

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ОЦЕНКИ НАКОПЛЕННЫХ ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЛИЦ, ПРОЖИВАЮЩИХ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧАЭС, ЗА ПЕРИОД 1986-1989 гг.

УО «Гомельский государственный медицинский университет», г. Гомель, Беларусь

Сравнительный анализ применяемых методик для оценки и прогноза индивидуализированных накопленных с момента аварии на ЧАЭС доз внешнего облучения показал, что консервативные подходы к оценке доз и недоучёт косвенных дозоформирующих факторов негативно сказываются на прогнозе доз в целом. Предлагаемый новый методический подход оценки индивидуализированных доз внешнего облучения согласуется со своими аналогами (коэффициент конкордации Кендалла $W=0,96$; $p<0,03$), но, при этом позволяет учесть не только прямой дозоформирующий фактор (плотность загрязнения населённого пункта), но и косвенные факторы в совокупности (профессиональная занятость, гендерная принадлежность и возраст), что, в свою очередь, позволяет выполнить реконструкцию индивидуализированных доз внешнего облучения за каждый исследуемый год с минимальной ошибкой. Регрессионный анализ показал, что между модельными оценками и данными индивидуального дозиметрического контроля наблюдается высокая корреляционная связь ($r=0,875$; $p<0,05$), ошибка оценки предлагаемого метода ~ в 4 раза ниже, чем предыдущих методов.

Ключевые слова: доза внешнего облучения, индивидуальный дозиметрический контроль, индивидуализированная доза, реконструкция, накопленная доза

Введение

Оценка доз облучения населения как внутреннего, так и внешнего, является неотъемлемой составляющей радиационно-эпидемиологических исследований по установлению зависимости «доза-эффект» и выявлению наиболее облучаемых групп населения и в то же время, актуальной и сложной проблемой дозиметрии и радиобиологии, поскольку последняя зависит не только от прямого фактора дозоформирования – плотности загрязнения населённого пункта, но и от косвенных факторов, таких как социально-демографические характеристики жителей, так как ведущим фактором дозоформирования является непосредственно сам индивид и его социально-обусловленное поведение [1-4].

Индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) – самый надежный ис-

точник информации об индивидуальных дозах внешнего облучения населения, однако в связи с трудоемкостью данного метода не всегда возможно его применение на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению [5]. Как следствие, при отсутствии или недостатке данных ИДК оценка доз облучения может быть выполнена по методическим указаниям [6-7], основанным на радиоэкологическом моделировании, и соответствующим методикам [8], основанным на плотности загрязнения территории соответствующего населённого пункта (далее – НП) и эмпирическим константам, учитывающим половозрастную структуру населения. В итоге применение этих методов приводит к большой неопределённости оценок [9-10].

Несомненно, большую часть облучения население получило в первые годы по-

сле аварии на ЧАЭС, но для анализа и прогноза доз облучения необходимо учитывать динамику их снижения с постоянным пересмотром эмпирических коэффициентов.

Вышеизложенное показывает важность применения более прогрессивных методических подходов оценки индивидуализированных доз внешнего облучения, поскольку применяемые методические подходы консервативны и не учитывают социально-обусловленного поведения индивида, что, в свою очередь, не соответствует задаче индивидуализации доз, поскольку эти методы позволяют оценить среднегрупповые дозы внешнего облучения для наиболее облучаемых групп населения.

Методические основы прогноза уровней облучения населения от радионуклидов цезия при постоянном проживании на территории, загрязненной в результате аварии на ЧАЭС [8], базируются исключительно на плотности поверхностного загрязнения населённого пункта по ^{137}Cs и типа НП без учета индивидуальных особенностей индивида, что соответствует только раннему послеаварийному периоду, тем самым позволяя лишь рассчитать среднее значение накопленной дозы внешнего облучения в пределах одного ареала обитания, что, в свою очередь, полностью не соответствует задаче индивидуализации доз.

В методических рекомендациях [11] частично было учтено социально-обусловленное поведение индивида, учитывая косвенные дозоформирующие факторы, но, основываясь на средней годовой эффективной дозе внешнего облучения населённого пункта, в котором проживал индивид, и классификации жителей этих НП лишь на 2 группы объединённых профессий по типу занятости, процедура реконструкции накопленных доз внешнего облучения так же не соответствует задаче индивидуализации.

Метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения [12] – более прогрессивен по отношению к предыдущим методам, но в нем не учтён косвенный фактор – профессиональная занятость, что увеличивает ошибку оценки.

