

Медико-биологические проблемы жизнедеятельности

Научно-практический рецензируемый журнал

№ 2(34)

2025 г.

Учредитель

Государственное учреждение
«Республиканский научно-
практический центр
радиационной медицины
и экологии человека»

Журнал включен в

Перечень научных изданий
Республики Беларусь
для опубликования
диссертационных исследований
по медицинской
и биологической
отраслям науки
(31.12.2009, протокол 25/1)

Журнал зарегистрирован

Министерством информации
Республики Беларусь,
Свид. № 762 от 6.11.2009

Подписано в печать 16.06.25
Формат 60×90/8. Бумага мелованная.
Гарнитура «Times New Roman».
Печать цифровая. Тираж 120 экз.
Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 7,16.
Зак. 191.

Издатель ГУ «Республиканский
научно-практический центр
радиационной медицины
и экологии человека»
Свидетельство N 1/410 от 14.08.2014

Отпечатано в
КУП «Редакция газеты
«Гомельская праўда»
г. Гомель, ул. Полесская, 17а

ISSN 2074-2088

Главный редактор, председатель редакционной коллегии

А.В. Рожко (д.м.н., профессор)

Редакционная коллегия

В.С. Аверин (д.б.н., профессор, зам. гл. редактора),
В.В. Аничкин (д.м.н., профессор), В.Н. Беляковский (д.м.н.,
профессор), К.Н. Буздалькин (к.т.н., доцент), Н.Г. Власова (д.б.н.,
профессор, научный редактор), А.В. Величко (к.м.н., доцент),
И.В. Веялкин (к.б.н., доцент), Н.Н. Веялкина (к.б.н., отв.
секретарь), А.В. Воропаева (к.б.н., доцент), Д.И. Гавриленко
(к.м.н.), М.О. Досина (к.б.н., доцент), А.В. Жарикова (к.м.н.),
С.В. Зыблева (д.м.н., доцент), С.А. Игумнов (д.м.н., профессор),
А.В. Коротаяев (к.м.н., доцент), А.Н. Лызилов (д.м.н., профессор),
А.В. Макарич (к.м.н., доцент), С.Б. Мельнов (д.б.н., профессор),
В.М. Мицура (д.м.н., профессор), Я.Л. Навменова (к.м.н.,
доцент), Э.А. Надыров (к.м.н., доцент), И.А. Новикова (д.м.н.,
профессор), Э.Н. Платошкин (к.м.н., доцент), Э.А. Повелица
(к.м.н.), А.С. Подгорная (к.м.н.), Ю.И. Рожко (к.м.н., доцент),
И.П. Ромашевская (к.м.н., доцент), А.П. Саливончик (к.б.н.),
А.Е. Силин (к.б.н., доцент), А.Н. Стожаров (д.б.н., профессор),
И.О. Стома (д.м.н., профессор), Н.И. Шевченко (к.б.н., доцент),
Ю.И. Ярец (к.м.н., доцент)

Редакционный совет

А.В. Аклеев (д.м.н., профессор, Челябинск), О.В. Алейникова
(д.м.н., чл.-кор. НАН РБ, Минск), С.С. Алексанин (д.м.н.,
профессор, Санкт-Петербург), Е.Л. Богдан (Минск),
Л.А. Бокерия (д.м.н., академик РАН и РАМН, Москва),
А.Ю. Бушманов (д.м.н., профессор, Москва), И.И. Дедов (д.м.н.,
академик РАМН, Москва), В.И. Жарко (Минск), К.В. Котенко
(д.м.н., профессор, Москва), В.Ю. Кравцов (д.б.н., профессор,
Санкт-Петербург), Н.Г. Кручинский (д.м.н., профессор, Пинск),
Т.В. Мохорт (д.м.н., профессор, Минск), Д.А. Пиневиц (Минск),
В.Ю. Рыбников (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), А.А. Усс
(д.м.н., профессор, Минск), В.А. Филонюк (д.м.н., профессор,
Минск), Р.А. Часнойть (к.э.н., Минск), В.Д. Шило (Минск)

Технический редактор

С.Н. Никонович

Корректор

Н.Н. Юрченко

Адрес редакции 246040 г. Гомель, ул. Ильича, д. 290,
ГУ «РНПЦ РМ и ЭЧ», редакция журнала
тел (0232) 38-95-00, факс (0232) 37-80-97
<http://www.mbp.rcrm.by> e-mail: mbp@rcrm.by

