

и окружающая среда: сб. науч. тр. — 2012. — Вып. 20. — С. 285–290.

5. Химико-экологическая и гигиеническая оценка воды природного парка «Нижеголь» / Л. Ф. Перистая [и др.] // Научные ведомости. Серия естественные науки. — 2011. — № 21(116). — С. 75–84.

6. Токсикологическая химия / под ред. Т. В. Плетневой. — М.: ГЭОТАР-Медицина, 2005. — 512 с.

7. Ясовеев, М. Г. Фторные минеральные воды Беларуси / М. Г. Ясовеев // Вода. — 2000. — № 10. — С. 6–10.

8. ГОСТ 4389-72. Вода питьевая. Методы определения содержания сульфатов. — Введ. 23.01.06. — 8 с.

9. ГОСТ 4245-72. Вода питьевая. Методы определения содержания хлоридов. — Введ. 25.05.06. — 6 с.

10. ГОСТ 18826-73. Вода питьевая. Методы определения содержания нитратов. — Введ. 23.01.06. — 7 с.

11. ГОСТ 4386-89 Вода питьевая. Методы определения массовой концентрации фторидов. — Введ. 23.01.06. — 8 с.

12. Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 24.12.2009 № 70/139.

Поступила 11.09.2014

УДК 614.876.06:621.039.58

## ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ В ОТДАЛЕННОМ ПЕРИОДЕ ПОСЛЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ

Н. Г. Власова, Ю. В. Висенберг, Г. Н. Евтушкова, Е. А. Дрозд

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

Разработана методика оценки средних годовых эффективных доз облучения жителей радиоактивно загрязненных населенных пунктов Республики Беларусь с использованием результатов СИЧ-измерений в качестве основы и с учетом влияния косвенных факторов. По разработанной методике создан очередной Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь.

Ключевые слова: доза внутреннего облучения, прямые и косвенные факторы дозоформирования, Каталог доз.

## DISTANT DOSE ASSESSMENT OF POPULATION AFTER THE CHERNOBYL ACCIDENT

N. G. Vlasova, Yu. V. Visenberg, G. N. Evtushkova, E. A. Drozd

Republican Research Center for Radiation Medicine  
and Human Ecology, Gomel

We have developed a method for assessment of the average annual effective internal irradiation doses in people living in radioactively contaminated areas of the Republic of Belarus using results of the Whole Body measurements as a basis and taking into account the effect of indirect factors. Based on the developed method, another Catalogue of Average Annual Effective Irradiation Doses of Residents of the Republic of Belarus was created.

Key words: internal irradiation dose, direct and indirect factors of dose forming, catalogue of doses.

### Введение

Для принятия решений о введении противорадиационных мер по снижению доз облучения населения и выявления наиболее облучаемых групп населения с целью оказания им адресной медицинской помощи необходима оценка доз облучения.

Для решения этой задачи необходима оценка средних годовых эффективных доз (СГЭД) облучения населения радиоактивно загрязненной территории. В соответствии с законами Республики Беларусь проводится отнесение населенных пунктов (НП) к зонам радиоактивного загрязнения 1 раз в 5 лет на основании данных о СГЭД облучения и средней плотности загрязнения территории населенного пункта радионуклидами цезия-137, стронция-90 и плутония-238, 239, 240 [1, 2].

В конце 80-х годов прошлого века в Беларуси введена система дозового мониторинга жителей загрязненных черномыльскими ра-

дионуклидами территорий на основе СИЧ-установок. К настоящему времени накоплена база СИЧ-измерений, которая содержит более 2,7 млн. записей, что позволяет использовать эти данные для разработки методики оценки СГЭД внутреннего облучения. Оценка доз облучения по СИЧ-измерениям наиболее достоверна и надежна, так как она обусловлена фактически поступившим в организм <sup>137</sup>Cs с реальным рационом питания.

Кроме использования данных СИЧ-измерений при разработке методики оценки среднего значения дозы внутреннего облучения в дополнение к прямым факторам (уровню радиоактивного загрязнения) следует учесть косвенные факторы, оказывающие влияющие на дозообразование. К их числу относят:

- социальный — численность жителей населенного пункта;
- природный — наличие и доступность для сельских жителей пищевых продуктов леса;

• радиоэкологический — тип почвы сельхозугодий, определяющий коэффициент перехода радионуклидов цезия по цепи «почва → молоко».

