Методы дозиметрического обеспечения радиационно-эпидемиологических исследований НРЭР

Власов О.К., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А.

МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск

Представлен обзор методов реконструкции динамики доз облучения населения после аварии на ЧАЭС, используемых в НРЭР, для обеспечения радиационно-эпидемиологических исследований. Разработанные методы основаны на единой базе данных НРЭР и Санкт-Петербургского НИИРГ радиометрии населения Брянской и Калужской областей и на модификации разработанных в СПб НИИРГ методик, официально утверждённых Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Для дозиметрического обеспечения радиационно-эпидемиологических исследований в НРЭР используется аналитическая модель, представляющая собой модификацию официальной методики реконструкции доз внутреннего облучения щитовидной железы (ЩЖ) населения загрязнённых областей Российской Федерации после аварии на ЧАЭС. Описана объединённая с СПб НИИРГ база данных радиометрии активности ^{131}I в ЩЖ, радиометрии активностей ^{137}Cs в теле жителей Брянской и Калужской областей в год аварии и СИЧ-измерений в последующие годы в Брянской области. Описан метод модификации официальных методик оценок доз внутреннего облучения ЩЖ и всего тела населения в год аварии на ЧАЭС. Результаты верификации методов, разработанных в НРЭР, показывают статистическую незначимость различий между расчётными дозами и данными каталогов, пересчитанных к средним дозам населения в населённых пунктах (НП). Рассчитанная база данных о динамике накопленных годовых и накопленных доз внешнего, внутреннего облучения и эффективных доз представляет собой информацию, необходимую для проведения радиационно-эпидемиологических исследований. Приведены результаты оценок стандартных ошибок расчётных величин средних в НП и индивидуальных доз внешнего и внутреннего облучения населения.

Ключевые слова: авария на ЧАЭС, радиометрия и СИЧ-измерения населения, модели транспорта радионуклидов по пищевым цепочкам, методы оценок доз облучения, действующие методические указания, методы НРЭР, реконструкция и верификация, распределения индивидуальных доз, оценки неопределённостей, детерминированные и вероятностные оценки доз облучения.

Введение

Специфика радиационно-эпидемиологических исследований, проводимых в НРЭР, обусловливает использование следующей информации:

- дозы внутреннего облучения щитовидной железы (ЩЖ);
- годовая динамика средних в населённых пунктах (НП) эффективных доз, доз внешнего и внутреннего облучения, накопленных к текущему году и ожидаемых за 70 лет;
- средние дозы облучения жителей с учётом их возраста и истории перемен мест жительства.

Наличие в НРЭР таких категорий населения как эвакуированные, отселённые, родившиеся до и после аварии, ликвидаторы, проживающие на загрязнённых территориях, приводит к необходимости расчёта динамики накопления доз за произвольные интервалы времени с учётом миграции населения.

В настоящей статье приводится краткий обзор методов реконструкции доз облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), разработанных в НРЭР для обеспечения

Власов О.К.* – зав. лаб., д.т.н.; Щукина Н.В. – ст. науч. сотр.; Чекин С.Ю. – зав. лаб.; Туманов К.А. – зав. лаб., к.б.н. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

*Контакты: 249035, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (484) 399-32-45; e-mail: nrer@obninsk.com.

радиационно-эпидемиологических исследований и исследований динамики транспорта радионуклидов по пищевой цепочке после радиационных аварий с выбросом продуктов в атмосферу.

Разработанные методы основаны на единой базе данных НРЭР и Санкт-Петербургского НИИРГ радиометрии населения Брянской и Калужской областей и на модификации разработанных в СПб НИИРГ методик, официально утверждённых Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзором) [1].

Материалы и методы

Для реализации методов реконструкции доз населения в НРЭР разработан программно-технический комплекс в среде Mathcad15, состоящий из следующих блоков:

- эталонная база НП Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей, содержащая код ТЕРСОН, географические координаты НП, плотности выпадения ^{137}Cs в НП, типы почв в ареалах НП по механическому составу;
- база входных радиозэкологических данных для расчётных моделей;
- эталонные базы данных каталогов Роспотребнадзора по дозам облучения ЩЖ и эффективных доз населения Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей с привязкой НП из перечней каталогов к кодам ТЕРСОН;
- база данных радиометрии жителей Брянской, Калужской и Тульской областей.

Программно-технический комплекс для первого года аварии на ЧАЭС состоит из:

- базы данных спектрометров измерения активности ^{137}Cs в теле человека (СИЧ-измерения) в 1990-1994 гг.;
- блока расчётов динамики активностей ^{131}I в ЩЖ и $^{137+134}\text{Cs}$ во всём теле жителей, индивидуальных доз по данным их радиометрии и средних по НП возрастзависимых доз внутреннего облучения ЩЖ и доз на всё тело по моделям Роспотребнадзора [1] и НРЭР [2-5];
- блока расчётов динамики индивидуальных годовых доз по данным СИЧ-измерений жителей НП и средних по НП накопленных и годовых доз внешнего и внутреннего облучения населения за весь период облучения, а также эффективных доз по моделям НРЭР [6-8];
- блока имитационных радиозэкологических моделей транспорта радионуклидов ^{131}I и $^{134+137}\text{Cs}$ по элементам трофической цепочки, разработанных в НРЭР [9-13];
- базы расчётных доз облучения населения для всех НП Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей;
- блока картографической визуализации баз входных и расчётных данных.

