon and its daughter decay products. Shown differences in geological and radioecological conditions that determine formation of volumetric activity radon in territory of eastern regions of Republic of Belarus, are quantitatively expressed in a complex radon index. Values of average annual effective doses exposure of population from radon estimated by models ICRP and UNSCEAR for Vitebsk region accord 1.49 ± 0.09 mSv/year and 2.45 ± 0.15 mSv/year; for Gomel region is 0.60 ± 0.04 mSv/year and 0.99 ± 0.06 mSv/year; for Mogilyov region is 1.30 ± 0.09 mSv/year and 2.14 ± 0.14 mSv/year respectively.

Keywords: radon, daughter decay products, volumetric activity, effective dose, complex radon index