© Государственное учреждение
«Республиканский научно-практический центр
радиационной медицины и экологии человека», 2025

№ 2(34)

2025

Medical and Biological Problems of Life Activity

Scientific and Practical Journal

Founder

Republican Research Centre
for Radiation Medicine
and Human Ecology

Journal registration
by the Ministry of information
of Republic of Belarus

Certificate № 762 of 6.11.2009

© Republican Research Centre
for Radiation Medicine
and Human Ecology

ISSN 2074-2088

Обзоры и проблемные статьи**Reviews and problem articles****М.Ю. Юркевич, Ж.А. Ибрагимова****M.Yu. Yurkevich, J.A. Ibragimova**

Нейротрофический фактор головного мозга (BDNF) и его роль в нейробиологических процессах

Brain-derived neurotrophic factor (BDNF) and its role in neurobiological processes

5

Медико-биологические проблемы**Medical-biological problems****Н.Г. Власова, К.Н. Буздалкин, Л.Н. Эвентова, А.Н. Матарас, Г.Н. Евтушкова****N.G. Vlasova, C.N. Bouzdalkin, L.N. Eventova, A.N. Mataras, G.N. Yevtushkova**

Прогноз индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения

Prediction of individualized accumulated doses of internal radiation

14

Е.А. Примакова, С.И. Кривенко, Е.А. Назарова, А.А. Сыманович, Е.Г. Юркина, А.А. Гомон, Н.И. Дедюля, Н.Ф. Миланович, С.В. Коротков**E.A. Prymakova, S.I. Krivenko, E.A. Nazarova, A.A. Symanovich, E.G. Yurkina, A.A. Gomon, N.I. Dedyulya, N.F. Milanovich, S.V. Korotkov**

Роль растворимых факторов в МСК-опосредованной иммунорегуляции

The role of soluble factors in MSC-mediated immunoregulation

21

Клиническая медицина**Clinical medicine****В.И. Бронский, С.В. Толканец, К.В. Бронская, Е.Н. Гаврилюк****V.I. Bronsky, S.V. Tolkanets, K.V. Bronskaya, E.N. Gavrilyuk**

Диссомния в структуре постковидного синдрома

Dyssomnia in the structure of post-covid syndrome

27

Д.А. Евсеенко, Н.В. Чуешова, Н.Н. Веялкина, З.А. Дундаров**D.A. Evseenko, N.V. Chueshova, N.N. Vejalkina, Z.A. Dundarov**

Формула расчёта индекса окислительного стресса у пациентов с циррозом печени и острой кровопотерей

Formula for calculating oxidative stress index in patients with liver cirrhosis and acute blood loss

35

Л.А. Кобылко, Н.В. Галиновская, Г.Е. Литвинов**L.A. Kabyłka, N.V. Halinouskaya, H.E. Litvinau**

Факторы, влияющие на выраженность болевого синдрома и качество жизни у пациентов после реваскуляризации миокарда с болями в нижней части спины

Factors influencing the severity of pain syndrome and quality of life in patients after myocardial revascularization with low back pain

43

Ю.К. Куликович, А.А. Лызиков, М.Л. Каплан, Д.Б. Куликович**Yu.K. Kulikovich, A.A. Lyzikov, M.L. Kaplan, D.B. Kulikovich**

Отдалённые результаты открытых реконструктивных вмешательств на артериях бедренно-подколенного сегмента

Long-term results of open reconstructive interventions on the arteries of the femoropopliteal segment