Разработанный ранее методический подход оценки индивидуализированных доз внешнего облучения [13] позволяет учесть косвенные факторы, что, в свою очередь, позволит снизить ошибку оценки индивидуализированных доз внешнего облучения и корректно проводить радиационно-эпидемиологический анализ.

Цель исследования – показать преимущества предлагаемого нового метода оценки индивидуализированных накопленных доз внешнего облучения в сравнении с другими методами.

Материал и методы исследования

Материалами явились данные об инструментально полученных индивидуальных дозах внешнего облучения жителей населённых пунктов Добрушского, Ветковского и Наровлянского районов Гомельской области, методом индивидуального дозиметрического контроля («База данных индивидуального дозиметрического контроля жителей Гомельской области Беларуси», рег. свидетельство № 5871404082 от 10.06.2014); «База данных плотностей загрязнения территории населённых пунктов Республики Беларусь радионуклидами цезия, стронция и плутония по состоянию на 1986 год», рег. свидетельство № 58709000639 от 20.05.2009.

Индивидуальный дозиметрический контроль был проведен методом термолюминесцентной дозиметрии (далее – ТЛ-измерения) на основе А1 О (ТЛД-500) по метрологически аттестованной методике измерений индивидуальных доз сотрудниками Гомельского областного центра гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья, а также сотрудниками ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России за период 1987-1989 гг.

Расчет накопленных доз внешнего облучения был проведен по методикам [8, 11-12] и по предлагаемому новому методу оценки индивидуализированных доз внешнего облучения [13]. Для проведения адекватного сравнительного анализа методических подходов рассчитанные индивидуализирован-

ные дозы внешнего облучения были приведены как средние значения по НП.

Статистический анализ проведен прикладными методами статистики. Сила линейной корреляционной связи между двумя выборками определялась непараметрическим тестом Спирмена (r ; p). Согласованность методических подходов определялась коэффициентом конкордации Кендалла (W ; p). Уровень значимости (α) принят равным 0,05.

Статистическая обработка данных проведена с использованием MS Excel и программного пакета для статистического анализа Statistica 12.0 (StatSoft, USA).

Результаты исследования

Для проведения сравнительного анализа методических подходов оценки накопленных доз внешнего облучения была сформирована исследовательская выборка из трех населенных пунктов по представительности обследованных лиц за каждый послеаварийный год с 1987 по 1989 гг.

В таблице 1 представлены данные о дозах внешнего облучения за каждый год по каждому НП в виде среднего значения по НП, поскольку метод 1991 года [8] позволяет лишь оценить среднее значение накопленной дозы внешнего облучения у жителей этих НП.

Сравнительный анализ методов оценки накопленных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории в результате аварии на ЧАЭС, осуществлялся путем определения ошибки оценки для каждого метода:

1. Оценка накопленных доз внешнего облучения по методическим указаниям 1991 года [8]

Базовым параметром при оценке доз внешнего облучения по данным методическим указаниям (далее – МУ) является плотность поверхностного загрязнения территории НП по ^{137}Cs и коэффициента связи дозы внешнего облучения с плотностью загрязнения. Накопленная доза внешнего облучения за 1986-1989 гг. оценивается по следующему соотношению:

$$D_{\text{внеш}} = K \cdot \sigma \quad (1)$$

где: $D_{\text{внеш}}$ – доза внешнего облучения за 1986-1989 гг.;

K – коэффициент связи, $\text{мЗв} \cdot \text{км}^2 \cdot \text{Ки}^{-1}$;

σ – плотность поверхностного загрязнения ^{137}Cs НП в 1986 г., $\text{Ки} \cdot \text{км}^2$.

Расчет накопленной дозы внешнего облучения по МУ 1991 года представлен в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, ошибка оценки по методическим указаниям 1991 года достаточна высока. Это обусловлено кон-

Таблица 1 – Средние значения дозы внешнего облучения по выбранным НП

Населенный пункт (район)	Доза внешнего облучения, мЗв/год*			Накопленная доза внешнего облучения за 1986-1989 гг., мЗв
	1987	1988	1989	
Смолегов (Наровлянский)	5,24	5,30	4,66	24,63
Морозовка (Добрушский)	5,13	4,40	4,76	23,52
Хизы (Ветковский)	9,73	12,46	8,09	47,80

* – для обеспечения единства расчетов накопленных доз облучения и последующего сравнительного анализа, дозы внешнего облучения за 1986 год были экстраполированы по методическим указаниям 1991 года [8].

