

Новый методический подход расчёта индивидуализированных доз внутреннего облучения лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие аварии на ЧАЭС

Е.А. Дрозд

Республиканский научно-практический центр радиационной медицины
и экологии человека, Гомель, Беларусь

Основой методического подхода расчета индивидуализированных доз внутреннего облучения является подтвержденная оригинальная научная гипотеза о том, что каждая группа лиц, однородных по демографическим характеристикам (пол и возраст), на кривой распределения дозы имеет своё определённое место, причём постоянное во времени, т.е. квантили распределения дозы, соответствующие средним дозам внутреннего облучения каждой возрастной группы мужчин и женщин, на кривой распределения дозы занимают своё определенное, устойчивое во времени, место.

Ключевые слова: индивидуализированная доза внутреннего облучения, квантили распределения дозы, устойчивость.

Введение

Для проведения радиационно-эпидемиологических исследований по установлению зависимости «доза – эффект» и оценки радиационного риска одной из актуальных проблем является оценка индивидуальных накопленных с момента аварии на ЧАЭС доз облучения населения, проживающего на загрязнённых радионуклидами территориях.

Государственный регистр лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (Госрегистр), является основным инструментом проведения радиационно-эпидемиологических исследований по установлению зависимости «доза – эффект» и оценки радиационного риска отдалённых эффектов облучения. В Госрегистре содержатся данные о состоянии здоровья ~ 250 000 лиц, индивидуальные паспортные данные, а информация о дозах облучения у них практически отсутствует.

Корректная оценка дозы может быть выполнена на основании исследования закономерностей формирования доз облучения населения.

Формирование доз внешнего и внутреннего облучения существенно различается. Для дозы внешнего облучения характерно монотонное снижение с течением времени, которое определяется радиоактивным распадом и перераспределением долгоживущих радионуклидов по профилю почвы. Для дозы внутреннего облучения характерна значительная вариабельность. Индивидуальные дозы внутреннего облучения жителей, помимо радиозоологических факторов, зависят от уровня потребления пищевых продуктов местного произрастания и производства, который определяется восприятием фактора радиационной опасности, что, в свою очередь, определяется личностными характеристиками индивида, такими как пол, возраст, профессия и др. [1].

Существующие методы оценки индивидуализированных накопленных с момента аварии доз облучения, основанные на радиозоологическом моделировании [2, 3], консервативны и позволяют рассчитать среднегрупповые (средневозрастные) дозы облучения с ошибкой в сред-

нем 200–300%. Методический подход оценки индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения [4], суть которого заключается в расчёте индивидуализированной дозы внутреннего облучения по значению соответствующего квантиля распределения годовой дозы внутреннего облучения индивида, обеспечивает довольно высокую точность прогноза. Однако недостаток его в том, что необходимы данные СИЧ-измерения индивида или члена его семьи хотя бы за один год, а лучше несколько лет. Этих данных для большинства лиц Госрегистра нет. Кроме того, процедура расчёта трудоёмка.

Цель исследования – на основе данных СИЧ-измерений выявить закономерности формирования индивидуальных доз внутреннего облучения у лиц, проживающих на загрязнённой радионуклидами территории, в зависимости от личностных характеристик и на их основе разработать новый методический подход оценки индивидуализированных накопленных с момента аварии доз внутреннего облучения.

Материалы и методы

Материалами исследования явились: «База данных СИЧ-измерений жителей Республики Беларусь за период 1987–2008 гг.» регистрационное свидетельство № 58709000637 от 20.05.2009; «База данных плотностей загрязнения территорий населённых пунктов Республики Беларусь радионуклидами цезия, стронция и плутония по состоянию на 1986 год» регистрационное свидетельство № 58709000639 от 20.05.2009, сформированные в ГУ «РНПЦ РМИЭЧ»; данные Государственного дозиметрического регистра о дозах внутреннего облучения, рассчитанных по результатам СИЧ-измерений, жителей Республики Беларусь за 2009–2012 гг.

Инструментальные исследования по определению содержания радионуклидов цезия в организме человека (СИЧ-измерения) проведены в период 1989–2012 гг.

Для исследования закономерностей формирования доз внутреннего облучения индивидов в зависимости

от личностных (демографических) факторов индивиду были применены методы прикладной статистики, в частности, однофакторный дисперсионный анализ (тест Колмогорова – Смирнова). В качестве тестовой статистики использовался непараметрический метод – медианный тест Краскела – Уоллиса.