1. База входных данных

База радиозэкологических данных. В основу базы радиозэкологических данных положен эталонный справочник 13-значных кодов Terson и географических координат НП с кодами областей, районов, сельсоветов, НП и их типов: сельских, ПГТ, городов и городов областного подчинения. С начала работ по чернобыльской тематике в эталонный справочник были занесены данные Госгидромета СССР о плотностях выпадения ^{137}Cs в НП с плотностью его выпадения больше 37 кБк/м^2 [9]. Затем с использованием оцифрованных карт «Атласа радиоактивного загрязнения европейской части России, Белоруссии и Украины» плотностей выпадения ^{137}Cs и мощностей

экспозиционных доз в воздухе [10] методами ГИС-технологий в работе [6] были реконструированы плотности выпадения ^{137}Cs во всех НП Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей.

База данных радиометрии жителей Брянской, Калужской и Тульской областей в год аварии на ЧАЭС. В настоящее время объединённая при выполнении совместных работ по чернобыльской тематике дозиметрическая база данных НРЭР и СПб НИИРГ содержит результаты проведённой в 1986 г. радиометрии ЩЖ и всего тела жителей Брянской, Калужской, Тульской областей, проживающих в НП, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС (табл. 1).

Таблица 1

Структура базы данных НРЭР жителей загрязнённых областей с радиометрией щитовидной железы и всего тела

Структура базы данных НРЭР	Брянск	Калуга	Тула ¹	Брянск ²	Калуга
	^{131}I в ЩЖ			^{137}Cs в теле	
Число жителей	1891	28311	223	14579	28311
Число районов	14	7	1	6	7
Число населённых пунктов	98	297	32	177	297
Плотности выпадения ^{137}Cs в, кБк/м ²	6-4340	4,8-482	17-475	45-4350	4,8-482
Минимальный возраст на время аварии	0	0	0,5	0	0
Максимальный возраст на время аварии	76	76	18 ²	84	93

¹ – средние значения по населённым пунктам Плавского района в возрастных группах; ² – возраст больше 18 лет, все взрослые жители.

База данных радиометрии жителей Брянской области содержит также результаты 466300 измерений инкорпорированной активности радиоцезия на установках СИЧ в 27 районах Брянской области у 167325 человек, проведённых в 1990-1994 гг.

В основном измерения проводились в наиболее загрязнённых радионуклидами районах области – Новозыбковском (34,6% измерений), Клиновском (20%), Красногорском (10,4%), Гордеевском (7,4%) и Злынковском (5,8%).

2. Методы реконструкции доз облучения населения

Дозы облучения ЩЖ и всего тела в год аварии. В НРЭР были выполнены работы по модификации действующей методики реконструкции средних в НП доз внутреннего облучения ^{131}I ЩЖ жителей загрязнённых областей [1] и созданию на её основе методики для доз внутреннего облучения ^{137}Cs всего тела населения в первый год после аварии на ЧАЭС. Математические модели обеих методик представляет собой аналитические соотношения, описывающие относительную динамику активностей радионуклидов в растительности, молоке, ЩЖ и организме человека в цепочке последовательных однокамерных моделей с постоянными во времени скоростями перехода между камерами и зависящими от возраста человека после однократного выпадения радионуклидов на растительность.

Основные этапы создания этой методики приведены в серии статей [2-5]. В них приводятся основные соотношения для расчёта относительных интегралов поступления ^{131}I [1] и ^{137}Cs в организм человека за счёт ингаляции и употребления загрязнённых продуктов питания: зелени и молока, активностей ^{131}I в ЩЖ и ^{137}Cs в организме человека и накопления доз внутреннего облу-

чения. Относительные индивидуальные дозы в ЩЖ и организме человека рассчитываются как сумма произведений интегралов суммарного относительного поступления радионуклидов в организм с вдыхаемым воздухом и пищей на соответствующие дозовые коэффициенты, зависящие от возраста. Абсолютные значения доз рассчитываются путём их нормировки на отношение измеренных активностей к их расчётным относительным величинам на время измерений.

Дозы внутреннего облучения всего тела населения с 1987 г. Реконструкция годовых и накопленных средних по НП доз внешнего облучения за весь период облучения проводится по разработанному в НРЭР методу [6, 7] создания базы данных типов почв по механическому составу в ареалах НП на основе данных каталогов [11, 12].

Основные положения разработанного метода состоят в следующем:

1) С использованием методик оценки средних в НП эффективных доз [1] и базы данных о типах почв в ареалах НП рассчитывались дозы внутреннего облучения населения Калужской, Орловской и Тульской областей с 1987 по 1995 гг. и с 1996 по 2005 гг. населения Брянской области (обусловленные корневым загрязнением продуктов питания).

2) В каждой области для всех НП из перечня каталогов с одинаковыми типами почв по механическому составу анализировались зависимости отношений доз из каталогов [11, 12] к расчётным дозам от плотности выпадения ^{137}Cs в НП.

3) Для НП с большими отличиями расчётных доз внутреннего облучения с 1987 по 1995 гг. от доз из каталогов типы почв уточнялись до тех пор, пока эти отличия не становились минимальными.

4) В районах из перечня каталогов в НП с плотностью выпадения ^{137}Cs меньше 37 кБк/м² использовались параметрические для каждого типа почв среднерайонные регрессионные зависимости отношения средних в НП доз взрослых в каталогах [11, 12] к расчётным дозам от плотности выпадения ^{137}Cs ; для всех НП в районах, не входящих в перечень каталогов, использовались аналогичные среднеобластные параметрические зависимости.