51

- В.Н. Мартинков, Д.К. Новик, А.Е. Силин, Ю.И. Ярец, И.Б. Тропашко, Д.А. Близин, О.В. Мурьчева, К.В. Бронская, И.Г. Мацак**
Взаимосвязь сывороточного С-реактивного белка с клинико-лабораторными характеристиками пациентов с истинной полицитемией 58
- В.N. Martinkov, D.K. Novik, A.E. Silin, Yu.I. Yarets, Y.B. Tropashko, D.A. Blizin, O.V. Murychava, K.V. Bronskaya, I.G. Matsak**
Association between serum C-reactive protein levels and clinical and laboratory characteristics of patients with polycythemia vera
- Ж.Н. Медведева, А.С. Подгорная, Ю.А. Лызикова**
Исход оперативного вмешательства у пациенток с миомой матки в ГУ «РНПЦ радиационной медицины и экологии человека» 65
- Zh.N. Medvedeva, A.S. Podgornaya, Yu.A. Lyzikova**
Outcome of surgical intervention in patients with uterine fibroids in the SI «Republican research center for radiation medicine and human ecology»
- Th.H. Nguyen, D.S. Nguyen, M.Th. Nguyen**
The status of worker's mental health disorder in manufacture enterprises of Vietnam 71
- T.H. Нгуен, Д.С. Нгуен, М.Т. Нгуен**
Состояние расстройств психического здоровья у рабочих производственных предприятий Вьетнама

Обмен опытом**Experience exchange**

- А.Ю. Захарко, А.С. Подгорная, О.В. Мурашко, Н.Н. Лакотко**
Нитевые технологии в эстетической гинекологии 78
- A.Yu. Zakharko, A.S. Podgornaya, O.V. Murashko, N.N. Lakotko**
Thread technologies in aesthetic gynecology
- Э.А. Повелица, А.С. Князюк, О.В. Пархоменко, А.М. Шестерня, М.Ю. Жандаров**
Пенэктомия — как исход хронического гнойного язвенно-некротического баланокавернита 88
- E.A. Povelitsa, A.S. Kniaziuk, O.V. Parchomenko, A.M. Shesternja, M.J. Zhandarau**
Penectomy as an outcome of chronic purulent ulcerative-necrotic balanocavernitis

УДК 614.876.06:621.039.58
DOI: 10.58708/2074-2088.2025-2(34)-14-20

Н.Г. Власова^{1,2}, К.Н. Буздалкин¹,
Л.Н. Эвентова¹, А.Н. Матарас¹,
Г.Н. Евтушкова¹

ПРОГНОЗ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННЫХ НАКОПЛЕННЫХ ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ

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

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

Проведены исследования, направленные на повышение точности прогноза индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС и проживающих на радиоактивно загрязнённой территории. В результате разработана модель, содержащая параметры, количественно описывающие устойчивые во времени факторы, наиболее влияющие на процесс формирования дозы внутреннего облучения, такие как пол и возраст. Проведена апробация модели и сравнение с данными контрольной выборки, сформированной на основе инструментально полученных значений годовых доз внутреннего облучения. Установлено, что модель позволяет снизить неопределённость оценки индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения не менее чем на 20 процентов. Прогностическая ценность метода прогнозирования повышена не менее, чем на 10 процентов. Улучшение указанных показателей достигнуто в результате учёта доз репрезентативного лица в населённых пунктах и повышения требований к обучающей выборке при калибровке модели.

Ключевые слова: индивидуализированная доза внутреннего облучения, населённый пункт, спектрометр излучения человека, реконструкция

Введение

Обследованию на спектрометре излучения человека (СИЧ) подлежат только жители мест, включённых в Перечень населённых пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, утверждаемый Постановлением Совета Министров Республики Беларусь. Жители условно чистых районов обследуются на СИЧ по собственной инициативе или при посещении медицинских учреждений на территории радиоактивного загрязнения и других организаций. Однако доля населения, обследованного на содержание ¹³⁷Cs в организме на СИЧ, в среднем составляет 1–2%, и даже в наиболее изученных районах (Брагинский, Наровлянский и Чечерский районы Гомельской области) доля жителей, обследованных на СИЧ, не превысила 50% [1].

В рамках Государственных программ Республики Беларусь по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской

АЭС разрабатывается методология прогноза накопленных доз облучения граждан, включённых в Государственный регистр лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС и других радиационных аварий (далее — Госрегистр), значения которых необходимы при радиационно-эпидемиологических исследованиях. В том числе была поставлена задача разработать и апробировать модель для прогноза индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС и проживающих на радиоактивно загрязнённой территории.

Прогноз доз внутреннего облучения населения представляет особую сложность, поскольку они являются весьма переменными величинами. Разброс доз внутреннего облучения жителей одного населённого пункта достигает двух порядков величины вследствие разнообразия

радиоэкологических и социально-демографических условий проживания, а также социально-поведенческих особенностей жителей различных населённых пунктов, различного восприятия фактора радиационной опасности.