#### **Материалы и методы**

Для разработки методики оценки СГЭД внутреннего облучения населения для цели зонирования загрязненной территории были использованы результаты СИЧ-измерений двумя способами: непосредственный расчет средней годовой дозы из статистически обоснованного набора СИЧ-измерений для конкретного населенного пункта и в качестве основы модели. Оценка доз облучения по СИЧ-измерениям более достоверна и надежна, так как она обусловлена фактически поступившим в организм  $^{137}\text{Cs}$  с реальным рационом питания.

Материалами для проведения исследования явились данные Государственного дозиметрического регистра о дозах внутреннего облучения, рассчитанных по результатам 400 тыс. СИЧ-измерений жителей Гомельской области за период 2009–2013 гг. Были выбраны 597 наиболее полно обследованных населенных пунктов со статистически достаточным количеством измерений.

Применены методы прикладной статистики: классификация по совокупности информативных фактор-признаков, корреляционный и регрессионный анализ.

#### **Результаты и обсуждение**

##### Классификация населенных пунктов загрязненных территорий по прямым факторам дозоформирования

Как показали исследования, выполненные ранее, основное влияние на формирование дозы внутреннего облучения жителей сельских НП, находящихся на загрязненных территориях, оказывают свойства почв, географические,

демографические и социально-экономические особенности НП [3, 4].

Уровень загрязнения сельскохозяйственной продукции местного производства и произрастания  $^{137}\text{Cs}$  практически полностью обуславливает дозу внутреннего облучения сельских жителей и зависит от свойств почвы. Значения коэффициента перехода радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  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.

Для проведения обобщенных оценок все многообразие почвенных различий объединили в группы почв, значительно различающихся между собой по значениям коэффициентов перехода в основные сельскохозяйственные продукты: молоко, свинину и говядину, картофель, грибы. Для почв Гомельской области использовали взвешенные коэффициенты перехода, рекомендованные МАГАТЭ при проведении оценок доз [5]. Значения этих коэффициентов представлены в таблице 1.

Пойменные почвы были выделены в дополнительную группу, так как они являются характерными для сельских населенных пунктов Гомельской области и Республики Беларусь. Территории с пойменными почвами широко используются в качестве кормовой базы для молочного и мясного животноводства. При расчете коэффициента перехода для территорий с пойменными почвами было принято допущение, что они относятся к одной из 3 представленных групп почв: песчаные, супесчаные, легко и среднесуглинистые и торфяно-болотные.

Таблица 1 — Значения коэффициентов перехода для некоторых сельскохозяйственных продуктов по группам почв

Продукты	Коэффициент перехода радионуклида $^{137}\text{Cs}$ , м <sup>2</sup> /кг			
	песчаные, супесчаные	легко и среднесуглинистые	торфяно-болотные	пойменные
Молоко	0,2	0,07	0,6	0,3
Говядина	0,6	0,25	2,0	0,5
Свинина	0,3	0,10	1,0	0,2
Картофель	0,06	0,04	0,2	0,08
Грибы	12	4	20	8

К группам почв, находящихся в сельскохозяйственном использовании, отнесли следующие типы почв Гомельской области:

I — песчаные и супесчаные: дерново-подзолистые, песчаные, дерново-подзолистые супесчаные, дерново-подзолистые карбонатные;

II — легко и среднесуглинистые: дерново-подзолистые суглинистые;

III — торфяно-болотные: торфяно-болотные;

IV — пойменные разделены поровну по 3 группам.

Наличие вблизи населенных пунктов лесных массивов является косвенным, значимым фактором формирования дозы внутреннего облучения. Установлено [4], что доза внутреннего облучения жителей лесных сельских НП превышает таковую у жителей безлесных НП. Как и наличие леса вблизи НП, численность жителей также является значимым косвенным фактором формирования дозы внутреннего облучения сельского населения. Малые и средние НП, как правило, обладают слаборазвитой

транспортной сетью и инфраструктурой. Их жители ведут хозяйство, близкое к натуральному.

