

## Оценки доз облучения населения в отдалённом периоде аварии на ЧАЭС: опыт международного сотрудничества

Н.Г. Власова, Ю.В. Висенберг, Л.А. Чунихин

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

*Исследования, проведенные за период 1990–2000 гг. в населённых пунктах Гомельской области, показали, что средние дозы внутреннего облучения населения, проживающего в населённых пунктах на территориях с близкими значениями плотности загрязнения, существенно различаются. Выявлены причины этого различия. Показано, что на формирование дозы внутреннего облучения оказывает влияние не только непосредственно радиационное загрязнение территории, но и ряд нерadiационных факторов.*

*Подтверждена гипотеза о том, что доза внутреннего облучения каждого индивида, а также каждой семьи на кривой распределения дозы имеет своё определённое место, постоянное во времени. Эта закономерность была использована в качестве методической основы для реконструкции индивидуализированных доз облучения лиц в любой временной период.*

*Разработана методика оценки средних годовых эффективных доз облучения жителей радиоактивно загрязнённых населённых пунктов (НП) Республики Беларусь. Результаты СИЧ-измерений использованы для непосредственной оценки дозы внутреннего облучения и в качестве основы для разработки модели. Модель для оценки дозы базируется на классификации населённых пунктов по региональным особенностям почв, обуславливающих поступление  $^{137}\text{Cs}$  в продукты питания местного производства и произрастания, и построении регрессионных зависимостей суточного поступления от плотности загрязнения территории населённого пункта  $^{137}\text{Cs}$  для каждого региона. Учтено влияние косвенных факторов на формирование дозы: численности жителей и площади леса вокруг населённого пункта.*

*По разработанной методике создан Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населённых пунктов Республики Беларусь.*

Ключевые слова: населённый пункт, доза внутреннего облучения, распределение дозы, косвенные факторы, устойчивость, сезонность.

В отдалённом периоде крупной радиационной аварии одной из актуальных проблем радиационной безопасности и радиационной медицины является корректная оценка доз облучения населения, проживающего на загрязнённых радионуклидами территориях.

Оценка доз облучения необходима для решения двух задач: фундаментальной – установления зависимости «доза – эффект» с последующей оценкой радиационного риска, и прикладной – принятия решения о вмешательстве в практическую деятельность человека, т.е. о введении противорадиационных мер по снижению доз облучения населения.

Для решения первой задачи необходима оценка индивидуальных накопленных с момента аварии эффективных доз облучения лиц. Для решения второй задачи необходима оценка средних годовых эффективных доз облучения населения радиоактивно загрязнённых территорий. В соответствии с Законами Республики Беларусь «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС» [1] и «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» [2] проводится отнесение населённых пунктов к зонам радиоактивного загрязнения 1 раз в 5 лет на основании данных о СГЭД облучения и средней плотности загрязнения тер-

ритории населённого пункта радионуклидами цезия-137, стронция-90 и плутония-238, 239, 240.

Корректная оценка как текущей, так и накопленной дозы может быть выполнена на основании исследования закономерностей формирования доз облучения населения. Авария на Чернобыльской АЭС предоставила уникальную возможность для изучения закономерностей формирования доз облучения населения и выявления основных факторов, оказывающих на нее влияние.

В конце 1980-х гг. в Беларуси была введена система дозового мониторинга жителей загрязнённых чернобыльскими радионуклидами территорий методом определения содержания радионуклидов цезия в организме человека на СИЧ-установках. В настоящее время в Беларуси функционируют 33 СИЧ-установки (рис. 1).

За все эти годы был накоплен значительный объём информации (более 2 млн результатов СИЧ-измерений содержания радионуклидов цезия в организме человека), который позволяет вполне обоснованно использовать его для исследования закономерностей формирования доз внутреннего облучения.