Таблица 2 – Сравнение накопленных доз, рассчитанных по МУ 1991 года с данными ИДК

Населенный пункт (район)	Плотность загрязнения НП, $\text{Ки} \cdot \text{км}^{-2}$	K , $\text{мЗв} \cdot \text{км}^2 \cdot \text{Ки}^{-1}$	Накопленная доза внешнего облучения, мЗв		Ошибка оценки, %
			МУ	ИДК	
Смолегов (Наровлянский)	17,96	1,90	34,13	24,63	39
Морозовка (Добрушский)	27,74	1,60	34,78	23,52	48
Хизы (Ветковский)	49,56	1,60	79,29	47,80	66

сервативным подходом к оценке доз внешнего облучения, учитывая только плотность загрязнения и не учитывая структуры населения. Такой методический подход не соответствует задаче индивидуализации доз, а позволяет лишь оценить среднее значение накопленной дозы внешнего облучения для НП или района.

2. Оценка накопленных доз внешнего облучения по методическим указаниям, применяемым в Российской Федерации

Индивидуализированная годовая эффективная доза внешнего облучения (далее – ИГЭД) жителя для населенного пункта за k -ый год в данных методических указаниях [11] определяется как сумма произведений средней годовой эффективной дозы (далее – СГЭД) внешнего облучения в населенных пунктах, в которых проживал данный житель в оцениваемом году, на фактор (α) – фактор учета доли времени его проживания в НП оцениваемого года, и на коэффициент (β) – поправки на социальный статус данного жителя и на тип дома, в котором проживал данный житель в НП в оцениваемом году (2). В качестве СГЭД внешнего облучения в НП в расчётном году используется среднее для данного НП за k -ый год значение годовой эффективной дозы внешнего облучения, содержащееся в «Региональной» базе данных доз облучения населения.

$$\text{ИГЭД}_{\text{внеш}}^k = \sum_n \text{СГЭД}_{\text{внеш}}^{kn} \cdot \alpha_n^k \cdot \beta_n^k \quad (2)$$

Значения долей времени (α), проведенных жителем в n -ом НП, расположенном в зоне радиоактивного загрязнения, в k -ом году, определяются из дополнительных данных, представленных в соответствии с разделом 3 данных МУ [11]. Значения (β) зависят от типа населенного пункта (село, посёлок городского типа, город), одной из

двух представленных в методике профессиональной группы среди жителей НП и типа дома, в котором он проживает (одноэтажный деревянный, одноэтажный каменный, многоэтажный).

Расчет накопленной дозы по методическим указаниям, применяемым в Российской Федерации (РФ) представлен в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, ошибка оценки дозы внешнего облучения несколько ниже, чем в предыдущей методике, так как уже присутствует элемент индивидуализации: учитывается влияние косвенных дозоформирующих факторов. Но для индивидуализации доз внешнего облучения недостаточно разбиения на 2 группы профессиональной занятости, поскольку в каждой из этих групп имеет место широкий разброс доз из-за усреднённого значения дозы внешнего облучения.

3. Оценка индивидуализированных накопленных доз внешнего облучения по методике, применяемой в Республике Беларусь

Применяемый сегодня в Республике Беларусь метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения [12] позволяет оценить не только накопленную дозу внешнего облучения по НП (начиная с 1990 года), но и индивидуализировать для каждого лица, учитывая как прямой фактор дозоформирования, так и гендерно-возрастные особенности индивида.

Методической основой оценки индивидуализированной накопленной с момента аварии на ЧАЭС за период с 1986-1989 гг. дозы внешнего облучения (E_{ext}) является плотность загрязнения территории НП по ^{137}Cs , эмпирический коэффициент и коэффициент индивидуализации (для соответствующей половозрастной группы) [12]. Накопленная индивидуализированная доза

Таблица 3 – Сравнение накопленных доз, рассчитанных по МУ РФ с данными ИДК

Населенный пункт (район)	Накопленная доза внешнего облучения, мЗв		Ошибка оценки, %
	МУ РФ	ИДК	
Смолегов (Наровлянский)	32,47	24,63	32
Морозовка (Добрушский)	32,12	23,52	37
Хизы (Ветковский)	64,77	47,80	36

внешнего облучения за 1986-1989 гг. оценивается по следующему соотношению:

$$E_{\text{ext}} = K \cdot \sigma \cdot k_3 \quad (3)$$

где: E_{ext} – накопленная индивидуализированная доза внешнего облучения за 1986-1989 гг.;

K – эмпирический коэффициент, мЗв·кБк⁻¹·м⁻²;

σ – плотность загрязнения территории НП ¹³⁷Cs в 1986 г., кБк·м⁻²;

k_3 – коэффициент индивидуализации, отн. ед.

