
РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 535.231.16:614.876

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА РЕКОНСТРУКЦИИ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННЫХ ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЛИЦ, ПРОЖИВАЮЩИХ НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Д. Б. КУЛИКОВИЧ^{1), 2)}, Н. Г. ВЛАСОВА³⁾, Ю. В. ВИСЕНБЕРГ¹⁾, Б. К. КУЗНЕЦОВ¹⁾

¹⁾Гомельский государственный медицинский университет,
ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Беларусь

²⁾Международный государственный экологический институт
им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

³⁾Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека,
ул. Ильича, 290, 246040, Гомель, Беларусь

Образец цитирования:

Куликович ДБ, Власова НГ, Висенберг ЮВ, Кузнецов БК. Верификация метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:59–68.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-59-68>

For citation:

Kulikovich DB, Vlasova NG, Visenberg YuV, Kuznetsov BK. Verification of the method for reconstruction of individualized external exposure doses to persons living in a contaminated territory with radionuclides. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:59–68. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-59-68>

Авторы:

Дмитрий Борисович Куликович – старший преподаватель кафедры медицинской и биологической физики¹⁾; аспирант кафедры экологической медицины и радиобиологии²⁾.

Наталья Генриховна Власова – доктор биологических наук, профессор; заведующий лабораторией радиационной защиты.

Юлия Валерьевна Висенберг – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры нормальной и патологической физиологии.

Борис Куприянович Кузнецов – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой медицинской и биологической физики.

Authors:

Dmitry B. Kulikovich, senior lecturer at the department of medical and biological physics^a; postgraduate student at the department of environmental medicine and radiobiology^b.
dimaproud@mail.ru

Natalie G. Vlasova, doctor of science (biology), full professor; head of the department of the radiation protection laboratory.
natalie_vlasova@mail.ru

Yuliya V. Visenberg, PhD (biology), docent; associate professor at the department of normal and pathological physiology.
visenju@mail.ru

Boris K. Kuznetsov, PhD (biology), docent; head of the department medical and biological physics.
borkuz@list.ru

Корректная оценка индивидуальных доз облучения населения является неотъемлемой составляющей для проведения радиационно-эпидемиологических исследований по установлению зависимости «доза – эффект» и выявлению наиболее облучаемых групп населения. При этом трудности в оценке индивидуальных доз внешнего облучения возникают при недостатке или отсутствии данных индивидуального дозиметрического контроля. В связи с этим оценка доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории, осуществляется методом реконструкции последних на основе официальных методических документов. Из-за консервативности существующих методик реконструкции доз внешнего облучения многие из них попросту не соответствуют задаче индивидуализации доз, так как позволяют оценить лишь средние значения в населенном пункте, а многие приводят к значительным ошибкам (300 % и более). На основании вышеизложенного нами ранее был разработан новый метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения, который позволяет учесть не только прямой фактор дозоформирования – плотность поверхностного загрязнения по ^{137}Cs , но и такие «косвенные» факторы, как профессиональная занятость, пол и возраст индивида. Для оценки адекватности разработанного нами метода и возможности его использования для реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения была проведена его верификация. Для этого была сформирована исследовательская выборка из данных индивидуального дозиметрического контроля жителей Могилевской обл. за 2005 и 2006 гг. Выборка сформирована с учетом представительности по типу профессиональной занятости сельского населения, по полу и возрасту, которые статистически обосновано оказывают влияние на формирование индивидуальной дозы внешнего облучения. Результат сравнительного анализа реконструированных доз с данными ИДК показал, что для выборки в целом за каждый год и для групп профессиональной занятости модельные оценки и данные ИДК полностью сопоставимы, ошибка оценки не превышала 11 %. Таким образом, верификация разработанного метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории, свидетельствует, что предложенный метод может быть использован при недостаточном количестве данных ИДК, либо при их отсутствии для прогноза индивидуальных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории.

Ключевые слова: доза внешнего облучения; индивидуальный дозиметрический контроль; индивидуализированная доза; информативный фактор-признак; группа профессиональной занятости; регрессионная модель.

Благодарность. Работа выполнена в рамках НИР по теме «Разработать и внедрить метод оценки и прогноза индивидуализированных накопленных доз облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС и проживающих на радиоактивно загрязненной территории» Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 годы Республики Беларусь, регистрационный № 20240256.

