

УДК 614.876.06:621.039.58:004.9
DOI: 10.58708/2074-2088.2026-2(38)-5-11

К.Н. Буздалкин¹, Д.Б. Куликович²,
Н.Г. Власова¹, Л.Н. Эвентова¹,
А.Н. Матарас¹

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗОВ ДОЗ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ, НАКОПЛЕННЫХ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

¹ГУ «РНПЦ радиационной медицины и экологии человека», г. Гомель, Беларусь;

²УО «Гомельский государственный медицинский университет», г. Гомель, Беларусь

Разработано WEB-приложение, позволяющее рассчитать дозы облучения, накопленные с 1986 по 2056 год. Ссылка на приложение размещена на сайте Республиканского научно-практического центра радиационной медицины и экологии человека (<https://www.rcrm.by>) в разделе «Научная деятельность» (<https://www.rcrm.by/science/dose-forecast/>). Накопленные индивидуализированные дозы внутреннего и внешнего облучения рассчитываются для лиц, постоянно проживающих на загрязнённой радионуклидами территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС. Консервативно предполагается, что пациент относится к наиболее облучаемой 10%-ой группе среди лиц данного возраста и профессии, проживающих в данном населённом пункте. Комбинируя фрагменты результатов расчётов для различных исходных данных, например, проживания в разных населённых пунктах или разной профессиональной занятости, можно рассчитать индивидуализированные дозы внутреннего и внешнего облучения, накопленные после аварии на ЧАЭС, с учётом смены мест жительства и профессии. Рассчитанные индивидуализированные накопленные с момента аварии дозы облучения позволяют проводить радиационно-эпидемиологические исследования по установлению зависимости «доза-эффект» и оценку рисков отдалённых последствий радиационного воздействия. С учётом индивидуализированных накопленных доз облучения проводятся эпидемиологические исследования развития радиационно-зависимых заболеваний лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС. Кроме того, с использованием разработанного WEB-приложения лица, проживающие или проживавшие на территории радиоактивного загрязнения, могут самостоятельно оперативно оценить уровни накопленных доз облучения и соответствующие риски для здоровья, а также целесообразность обращения по вопросам получения дополнительных мер социальной защиты.

Ключевые слова: Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека, доза внутреннего облучения, доза внешнего облучения, население, плотность загрязнения, Чернобыльская АЭС, прогноз

Введение

Республиканским научно-практическим центром радиационной медицины и экологии человека в рамках государственных программ Республики Беларусь по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС изучены основные закономерности формирования доз облучения населения, подвергшегося радиационному воздействию [1]. Разработана методология

прогноза накопленных доз облучения, значения которых необходимы при радиационно-эпидемиологических исследованиях. В том числе разработаны и апробированы модели для прогноза индивидуализированных накопленных доз как внутреннего, так и внешнего облучения [2–5].

Прогноз доз облучения населения представляет особую сложность, поскольку они являются весьма переменными величинами. Так, дозы внутреннего облучения

жителей одного населённого пункта могут отличаться на два порядка величины. С другой стороны, в различных населённых пунктах с одинаковой плотностью загрязнения значительный разброс средних доз внутреннего облучения обуславливается разнообразием почв и социально-демографических условий проживания, а также социально-поведенческих особенностей жителей, различного восприятия ими фактора радиационной опасности [3]. Поэтому при моделировании индивидуализированных доз применяются установленные закономерности формирования доз внутреннего и внешнего облучения населения.

Годовая эффективная доза внутреннего облучения репрезентативного лица принята равной среднему значению дозы по выборке 10% наиболее облучаемых лиц, проживающих в данном населённом пункте. Использование доз репрезентативного лица в населённых пунктах и повышение требований к обучающей выборке при калибровке моделей позволили значительно снизить неопределённость оценки индивидуализированных накопленных доз облучения и повысить прогностическую ценность методов прогнозирования, а также автоматизировать построение прогнозов доз внутреннего и внешнего облучения, накопленных после аварии на ЧАЭС.

Цель исследования — автоматизировать процесс построения прогноза доз внутреннего и внешнего облучения населения, подвергшегося радиационному воздействию в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Материал и методы исследования

При автоматизации построения прогноза доз внутреннего и внешнего облучения населения, накопленных после аварии на ЧАЭС, использованы результаты исследований, проведённых в рамках государственных программ Республики Беларусь по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Республиканским научно-практическим центром радиационной медицины и экологии человека [2–5].