Традиционный экологический подход в изучении формирования доз основывается на том, что распределение дозы среди населения практически повторяет распределение загрязнения в объектах окружающей среды и пи-



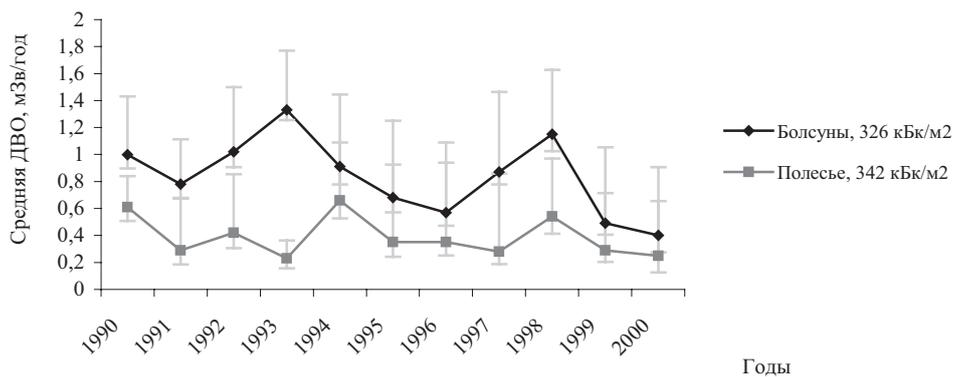


Рис. 3. Динамика средних значений доз внутреннего облучения жителей Чечерского района

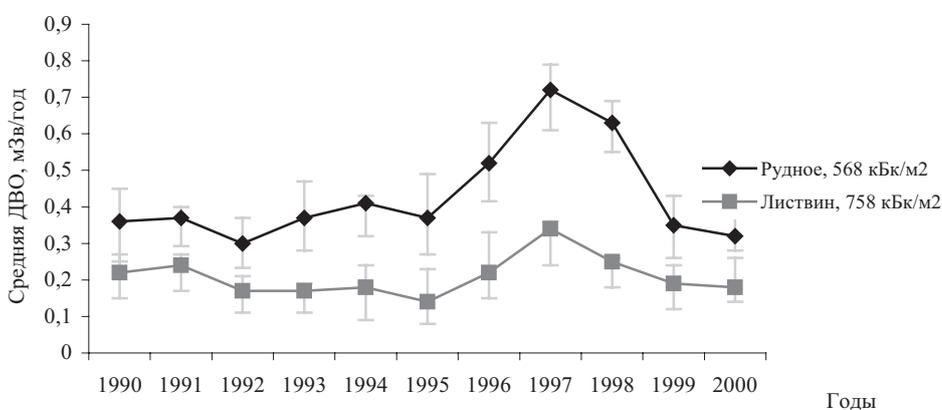


Рис. 4. Динамика средних значений доз внутреннего облучения жителей Хойникского района

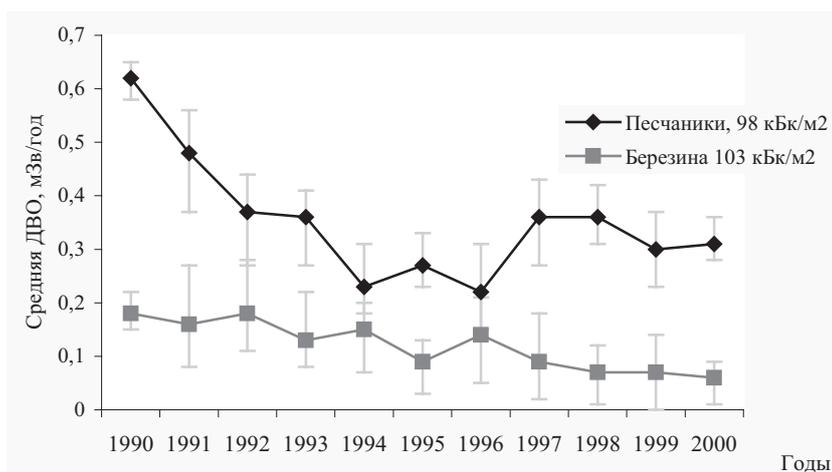


Рис. 5. Динамика средних значений доз внутреннего облучения жителей Житковичского района