Для выполнения этой процедуры табличные данные о динамике коэффициентов перехода ^{137}Cs из почв всех N типов, упорядоченных в порядке уменьшения коэффициентов перехода от песчаных до аллювиальных почв для каждого продукта питания [1], перестраивались к данным о динамике их минимальных и максимальных значений:

$$Kp_{max}^k = \begin{pmatrix} \sqrt{Kp^k \cdot Kp^{k+1}}, & \text{при } k \in 1 \dots N-1 \\ Kp^N, & \text{при } k = N \end{pmatrix},$$

$$Kp_{min}^k = \begin{pmatrix} Kp^1, & \text{при } k = 1 \\ \sqrt{Kp^{k-1} \cdot Kp^k}, & \text{при } k \in 2 \dots N \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Минимальные Kp_{min}^k и максимальные Kp_{max}^k значения коэффициентов перехода присваивались всем НП по их географическим координатам и цифровой карте типов почв по механическому составу для 4-х областей.

Затем по этим данным и данным [1] о динамике коэффициентов перехода и годовых потреблениях продуктов питания (R_k) рассчитывались минимальные и максимальные значения накопленных доз внутреннего облучения $D_{calc}(t_1 t_2)$ Брянской области за 1996-2005 гг., Калужской, Орловской и Тульской областей за 1987-1995 гг.

$$D_{calc}(t_1 t_2) = \sigma_{137}^{eff} \int_{t_1}^{t_2} [R_{milk} Kp_{milk}(x) + R_{pot} Kp_{pot}(x)] dx + \\ + R_{mush} \delta(t_{mush}, t_2) \int_{t_{mush}}^{t_2} Kp_{mush}(x) dx, \text{ мЗв}, \quad (2)$$

где σ_{137}^{eff} – эффективная плотность выпадения ^{137}Cs в НП, равная среднерайонной плотности выпадения ^{137}Cs для ПГТ и городов с численностью населения более 30 тыс. человек и плотности выпадения ^{137}Cs в остальных НП; *milk, mush, pot* – молоко, грибы и картофель соответственно.

$$\delta(t_{mush}, t_2) = \begin{cases} 1, & t_2 > t_{mush} \\ 0, & t_2 \leq t_{mush} \end{cases}. \quad (3)$$

Затем для каждого НП из перечня справочников происходило переопределение типа почв таким образом, чтобы величины расчётных доз (2) попадали в интервал минимальных и максимальных расчётных доз для каждого типа почв по механическому составу.

Для НП с плотностью выпадения ^{137}Cs меньше 37 кБк/м², не вошедших в справочники, для каждого типа почв сначала строились регрессионные зависимости минимальных и максимальных доз от плотностей выпадения ^{137}Cs . С использованием этих регрессий значения размахов расчётных доз для этих НП, определённые по плотности выпадения ^{137}Cs , использовались для уточнения типов почв по механическому составу.

3. Основные результаты реконструкции доз облучения населения 4-х областей

Дозы внутреннего облучения ЩЖ и всего тела за первый год после аварии (аэральное загрязнение растительности). Данные об активностях ^{131}I в ЩЖ и ^{137}Cs в теле жителей с их радиометрией использовались в работах [4, 5] для реконструкции их индивидуальных доз внутреннего облучения ЩЖ и всего тела. В этих работах оценены основные факторы, определяющие динамику активностей ^{137}Cs в молоке и организме жителей загрязнённых территорий в год аварии на ЧАЭС. Показано, что в течение первого года после аварии на ЧАЭС корневой путь поступления ^{137}Cs в растительность и молоко практически незначим для доз внутреннего облучения всего тела населения. Установлено, что в течение 200 суток после аварии динамика активности ^{137}Cs в теле жителей будет определяться только активностью ^{137}Cs в молоке за счёт поверхностного загрязнения травы пастбищ. При радиометрии жителей в более поздние сроки после начала стойлового сезона динамика активности ^{137}Cs в их теле будет определяться активностью ^{137}Cs в молоке за счёт загрязнения ^{137}Cs сена первого укоса.

Для выявления общих закономерностей формирования доз внутреннего облучения населения на территории, загрязнённой после чернобыльской аварии, реконструированные индивидуальные дозы внутреннего облучения всех жителей с измерениями ^{131}I в ЩЖ и ^{137}Cs в их теле приводились к стандартным дозам. Стандартная доза определялась как доза сельского жителя возраста 4 года для доз на ЩЖ, и 18 лет для доз на всё тело, с соответствующими этим возрастам суточным потреблением молока и зелени, с временами начала их потребления и начала выпаса молочных коров, начала радиоактивных выпадений в регионе, без учёта переездов жителей и контрмер по следующему соотношению:

$$D_{st,meash}^{nucl}(\sigma_{137}) = D_{meash}^{nucl}(A, "vc", t_{past}, "yes", \sigma_{137}) \frac{D_1^{nucl}(A_{st}, "v", t_{dep}, "not")}{D_1^{nucl}(A, "vc", t_{past}, "yes")}, \quad (4)$$