VERIFICATION OF THE METHOD FOR RECONSTRUCTION OF INDIVIDUALIZED EXTERNAL EXPOSURE DOSES TO PERSONS LIVING IN A CONTAMINATED TERRITORY WITH RADIONUCLIDES

D. B. KULIKOVICH^{a,b}, N. G. VLASOVA^c, Yu. V. VISENBERG^a, B. K. KUZNETSOV^a

^a*Gomel State Medical University,
5 Lange Street, Gomel 246000, Belarus*

^b*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Dauhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus*

^c*Republican Research Center for Radiation Medicine and Human Ecology,
290 Il'icha Street, Gomel 246040, Belarus*

Corresponding author: D. B. Kulikovich (dimaproud@mail.ru)

Correct assessment of individual exposure doses to the population is an integral component for conducting radiation epidemiological studies to establish the dose-effect relationship and identify the most exposed groups of the population. At the same time, difficulties in assessing individual external exposure doses arise when there is a lack or absence of individual dosimetric control data. In this regard, the assessment of external exposure doses of persons living in areas contaminated with radionuclides is carried out by reconstructing the latter on the basis of official methodological documents. Due to the over conservative nature of exposure dose reconstruction methods, many of them simply don't correspond to the task of dose individualization, since they only allow estimating average values within a locality, and many lead to significant errors of 300 % or more. Based on the above, we have previously developed and proposed a new method for reconstructing individualized external exposure dose, which allows us to take into account not only the direct factor of dose formation – the surface contamination density by ^{137}Cs , but also «indirect» factors, such as occupation, gender and age of the individual. To assess the adequacy of the method we developed and the possibility of using it to reconstruct individualized external radiation doses we carried out its verification. A research sample was formed based on individual dosimetric control data of residents

of the Mogilev region for 2005 and 2006. The sample was formed taking into account the representativeness by type of occupation of the rural population, by gender and age, which have a statistically justified influence on the formation of the individual external exposure dose. The result of a comparative analysis of reconstructed doses with IDC data showed that for the sample as a whole for each year and for occupational groups, the estimated data and IDC data are completely comparable, the estimation error did not exceed 11 %. Thus, verification of the developed method for reconstructing individual external exposure doses to persons living in a radioactively contaminated area showed that the proposed method can be used when there is insufficient amount of IDC data or, in their absence, to predict individual external exposure doses to persons living in a radioactively contaminated area.

Keywords: external exposure dose; individual dosimetric control; individualized dose; informative factor-sign; occupational group; regression model.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of research work on the topic «Development and implementation of a method for assessing and predicting individualized accumulated radiation doses of persons exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident and living in a radioactively contaminated area» of the State program for eliminating the consequences of the disaster at the Chernobyl accident at 2021–2025 Republic of Belarus. Reg. No. 20240256.

Введение

Надежная оценка эффектов радиационного воздействия на здоровье человека и популяции в целом не может быть получена без знания индивидуальных доз облучения. В связи с этим для изучения исследований медико-биологических последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции необходимо уделять особое внимание реконструкции индивидуализированных доз облучения, поскольку наличие или отсутствие эффектов может быть доказано путем проведения радиационно-эпидемиологических исследований [1]. Для обеспечения проведения такого рода исследований необходимо применять адекватные методические подходы реконструкции доз, поскольку большинство методик базируются исключительно на прямых факторах дозоформирования и не учитывают социально обусловленное поведение индивида, что, в конечном счете, приводит к неоднозначности оценки последней, так как именно индивид и его социально-демографические параметры – «ведущий фактор» дозоформирования [2; 3].

Ранее было статистически обосновано и доказано, что индивидуальная доза внешнего облучения зависит не только от плотности загрязнения радионуклидами территории проживания и жизнедеятельности индивида, но и от профессиональной занятости, пола и возраста индивида в совокупности [4–6].

Индивидуальный дозиметрический контроль (далее – ИДК) – лучший способ получить информацию о дозе облучения людей с точки зрения точности и надежности. Однако на практике сложно собрать данные о дозах облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС за весь послеаварийный период [7–9]. В таких ситуациях реконструкция доз осуществляется с применением соответствующих методик^{1–6}, которые в большинстве случаев являются сверхконсервативными и не соответствуют задаче индивидуализации доз, поскольку ошибки оценочных параметров могут достигать 300 % и более [10; 11].

Вышеизложенное определяет необходимость прогнозной оценки доз с использованием статистического моделирования, в связи с чем был разработан новый метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС [12]. В основе разработанного метода – уравнение, полученное методом множественной линейной регрессии, которое учитывает как прямой фактор дозоформирования – плотность поверхностного загрязнения территории населенного пункта (далее – НП) по ¹³⁷Cs, так и косвенные факторы (профессиональную занятость, пол и возраст индивида).