Названные факторы: значение коэффициента перехода радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  в цепи «почва → молоко», кислотность почв, расстояние до леса, численность жителей в НП, а также площадь лесной территории, приходящаяся на душу населения — было взято в качестве признаков для проведения классификации НП по условиям формирования дозы внутреннего облучения жителей НП по прямым формирующим дозу внутреннего облучения факторам.

К прямым дозообразующим факторам отнесли коэффициенты перехода радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в основные продукты питания (молоко, свинина и говядина, картофель, грибы) и кислотность почв.

Для каждого района Гомельской области рассчитали «почвенный индекс» ( $I_{\text{почв}}$ ), который определяли следующим образом:

$$I_{\text{почв}} = K_{\text{дост}}^{\text{эф.}} \times K_{\text{кисл.}} \quad (1)$$

где  $K_{\text{дост}}^{\text{эф.}}$  — эффективный коэффициент перехода в условный рацион, отн. ед.;

$K_{\text{кисл.}}$  — коэффициент, учитывающий кислотность почв, отн. ед.

Эффективный коэффициент перехода  $K_{\text{дост}}^{\text{эф.}}$  в условный рацион вычисляется для каждого района по следующей формуле:

$$K_{\text{дост}}^{\text{эф.}} = \sum E_i \cdot K_i^{\text{дост.}} \quad (2)$$

где  $E_i$  — доля  $i$ -й группы почв в районе, отн. Ед.;

$K_i^{\text{дост.}}$  — показатель доступности для условного рациона  $i$ -й группы почв, отн. ед.

Для построения модели оценки дозы внутреннего облучения из базы данных СИЧ-измерений жителей Республики Беларусь Государственного дозиметрического регистра для каждого региона были выбраны НП, в которых за период 2009–2013 гг. было выполнено более 30 СИЧ-измерений. По данным СИЧ-измерений в каждом НП определили основные статистические параметры распределения дозы внутреннего облучения.

Выбранные НП с достаточным количеством СИЧ-измерений были классифицированы по идентичным условиям формирования дозы внутреннего облучения на три региона: Полесский, Центральный, Северо-Восточный — аналогично тому, как это было выполнено в работе [6]. Количество НП по регионам представлено в таблице 2.

Таблица 2 — Количество населенных пунктов, вошедших в обучающую выборку каждого региона

Регион	Количество населенных пунктов
Полесский	80
Центральный	233
Северо-Восточный	284
Всего	597

• В первый (Полесский) регион вошли: Ельский, Лельчицкий и Наровлянский районы.

• Во второй (Центральный) регион: Брагинский, Житковичский, Калинковичский, Мозырьский, Речицкий, Рогачевский, Петриковский, Светлогорский и Хойникский районы.

• В третий (Северо-Восточный) регион: Буда-Кошелевский, Ветковский, Гомельский, Добрушский, Жлобинский, Кормянский, Лоевский и Чечерский районы.

Для построения регрессионных моделей дозы внутреннего облучения на плотность загрязнения территории населенные пункты были объединены в группы с примерно одинако-

вой плотностью загрязнения: менее 37 кБк/м<sup>2</sup>, 37–62 кБк/м<sup>2</sup>, 63–106 кБк/м<sup>2</sup>, 107–179 кБк/м<sup>2</sup>, 180–302 кБк/м<sup>2</sup>, 303–511 кБк/м<sup>2</sup>. Среднее значение плотности загрязнения по диапазонам составило: 24 кБк/м<sup>2</sup>, 50 кБк/м<sup>2</sup>, 84 кБк/м<sup>2</sup>, 135 кБк/м<sup>2</sup>, 221 кБк/м<sup>2</sup>, 381 кБк/м<sup>2</sup> соответственно.

Для всех населенных пунктов в заданном интервале усреднили значения дозы внутреннего облучения критической группы и сопоставляли со средним значением плотности загрязнения территории в данном интервале. Полученные линейные зависимости для 3-х регионов представлены на рисунке 1.

Параметры уравнения регрессии вида  $y = a + bx$  представлены в таблице 3.