Статистическая обработка данных проводилась при помощи пакета программ статистического анализа «STATISTICA 8.0» и «MICROSOFT EXCEL 2010».

Результаты и обсуждение

Поскольку существенную роль в формировании дозы внутреннего облучения играют экологические условия, а именно почвенные, то для корректного и адекватного анализа, а также достоверности полученных результатов, были выбраны населённые пункты, находящиеся в идентичных экологических условиях. Почвенные особенности определяют коэффициент перехода радионуклидов цезия из почвы в растительность, затем в пищевые продукты. Значения коэффициента перехода радионуклида ^{137}Cs в основные виды сельскохозяйственной продукции (молоко, свинину и говядину, картофель, овощи, пищевые продукты леса), установленные по одному и тому же продукту для различных типов почв Гомельской области, различаются почти на 2 порядка величины.

Исследовательская выборка была сформирована из населённых пунктов Лельчицкого, Ельского и Наровлянского районов Гомельской области (так называемый Полесский регион) с однородными почвенными свойствами [5]. Объём выборки составил 183 187 результатов СИЧ-измерений у жителей 196 населённых пунктов достаточной статистической мощности за каждый год 22-летнего периода, начиная с 1989 г. Для корректного объединения данных о дозах внутреннего облучения, рассчитанных по результатам СИЧ-измерений, в одну выборку дозы внутреннего облучения пронормировали на плотность загрязнения территории соответствующего населенного пункта за каждый год.

Как было сказано выше, формирование дозы внутреннего облучения индивида зависит от ряда личностных

характеристик, таких как пол, возраст, профессия, социальный и экономический статус. Но поскольку, к сожалению, в Госрегистре содержится информация только о возрастной и гендерной принадлежности индивида, то в исследование включены только эти факторы формирования дозы внутреннего облучения.

Исследование гендерной зависимости формирования дозы внутреннего облучения

Проведенный анализ данных о дозах внутреннего облучения, рассчитанных по результатам СИЧ-измерений, позволил выявить значимые различия в дозах внутреннего облучения мужчин и женщин.

Среднее значение дозы внутреннего облучения у мужчин на 30% превышает таковое у женщин. Это различие объясняется более высоким уровнем потребления продуктов мужчинами вообще и тем, что мужчины обладают сниженным чувством опасности по сравнению с женщинами, и, как следствие, различием в уровнях потребления продуктов питания местного производства и произрастания. Для наглядности на рисунке 1 представлены распределения дозы внутреннего облучения в группах мужчин и женщин в виде «ящиков с усами» за период 1990–2000 гг.

Проведенный статистический анализ (тест Колмогорова – Смирнова при уровне значимости $p < 0,05$) подтвердил значимое различие по среднему значению дозы внутреннего облучения между мужчинами и женщинами, сохраняющееся на протяжении всего периода исследования.

Исследование возрастной зависимости формирования дозы внутреннего облучения

Для выявления возрастных различий в формировании доз внутреннего облучения исследовательская выборка жителей была разбита по возрастам с шагом в 1 год. Методом однофакторного дисперсионного анализа были выявлены четыре возрастные группы, достоверно различающиеся по среднему значению дозы внутреннего облучения (табл. 1).

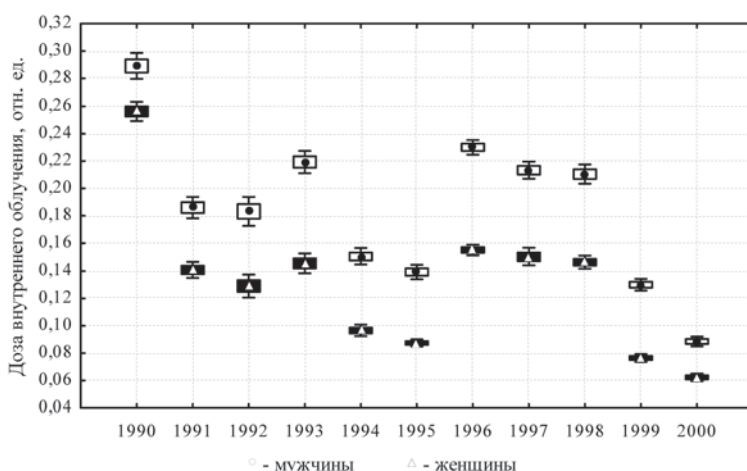


Рис. 1. Распределение средних доз внутреннего облучения в группах мужчин и женщин

Таблица 1

Возрастные группы, выявленные в результате статистического анализа данных СИЧ-измерений

Возрастная группа	Возрастной интервал
1	Дети от 0 до 6 лет
2	Школьники и учащиеся от 6 до 18 лет
3	От 18 до 60 лет
4	60 лет и старше

В первую группу вошли дети дошкольного возраста от 0 до 6 лет, вторую группу составляли школьники и учащиеся от 7 до 17 лет, в третью группу включены лица от 18 до 60 лет, в четвертую – лица 60 лет и старше. Достоверность различий по среднему значению в выявленных возрастных группах подтверждена тестом Краскела – Уоллиса с уровнем значимости $p < 0,0125$.