Цель исследования — повысить точность прогноза индивидуализированных накопленных доз облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС и проживающих на радиоактивно загрязнённой территории.

Материал и методы исследования

При калибровке модели использовалось более 600 тысяч результатов оценки индивидуальных эффективных доз внутреннего облучения жителей 21 района Гомельской области и г. Гомеля, рассчитанных по результатам СИЧ. Учитывалось, что результаты СИЧ-измерений неполны и часто не могут служить основой для оценки индивидуализированных внутренних доз облучения [1]. Также перед калибровкой и апробацией модели результаты СИЧ-обследований были протестированы на предмет артефактов. В результате было забраковано до 20% записей по каждому контрольному населённому пункту. Основная зафиксированная ошибка — наличие дублей.

Для апробации модели в контрольную выборку вошли три населённых пункта, расположенные как на южном, так и на северном радиоактивном следе, с различной плотностью загрязнения территории

^{137}Cs и с достаточным количеством СИЧ-измерений (таблица 1). Численность жителей и плотность загрязнения Комарина и Наровли приведены на 1 января 2023 года, Светиловичей — на 1 октября 2019 года. Параметры распределений индивидуальных доз внутреннего облучения в 2023 году представлены в таблице 2.

При апробации модели выбирались населённые пункты и жители, результаты СИЧ-исследований которых не применялись при калибровке модели.

Результаты исследования

Предложена модель, позволяющая повысить точность прогноза индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения. В отличие от ранее применявшегося метода [2] в предлагаемой модели накопленные индивидуализированные дозы прогнозируются по годовым дозам репрезентативного лица в населённых пунктах. Оценка доз репрезентативных лиц регламентируется общеизвестными международными рекомендациями в утверждённых в установленном порядке Каталогах средних годовых эффективных доз облучения жителей населённых пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь. В качестве средних значений представлены дозы репрезентативного лица.

Предложенный подход позволяет гармонизировать значения индивидуализированных доз с дозой репрезентативного

Таблица 1 — Контрольная выборка населённых пунктов

Населённый пункт	Район	Статус	Численность жителей	Плотность загрязнения ^{137}Cs , Ки·км ⁻²
Наровля	Наровлянский	город	8 352	6,27
Комарин	Брагинский	городской посёлок	2 072	1,55
Светиловичи	Ветковский	агрородак	740	13,31

Таблица 2 — Параметры распределений индивидуальных доз внутреннего облучения

Населённый пункт	Среднее, мЗв/год	Медиана, мЗв/год	Стандартное отклон., мЗв/год	Среднегеометр. отклон., отн. ед.	Min, мЗв/год	Max, мЗв/год
Комарин	0,014	0,007	0,026	2,6	0,005	0,4
Наровля	0,02	0,007	0,053	2,18	0,005	1
Светиловичи	0,037	0,016	0,070	2,63	0,009	0,541

лица. Кроме того, настоящие исследования показали, что, несмотря на значительную вариабельность доз репрезентативного лица, их применение снижает неопределённость прогноза индивидуализированных доз внутреннего облучения.

В модель введены параметры, количественно описывающие устойчивые во времени факторы, наиболее влияющие на процесс формирования дозы внутреннего облучения. Международная комиссия по радиологической защите в 1990 году рекомендовала для расчёта индивидуализированных доз использовать возрастные группы, которые были сформированы по усреднённым антропометрическим данным [3]. Ранее выполненные исследования выявили различия в формировании дозы внутреннего облучения в зависимости от таких демографических факторов как пол и возраст [2, 4].

При калибровке модели используются значения индивидуализированных доз внутреннего облучения $E_{i,j,k}(T)$ при $1987 \leq T \leq 2023$, реконструированные по значениям годовых эффективных доз внутреннего облучения репрезентативного лица $E_k^{ref}(i, j, k)$ — индексы пола, возраста и населённого пункта).

Годовая индивидуализированная эффективная доза внутреннего облучения линейно зависит от годовой эффективной дозы внутреннего облучения репрезентативного лица:

$$E_{i,j,k} = C_{i,j} \cdot E_k^{ref}, \quad (1)$$

где $C_{i,j}$ — двумерный тензор, линейно преобразующий элементы пространства годовых эффективных доз внутреннего облучения репрезентативных лиц в элементы пространства годовых индивидуализированных доз внутреннего облучения.