Дозиметрические модели, используемые для реконструкции и прогнозирования доз внутреннего и внешнего облучения, постоянно обновляются в связи с накоплением результатов прямых инструментальных измерений активности ^{137}Cs в организме на спектрометрах излучения человека (СИЧ). В настоящее время проводится около 60 тысяч СИЧ-измерений в год.

Параметры дозиметрической модели уточняются каждые пять лет и публикуются в очередной инструкции по применению. Например, последние обновления моделей приведены в инструкции по применению «Метод оценки средних годовых эффективных доз внешнего и внутреннего облучения жителей населённых пунктов, подлежащих радиологическому зонированию» (разработчик — ГУ «Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека», регистрационный №005-0625 от 20.10.2025 г.).

Метод индивидуализации дозы внутреннего облучения в зависимости от пола и возраста приведён в [2], дозы внешнего облучения в зависимости от вида занятости, типа населённого пункта, пола и возраста — в [4].

Результаты исследования

Разработано WEB-приложение, позволяющее построить прогноз накопленных доз облучения с 1986 по 2056 год. Серверная часть приложения, генерирующая HTML-страницы с кодом, реализующим клиентскую часть, размещена на сайте Республиканского научно-практического центра радиационной медицины и экологии человека (<https://www.rcrm.by>). Ссылка на WEB-приложение размещена в разделе сайта «Научная деятельность» (рисунок 1). Для запуска приложения в раскрывающемся списке необходимо выбрать «Прогноз индивидуализированных накопленных доз облучения» (<https://www.rcrm.by/science/dose-forecast/>). На экран будет выведена форма, приведённая на рисунке 2.

С помощью раскрывающихся списков, размещённых на форме, необходимо, во-

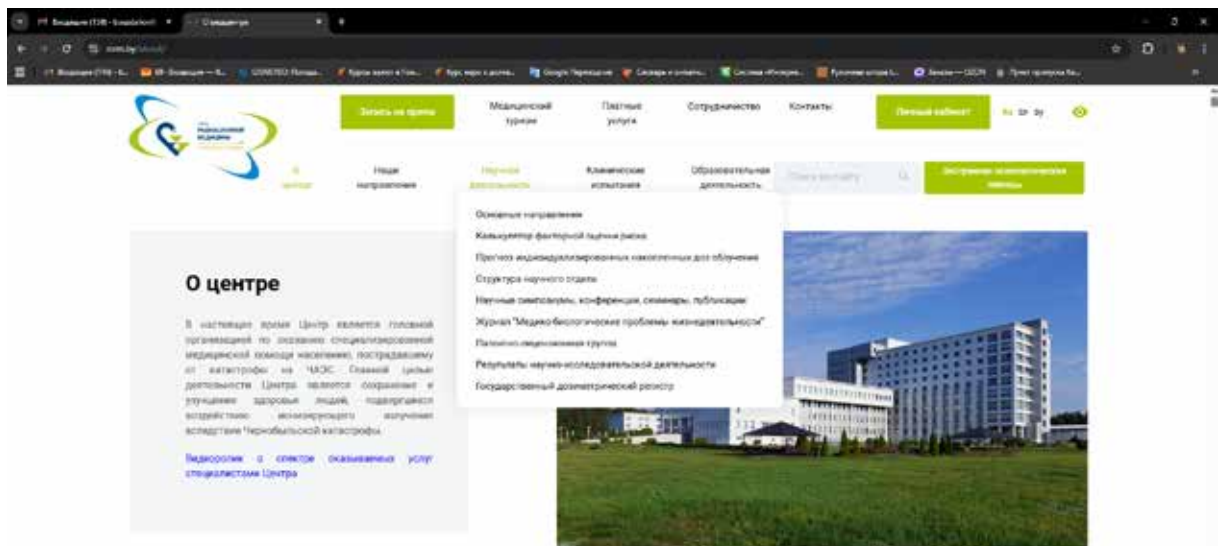


Рисунок 1 — Раздел «Научная деятельность» на сайте Республиканского научно-практического центра радиационной медицины и экологии человека (<https://www.rcrm.by>)

первых, выбрать населённый пункт, в котором проживает или проживал пациент, и, во-вторых, выбрать или ввести данные о пациенте (данные пользователя).

Информация о месте проживания необходима для определения плотности загрязнения территории населённого пункта ^{137}Cs , Ки·км⁻². На WEB-сервере размещена база данных населённых пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь, в кото-

рой серверная часть WEB-приложения автоматически находит значение плотности загрязнения, которое сформировалось в 1986 году после аварии на четвёртом энергоблоке Чернобыльской АЭС. Значение плотности загрязнения $\sigma(t)$ необходимо для дальнейших расчётов доз внутреннего и внешнего облучения.

