

УДК 535.231.16:614.876

МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННЫХ ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЛИЦ, ПРОЖИВАЮЩИХ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИИ ВСЛЕДСТВИЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

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

Оценка индивидуальных / индивидуализированных накопленных доз облучения необходима для решения задач по установлению зависимости «доза – эффект» и оценки радиационного риска, выявления наиболее облучаемых групп населения с целью оказания им адресной медицинской помощи. Надежная информация о дозах внешнего облучения населения может быть получена на основе данных индивидуального дозиметрического контроля, но применение этого метода на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению, является довольно трудоемкой задачей. При недостатке или отсутствии этих данных корректная оценка накопленной дозы может быть выполнена на основании прогнозных оценок по методическим рекомендациям, однако существующие методы оценки индивидуализированных доз облучения сверхконсервативны, поскольку они позволяют рассчитать только среднегрупповые (средневозрастные) дозы облучения. Данные методы не соответствуют задаче индивидуализации доз. Это определяет актуальность разработки адекватного методического подхода оценки индивидуализированных накопленных с момента аварии доз внешнего облучения. Исследовательская выборка была сформирована из имеющихся данных индивидуального дозиметрического контроля жителей Гомельской обл. за 1988–1995 гг. В результате проведенного исследования статистически обоснованы положения, вносящие вклад в расширение представлений о закономерностях формирования доз внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях. Установлена зависимость индивидуальных доз внешнего облучения от демографических и социальных характеристик индивида. Разработан метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения, основа которого – статистическая модель множественной линейной регрессии. Целевой фактор модели – индивидуальная годовая доза внешнего облучения; объясняющие факторы – плотность загрязнения территории населенного пункта по ^{137}Cs , профессиональная занятость и демографические характеристики индивида. По результатам верификации модели ошибка оценки составила ~10 %, при этом позволяя учесть косвенный фактор – профессиональную занятость индивида.

Образец цитирования:

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.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-46-57>

For citation:

Kulikovich DB, Vlasova NG, Visenberg YuV, Kuznetsov BK. 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. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-46-57>

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 of 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

Разработанный метод позволяет с высокой точностью рассчитать индивидуализированные годовые дозы внешнего облучения при недостатке или отсутствии данных индивидуального дозиметрического контроля. Рассчитанные таким образом индивидуализированные накопленные дозы внешнего облучения, наряду с индивидуализированными накопленными дозами внутреннего облучения, будут использованы в радиационно-эпидемиологических исследованиях для установления зависимости «доза – эффект» и оценки радиационных рисков.

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

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 гг. Республики Беларусь, регистрационный № 20240256.

METHOD FOR RECONSTRUCTING INDIVIDUALIZED EXTERNAL EXPOSURE DOSE OF PERSONS LIVING IN A CONTAMINATED AREA WITH RADIONUCLIDES AS A RESULT OF THE CHERNOBYL ACCIDENT

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

^aGomel State Medical University,

5 Lange Street, Gomel 246000, Belarus

^bInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,

23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^cRepublican Research Center for Radiation Medicine and Human Ecology,

290 Il'icha Street, Gomel 246040, Belarus

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

Dose (individual / individualized) assessment is necessary to solve problems of establishing the «dose – effect» relationship and assessing radiation risk, recognizing the most exposed groups of the population in order to provide them medical care. Reliable information on external exposure doses to the population can be obtained on the basis of individual dosimetric control data, however, the use of this method in areas subject to radioactive contamination is a rather labor-intensive problem. If this data is insufficient or no, a correct assessment of the accumulated dose can be made on the basis of forecast estimates according to guidelines; however, existing guidelines for assessing individualized external exposure doses are over-conservative: at best, they allow the calculation of average group (average age) exposure doses. These methods don't in any way correspond to the task of dose individualization. This determines the relevance of developing an adequate methodological approach to assessing individualized external exposure doses accumulated since the Chernobyl accident. The research sample was formed on the basis of the individual dosimetric control data of residents of the Gomel region for the period from 1988 to 1995. As a result of the research, provisions were statistically substantiated that contribute to expanding the understanding of the patterns of formation of external exposure doses for the population living in contaminated areas with radionuclides. The dependence of individual external exposure doses on the demographic and social characteristics of the individual has been established. A method of reconstruction of individualized external exposure doses has been developed, the basis of which is a statistical model of multiple linear regression. The target factor of the model is the individual annual external exposure dose; explanatory factors are: the contamination density with ¹³⁷Cs of the territory of a populated area, occupational employment and demographic characteristics of the individual. The model was verified using a generated control sample. The estimation error was ~10 %. But additionally takes into account the indirect factor – the individual's occupational employment. The developed method makes it possible to calculate with high accuracy individualized annual external exposure doses in the lack of individual dosimetry control data. The individualized accumulated external exposure doses of calculated in this way, along with the individualized accumulated internal exposure doses, will be used in radiation epidemiological researches to establish the «dose – effect» relationship and assess radiation risks.

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, No. 20240256.

Введение

Неотъемлемой составляющей для проведения радиационно-эпидемиологических исследований по установлению зависимости «доза – эффект» являются индивидуальные накопленные с момента аварии на ЧАЭС дозы облучения [1; 2], оценка которых – одна из наиболее актуальных и сложных проблем дозиметрии и радиобиологии, которая может быть решена путем исследования закономерностей формирования индивидуальных доз облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненной территории.

Доза внешнего облучения жителей населенного пункта непосредственно определяется прямым фактором дозообразования: уровнем плотности загрязнения территории в ареале населенного пункта, кроме того, индивидуальная доза внешнего облучения зависит от косвенных факторов: социально-демографических характеристик жителей [3].