где $D_{st,meash}^{nucl}$ – стандартная индивидуальная доза внутреннего облучения жителя с радиометрией радионуклида в его организме, мЗв; D_{meash}^{nucl} – индивидуальная доза внутреннего облучения человека радионуклидом по результатам его радиометрии, мЗв; A – возраст человека на время измерения; " vc " – тип НП: c – городской, v – сельский; A_{st} – стандартный возраст человека, для дозы на ЩЖ принимается равным 4 года, для дозы внутреннего облучения всего тела – 18 лет; t_{past} – время начала выпаса; t_{dep} – время начала радиоактивных выпадений в регионе проживания; " not ", " yes " – доза без учёта и с учётом контрмер; $D_1^{nucl}(A, "vc", t_{past}, "yes")$ – относительная доза внутреннего облучения человека, равная:

$$D_1^{nucl}(A, "vc", t_{past}, "yes") = K_{D,ing}^{nucl}(A)[Int_{milk,1}^{nucl}(A, "vc", t_{past}, "yes") + Int_{gr,1}^{nucl}(A, "vc", t_{past}, "yes")] + K_{D,inh}^{nucl}(A)Int_{inh,1}^{nucl}(A), \quad (5)$$

где Int_1^{nucl} – интегралы относительного поступления ^{131}I в ЩЖ или ^{137}Cs в тело за счёт молока ($milk$), зелени (gr) и ингаляции (h); $K_{D,ing,inh}^{nucl}$ – дозовые коэффициенты радионуклида при его поступлении в организм человека вместе с пищей (ing) и за счёт ингаляции (inh), мЗв/кБк; vc – тип НП: c – городской, v – сельский.

Зависимости стандартных доз от плотностей выпадения ^{137}Cs вместе с их степенными регрессиями для доз на ЩЖ так же, как и в [1], различны для городских и сельских жителей и имеют региональные особенности. Эти особенности обусловлены введением контрмер в Брянской области, влиянием погодных условий в разных областях на динамику биомассы растительности, на время начала выпаса молочных коров и потребления зелени. В отличие от методики [1], где регрессионная зависимость для доз на ЩЖ аппроксимировалась неоднородной линейной функцией, в работе [4] эти зависимости для доз на ЩЖ и на всё тело аппроксимировались физически обоснованной в работе [5] степенной функцией.

Затем в работе [5] средние в НП стандартные дозы пересчитывались к модифицированным стандартным дозам путём их пересчёта к погодным условиям, времени выпадений и отношений удельных активностей $^{131}I/^{137}Cs$ на время аварии к условиям в центральной части Брянской области. Степенные регрессии средних по НП модифицированных стандартных доз облучения от плотностей выпадения ^{137}Cs практически не зависят ни от области, ни от типа НП (рис. 1 Приложения). Реконструкция средних в НП доз внутреннего облучения ЩЖ и всего тела в первый год после аварии для всех НП 4-х областей производится путём их обратного пересчёта от стандартизованных доз [5].

Оценка неопределённостей реконструкции средних в НП доз внутреннего облучения населения за первый год после аварии на ЧАЭС. Стандартное геометрическое отклонение логнормального распределения неопределённости оценок числа жителей НП по индивидуальным дозам их внутреннего облучения населения за первый год после аварии на ЧАЭС (σ_D) может быть записана в следующем виде [13, 14]:

$$\sigma_D = \sigma_{D_{st}}^{HP} \cdot \sigma_{D_{st}}^{\sigma_{Cs}}, \quad (6)$$

где σ_D – стандартное геометрическое отклонение оценки средней дозы внутреннего облучения индивидуума в НП; $\sigma_{D_{st}}^{HP}$ – стандартное геометрическое отклонение распределения отношения стандартных доз внутреннего облучения (рис. 2а,б Приложения) измеренных жителей в НП к их среднегеометрическим значениям в этих же НП; $\sigma_{D_{st}}^{\sigma_{Cs}}$ – стандартное геометрическое отклонение отношения среднегеометрических значений стандартных доз внутреннего облучения в НП к их значениям, оценённым по регрессионным зависимостям (рис. 2в,г Приложения).

В результате обработки данных всех распределений получены следующие значения стандартных геометрических отклонений: $\sigma_{D_{st}^{Cs}}=2,0-2,3$; $\sigma_{D_{st}^{HP}}=1,7$; $\sigma_D=3,4-3,7$.

Эффективные дозы облучения населения с 1987 г. Дозы внешнего облучения. Динамика накопления доз внешнего облучения населения рассчитывалась по соотношениям методических указаний [1] с использованием эталонной базы данных о типах НП, плотностях выпадения ^{137}Cs и данных методических указаний [1] о среднем по районам времени начала, окончания выпадений, радиоизотопных составах выпадений продуктов аварии на ЧАЭС на местность. Расчёты показали, что число НП со значительными в 1,5-2 раза отклонениями расчётных величин доз внешнего облучения населения за 1986 г. и с 1987 по 1995 гг. от данных каталога [11] невелико (рис. 3 Приложения).

Дозы внутреннего облучения. В серии методик по оценке эффективных доз облучения населения [1] приведены данные о динамике коэффициентов перехода ^{137}Cs из почв основных их типов по механическому составу в дозообразующие продукты питания: молоко, картофель и грибы. Необходимая для таких оценок информация и преобладающих типах почв в ареалах НП восстанавливалась в 2 этапа. Первая версия этих данных была получена в работе [6] из оцифрованных карт типов почв йодного дефицита 4-х областей России путём приведения в ГЕОХИ РАН экспертным путём соответствия типов почв по йодному дефициту к их типам по механическому составу [1]. Типы почв в ареалах НП восстанавливались по их географическим координатам на цифровой карте типов почв. Вторая версия типов почв в НП Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей создавалась по методу, изложенному в разделе 1. С её использованием реконструировалась динамика накопления средних в НП доз внутреннего облучения взрослого населения с 1987 по 2020 гг.