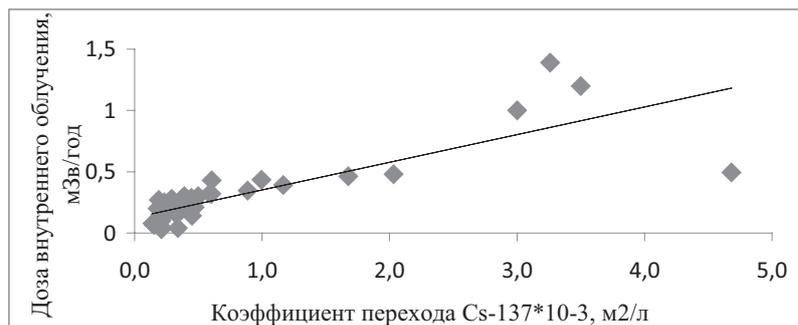


Рис. 6. Зависимость дозы внутреннего облучения от коэффициента перехода <sup>137</sup>Cs в цепи почва – молоко в населенных пунктах Гомельской области

Как видно из рисунка 6, значения доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов увеличиваются с ростом коэффициента перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в молоко. Почвенное разнообразие в Гомельской области определяет значения коэффициентов перехода в диапазоне от 0,14 до 5,0×10<sup>-3</sup> м<sup>2</sup>/л. При этом доза изменяется от 0,1 до 1,39 мЗв/год.

Таким образом, коэффициент перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в молоко вносит существенный вклад в формирование дозы внутреннего облучения жителей населенных пунктов районов Гомельской области.

Доза внутреннего облучения формируется в зависимости от множества факторов, включая социальный. В результате проведенных исследований в рамках проекта сотрудничества N 07 GUS01/7 «Оценка дозы облучения населения в зависимости от социального и географического факторов после чернобыльской аварии» [4] выявлена зависимость усредненной дозы внутреннего облучения сельских жителей от их численности в населённом пункте. Как видно из рисунка 7, чем меньше населенный пункт, тем выше доза внутреннего облучения.

Это обусловлено тем, что численность населения – это интегральный показатель социально-экономического уровня жизни, который выражает степень натурализации ведения хозяйства, т.е. чем меньше населенный пункт (чем дальше он от центра и дорог), тем больше вероятность потребления продуктов питания из личных подсобных хозяйств и тем выше доза внутреннего облучения [4].

Таким образом, социальный фактор играет существенную роль в дозоформировании.

Как показали наши исследования в рамках Международного проекта JSP5 «Анализ распределения дозы» в рамках Межправительственных соглашений между комиссией Европейского сообщества и странами СНГ по вопросам, связанным с ликвидацией последствий аварии на ЧАЭС [5], в формировании дозы внутреннего облучения большое значение играет «лесной» фактор, обусловленный потреблением ягод, грибов и дичи. В результате проведенных исследований было показано, что близость и доступность леса оказывает существенное влияние на формирование дозы внутреннего облучения. Чем ближе лес, тем чаще люди пользуются его дарами и тем больше их вклад в дозу внутреннего облучения.