Статистический анализ распределения дозы внутреннего облучения

Распределение доз в популяции жителей некоей социальной структуры есть не что иное, как распределение жителей по дозе облучения. Оно отражает отношение отдельных индивидов к фактору радиационной опасности. Это отношение формирует пищевое поведение людей и уровень потребления. Отношение отдельных лиц к радиационной опасности связано с личностными характеристиками, такими как пол, возраст, уровень образования, состояние здоровья и др.

Поскольку распределение дозы внутреннего облучения в популяции определяется личностными характеристиками каждого из жителей, то, очевидно, каждая группа лиц, однородных по демографическим характеристикам (а именно среднее значение дозы облучения), на кривой распределения дозы, образно говоря, будет иметь своё определённое место, причём постоянное во времени (рис. 2).

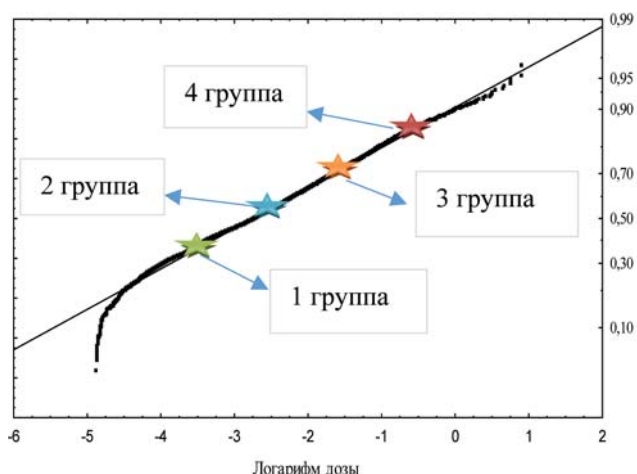


Рис. 2. Интегральные распределения дозы внутреннего облучения с обозначением места для каждой возрастной группы

Как показал статистический анализ, средние значения доз облучения четырёх выявленных возрастных групп распределились соответствующим образом на кривой распределения дозы внутреннего облучения, как показано на рисунке 2, а среднее значение дозы облучения каждой группы соответствует определённому значению квантиля распределения дозы в популяции.

В таблице 2 представлены значения квантилей распределения дозы внутреннего облучения каждой группы за каждый год.

Таблица 2

Квантили распределения дозы внутреннего облучения в возрастных группах

Год	Значение квантиля распределения дозы по возрастным группам, %			
	0–6 лет	7–17 лет	18–59 лет	≥60 лет
1989	41	50	71	79
1990	43	53	68	83
1991	36	47	73	79
1992	20	31	72	79
1993	13	46	68	76
1994	13	38	74	81
1995	28	55	68	76
1996	31	40	66	77
1997	16	33	71	81
1998	21	35	75	80
1999	19	40	65	79
2000	33	47	70	82
В среднем	27	43	69	79

Поскольку социально обусловленный уклад жизни, определяющий пищевое поведение индивида (уровень потребления радиационно значимых продуктов) со временем не меняется, очевидно, что место каждой возрастной группы лиц на кривой распределения дозы будет оставаться неизменным во времени. Этот факт позволяет прогнозировать дозы облучения у лиц, относящихся к определённой возрастной группе по соответствующим им квантилям распределения дозы.

Анализ закономерностей формирования дозы внутреннего облучения в зависимости от пола и возраста индивида в совокупности

Установленные различия в формировании дозы внутреннего облучения по полу и возрасту позволяют исследовать их влияние на формирование дозы внутреннего облучения в совокупности.

Средние дозы внутреннего облучения детей возрастной группы до 6 лет существенно не различаются по полу, в остальных же возрастных группах сохраняется установленное выше различие по гендерной принадлежности. Использование теста Краскела – Уоллиса с уровнем значимости $p < 0,05$ позволило подтвердить достоверность различия в возрастных группах 2, 3, 4 как мужчин, так и женщин.