Следовательно, ведущим фактором дозоформирования является сам человек: его личностные характеристики, гендерная принадлежность, возраст, сфера занятости, уровень образования, которые непосредственно определяют его поведение в социуме [3; 4]. Таким образом, индивидуальная доза внешнего облучения зависит не только от плотности загрязнения радионуклидами территории проживания и жизнедеятельности индивида, но и от его социально-обусловленного поведения [5–7].

Надежная информация о дозах внешнего облучения населения может быть получена на основе данных индивидуального дозиметрического контроля (далее – ИДК), однако применение этого метода на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению, является довольно трудоемкой задачей, требующей значительных финансовых, физических и временных затрат. Как следствие, сформированные базы данных ИДК носят ограниченный характер, которых недостаточно для проведения радиационно-эпидемиологических исследований [8–10]. С другой стороны, применение существующих методик оценки индивидуализированных доз внешнего облучения не целесообразно, поскольку они сверхконсервативны и не соответствуют задаче индивидуализации доз облучения, так как в их основе лежат прямые дозообразующие факторы, которые представлены в виде усредненных констант, и только для наиболее облучаемых групп населения¹⁻⁴.

Полученные эмпирическим путем, эти параметры имеют большой разброс, так как усредняют широкий спектр факторов, формирующих дозу облучения, встречающихся в реальной жизни, что приводит к большой неопределенности оценок [11; 12].

Метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения (в части доз внешнего облучения)⁵ – более прогрессивен по отношению к предыдущим методам, при этом ошибка оценки достаточно высока, и в тоже время в нем не учтен косвенный фактор – профессиональная занятость, отсюда вышеизложенное определяет актуальность разработки нового метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения.

Цель исследования: разработать метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения на основе выявленных закономерностей дозоформирования у лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории.

Материалы и методы исследования

Данные об инструментально полученных индивидуальных дозах внешнего облучения более 35 000 жителей Гомельской обл. (представительность обследованных лиц по гендерному признаку приблизительно одинаковая) явились основой нашего исследования методом ИДК («База данных индивидуально-дозиметрического контроля жителей Гомельской обл. Беларуси», регистрационное свидетельство № 5871404082 от 10.06.2014); «База данных плотности загрязнения территории населенных пунктов

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, 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, 1996. 8 с.

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

⁴Методические указания. Оценка эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения лиц, которые проживают на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС. Минск, 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, утвержденная Министерством здравоохранения Республики Беларусь 12 декабря 2014 г., № 095-0914. Гомель, 2014. 9 с.

Республики Беларусь радионуклидами цезия, стронция и плутония по состоянию на 1986 год», регистрационное свидетельство № 58709000639 от 20.05.2009.

ИДК был проведен методом термолюминесцентной дозиметрии (ТЛ-измерения) на основе Al O (ТЛД-500) по метрологически аттестованной методике измерений индивидуальных доз⁶ сотрудниками Гомельского областного центра гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья, а также сотрудниками ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России за период 1988–1995 гг. Средства измерения соответствовали требованиям к нижней границе рабочего диапазона на территориях как со средними, так и с низкими плотностями загрязнения [10].

С жителями населенных пунктов был проведен инструктаж о правилах эксплуатации дозиметров, задача которых осуществлялась с учетом представительности по типу занятости населения. Срок ношения дозиметра составлял в среднем один месяц.

После сбора дозиметров осуществлялось их измерение одновременно с фоновыми партиями. Полученные результаты заносились в базу данных и в дальнейшем обрабатывались по специальной программе.

В предыдущих исследованиях [7; 10] были выявлены информативные фактор-признаки, которые статистически обоснованно в совокупности оказывают влияние на формирование индивидуальной дозы внешнего облучения: профессиональная занятость и гендерно-возрастные особенности индивида. Таким образом, ранее было классифицировано 6 групп объединенных профессий по типу занятости населения (группа профессиональной занятости), которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Группы профессиональной занятости

Table 1

Occupational groups

Группа	Тип занятости
1*	Дети: дошкольники, школьники младших и старших классов
2*	Инвалиды, пенсионеры, безработные и домохозяйки
3*	Студенты, служащие, военнослужащие, медицинские работники
4*	Водители и механизаторы, животноводы, работники сельского хозяйства, рабочие
5*	Полеводы
6*	Работники лесхозов

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

Для построения модели оценки индивидуализированной дозы внешнего облучения применен метод прикладной статистики – множественная линейная регрессия. Оценка соответствия распределения исследуемых данных модели нормальному распределению проводилась тестом Колмогорова – Смирнова (d). Для количественных данных, распределение которых отлично от нормального, в качестве описательных статистик рассчитывались медиана и квартили распределения дозы внешнего облучения (Me (Q1;Q3)). Сравнение двух зависимых выборок осуществляли непараметрическим тестом Вилкоксона (W). Для сравнения двух независимых выборок применяли непараметрический тест Манна – Уитни (U). Сравнение нескольких групп осуществляли ранговым критерием Краскела – Уоллиса (H) с последующим апостериорным сравнением (поправка Бонферрони). Сила линейной корреляционной связи между двумя выборками определялась непараметрическим тестом Тау-Кендалла (τ). Уравнения для оценки индивидуализированной дозы внешнего облучения для каждой группы профессиональной занятости (с учетом социальных и демографических факторов) были получены методом множественной линейной регрессии с последующей проверкой типа распределения регрессионных остатков. Доверительный интервал реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения для групп профессиональной занятости рассчитывали для t -распределения Стьюдента [95 % ДИ: среднее – ($t_{0,05} \times$ ст. ош. среднего); среднее + ($t_{0,05} \times$ ст. ош. среднего)].