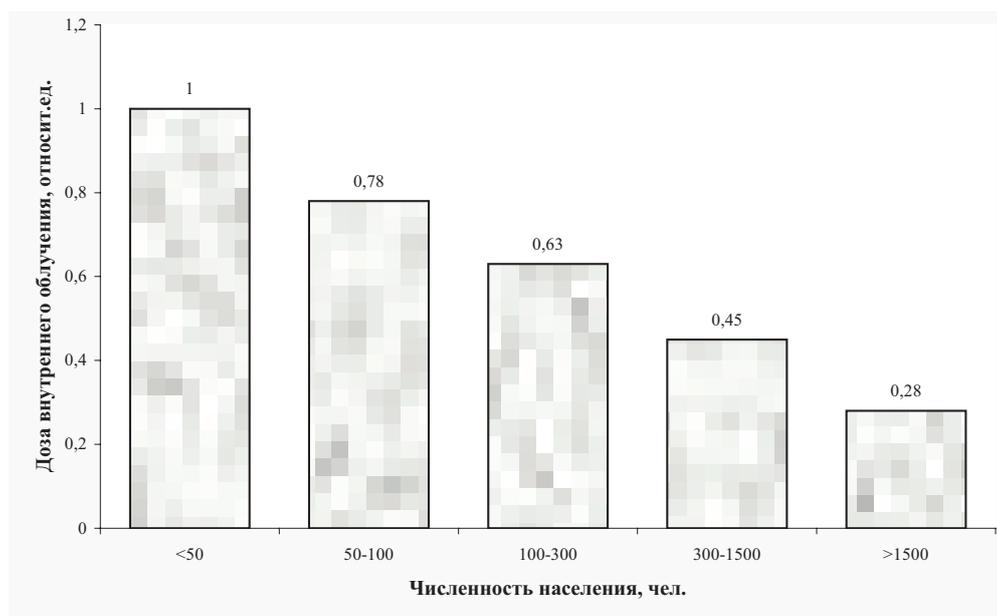


Рис. 7. Распределение относительной СИЧ-дозы внутреннего облучения по классам численности (территория с низким уровнем загрязнения)

Мы сравнили населенные пункты по следующим параметрам: число жителей – социальный фактор, наличие и расстояние до леса – природный фактор, коэффициент перехода радионуклидов из почвы в молоко – радиоэкологический фактор (табл.).

Значения средних доз внутреннего облучения в деревнях Болсуны и Полесье Чечерского района различаются почти в два раза. Очевидно, что причина такого различия связана с численностью жителей в этих деревнях и различной удаленностью от леса.

Различия в дозах внутреннего облучения в населенных пунктах Рудное и Листвин Хойникского района вызваны практически только разницей в значениях коэффициента перехода – почти в 10 раз.

В деревнях Песчаники и Березина Житковичского района различия в дозах внутреннего облучения обусловлены разницей в численности населения – в 3 раза, другие показатели одинаковы.

В Ветковском районе в деревне Шейка доза внутреннего облучения выше, чем в Шерстине, почти в 5 раз. Это обусловлено тем, что населенный пункт Шейка расположен близко от леса, в то время как Шерстин находится в 5 км от него. Такая существенная разница в дозах связана также и с различным числом жителей в этих деревнях. Хотя коэффициент перехода в Шерстине в 3 раза выше, чем в Шейке, он мало влияет на формирование дозы.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что каждый из косвенных факторов вносит вклад в формирование дозы внутреннего облучения. Наиболее значимый, как следует из результатов проведенного анализа, – это социальный фактор, представленный численностью населения.

Проведенный анализ 85 000 данных СИЧ-измерений по 238 населённым пунктам (изменения дозы внутреннего облучения по месяцам) позволил выявить сезонные изменения дозы внутреннего облучения. Методом однофакторного дисперсионного анализа были выделены 2 сезона: весна – лето: март, апрель, май, июнь, июль; осень – зима: август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь, январь, февраль (сельские жители употребляют сухие грибы зимой, заготовленные осенью), для которых средние дозы внутреннего облучения значимо различаются.

Среднее значение дозы внутреннего облучения в осенне-зимний период превышает весенне-летнее значение в среднем в 1,5–2 раза.