Сравнение расчётных данных с 1987 по 1995 гг. и с 1987 по 2005 гг. с аналогичными данными каталогов [11, 12], рассчитанных по фактическим материалам радиационного мониторинга в 1986-2005 гг., приведённое для примера на рис. 4 (Приложение) для 2005 г., показывает их вполне удовлетворительное согласие.

Средние в НП годовые дозы внутреннего облучения для взрослых жителей Брянской области за 1994 г., рассчитанные по данным их СИЧ-измерений, использовались для тестовой сверки с реконструированными расчётными дозами (рис. 5 Приложения).

Дополнительная верификация расчётных доз была проведена с использованием данных справочников среднегодовых доз (СГЭД₉₀) внешнего, внутреннего облучения и эффективных доз облучения жителей [15, 16] СГЭД₉₀ за 2011 и 2014 гг., рассчитанных для целей зонирования НП. Сама величина СГЭД₉₀ определялась как 90%-ый квантиль в распределении годовых доз в НП, рассчитанных для условий «без активных мер радиационной защиты».

В работе [8] приведён метод пересчёта данных справочников внутреннего и внешнего облучения критических групп (СГЭД₉₀), применяемых для целей зонирования НП, к средним дозам по НП дозам взрослых, используемым в радиационно-эпидемиологических исследованиях. Метод разработан на основе приведённых в работе [8] для доз внешнего и внутреннего облучения соотношений между дозами критических групп и дозами средних в городских и сельских НП. Полученные в работе [8] стандартные геометрические отклонения отношений индивидуальных доз к средним в НП дозам внешнего и внутреннего облучения для НП разных типов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Стандартные геометрические отклонения отношений индивидуальных к средним в населённых пунктах доз внешнего и внутреннего облучения для НП разных типов

Тип населённых пунктов	Вид облучения	Стандартные геометрические отклонения (σ_G)
Село, посёлок, деревня	внешнее	1,44
	внутреннее	1,92
Посёлок городского типа, город	внешнее	1,50
	внутреннее	2,22

Отметим практически полное совпадение величин стандартных отклонений для доз внутреннего облучения при корневом поступлении ^{137}Cs в кормовую и продовольственную растительность после года аварии на ЧАЭС в табл. 2 с аналогичными данными в соотношении (6) для первого года аварии.

Зависимости доз каталога [15] и расчётных для доз внешнего облучения за 2011 г. в Брянской области от плотностей выпадения ^{137}Cs и гистограммы их рассеивания (рис. 6 Приложения), аналогичные рисунки для доз внутреннего облучения и эффективных доз за 2014 г. в Тульской области (рис. 7 Приложения) показывают их вполне удовлетворительное согласие. В среднем по всему объёму данных размах отношений расчётных доз к пересчитанным средним в НП дозам в каталогах [15, 16] составляет 0,91-1,14, для доз внутреннего облучения и эффективных доз соответственно 0,88-1,26 и 0,87-1,2 (табл. 3).

Таблица 3

Статистические параметры отношений средних расчётных доз к средним дозам в населённых пунктах, реконструированным по средним дозам критических групп

Брянская область	μG	σG	Калужская область	μG	σG	Орловская область	μG	σG	Тульская область	μG	σG
Dext	1,14	1,12	Dext	0,91	1,04	Dext	1,24	1,15	Dext	1,01	1,11
Dint	1,13	1,46	Dint	0,88	2,16	Dint	1,26	1,42	Dint	0,9	1,48
Deff	1,13	1,18	Deff	0,87	1,18	Deff	1,2	1,16	Deff	0,96	1,17

μG , σG – среднегеометрические значения и стандартные геометрические отклонения; Dext, Dint, Deff – дозы внешнего, внутреннего облучения и эффективные дозы соответственно.

Учитывая, что стандартное геометрическое отклонение отношения среднегеометрических значений стандартных доз внутреннего облучения всего тела в НП, оценённым по данным радиометрии их жителей, к их значениям, оценённым по регрессионным зависимостям, равно 1,7, данные табл. 3 свидетельствуют о статистической незначимости различий между данными каталогов для средних в НП доз облучения населения [11, 12, 15, 16] и расчётными дозами.

Вполне удовлетворительное согласие средних в НП расчётных доз с данными даёт основание полагать, что рассчитанная нами база данных о динамике накопленных годовых и накопленных доз внешнего, внутреннего облучения и эффективных доз относится к средним дозам в населённых пунктах и представляет собой информацию, необходимую для проведения радиационно-эпидемиологических исследований.

Результаты расчётов средних в НП, накопленных к 2020 г., эффективных доз облучения взрослых на время аварии жителей 4-х областей на рис. 8 (Приложение) показывают, что ранг

областей по рангу увеличения площадей их территорий с увеличением эффективных доз облучения населения имеет вид: Калужская, Орловская, Тульская и Брянская области. Причём, только в 7 юго-западных районах Брянской области, несмотря на проведённые контрмеры, в большинстве НП суммарные накопленные эффективные дозы превышают 35 мЗв, суммарный предел накопленных доз за весь период 35-летний период облучения.

Заключение

Для проведения радиационно-эпидемиологических исследований в НРЭР разработан программно-технический комплекс, позволяющий проводить:

- реконструкцию динамики годовых и накопленных средних по НП эффективных доз облучения и доз облучения ЩЖ для населения Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей;
- реконструкцию индивидуальных доз внутреннего облучения всего тела и ЩЖ жителей по результатам их радиометрии и СИЧ-измерений;
- исследования динамики транспорта радионуклидов йода и цезия в окружающей среде после радиационных аварий с выбором продуктов в атмосферу.