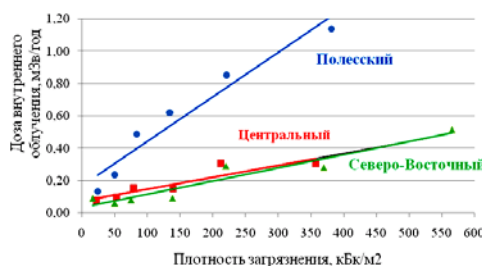


Рисунок 1 — Зависимость дозы внутреннего облучения от плотности загрязнения территории в 3-х регионах

Таблица 3 — Параметры уравнения регрессии и коэффициенты корреляции

Регион	Коэффициент корреляции	Уровень значимости коэффициента корреляции	Параметры уравнения	
			a	b
1. Полесский	0,87	0,0006	0,1570	0,0028
2. Центральный	0,91	0,0128	0,0767	0,0007
3. Северо-Восточный	0,95	0,0002	0,0342	0,0008

Из данных таблицы 3 видно, что коэффициенты корреляции достаточно высоки, что говорит об адекватности модели. Значения свободного члена в регрессионных уравнениях вида  $y = a + bx$  можно интерпретировать как так называемый «импорт дозы», связанный с тем, что люди, проживая на территориях с низкой плотностью загрязнения, пользуются «дарами» леса, расположенного на относительно загрязненной территории.

Как показал сравнительный анализ, значения параметров уравнений регрессии снизились по сравнению с ранее разработанной моделью (2009 г.). Значения свободного члена уравнения  $a$ : для Полесского региона — на 22 %, для Центрального — на 35 %, для Северо-Восточного — на 40 %.

В то же время коэффициент регрессии  $b$  остался почти без изменения, что свидетельст-

вует о сохранении зависимости дозы внутреннего облучения от плотности загрязнения.

#### Верификация модели оценки дозы внутреннего облучения

Чтобы оценить качество модели, была сформирована контрольная выборка населенных пунктов из разных регионов, которые сознательно не были включены в выборку для разработки модели. Было проведено сравнение доз внутреннего облучения, рассчитанных по модели с дозами, рассчитанными по результатам СИЧ-измерений у жителей населенных пунктов контрольной выборки. В таблице 4 представлены значения средних годовых доз внутреннего облучения, рассчитанные по модели и по результатам СИЧ-измерений для жителей исследуемых населенных пунктов.

Таблица 4 — Дозы внутреннего облучения некоторых населенных пунктов, оцененные двумя способами

Район	Населенный пункт	Численность населения	$\sigma Cs$ , кБк/м <sup>2</sup>	Средняя доза внутреннего облучения, мЗв/год		Модель/СИЧ
				по Модели	по СИЧ	
Гомельская область						
Брагинский	Дублин	300	191	0,211	0,164	1,29
Ветковский	Ветка	8100	370	0,330	0,337	0,98
Добрушский	Добруш	18800	91	0,107	0,095	1,13
Ельский	Добрынь	679	199	0,713	0,559	1,28
Ельский	Дуброва	351	81	0,383	0,335	1,14
Ельский	Засинцы	296	78	0,377	0,285	1,32
Лельчицкий	Ударное	724	38	0,263	0,229	1,15
Речицкий	Солтаново	952	29	0,097	0,076	1,28
Хойникский	Глинище	604	80	0,133	0,124	1,07
Хойникский	Козелужье	510	108	0,153	0,142	1,08
Могилёвская область						
Быховский	Селец	444	105	0,150	0,131	1,15
Костюковичский	Прудок	6	489	0,425	0,333	1,28

Данные таблицы 4 показывают сопоставимость результатов регрессионных оценок по модели и по СИЧ-измерениям для населенных пунктов всех регионов, расположенных на территориях с различной плотностью загрязнения. Ошибка прогноза по модели составила 30 %, что свидетельствует о высоком качестве модели.

Дозы внутреннего облучения, рассчитанные по модели, в каждом из трех регионов получили на основе классификации по прямым факторам дозоформирования. Эти оценки были сделаны для усредненных по региону зна-

чений, «почвенного индекса», кислотности почв, площади леса в регионе и числу жителей в НП. В населенных пунктах, численность жителей и близость к лесу в ареале которых отличаются от среднерегionalных, необходимо учитывать влияние косвенных факторов.