Поскольку доза внутреннего облучения человека формируется за счёт потребления загрязнённых радионуклидами пищевых продуктов, а потребление их определяется его отношением к радиационной опасности, которое связано с личностными характеристиками человека, такими как пол, уровень образования, психоэмоциональный статус, то распределение дозы в отдельном населенном пункте определяется личностными характеристиками каждого из жителей НП. Поэтому, очевидно, каждый человек на кривой распределения дозы имеет своё определённое место, причём постоянное во времени [6]. Доза каждого из лиц соответствует определённому значению квантиля распределения дозы за каждый год, что иллюстрирует рисунок 8.

В результате проведенного анализа представительных выборок данных о дозах внутреннего облучения, рассчитанных по результатам СИЧ-измерений, за 10-летний период в НП Киров были выявлены индивиды и семьи, относительные дозы которых одинаковы во времени, т.е. доза каждого индивида и семьи соответствует определённому значению квантиля распределения дозы за каждый год [6].

Для подтверждения предположения об устойчивости относительной дозы внутреннего облучения у индивидов и семей населённого пункта Киров был использован ранговый критерий согласия. Высокие (близкие к 1,0) значения коэффициента конкордации – 0,89 и 0,92 соответственно – подтверждают предположение об относительно стабильном ранге относительных индивидуальных и среднесемейных доз внутреннего облучения [6].

Результаты проведенного анализа позволяют с достаточно высокой степенью точности прогнозировать дозы облучения у отдельных лиц за любой календарный год по их относительным дозам за один или несколько лет или по известным относительным дозам у лиц и членов соответствующих семей.

Во исполнение Законов Республики Беларусь [1,2] в рамках Программы совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской катастрофы в рамках Союзного государства на 2006–2010 гг. [7] разработана методика оценки средних годовых эффективных доз (СГЭД) облучения жителей населённых пунктов, расположенных на радиоактивно загрязнённой территории.

Таблица

**Роль косвенных факторов в формировании дозы внутреннего облучения**

Населенные пункты	Плотность загрязнения, кБк/м <sup>2</sup>	Среднее значение дозы внутреннего облучения, мЗв/год	Численность населения	Коэффициент перехода «почва – молоко» ×10 <sup>-3</sup> м <sup>2</sup> /л	Расстояние до леса, км
Березина	103	0,12	218	0,19	2,5
Песчаники	98	0,35	73	0,25	2,0
Болсуны	325	0,76	333	0,10	1,0
Полесье	341	0,39	587	0,08	3,5
Рудное	568	0,43	135	0,20	4,0
Листвин	758	0,21	154	0,02	3,0
Шейка	619	1,14	38	0,11	0,5
Шерстин	637	0,24	509	0,35	5,0

Данные усреднены за период 1990–2000 гг.