Значения $c_{i,j}$, содержащиеся в тензоре $C_{i,j}$, постоянны, так как пол и возраст — устойчивые во времени факторы. Значения $c_{i,j}$ определены в результате статистического анализа значительного объёма результатов СИЧ-измерений содержания ^{137}Cs в организме на спектрометре излучения человека и приведены в таблице 3. Значение

Таблица 3 — Значения $c_{i,j}$

i	j			
	1	2	3	4
1	0,13	0,17	0,30	0,35
2	0,15	0,23	0,48	0,49

индекса $i=1$ присвоено женщинам, $i=2$ — мужчинам. Введены четыре возрастные группы: $j=1$ соответствует детям до 6 лет включительно, $j=2$ — детям от 7 до 17 лет, $j=3$ — взрослым от 18 до 59 лет и $j=4$ — лицам 60 лет и старше.

Прогнозные значения годовой индивидуализированной дозы внутреннего облучения $E_{i,j,k}(T)$ ($T \geq 2024$) определяются с применением экстраполяционной регрессионной кривой:

$$E_{i,j,k}(T) = E_{i,j,k}^0 \exp\left(-0.693 \cdot \frac{T - 1987}{\tau_{i,j,k}}\right), \quad (2)$$

где $\tau_{i,j,k}$ — период полуснижения индивидуализированной дозы внутреннего облучения в группе (i,j) населённого пункта k .

Значения постоянных параметров модели $E_{i,j,k}^0$ и $\tau_{i,j,k}$ определяются методом наименьших квадратов по реконструированным значениям $E_{i,j,k}(T)$, см. (1).

При подготовке статьи использовалось по 37 значений $E_{i,j,k}^n(T_n - 1987)$ с 1987 по 2023 год. Определение параметров нелинейной регрессии свелось к решению задачи аппроксимации экспоненциальной функцией от времени дискретной зависимости, заданной с временным лагом 1 год. Значение параметров $E_{i,j,k}^0$ и $\tau_{i,j,k}$ подбиралось так, чтобы сумма квадратов отклонений регрессионной кривой от дискретных известных значений $E_{i,j,k}^{ref}$ была минимальной:

$$\sum_{n=1}^{37} \left\{ (E_{i,j,k}^n(T_n - 1987) - E_{i,j,k}^0 \exp(-0.693 \cdot \frac{T_n - 1987}{\tau_{i,j,k}}))^2 \right\} \rightarrow \min, \quad (3)$$

Минимум суммы квадратов отклонений (3) определялся с использованием приложения Windows Microsoft Excel, где реализован метод построения трендов путём аппроксимации регрессионной зависимости экспоненциальной функцией. Матрицу ретроспективных значений $E_{i,j,k}^n(T_n - 1987)$ загружали на листы MS Excel.

При построении прогнозов $D_{i,j,k}(T)$ — индивидуализированных накопленных доз

внутреннего облучения в населённых пунктах, — использовались прогнозные значения годовых индивидуализированных доз $E_{i,j,k}(T)$, рассчитанных по формуле (2):

$$D_{i,j,k}(T) = D_{i,j,k}(2023) + \sum_{m=1}^{T-2023} E_{i,j,k}(T), \quad (4)$$

Здесь и далее при расчётах дозы зародыша и плода при внутриутробном развитии принимались значения эффективной дозы ребёнка до 1 года. Это приближение требует дополнительного обоснования или уточнения.

Апробация прогнозной модели, построенной в условиях высокой неопределённости и неполных данных, является неотъемлемой задачей при моделировании процессов, связанных с формированием доз облучения. Важной составляющей апробации является сравнение с данными контрольной выборки, сформированной на основе инструментально полученных значений годовых доз внутреннего облучения по результатам измерений содержания ^{137}Cs в организме. Апробация разработанной модели проводилась двумя способами: по контрольной выборке из трёх населённых пунктов и на годовых индивидуальных эффективных дозах внутреннего облучения, рассчитанных по результатам инструментальных СИЧ-исследований содержания ^{137}Cs в организме (указанные дозы не применялись при калибровке модели).