⁶Методика выполнения измерений индивидуальных доз с помощью термолюминесцентного дозиметрического комплекта на основе детекторов Al O, для решения задач прикладного ИДК: методические рекомендации. Б-5454. ИБФ МЗ СССР. Москва, 1991. 28 с.

Уровень значимости принят равным 0,05. Статистическая обработка данных проводилась с использованием *MS Excel* и программного пакета для статистического анализа *Statistica 12.0* (*StatSoft*, USA).

Результаты исследования и их обсуждение

Основой метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории, явились выявленные ранее информативные фактор-признаки и модель множественной линейной регрессии. Обучающая выборка сформирована из репрезентативных данных об индивидуальных дозах внешнего облучения за период с 1988 по 1992 гг. Целевой фактор-признак – индивидуальная годовая доза внешнего облучения лиц, вошедших в группы профессиональной занятости (далее – ГПЗ), которые представлены в табл. 1. В качестве объясняющих факторов-признаков были использованы: плотность загрязнения территории (σ) по ^{137}Cs исследуемого населенного пункта (далее – НП), $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$; гендерная принадлежность (G) индивида (используется бинарная классификация: 0 – женщины, 1 – мужчины); возраст (A), количество полных лет.

Для обеспечения адекватности регрессионной модели и сохранности ее эффективности путем снижения вероятности появления выбросов, которые негативно могут сказаться на работе модели в целом, годовая индивидуальная доза внешнего облучения и плотность загрязнения НП были представлены как логарифмы входной величины – универсальное семейство преобразований Бокса – Кокса [13].

Таким образом, модель множественной линейной регрессии имеет вид:

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

где E_i^{ext} – индивидуальная годовая доза внешнего облучения лица, относящегося к соответствующей i -той группе профессиональной занятости, $\text{мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$; b_i – свободный член уравнения регрессии для i -той группы профессиональной занятости, $\text{мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$; k_{1i}, k_{2i}, k_{3i} – коэффициенты регрессии, соответствующие каждому объясняющему фактору для i -той группы профессиональной занятости, отн. ед.

Параметры модели множественной линейной регрессии для каждой группы профессиональной занятости представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры уравнения регрессии для групп профессиональной занятости

Table 2

Parameters of the regression equation for occupational groups

ГПЗ	b	$k_1(\sigma)$	$k_2(G)$	$k_3(A)$	R^2_{adj}	F
1*	−0,248***	0,294***	0,019***	0,043***	0,737	1760
2*	−0,432***	0,649***	0,019*	−0,001	0,741	2296
3*	−0,169***	0,498***	0,103***	0,002***	0,732	1297
4*	−0,197***	0,538***	0,029***	0,004***	0,710	3832
5*	−0,082	0,491***	−0,006	0,005***	0,743	442
6*	1,054***	0,115***	0,032	0,004***	0,743	85

* – уровень значимости регрессионной модели ($p < 0,0001$);
* $p < 0,05$, ** $p < 0,001$, *** $p < 0,0001$ – соответствующие уровни значимости для коэффициентов в уравнении множественной линейной регрессии.

Как следует из табл. 2, скорректированные коэффициенты детерминации (R^2_{adj}) показывают высокую степень адекватности регрессионной модели для каждой группы профессиональной занятости. При этом стоит отметить высокую значимость предикторов полученных уравнений регрессии для каждой группы в целом.

Для оценки адекватности модели дополнительно был проведен анализ распределения регрессионных остатков [13] для каждой группы профессиональной занятости, которые соответствуют нормальному распределению, о чем свидетельствуют результаты тестов Колмогорова – Смирнова, представленные на рис. 1.