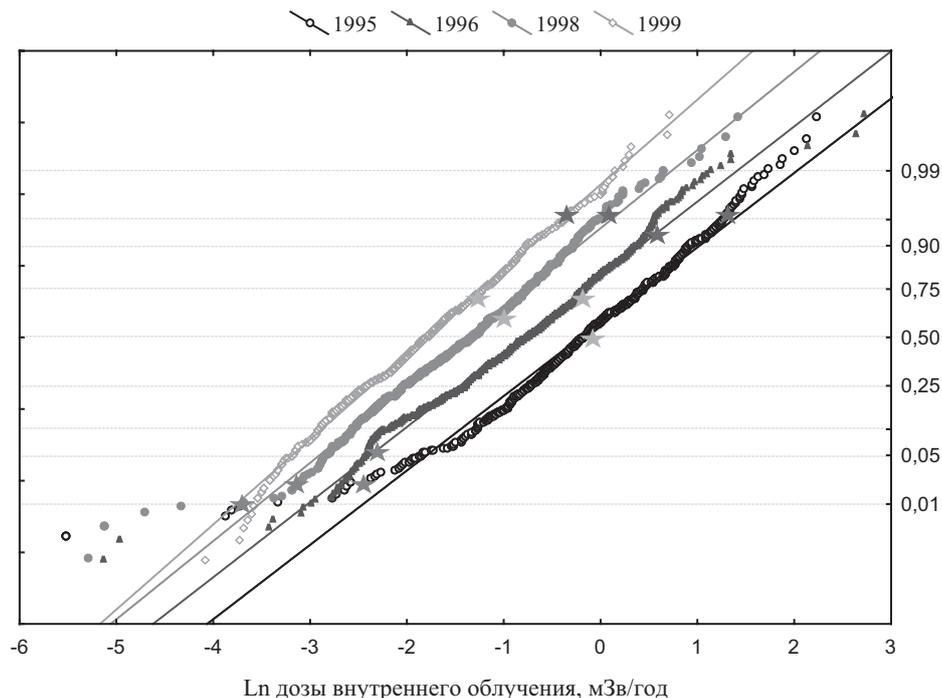


Рис. 8. Относительные дозы внутреннего облучения 3 лиц: каждому из них соответствуют близкие значения квантилей распределения дозы

Для обеспечения консерватизма и сохранения преемственности в методике оценки СГЭД необходимо оценивать среднюю дозу для наиболее облучаемой части жителей НП так называемой критической группы.

В публикации МКРЗ № 103 отдаленный период после аварии относится к понятию «существующее облучение» [8].

В этих условиях с применением требований публикации МКРЗ № 101 вводится понятие репрезентативного лица как представительного члена наиболее облучаемой группы жителей НП [9].

Оценка СГЭД внешнего облучения проведена для наиболее облучаемой группы из взрослых жителей конкретного НП – лиц рабочих сельскохозяйственных профессий,

что обеспечивает исключение недооценки дозы внешнего облучения жителей загрязнённых территорий.

Следуя определению МКРЗ, один из критериев критической группы – однородность по дозе [10].

Анализ распределений дозы в НП показал, что в большинстве из них выделялась «отстоящая» от основного эмпирического распределения, однородная группа в «хвосте» распределения. Это – критическая группа. Расщепление распределения на два – критической и основной групп – представлено на рисунке 9. Стандартное геометрическое отклонение (СГО) распределения дозы в критической группе низко по сравнению с основной группой и НП в целом, что свидетельствует о высокой степени её однородности.

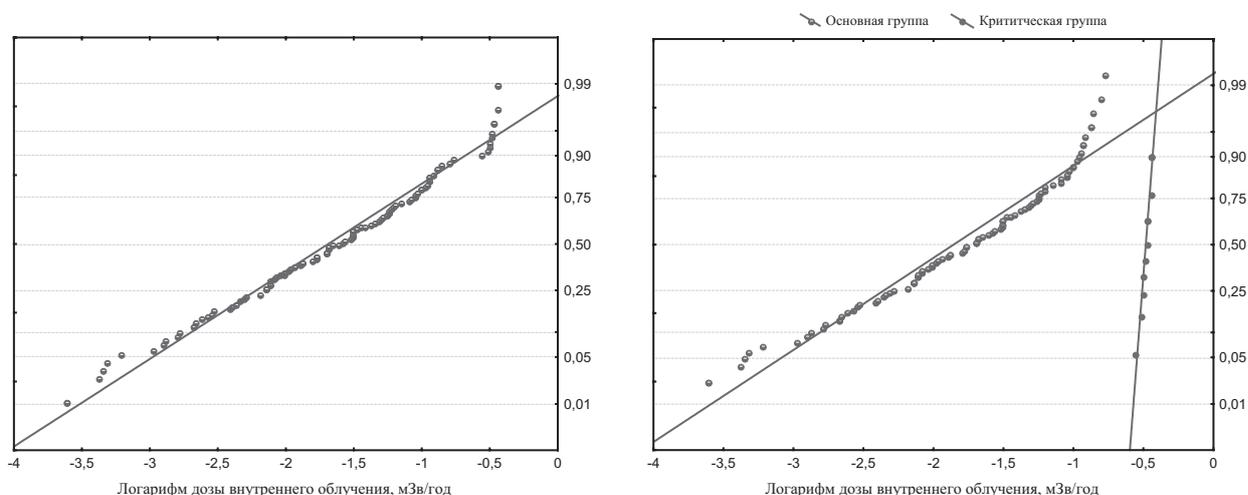


Рис. 9. Распределение дозы внутреннего облучения жителей НП слева: вся выборка НП, справа: основная группа и критическая группа (10%)