¹МУ 2.6.1.2004-05. Реконструкция средней (индивидуализированной) накопленной эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году (Дополнение 2 к МУ 2.6.1.579-96). Москва: Роспотребнадзор, 2005. 11 с.

²МУ 2.6.1.579-96. Реконструкция средней накопленной в 1986–2001 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. Москва: Роспотребнадзор; 1996. 8 с.

³Определение годовой суммарной эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов РБ, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС: методические указания. Минск: Минздрав РБ; 1996. 12 с.

⁴Оценка эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения лиц, которые проживают на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС: методические указания. Минск: Минздрав РБ; 2003. 14 с.

⁵Метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения включенных в Государственный регистр лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий. Инструкция по применению: утв. Министерством здравоохранения Республики Беларусь 12.12.2014 г., № 095-0914. Гомель: РНПЦ РМиЭЧ; 2014. 9 с.

⁶МУ 2.6.1.3295-15. Получение индивидуальных накопленных доз с использованием содержащихся в региональной базе данных доз облучения населения: методические указания. Москва: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2015. 21 с.

Цель исследования – провести верификацию разработанного метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования явились «База данных накопленных эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь», рег. свидетельство № 5870900638 от 21.05.2009, «База данных плотности загрязнения территории населенных пунктов Республики Беларусь радионуклидами цезия, стронция и плутония по состоянию на 1986 год», рег. свидетельство № 58709000639 от 20.05.2009.

Верификация метода [12], при разработке которого были использованы данные индивидуального дозиметрического контроля, полученные методом термолюминесцентной дозиметрии жителей Гомельской обл. за период с 1988 по 1995 год, проводилась по сформированной выборке ($n = 225$ чел.) для лиц молодого и среднего возраста по классификации Всемирной организации здравоохранения [13], проживающих в населенных пунктах, находящихся на территории с примерно одинаковым уровнем загрязнения по ^{137}Cs Костюковичского, Краснопольского, Славгородского и Чериковского р-нов Могилевской обл., за 2005 и 2006 годы. Выбор исследуемого временного периода обоснован тем, что для корректного проведения ИДК необходимо соблюдать ряд условий, в том числе и плотность поверхностного загрязнения ^{137}Cs выше 444 кБк/м^2 . В связи с этим не всегда есть возможность выполнения данной трудоемкой процедуры⁷.

Выборка сформирована с учетом представительности по типу профессиональной занятости сельского населения, по полу и возрасту, которые статистически обоснованно оказывают влияние на формирование индивидуальной дозы внешнего облучения [6; 9].

Реконструкция индивидуализированных доз внешнего облучения проводилась по разработанному методу [12] как для каждого индивида за каждый исследуемый год, так и для групп профессиональной занятости в отдельности (далее – ГПЗ) на основе уравнения:

$$E_i^{ext} = K_{reduce_j} \cdot e^{(b_i + [k_{1_i} \cdot \ln(\frac{\sigma}{37})] + [k_{2_i} \cdot G] + [k_{3_i} \cdot A])},$$

где E_i^{ext} – индивидуализированная годовая доза внешнего облучения лица, относящегося к соответствующей i -той группе профессиональной занятости, $\text{мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$ [9] (табл. 1);

K_{reduce_j} – коэффициент снижения дозы внешнего облучения для j -того типа населенного пункта, отн. ед;

b_i – свободный член уравнения регрессии для i -той группы профессиональной занятости, $\text{мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$;

$k_{1_i}, k_{2_i}, k_{3_i}$ – коэффициенты регрессии, соответствующие каждому объясняющему фактору для i -той

группы профессиональной занятости, отн. ед.;

σ – плотность загрязнения территории по ^{137}Cs исследуемого населенного пункта, $\text{кБк} \cdot \text{м}^{-2}$;

G – гендерная принадлежность индивида (используется бинарная классификация: 0 – лица женского пола, 1 – лица мужского пола);

A – возраст индивида, количество полных лет.

Таблица 1

Группы профессиональной занятости

Table 1

Occupational groups

Код группы	Тип занятости в социуме
1*	Дошкольник, школьники младших и старших классов
2*	Инвалид, пенсионер, безработный, домохозяйка
3*	Студент, служащий, военнослужащий, медицинский работник
4*	Водитель, механизатор, животновод, работник сельского хозяйства, рабочий
5*	Полевод
6*	Работник лесхоза

* Результаты апостериорного сравнения групп ($p < 0,05$).