Расчет накопленной дозы внешнего облучения по применяемой сегодня в Республике Беларусь Инструкции по применению представлен в таблице 4.

Как видно из таблицы 4, ошибка оценки доз внешнего облучения несколько ниже, чем в предыдущих методиках, поскольку расчет доз внешнего облучения по инструкции предусматривает учет дополнительных факторов дозоформирования, таких как гендерно-возрастные особенности индивида, что, в свою очередь, позволяет корректно оценить накопленную дозу внешнего облучения населения НП, но данный методический подход не предусматривает учета профессиональной занятости, что усредняет значение индивидуализированной дозы внешнего облучения. С другой стороны, метод не позволяет выполнить реконструкцию индивидуализированных доз внешнего облучения за каждый год периода с 1986 по 1989 гг.

4. Оценка индивидуализированных накопленных доз внешнего облучения по предлагаемому методическому подходу

Разработанный ранее метод оценки индивидуализированных доз внешнего облу-

чения жителей, проживающих на территории радиоактивно загрязнённых НП [13], согласуется с рассматриваемыми ранее методическими подходами (коэффициент конкордации Кендалла $W = 0,96$; $p < 0,03$), но при этом позволяет учесть не только плотность загрязнения НП, пол и возраст индивида, но и профессиональную занятость, которая в большей степени оказывает влияние на формирование индивидуальной дозы внешнего облучения. Другой отличительной особенностью разработанного метода является возможность реконструкции индивидуализированных доз за каждый послеаварийный год.

В основе метода – статистическая модель множественной линейной регрессии, которая описывается следующим уравнением:

$$E_i^{\text{ext}} = K_{\text{reduce}_j} \cdot e^{(b_i + [k_{1i} \cdot \ln(\frac{\sigma}{\sigma_7})] + [k_{2i} \cdot G] + [k_{3i} \cdot A])} \quad (4)$$

где: E_i^{ext} – индивидуализированная годовая доза внешнего облучения лица, относящегося к соответствующей i -той группе профессиональной занятости, мЗв·год⁻¹;

b_i – свободный член уравнения регрессии для i -той группы профессиональной занятости, мЗв·год⁻¹;

k_{1i}, k_{2i}, k_{3i} – коэффициенты регрессии, соответствующие каждому объясняющему фактору для i -той группы профессиональной занятости, отн.ед;

σ – плотность загрязнения территории по ¹³⁷Cs исследуемого населённого пункта, кБк·м⁻²;

G – гендерная принадлежность индивида (используется бинарная классификация: 0 – женщины, 1 – мужчины);

A – возраст, количество полных лет;

K_{reduce_j} – коэффициент снижения

Таблица 4 – Сравнение накопленных доз, рассчитанных по Инструкции РБ с данными ИДК

Населенный пункт (район)	Плотность загрязнения НП, Ки·км ⁻²	Накопленная доза внешнего облучения, мЗв		Ошибка оценки, %
		Инструкция по применению РБ	ИДК	
Смолегов (Наровлянский)	17,96	31,54	24,63	28
Морозовка (Добрушский)	27,74	33,03	23,52	40
Хизы (Ветковский)	49,56	68,36	47,80	43

Таблица 5 – Сравнение накопленных доз, рассчитанных по предлагаемому методу с данными ИДК

Населенный пункт (район)	Накопленная доза внешнего облучения, мЗв		Ошибка оценки, %
	Предлагаемый метод	ИДК	
Смолегов (Наровлянский)	28,08	24,63	14
Морозовка (Добрушский)	23,61	23,52	<1
Хизы (Ветковский)	58,32	47,80	22

дозы внешнего облучения для j-того типа НП, отн. ед;

Расчет накопленной дозы внешнего облучения по предлагаемому новому методу представлен в таблице 5.

Как видно из таблицы 5, ошибка оценки предлагаемого методического подхода по отношению к предыдущим методам значительно снизилась, что, в свою очередь, подтверждает гипотезу о том, что учет информативных фактор-признаков, оказывающих влияние на формирование индивидуальной дозы внешнего облучения, обеспечивает снижение ошибки оценки доз облучения, при этом между дозами, рассчитанными по модели и данными ИДК, наблюдается высокая корреляционная связь ($r=0,875$; $p<0,05$).

