

ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ

УДК 614.876:631.039.58

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СИЧ-ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗЫ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ЖИТЕЛЕЙ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

© 2009 г. Н. Г. Власова*, Д. Н. Дроздов, Л. А. Чунихин

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

Разработана методика оценки доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов (НП) Республики Беларусь, загрязненных чернобыльскими радионуклидами, основанная на результатах измерений на счетчике излучений человека (СИЧ-измерений). Результаты СИЧ-измерений Государственного дозиметрического регистра использованы для прямых оценок дозы внутреннего облучения и в качестве основы для разработки модельных представлений. Модель для оценки дозы базируется на классификации НП по региональным особенностям почв, обуславливающих поступление ^{137}Cs в продукты питания местного производства и произрастания, и построении регрессионных зависимостей суточного поступления от плотности загрязнения территории населенного пункта ^{137}Cs для каждого региона. При оценке дозы было учтено влияние косвенных факторов на ее формирование: численности жителей и площади леса вокруг НП в виде поправочных коэффициентов ($K_{\text{попр}}$), значения которых определены из регрессионной зависимости $K_{\text{попр}}$ от удельной площади леса для каждого региона. Исследованы области использования поправочных коэффициентов в каждом из регионов в зависимости от их особенностей.

Авария на Чернобыльской АЭС, ^{137}Cs , поступление в организм человека, доза внутреннего облучения, СИЧ-измерения, регрессионная модель, факторы формирования дозы.

В отличие от монотонного снижения мощности дозы внешнего облучения на загрязненных чернобыльскими радионуклидами территориях, динамика дозы внутреннего облучения (ДВО) сельских жителей в отдаленный период после аварии имеет нерегулярный характер с общей тенденцией к стабилизации.

Широкомасштабное проведение контрмер в личном секторе сельского хозяйства, с одной стороны, и с другой – практически полное восстановление доаварийного социального поведения и пищевых привычек привели к смещению центра тяжести формирования дозы от продуктов, полученных в личных подсобных хозяйствах (молоко, картофель, овощи, мясо), к пищевым продуктам леса (грибы, ягоды, дичь).

Как известно, в лесных почвах ^{137}Cs слабо мигрирует по вертикальному профилю и сосредоточен в настоящее время в основном в 10-сантиметровом слое, что делает его легкодоступным для включения в грибы, лесные ягоды и травы, поедаемые дикими животными. В то же время суще-

ственно снизились уровни загрязнения ^{137}Cs молока и другой сельскохозяйственной продукции.

Такая ситуация создает определенные трудности в использовании прежних методов оценки ДВО, основанных на поступлении радионуклида ^{137}Cs в организм человека с молоком, моделирующим всю мясо-молочную продукцию, и картофелем – растительную [1, 2].

Поправки в выражении для расчета дозы в виде коэффициентов, учитывающих потребление лесных пищевых продуктов, обычно оценивают с большой степенью неопределенности, что обусловлено, во-первых, недостаточным объемом данных по загрязнению пищевых продуктов леса и, во-вторых, внушительным перечнем факторов, влияющих на поступление ^{137}Cs в лесную продукцию.

После введения в конце 80-х годов прошлого века системы дозового мониторинга жителей загрязненных чернобыльскими радионуклидами территорий в Республике Беларусь, благодаря использованию счетчиков излучения человека (СИЧ), был накоплен значительный объем информации (более 1.8 млн результатов СИЧ-измерений содержания радионуклидов цезия в организме человека), который можно вполне обоснованно ис-

*Адресат для корреспонденции: Республика Беларусь, 246042 Гомель, РНПЦ РМиЭЧ; тел.: (8-10380-232) 38-95-22; факс: (8-10380-232) 37-80-97; e-mail: Natalie_Vlasova@mail.ru.

пользовать для оценки текущих ДВО населения, проживающего на загрязненных территориях.

Результаты СИЧ-измерений используются для оценки средних годовых эффективных ДВО населения двумя способами: непосредственный расчет средней годовой дозы из статистически обоснованного набора СИЧ-измерений для конкретного населенного пункта (НП) и в качестве основы для разработки модельных оценок. Оценку доз облучения по СИЧ-измерениям можно считать более точной и надежной, так как она обусловлена фактически поступившим в организм ^{137}Cs с реальным рационом питания. Дозы, рассчитанные по поступлению ^{137}Cs с загрязненными молоком и картофелем, имеют больший запас консерватизма.