В рамках выполнения ТС проекта RER/9/074 «Радиационный мониторинг облучения населения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС» [11] выявлено, что критическая группа составляет в среднем 10% наиболее облучаемых лиц среди жителей каждого НП. Средняя годовая доза внутреннего облучения критической группы отличается от средней по НП дозы в 3–4 раза [11, 12].

Принципиальным отличием методики от ранее разработанных является то, что все ранее разработанные методики оценки средней годовой эффективной дозы облучения использовали модели, основанные на потреблении загрязненного молока, моделирующего всю мясо-молочную и лесную часть рациона, и картофеля, который моделирует продукты питания растительного происхождения. В основу настоящей методики оценки СГЭД внутреннего облучения положены результаты СИЧ-измерений. Результаты СИЧ-измерений являются интегральным показателем уже поступившего в организм человека цезия-137 с продуктами питания.

Оценка СГЭД внутреннего облучения проводится двумя способами:

1) по среднему значению в наиболее облучаемой группе дозы внутреннего облучения, оцененному по результатам достаточного количества непосредственных СИЧ-измерений в НП, если выполнялось условие достаточности [13]. Таких оказалось 400 НП;

2) в случае отсутствия или недостатка данных СИЧ-измерений средняя годовая эффективная доза внутреннего облучения оценивалась по среднему суточному поступлению цезия-137 в организм жителей НП.

Второй способ оценки СГЭД внутреннего облучения заключается в использовании регрессионной модели для каждого из трёх регионов, образованных по предварительно выполненной классификации с учётом условий формирования средней дозы внутреннего облучения критической группы каждого НП, т.е. с тем же консерватизмом, заложенным в исходных данных модели. Для учета влияния косвенных факторов на величину средней годовой дозы внутреннего облучения жителей сельских населенных пунктов была проведена классификация НП каждого региона по таким косвенным факторам, как: численность жителей в НП и площадь леса в радиусе 3 км вокруг НП. В каждом регионе выбрали по 4 группы НП с близкими значениями величины удельной площади леса (удельная площадь леса – это отношение площади леса к численности жителей НП, в ареале которого находится лес). Каждая группа характеризуется средним значением численности населения и удельной площадью леса в НП. Для каждого региона была построена линейная регрессия относительных значений дозы на удельную площадь леса в НП [14, 15].

Расчитанная средняя суммарная по НП доза в 2,2–2,5 раза может превышать среднюю фактическую дозу облучения жителей НП [14]. Заложенный в алгоритм расчета дозы консерватизм позволяет избежать ее недооценки.

Инструкция [14] была использована в качестве методической основы создания «Каталога средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь», утв. МЗ РБ 18.08.09.

## Выводы

1. В случае крупного радиационного инцидента для обеспечения дифференцированного подхода к планированию мер радиационной безопасности органам управления следует не только основываться на уровнях загрязнения территории НП, но и учитывать факторы нерадиационной природы.

2. Необходимо разработать методику оценки СГЭД облучения жителей НП, находящихся на радиоактивно загрязнённых территориях; для целей зонирования следует учитывать, помимо прямых, и факторы нерадиационной природы: географические, экологические, социальные.