В первом случае для трёх населённых пунктов, входящих в контрольную выборку, с использованием модели были рассчитаны годовые индивидуализированные дозы внутреннего облучения в каждый год периода с 2005-го по 2023 год. Индивидуализированные дозы облучения, рассчитанные с помощью модели, сравнивались со средними дозами облучения по указанным группам населения. Отклонения варьировали по модулю от 0 до 158 процентов. Среднеквадратичные (стандартные) отклонения по группам и годам не превышали 63 процента.

Во втором случае сравнение индивидуализированных доз внутреннего облучения, рассчитанных с использованием

модели с оценками по СИЧ-измерениям, проводилось по жителям, относящимся к различным половозрастным группам. Данным способом установлено, что отклонение модельной оценки от инструментально установленных значений варьируется от 0% до 133%, что вполне объяснимо, учитывая множество факторов, влияющих на процесс дозоформирования, и малую величину доз облучения. Средняя ошибка оценки индивидуализированной дозы внутреннего облучения населения в условиях неопределённости и неполных данных СИЧ-измерений составила 32 процента.

На заключительном этапе разработанная модель апробирована на предмет построения прогнозов индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения для любого момента времени и для любой категории населения Республики Беларусь. При апробации модели построен прогноз индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию и проживающих в населённых пунктах, входящих в контрольную выборку, в том числе на 2036 и 2056 годы.

В качестве примера на рисунке 1 приведён прогноз годовых индивидуализированных доз внутреннего облучения мальчиков в возрасте до 6 лет для Комарина на 2024–2056 годы. На горизонтальной оси 1 соответствует 1987 году, так как результаты СИЧ 1986 года при построении прогноза не учитывались по причине наличия ингаляционной составляющей поступления радионуклидов и, главное, аэрального, т.е. некорневого загрязнения сельскохозяйственных растений.

На рисунке 1 в качестве годовых индивидуализированных доз внутреннего облучения с 1987-го по 2023 год приняты значения соответствующих средних групповых доз внутреннего облучения, рассчитанных по результатам СИЧ-измерений. На рисунке 2 в качестве примера приведён прогноз накопленной дозы внутреннего облучения для мальчика, родившегося 1 октября 2024 года, при проживании в Комарине до 33 лет, т.е. до 2056 года.

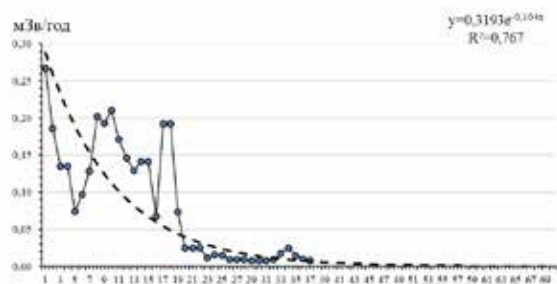


Рисунок 1 — Прогноз годовых индивидуализированных доз внутреннего облучения мальчиков в возрасте до 6 лет, проживающих в н.п. Комарин

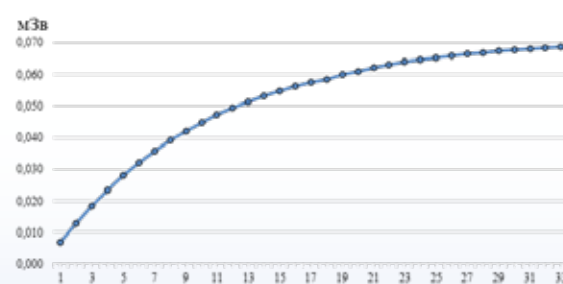


Рисунок 2 — Прогноз накопленной дозы внутреннего облучения для мальчика 2024 г.р. при проживании в Комарине до 33 лет, мЗв

Аналогично в качестве примера построен прогноз индивидуализированных доз внутреннего облучения для мужчин возрастом от 18 до 59 лет, проживающих в Светиловичах (рисунок 3).

Прогноз накопленных доз для мужчин 1968 года рождения, проживающих в Светиловичах, приведён на рисунке 4.

На рисунках 1 и 3 приведены параметры регрессионных кривых: 0,104 и 0,091 соответственно. Указанные значения соответствуют периодам полуснижения индивидуализированных доз внутреннего облучения $\tau_{i,j,k}$ равным 7 и 8 годам. В то время, как, например, для пенсионерок из Наровли этот параметр превышал 10 лет. Установлено, что в настоящее время период полуснижения у некоторых групп населения увеличился. Например, по последним 19 годам наблюдений $\tau_{i,j,k}$ составлял для мальчиков 12 лет.