⁷Методика выполнения измерений индивидуальных доз с помощью термолюминесцентного дозиметрического комплекта на основе детекторов А1 О, для решения задач прикладного ИДК: методические рекомендации: ИБФ МЗ СССР, инв. № Б-5454, Москва: ИБФ МЗ СССР, 1991. 28 с.

Выявленные ранее группы профессиональной занятости в сформированной выборке представлены следующим образом: ГПЗ 3 – служащие административного аппарата, дозиметрист, врач, фельдшер, лаборант и санитарка; ГПЗ 4 – агроном, водитель, животновод, зоотехник, рабочий, тракторист, механизатор; ГПЗ 5 – полевод.

Статистическая обработка данных проводилась методами прикладной статистики с использованием *MS Excel* и программного пакета для статистического анализа *Statistica 12.0* (StatSoft, USA). Для данных, распределение которых отлично от нормального, в качестве описательных статистик рассчитывали медиану, нижний и верхний квартили индивидуальной / индивидуализированной дозы внешнего облучения. Сравнение двух выборок осуществляли непараметрическим тестом Вилкоксона (W). Сила линейной корреляционной связи между двумя выборками определялась непараметрическим тестом Спирмена (R) [14]. Уровень значимости принят равным 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведена реконструкция индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на территории Могилевской обл. за 2005 и 2006 годы (данные ИДК предоставлены УЗ «Краснопольский районный ЦГЭ», УЗ «Чериковский районный ЦГЭ», УЗ «Славгородский районный ЦГЭ» и УЗ «Костюковичский районный ЦГЭ») с применением нового методического подхода, который позволяет учесть не только прямой фактор дозоформирования (плотность поверхностного загрязнения территории НП по ^{137}Cs), но и косвенные факторы – профессиональная занятость, пол и возраст индивида. Как было показано ранее [12], учет всех дозоформирующих факторов позволяет не только отойти от консервативных подходов реконструкции доз, но и обеспечивает повышение точности прогноза, снижая ошибки оценки последних.

Для проведения сравнительного анализа реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК были оценены основные параметры распределения индивидуальной дозы внешнего облучения лиц исследовательской выборки (табл. 2).

Таблица 2

Статистические параметры исследовательской выборки по данным ИДК

Table 2

Statistical parameters of the research sample according to IDC data

Параметр	Доза внешнего облучения, мЗв/год		
	По выборке	Лица мужского пола	Лица женского пола
2005 г.			
Медиана	0,26	0,26	0,26
Нижний квартиль	0,23	0,23	0,25
Верхний квартиль	0,30	0,30	0,30
2006 г.			
Медиана	0,21	0,21	0,24
Нижний квартиль	0,20	0,20	0,23
Верхний квартиль	0,28	0,28	0,26

В табл. 3 представлен фрагмент реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения лиц из сформированной выборки и соответствующие им данные ИДК.

Как следует из табл. 3, реконструированные индивидуализированные дозы внешнего облучения фактически не отличаются от данных ИДК: за 2005 г. ошибка оценки составила в среднем ~ 10 % ($W = 2305$; $p = 0,93$), а за 2006 г. ~ 9 % ($W = 2241$; $p = 0,87$), при этом коэффициенты корреляции Спирмена для каждого периода достаточно высоки ($R = 0,78$; $p < 0,0001$) и ($R = 0,86$; $p < 0,0001$) соответственно. Результат корреляционного анализа представлен на рис. 1, 2.