Аналогично проведенному статистическому анализу, в отношении возрастных групп популяции в целом было определено место на кривой распределения дозы каждой возрастной группы мужчин и женщин, т.е. значения кван-

тия распределения дозы внутреннего облучения, соответствующие средним значениям дозы облучения лиц каждой возрастной группы. Соответствующие квантили распределения дозы возрастных групп мужчин и женщин представлены в таблице 3.

Как видно из данных таблицы 3, значения квантилей распределения дозы для каждой возрастной группы существенно различаются. Так, среднее значение дозы внутреннего облучения лиц группы, включающей детей обоих полов в возрасте до 6 лет, в среднем соответствует 26% квантилю распределения дозы, а среднее значение дозы внутреннего облучения во второй группе, включающей детей и подростков в возрасте от 7 до 17 лет, соответствует 37% и 48% квантилям распределения дозы внутреннего облучения девочек и мальчиков соответственно. Значение средней дозы внутреннего облучения в третьей возрастной группе, включающей женщин 18–60 лет, соответствует 57% квантилю распределения дозы, а среднее значение дозы внутреннего облучения четвертой возрастной групп женщин старше 60 лет соответствует 71% квантилю распределения дозы.

Квантиль распределения дозы для каждой возрастной группы у мужчин и женщин на протяжении наблюдаемого периода остается практически неизменным, т.е. он устойчив во времени. В то же время у мужчин третьей и четвертой возрастных групп за период 1990–1994 гг. и 1997 г. средние значения дозы соответствуют в среднем 76% и 84% квантилям распределения дозы соответственно, а за периоды 1995–1996 гг. и 1998–2000 гг. происходит смещение средних значений дозы внутреннего облучения в сторону увеличения у группы лиц 18–59 лет и снижения у лиц старше 60 лет. Так, средние значения дозы соответствуют в среднем 84% квантилю распределения дозы для лиц 18–59 лет и 79% – для лиц старше 60 лет. Такое изменение соотношения средних значений

доз в возрастных группах лиц мужского пола зависит от профессионального состава обследованных на СИЧ, который в данном исследовании не учитывался. В связи с выявленным перераспределением средних значений дозы внутреннего облучения в возрастных группах среди лиц мужского пола и для более глубокого понимания процесса формирования индивидуальной дозы внутреннего облучения целесообразно исследовать влияние профессиональной ориентации на формирование дозы внутреннего облучения.

Таким образом, средние значения квантилей распределения дозы для каждой возрастной группы обоих полов представлены в таблице 4.

Алгоритм расчета индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения лиц, включенных в Госрегистр, состоит из нескольких этапов. Во-первых, для лиц, включенных в Госрегистр, необходимо выбрать из базы данных СИЧ-измерений Государственного дозиметрического регистра данные по дозам внутреннего облучения, соответствующего их месту жительства за каждый послеаварийный год, т.е. с учётом переездов. Во-вторых, нужно построить распределение дозы внутреннего облучения мужчин или женщин (в зависимости от пола индивида) в каждом из населённых пунктов проживания индивида за каждый год. И в-третьих, по соответствующему возрастной группе (с учётом возраста в каждом году) значению квантиля распределения дозы, используя данные таблицы 4, следует рассчитать индивидуализированные дозы внутреннего облучения за каждый год.

Оценка индивидуализированных доз внутреннего облучения за весь послеаварийный период проводится суммированием доз, рассчитанных как по результатам непосредственных СИЧ-измерений, так и по квантилям распределения дозы.

Таблица 3

Квантили распределения дозы внутреннего облучения в возрастных группах

Год	0–6 лет	7–17 лет		18–59 лет		≥60 лет	
	Оба пола	Женщины	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины	Мужчины
1990	43	47	55	66	69	78	88
1991	36	50	64	67	77	73	83
1992	20	24	39	64	77	74	83
1993	13	42	57	54	75	67	81
1994	13	36	40	62	80	70	87
1995	28	40	47	64	86	70	80
1996	31	36	45	54	84	61	80
1997	16	28	40	61	79	76	84
1998	21	29	42	64	83	71	79
1999	19	35	44	66	86	69	80
2000	33	43	50	64	83	69	76
В среднем	26	37	48	57	79	71	82

Таблица 4

Средние значения квантилей распределения для соответствующих половозрастных групп для периода 1989–2012 гг.