Разработанные методы реконструкции индивидуальных и средних в НП эффективных доз облучения населения основаны на единой базе данных НРЭР и СПб НИИРГ радиометрии населения Брянской и Калужской областей и на модификации методик СПб НИИРГ, официально утверждённых Роспотребнадзором.

Методы реконструкции динамики доз внутреннего облучения верифицированы на базе данных радиометрии ^{131}I в ЩЖ и ^{137}Cs в теле жителей Брянской и Калужской областей в год аварии, на данных СИЧ-измерений активности ^{137}Cs в теле жителей Брянской области в 1994 г. и данных каталогов годовых за 2011 и 2014 гг. эффективных доз и её составляющих доз внешнего и внутреннего облучения населения в областях, загрязнённых после аварии на ЧАЭС.

Хорошее согласие доз населения, рассчитанных по методикам НРЭР, с данными каталогов Роспотребнадзора для критических групп населения, пересчитанных к средним дозам в НП, даёт основание для использования расчётных доз в радиационно-эпидемиологических исследованиях.

Литература

1. Оценка доз облучения населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС: Сб. методических документов /под ред. академика РАМН Г.Г. Онищенко. С-Пб., 2006. 180 с.
2. **Власов О.К., Щукина Н.В.** Модификация действующих методик реконструкции доз внутреннего облучения щитовидной железы и всего тела жителей населённых пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС в 1986 г. Часть 1. Основные соотношения и свойства методики реконструкции доз внутреннего облучения щитовидной железы и всего тела жителей населённых пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС в 1986 г. //Радиация и риск. 2009. Т. 18, № 4. С. 23-39.
3. **Власов О.К., Щукина Н.В.** Модификация действующих методик реконструкции доз внутреннего облучения щитовидной железы и всего тела жителей населённых пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС в 1986 г. Часть 2. Оценки влияния основных факторов, определяющих динамику активностей ^{137}Cs в молоке и организме жителей загрязнённых территорий осенью-зимой 1986 г. после аварии на ЧАЭС //Радиация и риск. 2010. Т. 19, № 1. С. 11-19.
4. **Власов О.К., Щукина Н.В.** Модификация действующих методик реконструкции доз внутреннего облучения щитовидной железы и всего тела жителей населённых пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС в 1986 г. Часть 3. Реконструкция индивидуальных и стандартных доз внутреннего облучения щитовидной железы и всего тела населения по результатам их радиометрии в 1986 г. //Радиация и риск. 2010. Т. 19, № 2. С. 21-35.
5. **Власов О.К., Щукина Н.В.** Модификация действующих методик реконструкции доз внутреннего облучения щитовидной железы и всего тела жителей населённых пунктов российской федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС в 1986 г. Часть 4. Модифицированный метод стандартизации доз внутреннего облучения щитовидной железы и всего тела жителей населённых пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС за первый год после аварии //Радиация и риск. 2010. Т. 19, № 3. С. 71-93.
6. **Власов О.К., Годько А.М., Щукина Н.В., Коробова Е.М.** Реконструкция динамики эффективных доз облучения населения, проживающего на загрязнённой в результате аварии на ЧАЭС территории, по официальным данным //Радиация и риск. 2007. Т. 16, № 2-4. С. 92-108.
7. **Власов О.К.** Схема реконструкции динамики доз внутреннего облучения населения на основе консервативных допущений, принятых в официальных методиках и при расчётах доз для каталогов //Радиация и риск. 2007. Т. 16, № 2-4. С. 109-132.
8. **Власов О.К., Брук Г.Я., Щукина Н.В.** Разработка и верификация технологии реконструкции эффективных доз облучения населения России после аварии на ЧАЭС //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 3. С. 28-45.
9. Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239+240. Обнинск: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, НПО «Тайфун», 2000. 181 с.
10. Атлас радиоактивного загрязнения европейской части России, Белоруссии и Украины. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1998.
11. Накопленные в 1986-1995 гг. средние эффективные дозы облучения жителей населённых пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. //Радиация и риск. 1999. Специальный выпуск 1. С. 1-129.
12. **Брук Г.Я., Балонов М.И., Голиков В.Ю., Базюкин А.Б., Романович И.К., Шутов В.Н., Звонова И.А., Жеско Т.В., Константинов Ю.О., Пархоменко В.И., Кравцова О.С., Кадука М.В., Кайдановский Г.Н., Братилова А.А., Травникова И.Г., Яковлев В.А., Власов А.Ю., Власов О.К., Щукина Н.В., Перминова Г.С., Липатова О.В., Марченко Т.А.** Средние накопленные за 1986-2005 годы эффективные дозы облучения жителей населённых пунктов Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей Российской Федерации, отнесённых к зонам радиоактивного загрязнения по постановлению