После клика по кнопке «Расчитать» WEB-приложение произведёт необходимые расчёты и их результаты разместит в виде графиков и таблицы на WEB-странице (рисунки 3 и 4, таблица 1).

По формуле (1) индивидуализированные дозы внутреннего облучения $E_{i,j,r}^{int}(t)$, мЗв·год⁻¹ реконструируются до 2026 года (рисунок 3, таблица 1):

$$E_{i,j,r}^{int}(t) = C_{i,j} \cdot (a_r(t) + b_r(t) \cdot \sigma(t)), \quad (1)$$

где $C_{i,j}$ — постоянные коэффициенты, зависящие от пола и возраста, указанных клиентом WEB-приложения [2]; $a_r(t)$ и $b_r(t)$ — коэффициенты линейной регрессии дозы внутреннего облучения от плотности загрязнения в различные периоды после аварии для региона r , указанного пользователем WEB-приложения (рисунок 2).

В Инструкции по применению «Метод оценки средних годовых эффективных доз внешнего и внутреннего облучения жителей населённых пунктов, подлежащих

Рисунок 2 — Форма «Прогноз индивидуализированных накопленных доз облучения» (<https://www.rcrm.by/science/dose-forecast/>)



Рисунок 3 — Результаты расчёта годовых индивидуализированных доз облучения на примере мужчины 1970 г.р., служащего, проживающего в деревне Млынок Ельского района Гомельской области (сельский населённый пункт, Полесский регион)

радиологическому зонированию» №005-0625 от 20.10.2025 г. показано, что в Полесском регионе дозы внутреннего облучения в среднем в два раза выше, чем на другой территории в такой же плотности загрязнения ^{137}Cs , что связано с преобладанием в регионе торфяных и песчаных почв, отличающихся высоким переходом ^{137}Cs из почвы в растения и далее в пищевую продукцию животного происхождения, рацион человека. К Полесскому региону относятся Пинский, Лунинецкий, Столинский, Ельский, Лельчицкий, Наровлянский и Солигорский районы.

По формуле (2) с применением экстраполяционной регрессионной кривой индивидуализированные дозы внутреннего облучения $E_{i,j,r}^{int}(t)$, мЗв·год⁻¹ прогнозируются после 2025 года (рисунок 3, таблица):

$$E_{i,j,r}^{int}(t) = E_{i,j,r}^{2025} \cdot \exp\left(-0,693 \cdot \frac{t - 2025}{\tau}\right), \quad (2)$$

где $E_{i,j,r}^{2025}$ — годовая индивидуализированная эффективная доза внутренне-

го облучения индивида пола i и возраста j , проживающего в регионе r за 2025 год, мЗв·год⁻¹; τ — период полуснижения индивидуализированной дозы внутреннего облучения, значения которого определяются методом наименьших квадратов по известным значениям $E_{i,j,r}^{int}(t)$ и консервативно принятым равным 18 годам.

Указание группы профессиональной занятости и типа населённого пункта (рисунок 2) необходимы только для расчёта индивидуализированной дозы внешнего облучения, годовое значение которой $E_{i,j,k,g}^{ext}(t)$, мЗв·год⁻¹, в WEB-приложении в период с 1986 по 2056 год определяется по формуле (3) (рисунок 3, таблица):

$$E_{i,j,k,g}^{ext}(t) = R_k(t) \cdot e^{(b_g + [\beta_{1g} \cdot \ln(\frac{\sigma_k}{37})] + [\beta_{2g} \cdot i] + [\beta_{3g} \cdot A(j)])}, \quad (3)$$

В выражении (3) индивидуализированная годовая доза внешнего облучения, соответствующая полу i и возрасту j индивида, определяется для g -той группы про-

Таблица — Годовые индивидуализированные дозы облучения мужчины 1970 г.р., служащего, проживающего в деревне Млынок Ельского района Гомельской области (сельский населённый пункт, Полесский регион)

Год	Возраст	Внешняя, мЗв/год	Внутренняя, мЗв/год	Суммарная, мЗв/год	Накопленная суммарная, мЗв
1986	16	5,285	8,184	13,469	13,469
1987	17	3,409	3,199	6,608	20,077
1988	18	3,377	1,563	4,94	25,017
1989	19	1,643	0,764	2,407	27,424
1990	20	1,628	0,597	2,225	29,649
2025	55	0,108	0,156	0,264	54,759
2026	56	0,107	0,15	0,257	55,016
2027	57	0,106	0,144	0,25	55,266
2055	85	0,04	0,049	0,089	59,362
2056	86	0,039	0,047	0,086	59,448
2057	87	0,038	0,045	0,084	59,532

фессиональной занятости в населённом пункте типа k (город, посёлок городского типа, сельский населённый пункт) [4, 5]. При расчётах предполагается, что указанное лицо в поставарийный период не меняло профессии.