Реконструированные индивидуализированные дозы внешнего облучения

Table 3

Reconstructed individualized external expose doses

№	Год ИДК	Район	Пол	Возраст, лет	Профессия	ГПЗ	Доза внешнего облучения, мЗв/год		Ошибка оценки, %
							Метод*	ИДК	
1	2005	Краснопольский	М	23	Животновод	4	0,21	0,21	2
2	2005	Краснопольский	М	34	Тракторист	4	0,22	0,20	8
3	2005	Краснопольский	М	52	Тракторист	4	0,23	0,24	4
4	2005	Краснопольский	М	58	Водитель	4	0,24	0,20	18
5	2005	Костюковичский	Ж	54	Зав. складом	3	0,22	0,19	18
6	2005	Костюковичский	М	59	Начальник участка	3	0,06	0,05	25
7	2005	Костюковичский	Ж	41	Полевод	5	0,27	0,24	14
8	2005	Костюковичский	М	37	Агроном	4	0,22	0,23	5
9	2005	Костюковичский	М	48	Тракторист	4	0,23	0,21	9
10	2005	Славгородский	Ж	39	Дозиметрист	3	0,27	0,25	9
11	2005	Славгородский	Ж	32	Фельдшер	3	0,27	0,27	1
12	2005	Славгородский	Ж	31	Полевод	5	0,32	0,30	5
13	2005	Славгородский	М	44	Животновод	4	0,32	0,31	4
14	2005	Славгородский	М	57	Зоотехник	4	0,34	0,39	13
15	2005	Чериковский	М	42	Тракторист	4	0,26	0,24	9
16	2005	Чериковский	М	43	Тракторист	4	0,26	0,29	9
17	2005	Чериковский	М	21	Тракторист	4	0,24	0,25	4
18	2005	Чериковский	М	24	Тракторист	4	0,24	0,26	6
19	2006	Краснопольский	М	24	Тракторист	4	0,20	0,19	7
20	2006	Краснопольский	М	46	Водитель	4	0,22	0,20	9
21	2006	Краснопольский	М	46	Механизатор	4	0,22	0,20	11
22	2006	Краснопольский	Ж	36	Животновод	4	0,21	0,19	10
23	2006	Краснопольский	Ж	48	Животновод	4	0,22	0,20	9
24	2006	Костюковичский	Ж	35	Полевод	5	0,26	0,24	8
25	2006	Костюковичский	Ж	55	Зав. складом	3	0,22	0,20	10
26	2006	Костюковичский	М	40	Агроном	4	0,22	0,20	9
27	2006	Костюковичский	М	39	Водитель	4	0,22	0,20	9
28	2006	Славгородский	Ж	44	Полевод	5	0,34	0,34	2
29	2006	Славгородский	Ж	54	Санитарка	3	0,28	0,26	7
30	2006	Славгородский	М	39	Тракторист	4	0,31	0,30	4
31	2006	Славгородский	М	45	Животновод	4	0,32	0,30	7
32	2006	Чериковский	М	34	Полевод	5	0,26	0,24	10
33	2006	Чериковский	М	23	Полевод	5	0,25	0,24	4
34	2006	Чериковский	М	22	Тракторист	4	0,24	0,21	14
35	2006	Чериковский	М	28	Тракторист	4	0,24	0,22	11
36	2006	Чериковский	М	37	Тракторист	4	0,25	0,23	10

*Для удобства восприятия реконструированные индивидуализированные дозы внешнего облучения представлены с точностью до сотых.

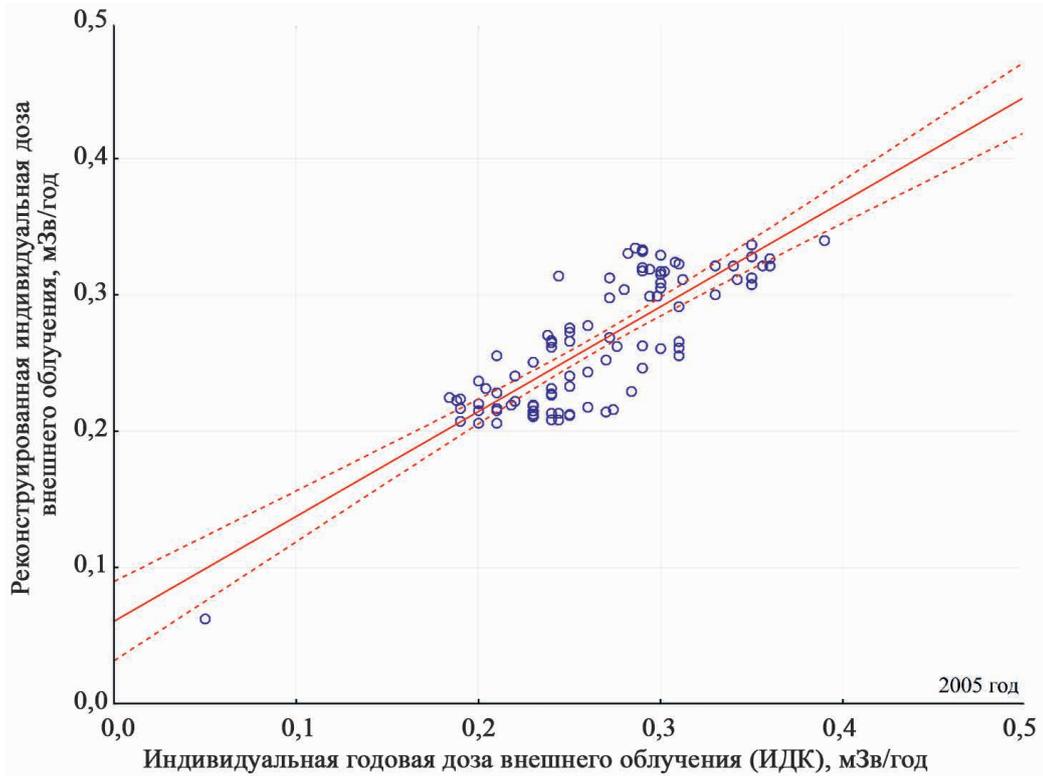


Рис. 1. Результат корреляционного анализа реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК (2005 г.)