В целом, оба методических подхода не противоречат друг другу, за исключением незначительного допущения, принимаемого при расчетах. Дозу по активности молока и картофеля оценивают как ожидаемую годовую дозу при поступлении ^{137}Cs с продуктами питания в текущем году, в то время как дозу по СИЧ-измерениям оценивают как ожидаемую от уже поступившего в организм ^{137}Cs . Такое небольшое временное смещение устраняется допущением о равновесной активности ^{137}Cs , определяемой при единичном СИЧ-измерении. Неопределенность единичного СИЧ-измерения преодолевается усреднением набора СИЧ-измерений жителей одного НП в течение года.

В Публикации № 101 МКРЗ введено понятие репрезентативного человека как представительного члена наиболее облучаемой критической группы (КГ) жителей НП [3]. Критическая группа из жителей НП, согласно той же Публикации, принимается как 10% наиболее облучаемых жителей НП.

Согласно рекомендациям Публикации № 103 МКРЗ, облучение в отдаленный период после аварии рассматривается как текущее [4]. Дозу от такого облучения для целей зонирования необходимо оценивать как среднюю по КГ населения, что примерно соответствует дозе облучения на уровне 95% квантиля распределения дозы, т.е. дозе облучения репрезентативного человека.

Использование значения средней дозы КГ населения для целей зонирования оправдано с точки зрения процесса формирования ДВО. Как было указано выше, существенный вклад в значение ДВО вносит загрязнение радионуклидами пищевых продуктов леса, главным образом, грибов. Циклическая периодичность урожайности грибов складывается из 2–3 малоурожайных, 1–3 среднеурожайных и 1–2 сильно урожайных лет [5]. Вследствие различного уровня потребления грибов в эти годы среднее значение ДВО жителей населенных пунктов лесной зоны варьирует в 2–

3 раза. В реальных распределениях ДВО жителей сельских населенных пунктов среднее значение дозы всего населения отличается от среднего значения отдельных групп в 2–3.5 раза.

Результаты СИЧ-измерений, используемые в настоящей работе, приводятся в терминах поступления ^{137}Cs в организм человека с продуктами питания для сохранения методического единства в оценках средних годовых эффективных ДВО, представленных ранее в официальных Каталогах доз 1992 г. и 2004 г. [6, 7]. При этом в расчетах поступления исходили из равновесного содержания ^{137}Cs в организме человека.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Материалом для оценки средних годовых эффективных ДВО жителей НП, расположенных на территории радиоактивного загрязнения, послужили данные СИЧ-измерений из базы данных Государственного дозиметрического регистра за период 2005–2007 гг. Для оценки ДВО непосредственно по результатам СИЧ-измерений использовали данные по Брестской, Гомельской и Могилевской областям. Модельные оценки проводили на основе данных СИЧ-измерений по Гомельской области. Информация о плотности загрязнения населенных пунктов ^{137}Cs была представлена Республиканским центром радиационного контроля и мониторинга окружающей среды.

При расчете средних годовых индивидуальных эффективных ДВО жителей НП с использованием данных СИЧ-измерений принята модель равновесного содержания ^{137}Cs в теле человека, когда значение среднего в течение года суточного поступления радионуклида соответствует его среднему суточному выведению. Средняя годовая эффективная ДВО жителей ^{137}Cs ($E_{\text{НП}}^{\text{int}}$) определяется согласно выражению:

$$E_{\text{НП}}^{\text{int}} = K_d \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i/M_i) \text{ мЗв/год}, \quad (1)$$

где K_d – дозовый коэффициент, равный 2.5 (мЗв/год)/(кБк/кг); Q_i – содержание ^{137}Cs в организме i -го человека по данным СИЧ-измерений, кБк; M_i – масса тела i -го человека, кг; n – число обследованных на СИЧ жителей НП.

Для статистической достоверности оценки средней годовой эффективной ДВО жителей конкретного НП по результатам СИЧ-измерений использовали представительные по числу измерений и сезонной равномерности выборки. Количество необходимого и достаточного числа измерений в зависимости от численности жителей в НП приведено в табл. 1 [8].