#### Классификация населенных пунктов на загрязненных радионуклидами территориях по косвенным факторам дозоформирования

Для учета влияния косвенных факторов на величину средней годовой дозы внутреннего облучения жителей сельских населенных пунк-

тов была проведена классификация НП каждого региона по таким косвенным факторам, как численность жителей в НП и удельная плотность леса в ареале НП (площадь леса в радиусе 3 км вокруг НП, отнесенная к числу жителей). Для удобства последующих расчетных процедур средние дозы внутреннего облучения жителей населенных пунктов выражали в относительных единицах.

Для этого в каждом регионе выбрали по 4 группы НП с близкими значениями величины удельной площади леса. Удельная площадь леса — отношение площади леса к численности жителей НП, в ареале которого находится лес. Каждая группа характеризовалась средним значением численности населения и удельной площадью леса в НП. Средняя доза внутреннего облучения жителей каждого НП была нормирована

на среднее значение дозы облучения для группы со средними показателями, которые принимались за 1.

Затем для каждого региона была построена линейная регрессия относительной дозы на удельную площадь леса в НП. На рисунке 2 представлены регрессионные зависимости относительного значения дозы внутреннего облучения жителей от удельной площади леса.

В таблице 5 представлены параметры уравнений регрессии и коэффициенты корреляции для трех регионов.

Проведенная классификация позволяет непосредственно вносить поправки в значение дозы внутреннего облучения жителей для НП, у которых значения косвенных признаков отличается от среднерегionalных.

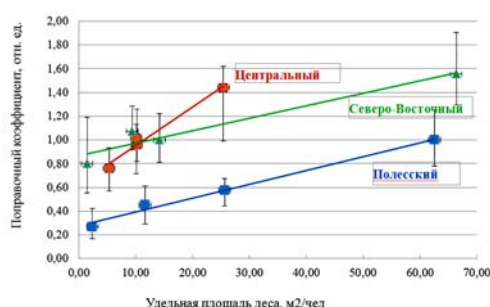


Рисунок 2 — Зависимость поправочного коэффициента  $K_{нопр}$  от удельной плотности леса

Таблица 5 — Параметры уравнения регрессии и коэффициенты корреляции

Регион	Коэффициент корреляции	Уровень значимости коэффициента корреляции	Параметры уравнения	
			a	b
Полесский	0,99	0,005	0,034	0,48
Центральный	0,98	0,010	0,018	0,87
Северо-Восточный	0,96	0,031	0,056	0,66

Проведен анализ результатов оценки СГЭД облучения жителей НП, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения.

В таблице 6 представлено распределение НП и численности жителей Беларуси по дозовым диапазонам, превышающим и равным 1 мЗв/год.

Таблица 6 — Распределение населенных пунктов и численности населения Беларуси по дозовым диапазонам, превышающим или равным 1 мЗв/год

Диапазон СГЭД, мЗв/год	Область	Каталог-2009		Каталог-2015	
		количество НП	численность проживающего населения, чел.	количество НП	численность проживающего населения, чел.
> 1	Брестская	5	4841	4	4682
	Гомельская	142	39844	67	18339
	Могилёвская	44	3443	8	245
	<b>Итого</b>	<b>191</b>	<b>48128</b>	<b>79</b>	<b>23266</b>
= 1	Гомельская	2	6214	—	—
	<b>Итого</b>	<b>2</b>	<b>6214</b>	—	—
>1 – < 2	Брестская	5	4841	4	4682
	Гомельская	120	37196	58	17277
	Могилёвская	38	3362	8	245
	<b>Итого</b>	<b>165</b>	<b>45399</b>	—	<b>22204</b>
≥ 2 – < 3	Гомельская	17	2132	9	1062
	<b>Итого</b>	<b>21</b>	<b>2210</b>	<b>9</b>	<b>1062</b>
≥ 3 – < 4	Гомельская	1	1	—	—
	Могилёвская	2	3	—	—
	<b>Итого</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	—	—
≥ 4	Гомельская	4	515	—	—
	<b>Итого</b>	<b>4</b>	<b>515</b>	—	—

Как видно из данных таблицы 6, СГЭД превысила 1 мЗв/год в 79 НП из 2400, в которых проживает ~ 23 тыс. человек. Ни в одном из НП СГЭД не превысила 5 мЗв/год. По Каталогу доз 2009 г. из 2613 населенных пунктов в 193 суммарная эффективная доза облучения превышала или равнялась 1 мЗв/год.