Проведенный сравнительный анализ демонстрирует, что предлагаемый методический подход оценки индивидуализированных доз внешнего облучения полностью согласуется с рассмотренными выше методическими указаниями [8, 11] и инструкцией по применению [12], но, учитывая дозоформирующие факторы, позволяет отойти от консервативных подходов и средних оценочных параметров, при этом с высокой точностью реконструировать индивидуализированные накопленные дозы внешнего облучения жителей, постоянно проживающих на радиоактивно загрязнённой территории, за каждый послеаварийный год.

Заключение

Сравнительный анализ методических подходов оценки накопленных доз внешнего облучения за послеаварийный период с 1986 по 1989 гг. показал, что применение консервативных подходов оценки доз облучения искажает реальную картину за счет

вариабельности доз и не позволяет реконструировать их за каждый послеаварийный год. Для обеспечения адекватности оценки накопленных индивидуализированных доз внешнего облучения необходимо учитывать социальные и демографические особенности индивида. Предлагаемый методический подход, который учитывает вышеизложенные факторы, не противоречит рассмотренным выше методам, при этом позволяет более точно оценить индивидуализированные дозы внешнего облучения, снижая оценку ошибки ~ в 4 раза по отношению к предыдущим методическим подходам.

Библиографический список

1. Distribution of doses received in rural areas affected by the Chernobyl accident. JSP-2 task 5 / A. M. Skryabin [et al.] // Report NRPB-R277 National Radiological Protection Board. – UK: Chilton, 1995. – 52 p.
2. Golikov, V.Yu. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident / Yu.V. Golikov, M.I. Balonov, P. Jacob // Radiation and Environmental Biophysics. – 2002. – V. 41. – P. 185-193.
3. Optimization of health protection of the public following a major nuclear accident: interaction between radiation protection and social and psychological factors / P.T. Allen [et al.] // Health Phys. – 1996. – Vol. 71, No 5. – P. 763-765.
4. 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) / N.G. Vlasova [et al.] // Book of Synopses. – IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 19-23 October 2015. – Ref. No: CN-213. – P. 250-255.
5. Куликович, Д.Б. Статистический анализ факторов, оказывающих влияние на формирование дозы внешнего облучения / Д.Б. Куликович, Н.Г. Власова // Проблемы здоровья и экологии. – 2022. – Т. 19. № 3. – С. 99-105.
6. Реконструкция средней (индивидуализированной) накопленной эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вслед-

ствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году : Методические указания (Дополнение 2 к МУ 2.6.1.579-96). – Москва.: Роспотребнадзор, 2005. – 11 с.

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

8. Методические основы прогноза уровней облучения населения от радионуклидов цезия при постоянном проживании на территории, загрязнённых в результате аварии на ЧАЭС: Методические указания. – Москва.: МЗ СССР, 1991. – 72 с.

9. 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.

10. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine / I. Likhariov [et al.] // Health Physics. – 1996. – Vol. 70, No 1. – P. 87-98.

11. Получение индивидуальных накопленных доз с использованием содержащихся в региональной базе данных доз облучения населения. Методические указания. – М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2015. – 21 с.

12. Метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения включённых 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. – 2014. – 8 с.

13. Куликович, Д. Б. Статистическая модель оценки индивидуализированных доз внешнего облучения / Д. Б. Куликович, Н. Г. Власова // Ильинские чтения 2023: Сборник материалов международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов (Москва, 15-16 марта 2023 года). – Москва: Государственный научный центр Российской Федерации - Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, 2023. – С. 32-34.

D.B. Kulikovich

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING ACCUMULATED EXTERNAL EXPOSURE DOSES OF PERSONS PERMANENTLY RESIDING IN A CONTAMINATED AREA WITH RADIONUCLIDES AS A RESULT OF THE CHERNOBYL ACCIDENT FOR THE PERIOD 1986-1989

A comparative analysis of the methods used for assessing and forecasting individual accumulated external exposure doses since the Chernobyl accident showed that conservative approaches to assessing doses and underestimation of indirect dose-forming factors have a negative influence on dose forecasting in general. The proposed new methodological approach of assessing of individualized external exposure doses is consistent with its analogues (Kendall's concordance factor $W=0,96$; $p<0,03$), but at the same time allows taking into account not only the direct dose-forming factor (contaminated density) but also indirect factors in the aggregate (occupational employment, gender and age), which, in turn, makes it possible to reconstruct individualized external exposure doses for each year under study with minimal error. Regression analysis showed that there is a high correlation between new method's estimates and individual dosimetric control data ($R=0,875$; $p<0,05$), the estimation error of the proposed method is ~ 4 times lower than previous methods.

Key words: *external exposure dose, individual dosimetric control, dose assessment method, reconstruction of individual doses, accumulated external exposure dose*

Поступила 01.03.24