Таблица 1. Необходимый и достаточный с вероятностью 0.95 объем выборки для достоверной оценки текущих доз облучения жителей в населенном пункте

Показатель	Численность жителей в населенном пункте			
	<100	100–1000	1000–10000	>10000
Объем выборки	Не менее 85% от общей численности	Не менее 40% от общей численности	Не менее 10% от общей численности	680

Как было показано в работе [9], содержание ^{137}Cs в теле человека в осенне-зимний период (август–февраль) превышает весенне-летнее значение в 1.5–2 раза. Был использован критерий равномерности:

$$\frac{|N_{\text{о.-з.}} - N_{\text{в.-л.}}|}{N_{\text{о.-з.}} + N_{\text{в.-л.}}} < 0.33, \quad (2)$$

где $N_{\text{о.-з.}}$ – число измерений в осенне-зимний период; $N_{\text{в.-л.}}$ – число измерений в весенне-летний период.

Выполнение данного условия ухудшает точность оценки дозы, по сравнению с равномерным по сезонам количеством измерений на 4–8%.

Из распределения ДВО жителей конкретного НП выявляли КГ, которая представляет собой выборку жителей, у которых проведены СИЧ-измерения, составляющую 10% от общей численности жителей данного НП, имеющих наибольшие по сравнению с остальными индивидуальные ДВО. Среднюю годовую эффективную ДВО у лиц КГ ($E_{\text{НП}}^{\text{int}}$) находят из выражения

$$E_{\text{КГ}}^{\text{int}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{\text{КГ},i}^{\text{int}}, \quad (3)$$

где n – численность лиц, составляющих критическую группу; $\sum_{i=1}^n E_{\text{КГ},i}^{\text{int}}$ – эффективная доза внутреннего облучения i -го лица из КГ, мЗв/год.

Статистическую обработку полученных результатов проводили при помощи пакетов прикладных программ Microsoft Excel, Statistica 6.0. Использовали общепринятые методы вариационной статистики, а также элементы кластерного и дискриминантного анализа [10, 11]. Гипотезу о нормальном распределении величин проверяли с помощью критериев Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка [12]. Достоверность различий оценивали по критерию Вилкоксона [13] для примеров, подчиняющихся законам логнормального распределения. Взаимосвязь между факторами формирования дозы и средней годовой эффективной ДВО жителей устанавливали при помощи корреляционного анализа с расчетом коэффициента корреляции Пирсона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обоснование выбора основных и косвенных факторов формирования дозы при отсутствии или недостатке СИЧ-измерений

Имеющаяся СИЧ-информация отличается неоднородностью по количеству измерений, проведенных в загрязненных чернобыльскими радионуклидами НП Республики Беларусь. Наиболее развита база данных Гомельской области, однако условия статистической достоверности при оценке ДВО по прямым СИЧ-измерениям выполняются для относительно небольшого числа НП. В то же время существующего объема результатов СИЧ-измерений вполне достаточно для разработки модельных оценок дозы. Задачей моделирования в данном случае является нахождение регрессионных зависимостей в однородных условиях формирования дозы между целевым и объясняющим признаками, какими являются ДВО и плотность загрязнения территории НП ^{137}Cs .

Формирование ДВО происходит под воздействием ряда факторов радиационной и нерадиационной природы. Численное значение дозы в равной степени зависит как от уровня загрязнения и миграционных свойств почвы, так и от социального поведения и пищевых привычек человека. Из множества факторов, прямо или опосредованно оказывающих влияние на среднее значение ДВО, были рассмотрены 15 факторов, из которых для шести была обнаружена статистически достоверная корреляция с дозой. В частности, такими факторами были коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в растения ($K_{\text{п}}$), кислотность почвы, относительная площадь продуктивного леса в радиусе 5 км вокруг НП, численность постоянно проживающего населения в НП, число хозяйств в НП, демографический потенциал НП [14]. Первые два признака обуславливают загрязнение пищевой продукции местного производства и произрастания, от потребления которой формируется доза – их можно отнести к основным дозообразующим факторам. Остальные признаки, характеризующие социально-демографические и экологические условия конкретных НП, можно обозначить как косвенные.