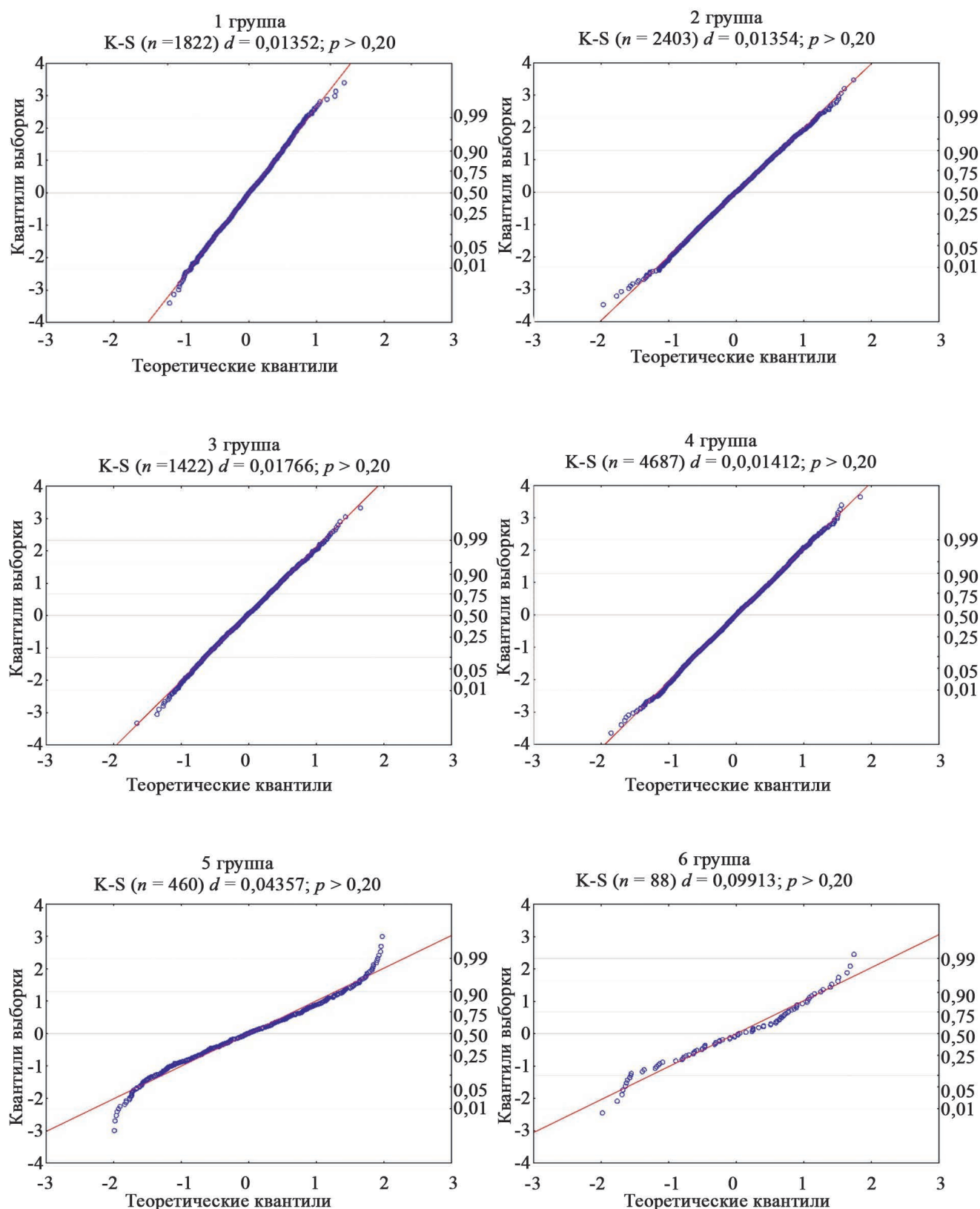


Рис. 1. Распределение остатков для групп профессиональной занятости

Fig. 1. Q-Q residuals plots for occupational groups

Физический распад, миграция радионуклидов, а также комплекс проведенных противорадиационных мероприятий обеспечивают снижение дозы внешнего облучения со временем (рис. 2).

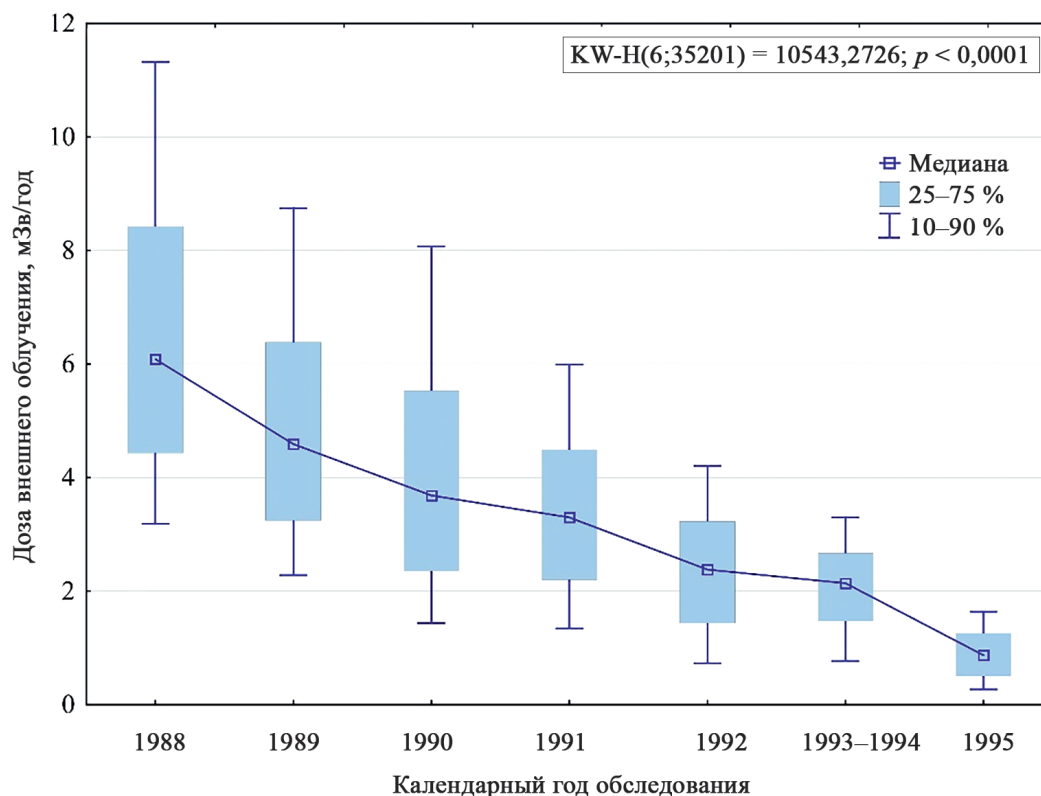


Рис. 2. Динамика дозы внешнего облучения за исследуемый период

Fig. 2. Dynamics of external exposure dose over the research period

Данные о дозах внешнего облучения за 1993–1994 гг. были объединены в одну выборку, поскольку за этот временной промежуток не было выявлено значимых различий в значениях дозы внешнего облучения ($U = 7,2 \cdot 10^4$; $p = 0,146$). Поскольку разработанная модель относится к конкретному году, а интерес представляет оценка индивидуализированных доз внешнего облучения за каждый год послеаварийного периода, то необходимо было предусмотреть дополнительный параметр модели, позволяющий ее применение для любого периода. С этой целью был рассчитан коэффициент, характеризующий снижение дозы внешнего облучения, значения которого были получены по результатам статистического анализа данных, содержащихся в Каталогах средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Беларуси за 1992, 2004, 2009, 2015 и 2020 годы, а также о годовых эффективных дозах внешнего облучения выборочных наиболее представительных населенных пунктов разного типа и условий формирования дозы внешнего облучения.