Суммарная индивидуализированная накопленная доза облучения, мЗв, лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС и проживающих на радиоактивно загрязнённой территории, определяется суммированием доз внутреннего и внешнего облучения (рисунки 3 и 4, таблица 1).

Ниже приведён пример расчёта накопленных доз облучения домохозяйкой из Гомеля 1962 года рождения, которая желает выяснить, связано ли её плохое самочувствие с проживанием на территории радиоактивного загрязнения. Для расчёта необходимо выполнить следующее:

1. На сайте РНПЦ РМиЭЧ запустить WEB-приложение по ссылке <https://www.rcrm.by/science/dose-forecast/>.

2. В верхней части загрузившейся формы «1. Населённый пункт» в раскрывающемся списке «Область» выбрать «ГОМЕЛЬСКАЯ», в списке «Район» — «ГОМЕЛЬ», в списке «Сельсовет» — «П», в списке «Категория» — «г.», в списке «Пункт» — «ГОМЕЛЬ».

3. В нижней части загрузившейся

формы «2. Данные пользователя» в раскрывающемся списке «Пол» необходимо выбрать «Женщина», в списке «Год рождения» — «1962», в списке «Группа профессиональной занятости» — «2-инвалиды, пенсионеры, безработные, домохозяйки», в списке «Тип населённого пункта» — «Город», в списке «Регион» — «Центральный и Северовосточный».

4. Кликнуть по кнопке «Рассчитать».

Найденное значение плотности загрязнения ^{137}Cs территории г. Гомеля в 1986 году ($2,2 \text{ Ки/км}^2$) и результаты прогноза накопленных домохозяйкой доз облучения при постоянном проживании в Гомеле, сформированных выпавшим ^{137}Cs , будут выведены на экран ниже кнопки «Рассчитать». В том числе будет указана накопленная к 2026 году доза внешнего облучения (3,8 мЗв), доза внутреннего облучения (3,2 мЗв) и суммарная доза (7 мЗв), а также накопленная к 2057 году доза внешнего облучения (4,0 мЗв), доза внутреннего облучения (3,5 мЗв) и суммарная доза (7,5 мЗв).

Построенные WEB-приложением графики демонстрируют различную динамику годовых доз внутреннего и внешнего облучения в поставарийный период. В сформированной WEB-приложением таблице указано, что годовая доза внешнего облучения домохозяйки возрастом 24 года в первый год после аварии (в 1986 году) со-

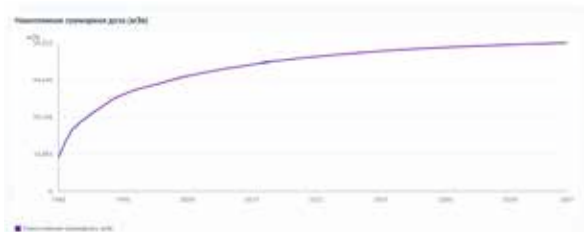


Рисунок 4 — Суммарные накопленные индивидуализированные дозы облучения мужчины 1970 г.р., служащего, проживающего в деревне Млынок Ельского района Гомельской области (сельский населённый пункт, Полесский регион)

ставляла 0,6 мЗв, возрастом 64 года в 2025 году — 0,01 мЗв/год, а возрастом 94 года в 2056 году составит 0,005 мЗв. Доза внутреннего облучения домохозяйки в первый год после аварии составила 1,1 мЗв, в 2025 году — 0,021 мЗв/год, а в 2056 году составит 0,006 мЗв/год.

График с кумулятивной кривой суммарной дозы облучения показывает, что к 2056 году при постоянном проживании в Гомеле домохозяйка 1962 г.р. не накопит дозу облучения выше 7,5 мЗв. Указанное значение значительно ниже 70 мЗв — предельного значения, установленного международными рекомендациями и национальными требованиями радиационной безопасности к дозе, накопленной за жизнь (70 лет). Иными словами не только детерминированные эффекты воздействия на здоровье невозможны, но и стохастические (случайные) эффекты настолько маловероятны, что не могут быть объяснением плохого самочувствия домохозяйки из Гомеля 1962 года рождения.

Заключение

Автоматизирован процесс построения прогноза доз внутреннего и внешнего облучения населения, подвергшегося радиационному воздействию в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Автоматизация проведена путём разработки WEB-приложения, позволяющего рассчитать дозы облучения, накопленные с 1986 по 2056 год.