## Литература

1. Республика Беларусь. Закон. «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий»: введ.: 06.01.2009. – Минск, 2009. – 20 с.
2. Республика Беларусь. Закон. «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС»: введ.: 12.11.1991. – Минск, 1991. – 26 с.
3. 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. – UK: Chilton, 1995. – 52 p.
4. Evaluation of the Population Dose in Relation to Social and Geographical Factors after the Chernobyl accident / The Cooperation Project N 07 GUS01/7 – Final report – Ulich, Germany.
5. Jacob, P. Pathway analysis and dose distributions JSP5 / P. Jacob [et al.] // Final Report for the contracts COSU-CT93-0053 and COSU-CT94-0091 of the European Commission. Brussels, 1995. – 130 p.
6. Власова, Н.Г. Методический подход реконструкции индивидуализированных доз облучения лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на ЧАЭС / Н.Г. Власова // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2012. – № 2 (8). – С. – 120–129.
7. Разработка единой методики оценки текущей средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивно загрязненной Российской Федерации и Республики Беларусь, для целей зонирования / Программа совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской катастрофы в рамках Союзного государства на 2006–2010 гг. ГР № 20071226: отчет о НИР. – Гомель, 2007. – 80 с.
8. The Recommendations of the International Commission of Radiological Protection / Publication 103 of the ICR / Editor J. Valentin. – 2007. – 332 p.
9. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and The Optimization of Radiological Protection: Broadening the Process / Publication 101 of the ICR / Published by Elsevier Ltd. – 2006. – 104 p.
10. Радиационная защита. Рекомендации МКРЗ. Публикация 60 и 61: Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1994. – 190 с.
11. Радиационный мониторинг облучения населения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС: отчет по ТС проекту RER/9/074 // МАГАТЭ. – Вена, 2007. – 119 с.
12. Власова, Н.Г. К методике выявления критической группы среди сельских жителей с помощью статистического анализа распределения дозы / Н.Г. Власова // Достижения медицинской науки Беларуси. – Минск: БелЦНМИ, – 2000. – Выпуск V. – С. 66.
13. Власова, Н.Г. Оценка средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территориях, загрязненных радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС / Н.Г. Власова // Радиационная гигиена. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 9–14.

14. Оценка средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территориях, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Инструкция по применению № 044-0508: утв. МЗ РБ 27.06.08. – Гомель, 2008. – 16 с.
15. 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.

**N.G. Vlasova, Yu.V. Visenberg, L.A. Chunikhin**

**Exposure Doses Assessment of Population at Long-term Period after the Chernobyl Accident: International Collaboration Experience**

The Republican Research Center for Radiation Medicine and Human Ecology Ministry of Health of Belarus, Gomel, Belarus

*Abstract. The study which had been conducted in the period from 1990 to 2000's in the settlements of Gomel region showed that the average internal exposure doses of population living in the settlements situated on territories with equal levels of contamination density were considerably different. The reasons for the difference have been revealed. It was shown that not only radiation contamination of territory but also a range of factors of non-radiation origin have influence on formation of internal exposure dose.*

*The hypothesis has been approved that internal exposure dose of each individual and also of each family has its certain place, constant in time at a dose distribution curve. This appropriateness had been used as a methodological basis for reconstruction of subjects' individual doses for any time period.*

*Method for estimating the average annual effective exposure doses of inhabitants living in contaminated settlements of the Belarus Republic had been developed. The results of the Whole Body Counter measurements had been used for direct assessment of internal exposure dose and as the basis for developing a model. Model for the dose estimation is based on the classification of settlements according to regional characteristics of soil, which cause <sup>137</sup>Cs intaking with locally produced foodstuff. The model is also based on regression of daily <sup>137</sup>Cs intake on the density contamination of the soil for each region. The effect of the indirect factors on the dose forming had been taken into account: the number of inhabitants and the area of forest around the settlement.*

*According to the developed method, there had been created a Catalog of Average Annual Effective Doses of Residents of the Belarus Republic.*

*Key words: settlement, internal exposure dose, dose distribution, indirect factors, stability, seasonal prevalence.*

Поступила: 10.11.2012 г.

Н.Г. Власова  
E-mail: natalie\_vlasova@mail.ru