- правительства Российской Федерации № 1582 от 18 декабря 1997 г. «Об утверждении перечня населённых пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» //Радиация и риск. 2007. Т. 16, № 1. С. 3-73.
13. **Власов О.К.** Радиоэкологическая модель транспорта радионуклидов йода и цезия по пищевым цепочкам после радиационных аварий с выбросом в атмосферу для исследований закономерностей формирования доз внутреннего облучения населения. Часть 5. Оценки некоторых видов неопределённостей при реконструкции доз внутреннего облучения населения //Радиация и риск. 2014. Т. 23, № 4. С. 22-34.
 14. **Власов О.К., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А.** Оценка неопределённости доз облучения российских ликвидаторов с учётом их проживания на загрязнённых радионуклидами территориях РФ //Радиация и риск. 2015. Т. 24, № 4. С.20-34.
 15. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2011 году жителей населённых пунктов Российской Федерации, отнесённых к зонам радиоактивного загрязнения по постановлениям Правительства Российской Федерации № 1582 от 18 декабря 1997 г. «Об утверждении перечня населённых пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» и № 197 от 7 апреля 2005 г. «Об изменении перечня населённых пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» (для целей зонирования населённых пунктов): Информационные материалы /Под ред. к.т.н. Г.Я. Брука и д.м.н. И.К. Романовича. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2012. 166 с.
 16. **Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Власов А.Ю., Гончарова Ю.Н., Громов А.В., Жеско Т.В., Кадука М.В., Кравцова О.С., Романович И.К., Сапрыкин К.А., Степанов В.С., Титов Н.В., Травникова И.Г., Тутельян О.Е., Яковлев В.А.** Средние годовые эффективные дозы облучения в 2014 году жителей населённых пунктов Российской Федерации, отнесённых к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (для целей зонирования населённых пунктов) //Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 2. С. 32-128.

Приложение

Иллюстративный материал к статье

a)

6)

Рис. 1. Зависимости стандартизованных доз внутреннего облучения ЩЖ (а) и всего тела (б) в населённых пунктах 4-х областей от плотности выпадения ^{137}Cs .

Рис. 2. Распределения стандартных доз внутреннего облучения ЩЖ и всего тела в населённых пунктах Брянской области по числу жителей с радиометрией (а, б) и отношения средних по НП доз внутреннего облучения ЩЖ и всего тела стандартного человека к их регрессионным значениям по числу НП (в, г).

Рис. 3. Гистограммы рассеивания доз внешнего облучения взрослого населения Брянской области за первый год после аварии (а) и по 1995 г. (б).

Рис. 4. Зависимости эффективных доз облучения взрослого на время аварии населения с 1986 по 2005 гг. от плотности выпадения ^{137}Cs .

Рис. 5. Гистограммы распределения отношения расчётных средних в населённых пунктах Брянской области доз внутреннего облучения взрослого человека к средним в населённых пунктах СИЧ-дозам, приведённым к дозам взрослых.

Рис. 6. Средние в населённых пунктах Брянской области годовые дозы внешнего облучения взрослых жителей за 2011 г. в зависимости от плотностей выпадения ^{137}Cs (а) и гистограммы их рассеивания (б).

Рис. 7. Средние за 2014 г. годовые дозы критических групп жителей населённых пунктов Тульской области, пересчитанные к средним дозам взрослых жителей. μ_{G} и σ_{G} – среднегеометрические значения и стандартные геометрические отклонения отношения расчётных доз к дозам каталога; int, eff – дозы внутреннего облучения и эффективные дозы.

Рис. 8. Карта 4-х областей средних в населённых пунктах, накопленных по 2020 г., эффективных доз облучения взрослых жителей на время аварии.

Methods for dosimetry support of radiation-epidemiological studies carried out at NRER

Vlasov O.K., Shchukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A.

A. Tsyb MRRC, Obninsk

The paper reviews methods for reconstruction of dynamics of radiation doses to the public exposed to radiation after the Chernobyl accident. The methods are used in radiation-epidemiological studies carried out at the National Radiation and Epidemiological Registry (NRER). The methods development was based on the joint NRER-RIRH (the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene) base of radiometric data and modified RIRH methods, approved by the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Rospotrebnadzor). Radiation dosimetry data for NRER radiation-epidemiological studies analytical model is used. The model is the modified version of formally approved method for reconstruction of thyroid internal radiation doses received by people lived in areas of Russia contaminated with radionuclides after the Chernobyl accident. The paper describes the joint NRER-RIRH database of radiometry data on ^{131}I activity in the thyroid, ^{137}Cs activity in the whole-body of residents of Bryansk and Kaluga regions collected in 1986, as well as whole body counting performed in the Bryansk region in later years. The mode of modification of formally approved methods for computation of internal thyroid and whole-body radiation doses to the people irradiated in 1986 is described in the paper. Magnitudes of standard errors of calculated mean values of radiation doses to the population of a specific settlement and individual internal radiation doses are given in the paper.

Key words: *Chernobyl accident, radiometry and WBC-counting, models for radionuclides transfer in food chain, methods for radiation doses assessment, current methodology guidelines, NRER methods, reconstruction and verification, individual doses distribution, uncertainties assessment, deterministic and stochastic radiation doses estimate.*

References

1. *Estimating radiation doses to Russian population following the Chernobyl accident.* Collection of guidelines. Ed.: G.G. Onishchenko. Saint Petersburg, 2006. 180 p. (In Russian).
2. **Vlasov O.K., Shchukina N.V.** Updating of official technique of reconstruction of thyroid and all body internal irradiation doses of Russian Federation inhabitants, undergone to radioactive fallout owing to ChNPP accident in 1986. Part 1. Basic relation and properties of technique of reconstruction of thyroid and all body internal irradiation doses of Russian Federation inhabitants, undergone to radioactive fallout owing to ChNPP accident in 1986. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2009, vol. 18, no. 4, pp. 23-39. (In Russian).
3. **Vlasov O.K., Shchukina N.V.** Updating of official technique of reconstruction of thyroid and all body internal irradiation doses of Russian Federation inhabitants, undergone to radioactive fallout owing to ChNPP accident in 1986. Part 2. Estimations of influence of the major factors determining dynamics activities ^{137}Cs in milk and an organism of inhabitants of contaminated territories on autumn-winter 1986 after ChNPP accident. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 11-19. (In Russian).
4. **Vlasov O.K., Shchukina N.V.** Updating of official technique of reconstruction of thyroid and all body internal irradiation doses of Russian Federation inhabitants, undergone to radioactive fallout owing to ChNPP accident in 1986. Part 3. Reconstruction of a population thyroid and all body individual and standard internal irradiation doses by them radiometry in 1986. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2010, vol. 19, no. 2, pp. 21-35. (In Russian).
5. **Vlasov O.K., Shchukina N.V.** Updating of official technique of reconstruction of thyroid and all body internal irradiation doses of Russian Federation inhabitants, undergone to radioactive fallout owing to ChNPP accident in 1986. Part 3. Updating technique for standardization of thyroid and a whole body internal radiation doses got