Коэффициент снижения (K_{reduce}) был рассчитан как отношение среднего значения дозы внешнего облучения текущего года к предшествующему.

$$K_{reduce_j} = \frac{\overline{E}_j^{ext}}{\overline{E}_{j-1}^{ext}}, \quad (2)$$

где K_{reduce_j} – коэффициент снижения дозы внешнего облучения для j -того типа НП, отн. ед; $\overline{E}_j^{ext}$ – средняя годовая доза внешнего облучения текущего года, мЗв·год⁻¹; $\overline{E}_{j-1}^{ext}$ – средняя годовая доза внешнего облучения предшествующего года, мЗв·год⁻¹.

Рассчитанные коэффициенты снижения дозы внешнего облучения в зависимости от типа НП представлены в табл. 3.

Сравнительный анализ рассчитанных доз внешнего облучения с учетом полученного коэффициента с данными ИДК был проведен на исследуемой выборке за период с 1988 по 1995 гг. и представлен на рис. 3.

Сравнительный анализ показал, что рассчитанные значения дозы внешнего облучения на основе коэффициента имеют сильную корреляционную связь ($\tau = 0,9987$; $p = 0,0016$) с данными ИДК за исследуемый период, при этом отклонение рассчитанных значений дозы внешнего облучения от данных ИДК лежит в интервале $\pm 9\%$ ($W = 10$; $p = 0,50$).

Таблица 3

Коэффициенты снижения дозы внешнего облучения

Table 3

Reduction coefficients of external exposure dose

Период	Значение коэффициента K_{reduce} отн. ед.		
	Город	Поселок городского типа	Сельский населенный пункт
1986*	0,576	1,080	1,800
1987–1988*	0,400	0,750	1,250
1989–1994	0,229	0,429	0,614
1995–1997	0,100	0,188	0,313
1998–1999	0,050	0,094	0,156
2000–2004	0,067	0,125	0,208
2005–2009	0,040	0,075	0,125
2010–2015	0,033	0,063	0,104
2016–2020	0,022	0,042	0,069
2021–2030	0,018	0,034	0,057
2031–2041	0,017	0,031	0,052

* – Для 1986 г. коэффициент был получен путем экстраполяции по методическим рекомендациям 1991 г. «Методические основы прогноза уровней облучения населения от радионуклидов цезия при постоянном проживании на территориях, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС».

* – Для детей в возрасте до 18 лет с 1988 по 1995 г., вне зависимости от типа НП, коэффициент принят 0,17 при $\sigma < 12 \text{ Ки} \cdot \text{км}^{-2}$.

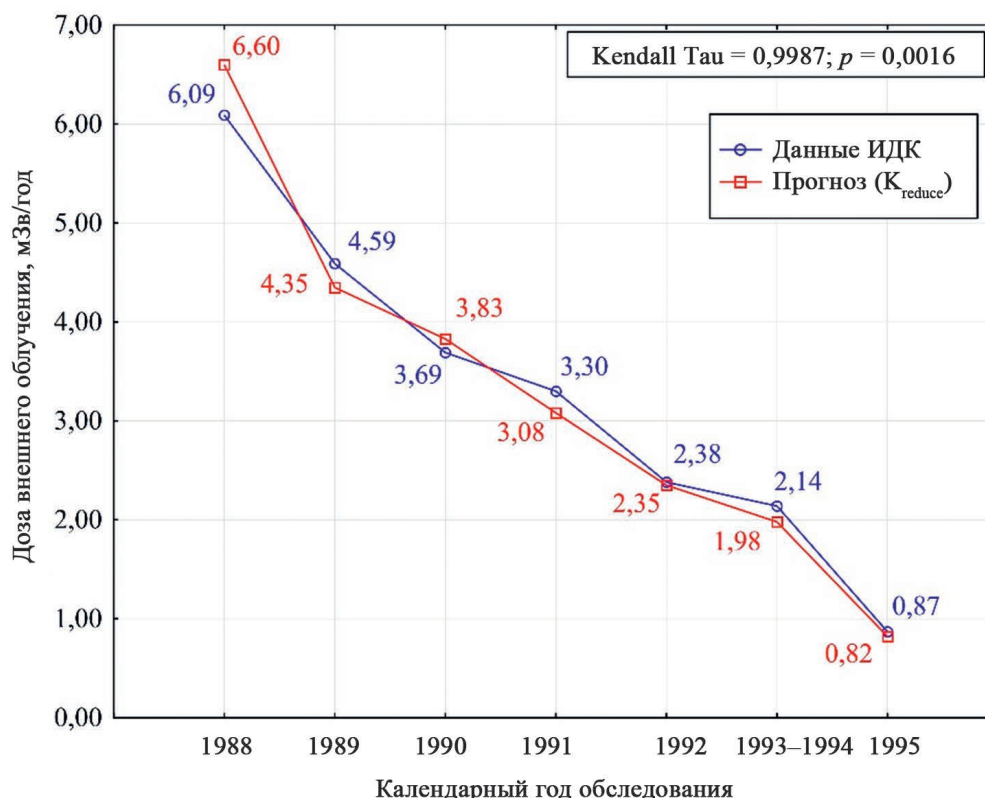


Рис. 3. Сравнение рассчитанных (с учетом коэффициента снижения) доз внешнего облучения с данными ИДК

Fig. 3. Comparison of calculated external exposure doses (taking into account the reduction factor) with IDC data

Таким образом, модель оценки индивидуализированной дозы внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории, учитывающая их социально обусловленное поведение и демографические факторы, может быть представлена в виде уравнения:

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

Для проведения верификации модели была сформирована контрольная выборка из данных ИДК, не вошедших в обучающую выборку, то есть с 1993 по 1995 г.