Fig. 1. The result of correlation analysis of the reconstructed of individualized external exposure doses with IDC-data (2005)

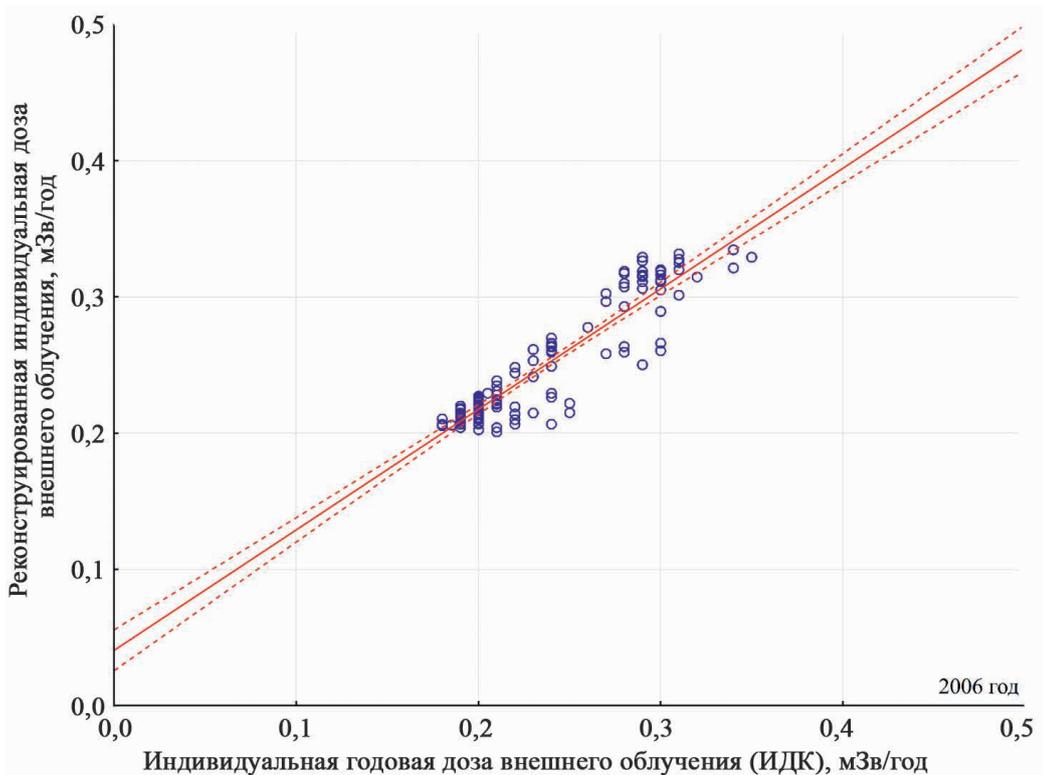


Рис. 2. Результат корреляционного анализа реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК (2006 г.)

Fig. 2. The result of correlation analysis of the reconstructed of individualized external exposure doses with IDC-data (2006)

Далее были оценены параметры распределения индивидуальной дозы внешнего облучения в группах профессиональной занятости по данным ИДК и проведен сравнительный анализ реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения в соответствующих группах профессиональной занятости по сформированной выборке. Результат сравнительного анализа представлен в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительный анализа параметров распределения реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения по группам профессиональной занятости с данными ИДК

Table 4

Comparative analysis of the distribution parameters of reconstructed individualized external exposure doses by occupational groups with IDC data

Параметр	Реконструированная доза внешнего облучения в группах профессиональной занятости, мЗв/год**					
	ГПЗ 3		ГПЗ 4		ГПЗ 5	
	Метод	ИДК	Метод	ИДК	Метод	ИДК
2005 г.						
Медиана	0,27	0,25	0,25	0,27	0,27	0,29
Нижний квартиль	0,24	0,21	0,22	0,23	0,26	0,24
Верхний квартиль	0,27	0,26	0,31	0,30	0,30	0,31
Коэффициент корреляции Спирмена (R) *	0,77		0,72		0,72	
Ошибка оценки, %	~ 11		~ 10		~ 9	
2006 г.						
Медиана	0,27	0,24	0,22	0,21	0,26	0,24
Нижний квартиль	0,26	0,23	0,21	0,20	0,26	0,24
Верхний квартиль	0,27	0,25	0,30	0,28	0,29	0,30
Коэффициент корреляции Спирмена (R) *	0,79		0,83		0,85	
Ошибка оценки, %	~ 11		~ 9		~ 6	

* $p < 0,05$;

** для удобства восприятия реконструированные индивидуализированные дозы внешнего облучения представлены с точностью до сотых.