Дозы внутреннего и внешнего облучения, накопленные после аварии на ЧАЭС, рассчитываются для лиц, постоянно проживающих на загрязнённой радионуклидами территории. Комбинируя фрагменты результатов расчётов для различных исходных данных, например, проживания в разных населённых пунктах или разной профессиональной занятости, можно рассчитать индивидуализированные дозы внутреннего и внешнего облучения, накопленные после аварии на ЧАЭС, с учётом смены мест жительства и профессии.

Рассчитанные индивидуализированные накопленные с момента аварии дозы облучения позволяют проводить радиационно-эпидемиологические исследования по установлению зависимости «доза — эффект» и оценку рисков отдалённых последствий радиационного воздействия. С учётом индивидуализированных накопленных доз облучения проводятся эпидемиологические исследования развития радиационно-зависимых заболеваний лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС. Кроме того, с использованием разработанного WEB-приложения лица, проживающие или проживавшие на территории радиоактивного загрязнения, могут самостоятельно оперативно оценить уровни накопленных доз облучения и соответствующие риски для здоровья, а также целесообразность обращения по вопросам получения дополнительных мер социальной защиты.

Библиографический указатель

1. Буздалкин, К. Н. Закономерности формирования доз внутреннего облучения населения, подвергшегося радиационному воздействию в результате аварии на Чернобыльской АЭС / К. Н. Буздалкин, Н. Г. Власова // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. — 2026. — № 1(37). — С. 16–22.
2. Прогноз индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения / Н. Г. Власова, К. Н. Буздалкин, Л. Н. Эвентова [и др.] // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. — 2025. — № 2(34). — С. 14–20.
3. Реконструкция индивидуализированных доз внутреннего облучения в условиях неопреде-

ленности и неполных данных СИЧ-измерений / Н. Г. Власова, К. Н. Буздалкин, Л. Н. Эвентова [и др.] // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2024. – № 2(32). – С. 48–55.

4. Kulikovich, D. B. Model for Reconstruction of Individualized External Exposure Doses for People Living on a Territory Contaminated with Radionuclides as a Result of the Chernobyl Accident / D. B. Kuliko-

vich, N. G. Vlasova // Biology Bulletin. – 2024. – Vol. 51, No. 12. – P. 3784–3792.

5. Апробация алгоритма расчёта индивидуализированных накопленных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязнённой территории / Д. Б. Куликович, Н. Г. Власова, Б. К. Кузнецов [и др.] // Здоровоохранение. – 2025. – № 2. – С. 53–60.

K.N. Bouzdalkin, D.B. Kulikovich, N.G. Vlasova, L.N. Eventova, A.N. Mataras

AUTOMATION FOR FORECASTING OF INTERNAL AND EXTERNAL RADIATION DOSES ACCUMULATED AFTER THE CHERNOBYL ACCIDENT

A web application has been developed to calculate radiation doses accumulated from 1986 to 2056. The web application is available on the website of the Republican Scientific and Practical Center for Radiation Medicine and Human Ecology at <https://www.rcrm.by>. A link to the application is available on the website of the Republican Scientific and Practical Center for Radiation Medicine and Human Ecology at <https://www.rcrm.by> in the «Scientific Activities» section (<https://www.rcrm.by/science/dose-forecast/>). Accumulated individualized doses of internal and external radiation are calculated for individuals permanently residing in areas contaminated with radionuclides that were exposed to radioactive contamination as a result of the Chernobyl accident. It is conservatively assumed that the patient belongs to the 10% most exposed group among individuals of a given age and occupation in a given locality. By combining fragments of calculation results for various input data, such as residence in different localities or different occupations, it is possible to calculate individualized doses of internal and external radiation accumulated since the Chernobyl accident, taking into account changes in residence and occupation. The calculated individualized cumulative radiation doses since the accident enable radiation epidemiological studies to establish the dose-response relationship and assess the risks of long-term effects of radiation exposure. Taking into account the individualized cumulative radiation doses, epidemiological studies are being conducted on the development of radiation-related diseases in individuals exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident. Furthermore, using the developed web application, individuals living or who have lived in radioactively contaminated areas can quickly and easily assess their cumulative radiation dose levels and the associated health risks, as well as the advisability of seeking additional social protection measures.

Key words: *Republican research centre for radiation medicine and human ecology, internal radiation dose, external radiation dose, population, contamination density, Chernobyl nuclear power plant, forecast*

Поступила 13.05.2026