При использовании всего интервала наблюдений значение критерия R^2 варьирует в интервале 0,6–0,9, что при аппроксимации временного ряда групповых доз внутреннего облучения следует считать удовлетворительной величиной. Значения критерия R^2 показывают значительно более низкую надёжность прогноза при сужении обучающего интервала, поэтому предлагается использовать весь интервал наблюдений при построении прогнозов индивидуализированных (накопленных) доз внутреннего облучения. Использование других функциональных зависимостей в качестве регрессионных кривых также приводит к значительно меньшему значению R^2 или значительно

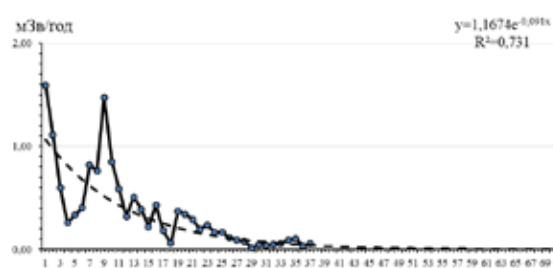


Рисунок 3 — Прогноз внутреннего облучения мужчин 18–59 лет для Светиловичей

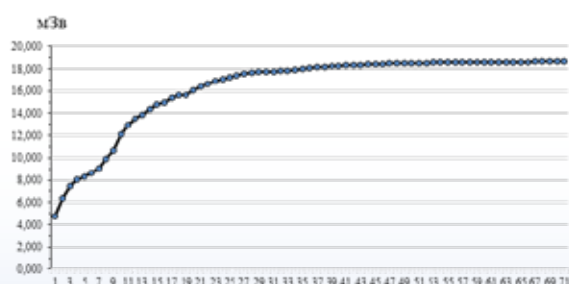


Рисунок 4 — Прогноз накопленных доз для мужчин 1968 года рождения для Светиловичей

сужает горизонт прогноза при установленном доверительном интервале $p=0,95$.

Достигнутая ошибка расчёта индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС, даже для более близкого горизонта прогноза составляла 25–35% [5, 6]. Прогностическая ценность метода прогнозирования — 85% [5]. Однако отклонения были обусловлены как упомянуты-

ми ошибками расчёта индивидуализированных доз внутреннего облучения, так и «статистической» составляющей, которая значительно выше ошибки расчёта.

Общеизвестно, что только из-за сезонности поступления ^{137}Cs в организм, например, с «дарами леса», неопределённость оценки годовой индивидуальной дозы внутреннего облучения по инструментальным данным СИЧ при доверительном интервале $p=0,95$ составляет 70% (с учётом погрешности дозового коэффициента). Погрешность результатов инструментального определения содержания ^{137}Cs в организме составляет от 30% ($p=0,95$) по паспортным данным применяемых бортовых спектрометров облучения человека при соблюдении рабочих условий эксплуатации [7].

Указанные неопределённости приведены без учёта минимальной измеряемой активности (далее МИА), которая в зависимости от веса и роста исследуемого лица, составляет от 56 до 220 Бк ^{137}Cs [10]. Значение МИА присваивается лицу при более малой активности, т.е. когда за время измерения 1 час статистическая погрешность не достигла 50% ($p=0,95$). В такой ситуации наблюдалась неопределённость оценки индивидуальной дозы внутреннего облучения 600% при попытке сравнить результаты оценок, выполненных на основе результатов измерений на различных спектрометрах.

В дальнейшем «статистическую» составляющую ошибки снизить не представляется возможным, однако её нижнюю границу оценить можно. Так как процессы, приводящие к неопределённостям результатов измерений и оценок доз независимы, т.е. ортогональны, то стандартное отклонение суммарного воздействия (без учёта влияния минимальной детектируемой активности) при $p=0,95$ составляет не менее $\sqrt{70^2 + 30^2} = 76\%$.

Поэтому усилия были направлены на снижение расчётной составляющей, т.е. ошибки расчёта индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения лиц по имеющимся исходным данным. В частности, были более тщательно отобра-

ны населённые пункты в обучающую выборку с точки зрения наличия артефактов и малых значений доз облучения. При калибровке модели учитывалось количество жителей, проживающих в населённом пункте, и количество обследованных в данном году. В результате ошибка расчёта индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС, составила не более 15%.