Был проведен расчет индивидуализированных доз внешнего облучения для лиц, входящих в соответствующие группы профессиональной занятости.

Верификация модели для выбранных случайным образом индивидуальных доз внешнего облучения из контрольной выборки (рис. 4) показала, что модельные оценки и данные ИДК практически не различимы ($W = 189,50$; $p = 0,76$), ошибка оценки модели составила в среднем $\pm 11\%$ ($\tau = 0,9966$; $p < 0,0001$).

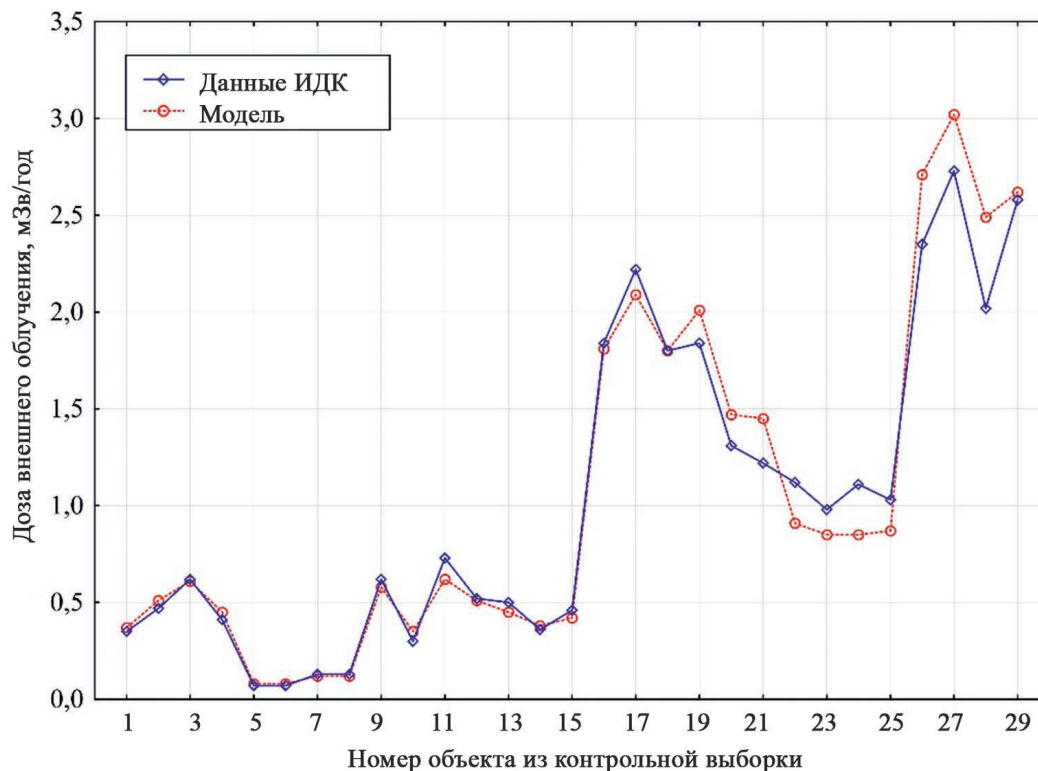


Рис. 4. Сравнение прогнозных оценок модели с данными ИДК
(для выбранных случайным образом объектов из контрольной выборки)

Fig. 4. Comparison of model forecast estimates with IDC data (for randomly selected objects from the control sample)

Аналогично была проведена верификация модельных оценок индивидуализированной дозы внешнего облучения для каждой группы профессиональной занятости в отдельности. Сравнительный анализ модельных индивидуализированных доз внешнего облучения для ГПЗ с данными ИДК также показал, что между ними отсутствуют статистически значимые различия ($W = 9,00$; $p = 0,75$), сильная корреляционная связь ($\tau = 0,9989$; $p < 0,005$), при этом ошибка оценки модели, как и ожидалось, снизилась до $\pm 5\%$ (рис. 5).

Для оценки преимущества разработанного метода перед существующей методикой, принятой в 2014 г. в Республике Беларусь⁷, был проведен сравнительный анализ рассчитанных доз внешнего облучения по двум методам с данными ИДК (рис. 6).

Сравнительный анализ методов оценки индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК, выбранных случайным образом из контрольной выборки, показал статистически значимые различия между данными, рассчитанными по предложенной модели и действующей методике ($W = 73$; $p = 0,0018$). При этом наблюдается сильная корреляционная связь рассчитанных доз по разработанной модели с данными ИДК ($\tau = 0,93$; $p < 0,0001$), а между дозами, рассчитанными по методике 2014 г., и данными ИДК корреляционная связь слабее ($\tau = 0,48$; $p < 0,001$). Ошибка оценки разработанной модели составила $\sim$ в среднем 11% , а ошибка методики, применяемой в Республике Беларусь $\sim 40\%$.

⁷Метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения включенных в Государственный регистр лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий: инструкция по применению, утвержденная Министерством здравоохранения Республики Беларусь 12 декабря 2014 г., № 095-0914. Гомель, 2014. 9 с.