Пол	Средние значения квантилей распределения дозы (диапазон ошибки среднего)			
	0–6 лет	7–17 лет	18–59 лет	60 лет и старше
Женщины	26% (21–32%)	40% (31–49%)	67% (63–71%)	78% (74–82%)
Мужчины		45% (39–51%)	70 (67–73%)	79% (75–83%)

Апробация алгоритма расчета индивидуализированных накопленных доз внутреннего облучения лиц, включенных в Госрегистр

Проведен расчёт индивидуализированных доз внутреннего облучения для случайным образом выбранных 38 жителей райцентров и населённых пунктов Гомельской области, расположенных на территории с плотностью загрязнения по цезию-137 от 55 до 6431 кБк/м². У всех выбранных лиц имеются данные СИЧ-измерений.

Сравнение доз внутреннего облучения, рассчитанных по предложенному методическому подходу, с данными по результатам индивидуальных СИЧ-измерений у одних и тех же лиц, представлено в таблице 5.

они занимают своё определенное место и устойчивы во времени. Устойчивость во времени квантилей распределения дозы внутреннего облучения позволяет рассчитать дозу внутреннего облучения индивида за каждый год послеаварийного периода. Это является методической основой реконструкции индивидуализированных доз внутреннего облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС.

Литература

1. Skryabin, A.M. Distribution of Doses received in Rural Areas affected by the Chernobyl accident. JSP-2 task 5 / A.M. Skryabin [et al.] // NRPB-R277, National Radiological Protection Board, Chilton, UK. – 1995. – P. 52.

Таблица 5

Индивидуализированные дозы внутреннего облучения, рассчитанные по результатам СИЧ-измерений у одних и тех же лиц

Индивид	Пол	Год рождения	Населенный пункт (район)	Плотность загрязнения, кБк/м²	Доза внутреннего облучения, мЗв/год		
					Рассчитанная	Диапазон ошибки среднего	По СИЧ-измерениям
1990 г.							
1	М	1927	г. Буда-Кошелево	1471	0,110	0,105÷0,116	0,069
3	М	1985	г. Житковичи	382	0,086	0,065÷0,108	0,065
8	М	1966	Глубочица (Чечерский)	1762	0,603	0,579÷0,627	0,527
1993 г.							
12	М	1928	г. Добруш	1314	0,195	0,185÷0,205	0,182
15	М	1936	Антоновка (Буда-Кошелевский)	2258	0,114	0,109÷0,119	0,072
18	Ж	1963	Антоновка (Добрушский)	262	0,122	0,115÷0,129	0,104
19	М	1962	Усохская Буда (Добрушский)	55	0,366	0,351÷0,381	0,335
1998 г.							
20	М	1981	Дублин (Брагинский)	2543	0,237	0,206÷0,268	0,197
21	Ж	1943	Стежерное (Брагинский)	1113	0,192	0,180÷0,204	0,185
22	Ж	1924	Чемерисы (Брагинский)	710	0,183	0,174÷0,192	0,189

Рассчитанные по разработанному методическому подходу индивидуализированные дозы внутреннего облучения не выходят из доверительного интервала среднего, что обеспечивает точность предложенного подхода, а отличие рассчитанных индивидуализированных доз внутреннего облучения практически от таковых по результатам СИЧ-измерений в среднем составляющее 20% подтверждает его адекватность.

Заключение

В результате проведенного исследования установлены статистически значимые различия средних значений дозы внутреннего облучения по полу и возрасту. Определены квантили, соответствующие средним значениям дозы внутреннего облучения каждой возрастной группы мужчин и женщин. На кривой распределения дозы

2. Методические указания МУ 2.6.1.2004-05 «Реконструкция средней (индивидуализированной) накопленной в 1986–1995 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году (Дополнение № 2 к МУ 2.6.1.579-96)».
3. Методические указания «Реконструкция среднегопуховых и коллективных накопленных доз облучения жителей населенных пунктов Беларуси, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС» / В.Ф. Миненко [и др.]. – Минск, 2002.
4. Власова, Н.Г. Методический подход реконструкции индивидуализированных доз облучения лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на ЧАЭС / Н.Г. Власова // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2013. – Т. 58, № 3. – С. 24–33.
5. Власова, Н.Г. Статистический анализ результатов СИЧ-измерений для оценки дозы внутреннего облучения сельских жителей в отдаленный период аварии на ЧАЭС / Н.Г. Власова, Л.А. Чунихин, Д.Н. Дроздов // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – № 4. – С. 397–406.

Е.А. Дрозд
E-mail: RCRM@TUT.BY

Поступила: 22.10.2014 г.