Как следует из табл. 4, согласованность реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК в группах профессиональной занятости также находится на высоком уровне, о чем свидетельствуют коэффициенты корреляции Спирмена. При этом ошибка оценки сохранилась на том же уровне, что и для выборки в целом.

Проведенная верификация свидетельствует об адекватности выбранного метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения. Адекватность метода обеспечена учетом информативных фактор-признаков (профессиональная занятость, пол и возраст индивида). Это позволяет корректно, с достаточно высокой точностью оценить индивидуализированные дозы внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории.

Заключение

Проведена верификация метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории, в отдаленном периоде после аварии на ЧАЭС.

По результатам сравнительного анализа реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК было установлено, что между рассчитанными дозами и данными ИДК, как для всей выборки, так и для групп профессиональной занятости наблюдается высокая корреляционная связь, при этом ошибка оценки не превышает ~11 %.

Таким образом, разработанный метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории, может быть использован при

недостаточном количестве данных ИДК, либо при их отсутствии. Он позволит прогнозировать индивидуальные дозы внешнего облучения для проведения радиационно-эпидемиологических исследований по выявлению наиболее облучаемых групп населения для оказания им в дальнейшем специализированной медицинской помощи.

Библиографические ссылки

1. Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes (Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group «Health»). Geneva: WHO Press; 2006. 182 p. <https://www.who.int/publications/i/item/9241594179>
2. Skryabin AM, Savkin MN, Grinev M, Robinson CA, Prosser SL, Jones KA. Distribution of doses received in rural areas affected by the Chernobyl accident. *Didcot: National Radiological Protection Board*; 1995. 52 p.
3. Allen PT, Archangelskaya GV, Belyaev ST, Demin VF, Drottz-Sjoberg BM, Hedemann-Jenson P. Optimization of health protection of the public following a major nuclear accident: interaction between radiation protection and social and psychological factors. *Health Physics*. 1996;71(5):763–765. DOI: 10.1097/00004032-199611000-00019
4. Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Biophysics*. 2002;41(10):185–193. DOI: 10.1007/s00411-002-0167-2
5. Vlasova NG, Rozhko AV, Visenberg YuV, Drozd EA. Dose Assessment in Population Living on Contaminated Territories at the Remote Period after the Chernobyl Accident. In: International Conference on Global Emergency Preparedness and Response. International Atomic Energy Agency (IAEA). Book of Synopses. IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 19–23 October 2015. Reference No: CN-213. 2015;250–255.
6. Куликович ДБ, Власова НГ. Выявление однородных по дозе внешнего облучения групп жителей загрязненных территорий по совокупности информативных фактор-признаков. *Проблемы здоровья и экологии*. 2023;20(1):123–130. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2023-20-1-15>.
7. Матарас АН, Эвентова ЛН, Висенберг ЮВ, Власова НГ. Методический подход оценки индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на ЧАЭС. *Проблемы здоровья и экологии*. 2014;40(2):91–96. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19>.
8. Muller H, Prohl G. Ecosys-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents. *Health Physics*. 1993;63(3):232–252. DOI: 10.1097/00004032-199303000-00002.
9. Куликович ДБ, Власова НГ. Статистический анализ факторов, оказывающих влияние на формирование дозы внешнего облучения. *Проблемы здоровья и экологии*. 2022;19(3):99–105. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14>
10. International Atomic Energy Agency. Working papers of the TC project RER/9/074 «Radiation monitoring of public exposure in the remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant». Vienna: IAEA; 2007.
11. Likhtariov I, Kovgan L, Novak D, Vavilov S, Jacob P, Paretzke HG. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. *Health Physics*. 1996;70(1):87–98. DOI: 10.1097/00004032-199601000-00013.
12. Куликович ДБ, Власова НГ, Висенберг ЮВ, Кузнецов БК. Метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории вследствие аварии на ЧАЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;1:46–57. DOI: <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-46-57>.
13. Козлова ОА, Секички-Павленко ОО. Теоретические основания определения возрастных границ и возрастной структуры населения в контексте демографического старения. *AlterEconomics*. 2022;19(3):442–463. DOI: <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2022.19-3.3>
14. Мастицкий СЭ, Шитиков ВК. *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва: ДМК Пресс; 2015. 496 с.