Проведен сравнительный анализ СГЭД облучения жителей НП, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, представленных в четырех Каталогах доз: 1992, 2004, 2009 и 2015 гг.

На рисунке 3 представлены интегральные распределения СГЭД жителей НП, расположенных в зонах радиоактивного загрязнения, соответствующие четырем периодам. Как видно на рисунке и по данным таблицы 8, наблюдается общая тенденция к снижению СГЭД.

Очевидно, близкие значения стандартного геометрического отклонения распределения СГЭД 4-х Каталогов и практически параллельность распределений свидетельствуют об адекватности выбранного методического подхода.

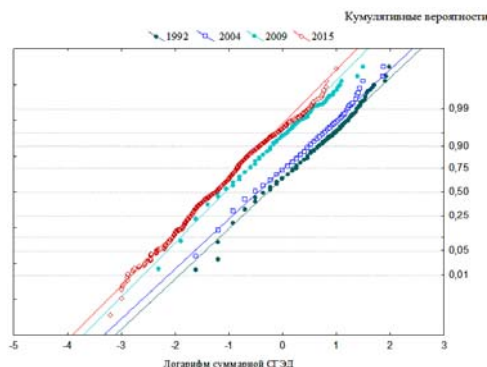


Рисунок 3 — Распределение СГЭД облучения жителей НП, расположенных в зонах радиоактивного загрязнения

Таблица 7 — Параметры распределения СГЭД облучения жителей населенных пунктов, расположенных в зонах радиоактивного загрязнения

Параметр	СГЭД			
	1992 г.	2004 г.	2009 г.	2015 г.
Среднее, мЗв/год	0,99	0,83	0,46	0,34
Медиана, мЗв/год	0,70	0,59	0,35	0,25
Стандартное геометрическое отклонение	2,01	1,99	1,83	1,83
Нижняя граница доверительного интервала среднего, мЗв/год	0,35	0,30	0,19	0,14
Верхняя граница доверительного интервала среднего, мЗв/год	1,41	1,17	0,64	0,46

Настоящий Каталог является основанием для разработки нормативного документа о включении населенных пунктов Республики Беларусь в соответствующие зоны радиоактивного загрязнения.

**Заключение**

Разработана методика оценки СГЭД внутреннего облучения населения, которая основана на классификации сельских НП Беларуси по региональным особенностям почв, обуславливающим поступление <sup>137</sup>Cs в продукты питания местного производства, и косвенных факторах, характеризующих НП: численность жителей, наличие и доступность леса. Для каждого региона установлены регрессионные зависимости дозы внутреннего облучения, рассчитанной по результатам СИЧ-измерений, от плотности загрязнения территории.

По разработанной методике создан очередной «Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей НП Республики Беларусь, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения», который наряду с плотностью загрязнения территории долгоживущими ра-

дионуклидами будет использован для принятия Постановления Совета Министров об отнесении населенных пунктов к соответствующим зонам радиоактивного загрязнения.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Республика Беларусь. Закон. «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий»: введ.: 06.01.2009. — Минск. — 20 с.
2. Республика Беларусь. Закон. «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС»: введ.: 04.07.2006. — Минск. — 29 с.
3. Власова, Н. Г. Оценки доз облучения населения в отдаленном периоде аварии на ЧАЭС: опыт международного сотрудничества / Н. Г. Власова, Ю. В. Висенберг, Л. А. Чунихин // Радиационная гигиена. — 2013. — Т. 6, № 1. — С. 45–52.
4. Висенберг, Ю. В. Особенности формирования доз внутреннего облучения жителей сельских населенных пунктов в отдаленном периоде Чернобыльской катастрофы: дис. ... канд. биол. наук / Ю. В. Висенберг. — Гомель, 2008. — 138 с.
5. Радиационный мониторинг облучения населения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС / Рук-во МАГАТЭ по ТС проекту RER/9/074/М. И. Балонв [и др.]. — Вена, Австрия, 2007. — 119 с.
6. 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.

Поступила 18.11.2014