Заключение

В результате апробации разработанной модели подтверждена возможность её применения для оценки и прогноза индивидуализированных накопленных доз облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС и проживающих на радиоактивно загрязнённой территории. Установлено, что модель позволяет снизить неопределённость оценки индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения не менее чем на 20%. Прогностическая ценность метода прогнозирования повышена не менее чем на 10%. Улучшение указанных показателей достигнуто в результате учёта доз репрезентативного лица в населённых пунктах и повышения требований к обучающей выборке при калибровке модели.

Впервые сделан прогноз индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения на период с 1986 по 2036 год и на период с 1986 по 2056 год, что соответствует 50 и 70 годам жизни человека, родившегося в год аварии на ЧАЭС. Указанный прогноз основан как на инструментальных данных о содержании ^{137}Cs в организме в поставарийный период, так и на прогнозируемых дозах облучения.

Рассчитанные в результате проведённого исследования индивидуализированные накопленные с момента аварии дозы облучения лиц, включённых в Госрегистр, позволят более достоверно проводить радиационно-эпидемиологические исследования по установлению зависимости «доза» — эффект» и оценку рисков отда-

лённых последствий радиационного воздействия. В том числе будут проводиться эпидемиологические исследования развития радиационно-зависимых заболеваний лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС, с учётом полученных ими индивидуализированных накопленных доз облучения.

Выявление групп повышенного радиационного риска обеспечит оказание адресной медицинской помощи и, соответственно, снижение уровня заболеваемости и смертности населения в целом. Прогноз накопленных доз облучения населения является обоснованием при планировании хозяйственной деятельности и развитии системы здравоохранения на территориях радиоактивного загрязнения.

Библиографический указатель

1. Реконструкция индивидуализированных доз внутреннего облучения в условиях неопределённости и неполных данных СИЧ-измерений / Н.Г. Власова [и др.] // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2024. – № 2(32). – С.48-55.
2. 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. – 10 с.

3. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part I: A report of Task Group of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. Publication 56. International Commission on Radiological Protection. – Oxford: Pergamon Press, 1990. – 122 p.

4. Власова, Н.Г. Метод индивидуализации дозы внутреннего облучения населения, проживающего на загрязнённой территории, при недостатке или отсутствии данных / Н.Г. Власова, Е.А. Дрозд // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2019. – № 1(21). – С. 51-55.

5. Разработать и внедрить программное обеспечение для расчёта индивидуализированных накопленных доз облучения лиц, включённых в Государственный регистр: отчёт о НИР (заключ.) / Государственная программа по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2011–2015 годы / ГУ «РНПЦ РМиЭЧ»; рук. темы Н.Г. Власова. – Гомель, 2015. – 176 с. – ГР № 20113777.

6. Estimated Radiation Doses Received by New Mexico Residents from the 1945 Trinity Nuclear Test / S.L. Simon [et al.] // Health Phys. – 2020. – Vol. 119(4). – P. 428-477. doi: 10.1097/HP.0000000000001328.

7. Спектрометр излучения человека СКГ-АТ1316. Руководство по эксплуатации / НПУП «АТОМТЕХ. – Минск, 2002. – 63 с.

N.G. Vlasova, C.N. Bouzdalkin, L.N. Eventova, A.N. Mataras, G.N. Yevtushkova

PREDICTION OF INDIVIDUALIZED ACCUMULATED DOSES OF INTERNAL RADIATION

Studies aimed at improving the accuracy of forecasting individualized accumulated doses of internal radiation to persons exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident and living in a radioactively contaminated area have been conducted. As a result, a model has been developed containing parameters that quantify the time-stable factors that most influence the process of internal radiation dose formation, such as gender and age. The model was tested and compared with the data of a control sample formed on the basis of instrumentally obtained values of annual doses of internal radiation. It has been found that the model reduces the uncertainty of estimating individualized accumulated doses of internal radiation by at least 20%. The predictive value of the forecasting method has been increased by at least 10%. The improvement of these indicators was achieved as a result of taking into account the doses of a representative person in populated areas and increasing the requirements for the training sample when calibrating the model.

Key words: *individualized dose of internal radiation, settlement, human radiation spectrometer, reconstruction*

Поступила 14.02.25