Vlasov O.K.* – Head of Lab., D.Sc., Tech.; **Shchukina N.V.** – Senior Researcher; **Chekin S.Yu.** – Head of Lab.; **Tumanov K.A.** – Head of Lab., C. Sc., Biol. A. Tsyb MRRC.

*Contacts: 4 Korozyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249035. Tel.: (484) 399-32-45; e-mail: nrer@obninsk.com.

- by residents of settlements the Russian Federation contaminated with radionuclides in the first year after the Chernobyl accident. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2010, vol. 19, no. 3, pp. 71-93. (In Russian).
6. **Vlasov O.K., Godko A.M., Shchukina N.V., Korobova T.M.** Reconstruction of effective doses for the population living on the territory contaminated after the Chernobyl accident based on official data. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2007, vol. 16, no. 2-4, pp. 92-108. (In Russian).
 7. **Vlasov O.K.** Method for reconstructing internal radiation doses for the population based on the conservative assumptions adopted in official methodologies and dose calculations for catalogues. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2007, vol. 16, no. 2-4, pp. 109-132. (In Russian).
 8. **Vlasov O.K., Bruk G.Ya., Shchukina N.V.** Development and verification of the technology for reconstructing effective radiation doses for the population of Russia affected by the Chernobyl accident. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 28-45. (In Russian).
 9. Data on radioactive contamination of the settlements of the Russian Federation with cesium-137, strontium-90 and plutonium-239+240. Obninsk, Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, SPA "Typhoon", 2000, 181 p. (In Russian).
 10. Atlas of radioactive contamination of the European part of Russia, Belarus and Ukraine. Moscow, Federal Service of Geodesy and Cartography of Russia, 1998. (In Russian).
 11. Accumulated in 1986-1995 average effective doses of radiation to the inhabitants of the settlements of the Russian Federation exposed to radioactive contamination as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in 1986. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 1999, Special Issue 1, pp. 1-129. (In Russian).
 12. **Bruk G.Ya., Balonov M.I., Golikov V.Yu., Bazyukin A.B., Romanovich I.K., Shutov V.N., Zvonova I.A., Zhesko T.V., Konstantinov Yu.O., Parkhomenko V.I., Kravtsova O.S., Kaduka M.V., Kaydanovskiy G.N., Bratilova A.A., Travnikova I.G., Yakovlev V.A., Vlasov A.Yu., Vlasov O.K., Shchukina N.V., Perminova G.S., Lipatova O.V., Marchenko T.A.** Average accumulated effective doses for 1986-2005 for residents of settlements in the Bryansk, Kaluga, Oryol and Tula regions of the Russian Federation, classified as radioactive contamination zones by Decree of the Government of the Russian Federation No. 1582 dated December 18, 1997 "On approval of the list of settlements located within the boundaries of zones of radioactive contamination due to the disaster at the Chernobyl nuclear power plant". *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2007, vol. 16, no. 1, pp. 3-73. (In Russian).
 13. **Vlasov O.K.** Radioecological model for transport of radioiodine and radiocesium in the food chains after radiological accidents and discharge of radioactive substances to atmosphere for study of mechanism of formation of internal radiation doses to population. Part 5. Estimating some uncertainties in reconstructed internal radiation doses to the population. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 22-34. (In Russian).
 14. **Vlasov O.K., Shchukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A.** Uncertainty in assessment of radiation doses to Russian clean-up workers residing in territories contaminated with radionuclides. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2015, vol. 24, no. 4, pp. 20-34. (In Russian).
 15. Average annual effective radiation doses in 2011 of residents of settlements of the Russian Federation classified as zones of radioactive contamination by Decree of the Government of the Russian Federation No. 1582 dated December 18, 1997 "On approval of the list of settlements located within the boundaries of zones of radioactive contamination due to a disaster on Of the Chernobyl NPP" and No. 197 of April 7, 2005 "On changing the list of settlements located within the boundaries of radioactive contamination zones due to the disaster at the Chernobyl nuclear power plant" (for the purpose of zoning settlements): Information materials. Eds: G.Ya. Brook, I.K. Romanovich. M.: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Welfare, 2012. 166 p. (In Russian).
 16. **Bruk G.Ja., Bazjukin A.B., Bratilova A.A., Vlasov A.Ju., Goncharova Ju.N., Gromov A.V., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Kravcova O.S., Romanovich I.K., Saprykin K.A., Stepanov V.S., Titov N.V., Travnikova I.G., Tutel'jan O.E., Jakovlev V.A.** The average annual effective doses in 2014 for the population in the settlements of the Russian Federation attributed to zones of radioactive contamination due to the Chernobyl accident (for zonation purposes). *Radiatsionnaya gygiena – Radiation Hygiene*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 32-128. (In Russian).