Для косвенных факторов был проведен анализ парных корреляций, который показал, что коэффициент корреляции между факторными призна-

Таблица 2. Коэффициент перехода (K_{Π}) ^{137}Cs в звене “почва–продукт” для групп почв, $\text{м}^2/\text{кг} \times 10^{-3}$

Продукт	Тип почвы			
	песчаные, супесчаные	легко- и средне-суглинистые	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

ками численность населения и число хозяйств в НП составляет 0.99, между факторными признаками относительная площадь леса и демографический потенциал – 0.75. Известно, что при сильной корреляционной связи для описания объектов можно использовать (с незначительными потерями информации) одну из двух переменных. Таким образом, для характеристики средней дозы внутреннего облучения наиболее информативными косвенными признаками могут быть численность населения и относительная площадь продуктивного леса. Нужно отметить, что выбранные в ходе анализа косвенные признаки имеют разнонаправленный характер связи в отношении средней дозы внутреннего облучения, что существенно усложняет их формализованное выражение в виде множественной регрессионной зависимости. Поэтому в дальнейшем целесообразно использовать объединенный факторный признак – удельная площадь продуктивного леса, которая рассчитывается как отношение площади продуктивного леса в радиусе 5 км вокруг НП к числу жителей, постоянно проживающих в НП.

Оценка средней годовой эффективной дозы внутреннего облучения при отсутствии или недостатке данных СИЧ-измерений

Основанием для оценки дозы внутреннего облучения населения загрязненных чернобыльскими радионуклидами территорий является расчет среднего годового поступления ^{137}Cs , проведенный по результатам СИЧ-измерений. В предположении равновесного содержания ^{137}Cs в организме человека ежесуточное поступление с пищей можно рассчитать по формуле:

$$q_{\text{КГ}} = 0.3 E_{\text{КГ}}^{\text{int}} M, \quad (4)$$

где $E_{\text{КГ}}^{\text{int}}$ – средняя годовая эффективная ДВО КГ жителей НП, мЗв/год; M – масса репрезентативного (стандартного человека), равная 70 кг; 0.3 – коэффи-

циент пропорциональности, равный произведению дозового коэффициента 2.5×10^{-3} (мЗв/год)/(кБк/кг) на 120 (кратность накопления).

Для оценки ДВО жителей НП с недостатком или отсутствием данных по СИЧ-измерениям использовали модельные представления, основанные на учете основных и косвенных факторов формирования ДВО. К основным дозообразующим факторам отнесены свойства почв: коэффициенты перехода ^{137}Cs из почвы в основную сельскохозяйственную и лесную продукцию (молоко, мясо – говядина и свинина, картофель, грибы) и кислотность почв. Как было установлено в работе [15], на кислых почвах поступление ^{137}Cs в растения увеличивается примерно вдвое.

К косвенным факторам формирования дозы отнесены численность жителей в НП и площадь лесных массивов в ареале населенного пункта. Выбранные косвенные факторы вносят наибольший вклад в формирование ДВО, так как близость леса и слабо развитая инфраструктура в малых и средних НП создает определенный уклад хозяйствования, близкий к натуральному. По выбранным основным и косвенным факторам была проведена классификация НП.

Для проведения классификации по основным факторам в районах Гомельской области выбирали НП, в которых за период 2005–2007 гг. было выполнено 30 и более СИЧ-измерений; выделили критическую группу и определили среднее суточное поступление ^{137}Cs в организм лиц КГ.

Районы Гомельской области были разбиты на 3 региона, каждый из которых имеет однородные почвенные характеристики. Все типы почв Беларуси объединили в 4 группы, существенно различающиеся по поступлению ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию: молоко, мясо – говядину, свинину, картофель, грибы. Группы почв следующие: песчаные и супесчаные, легко- и средне-суглинистые, торфяно-болотные, пойменные.