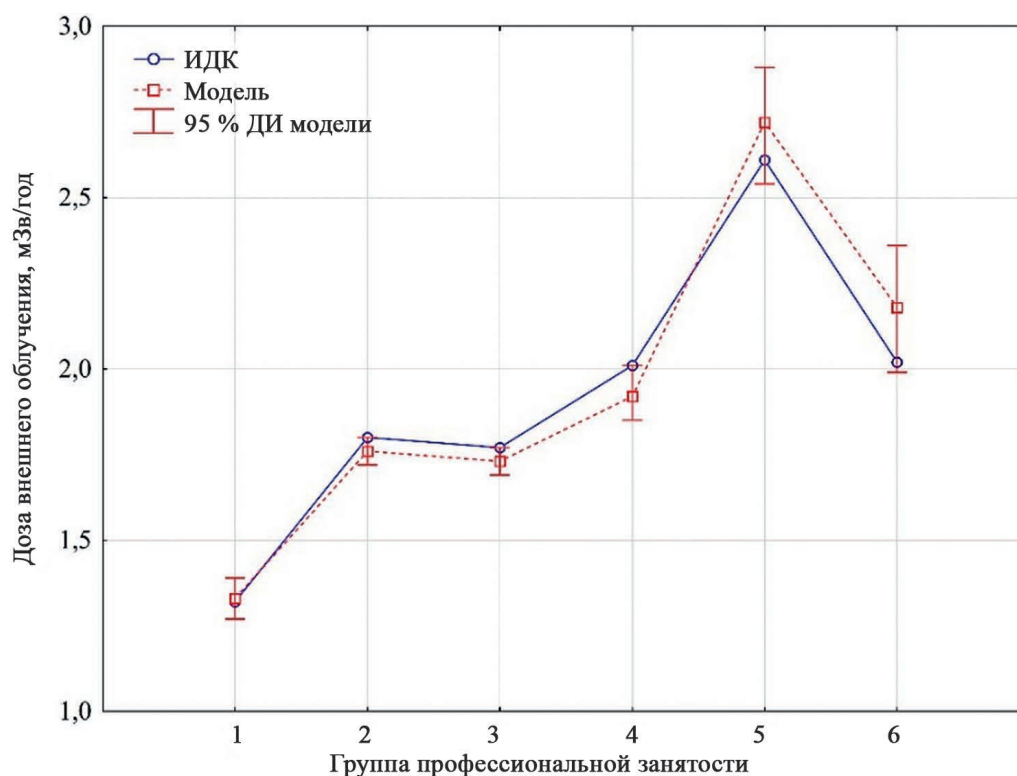


Рис. 5. Сравнение прогнозных оценок модели с данными ИДК (для групп профессиональной занятости в целом)

Fig. 5. Comparison of model forecast estimates with IDC data (for occupational groups in general)

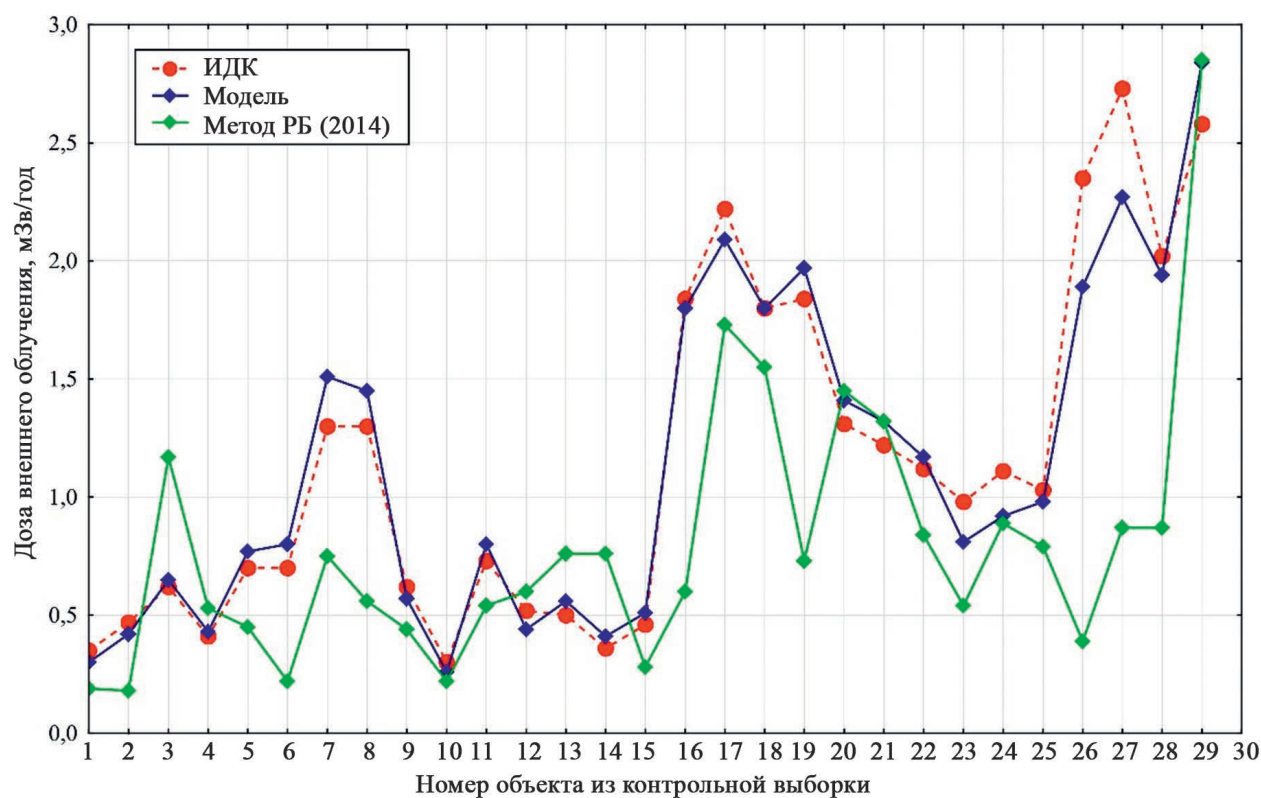


Рис. 6. Сравнительный анализ методов с данными ИДК

Fig. 6. Comparative analysis of methods with IDC data

Разработанная статистическая модель не противоречит методическому подходу реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения, применяемому в Республике Беларусь, но при этом позволяет учесть косвенный фактор, оказывающий влияние на формирование дозы внешнего облучения – профессиональную занятость, что позволяет снизить ошибку оценки.