References

1. Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes (Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group «Health»). Geneva: WHO Press; 2006. 182 p. <https://www.who.int/publications/i/item/9241594179>
2. Skryabin AM, Savkin MN, Grinev M, Robinson CA, Prosser SL, Jones KA. Distribution of doses received in rural areas affected by the Chernobyl accident. *Didcot: National Radiological Protection Board*; 1995. 52 p.
3. Allen PT, Archangelskaya GV, Belyaev ST, Demin VF, Drottz-Sjoberg BM, Hedemann-Jenson P. Optimization of health protection of the public following a major nuclear accident: interaction between radiation protection and social and psychological factors. *Health Physics*. 1996;71(5):763–765. DOI: 10.1097/00004032-199611000-00019
4. Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Biophysics*. 2002;41(10):185–193. DOI: 10.1007/s00411-002-0167-2
5. Vlasova NG, Rozhko AV, Visenberg YuV, Drozd EA. Dose Assessment in Population Living on Contaminated Territories at the Remote Period after the Chernobyl Accident. In: International Conference on Global Emergency Preparedness and Response. International Atomic Energy Agency (IAEA). Book of Synopses. IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 19–23 October 2015. Reference No: CN-213. 2015;250–255.
6. Kulikovich DB, Vlasova NG. *Vyyavlenie odnorodnyh po doze vneshnego oblucheniya grupp zhitelej zagryaznennyh territorij po sovokupnosti informativnyh faktor-priznakov* [Identification of groups of residents in contaminated territories homogeneous in the external exposure dose by a set of informative factors-signs]. *Health and Ecology Issues*. 2023;20(1):123–130. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2023-20-1-15>. Russian.
7. Mataras AN, Eventova LN, Visenberg YuV, Vlasova NG. *Metodicheskij podhod ocenki individualizirovannyh doz vneshnego oblucheniya lic, podvergsihshysya vozdeystviyu radiacii vsledstvie katastrofy na CHAES* [Methodological approach to the assessment of individualized external dose in people affected after the Chernobyl accident]. *Health and Ecology Issues*. 2014;40(2):91–96. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19>. Russian.
8. Muller H, Prohl G. Ecosys-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents. *Health Physics*. 1993;63(3):232–252. DOI: 10.1097/00004032-199303000-00002.

9. Kulikovich DB, Vlasova NG. *Statisticheskij analiz faktorov, okazyvayushchih vliyanie na formirovanie dozy vneshnego oblucheniya* [Statistical analysis of factors contributing to the formation of the external exposure dose]. *Health and Ecology*. 2022;19(3):99–105. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14>. Russian.

10. International Atomic Energy Agency. Working papers of the TC project RER/9/074 «Radiation monitoring of public exposure in the remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant». Vienna: IAEA; 2007.

11. Likhtariov I, Kovgan L, Novak D, Vavilov S, Jacob P, Paretzke HG. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. *Health Physics*. 1996;70(1):87–98. DOI: 10.1097/00004032-199601000-00013.

12. Kulikovich DB, Vlasova NG, Visenberg YuV, Kuznetsov BK. *Metod rekonstrukcii individualizirovannyh doz vneshnego oblucheniya lic, prozhivayushchih na zagryaznennoy radionuklidami territorii vsledstvie avarii na ChAJeS* [Method for reconstructing individualized external exposure dose of persons living in a contaminated area with radionuclides as a result of the Chernobyl accident]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;1:46–57. DOI: <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-46-57>. Russian.

13. Kozlova OA, Sekicki-Pavlenko OO. *Teoreticheskie osnovaniya opredeleniya vozrastnyh granic i vozrastnoj struktury naseleniya v kontekste demograficheskogo starenija* [Theoretical grounds for determining age boundaries and age structure of the population in the context of demographic aging]. *AlterEconomics*. 2022;19(3):442–463. DOI: <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2022.19-3.3>. Russian.

14. Masticzkij SE, Shitikov VK. *Statisticheskij analiz i vizualizaciya dannyh s pomoshch'yu R* [Statistical analysis and Data visualization using R]. Moscow: DMK Press; 2015. 496 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 28.05.2024.
Received by editorial board 28.05.2024.