Заключение

В результате проведенного исследования были статистически обоснованы положения, вносящие вклад в расширение представлений о закономерностях формирования доз внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях. Установлена зависимость индивидуальных доз внешнего облучения от демографических и социальных характеристик индивида.

По результатам сравнительного анализа разработанного метода и методики оценки индивидуализированных доз внешнего облучения, применяемой в Республике Беларусь, установлено, что между данными, рассчитанными по предложенному методу и действующей методике наблюдаются статистически значимые различия, при этом между рассчитанными дозами по разработанному методу и данными ИДК наблюдается сильная корреляционная связь, а между дозами, рассчитанными по методике 2014 г., и данными ИДК корреляционная связь слабее. Ошибка оценки разработанного метода ~ в 4 раза ниже, чем таковая в применяемой в Республике Беларусь методике.

Разработанный метод оценки индивидуализированных доз внешнего облучения может быть использован при недостатке или отсутствии данных индивидуального дозиметрического контроля как для ретроспективной, так и проспективной оценки доз внешнего облучения за счет введенного коэффициента, характеризующего снижение дозы внешнего облучения, что, в свою очередь, позволит проводить оценку индивидуализированных доз внешнего облучения за любой календарный год с высокой степенью точности у лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории, учитывая их социальный и демографический статус.

Рассчитанные таким образом индивидуализированные накопленные дозы внешнего облучения наряду с индивидуализированными накопленными дозами внутреннего облучения будут использованы в радиационно-эпидемиологических исследованиях для установления зависимости «доза – эффект» и оценки радиационных рисков.

Библиографические ссылки

1. Власова НГ. Методический подход реконструкции индивидуализированных доз облучения лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на ЧАЭС. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2013;58(10):24–33.
2. Веялкин ИВ, Чешик АА, Семененко ОФ, Власова НГ, Горбун ЮВ, Веялкина НН. Заболеваемость злокачественными новообразованиями отдельных органов в зависимости от индивидуализированных накопленных доз. *Проблемы здоровья и экологии*. 2015;45(3):78–84. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2015-12-3-18>.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Vlasova NG, Rozhko AV, Visenberg YuV, Drozd EA. Dose Assessment in Population Living on Contaminated Territories at the Remote Period after the Chernobyl Accident. *International Conference on Global Emergency Preparedness and Response. International Atomic Energy Agency (IAEA). Book of Synopses. IAEA Headquarters. Vienna: IAEA*; 2015. p. 250–255.
7. 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>.
8. 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. DOI: doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19.
9. 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.
10. Куликович ДБ, Власова НГ. Статистический анализ факторов, оказывающих влияние на формирование дозы внешнего облучения. *Проблемы здоровья и экологии*. 2022;19(3):99–105. DOI: doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14.
11. 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.
12. 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.
13. Мاستицкий СЭ, Шитиков ВК. *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва: ДМК Пресс; 2015. 496 с.

References

1. Vlasova NG. *Metodicheskij podhod rekonstrukcii individualizirovannyh doz oblucheniya lic, podvergshih'sya vozdejstviyu radiacii v rezul'tate avarii na CHAES* [Methodological approach to reconstructing individualized radiation doses of persons exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident]. *Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost* [Medical Radiology and Radiation Safety]. 2013;58(3):24–33. Russian.
2. Veyalkin IV, Cheshik AA, Semenenko OF, Vlasova NG, Gorbun YuV, Veyalkina NN. *Zabolevaemost' zlokachestvennyh novoobrazovaniyami ot del'nyh organov v zavisimosti ot individualizirovannyh nakoplenykh doz* [Incidence of malignant neoplasms of certain organs depending on individualized accumulated irradiation doses]. *Health and Ecology Issues*. 2015;45(3):78–84. Russian. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2015-12-3-18>.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Vlasova NG, Rozhko AV, Visenberg YuV, Drozd EA. Dose Assessment in Population Living on Contaminated Territories at the Remote Period after the Chernobyl Accident. International Conference on Global Emergency Preparedness and Response. International Atomic Energy Agency (IAEA). Book of Synopses. IAEA Headquarters. Vienna: IAEA; 2015. p. 250–255.
7. Kulikov DB, Vlasova NG. *Vyyavlenie odnorodnykh po doze vneshnego oblucheniya grupp zhitelej zagryaznennykh territorij po sovokupnosti informativnykh 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*. 2023;20(1):123–130. Russian. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2023-20-1-15>.
8. Mataras AN, Eventova LN, Visenberg YuV, Vlasova NG. *Metodicheskij podhod ocenki individualizirovannyh doz vneshnego oblucheniya lic, podvergshih'sya vozdejstviyu 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. Russian. DOI: doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19.
9. 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.
10. Kulikov 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 Issues*. 2022;19(3):99–105. Russian. DOI: doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14.
11. 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.
12. 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.
13. Masticzkij SE, Shitikov VK. *Statisticheskij analiz i vizualizaciya dannykh s pomoshch'yu R* [Statistical analysis and Data visualization using R]. Moscow: DMK Press; 2015. 496 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 30.01.2024.
Received by editorial board 30.01.2024.