Для каждого района, расположенного на загрязненных радионуклидами территориях, рассчитывали долю каждой группы почв. Полученные данные использовали для получения взвешенного по набору продуктов питания сельского жителя “почвенного” индекса ($F_{\text{почв}}$), который определяется как:

$$F_{\text{почв}} = K_{\text{дост}} K_{\text{кисл}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{дост}}$ – эффективный коэффициент доступности для растений, отн. ед.; $K_{\text{кисл}}$ – коэффициент, учитывающий кислотность почв, отн. ед.

Для расчета $K_{\text{кисл}}$ использовали выражение:

$$K_{\text{кисл}} = 2\eta + (1 - \eta), \quad (6)$$

где η – доля почв в районе с $\text{pH} < 5$.

При расчете $K_{\text{дост}}$ использовали данные, представленные в табл. 2 [8].

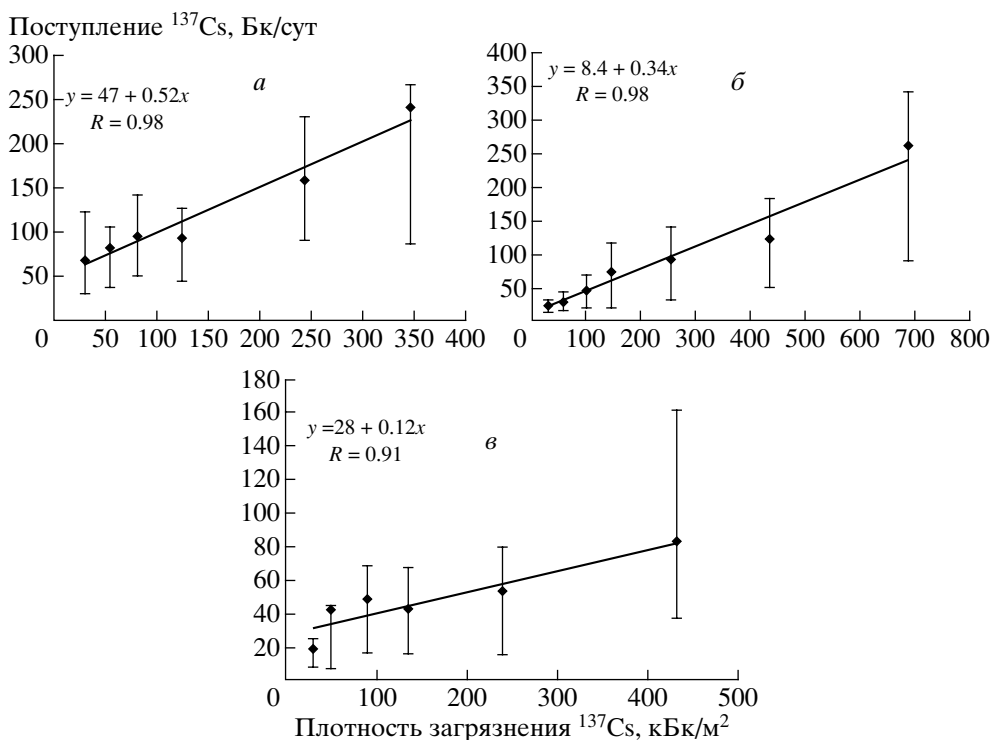


Рис. 1. Регрессионные зависимости суточного поступления ^{137}Cs от плотности загрязнения территорий. *а* – Полесский регион, *б* – Северо-Восточный регион, *в* – Центральный регион.

Эффективный коэффициент $K_{\text{дост}}$ вычисляли для каждого района по следующей формуле:

$$K_{\text{дост}} = \sum \epsilon_i K_i^{\text{дост}}, \quad (7)$$

где ϵ_i – доля i -й группы почв в районе; $K_i^{\text{дост}}$ – показатель доступности i -й группы почв.

По полученным значениям $F_{\text{почв}}$ все НП были классифицированы с помощью процедуры кла-

Таблица 3. Сравнение средних годовых доз внутреннего облучения, рассчитанных по модели и по прямым СИЧ-измерений для жителей некоторых НП

Район	Населенный пункт	Численность жителей, чел.	Плотность загрязнения, kBq/m ²	Доза внутреннего облучения, мЗв/год	
				модель	СИЧ-измерения
Лунинецкий	Луги	125	54	0.32	0.22
Пинский	Паре	187	63	0.34	0.35
Брагинский	Рыжков	176	216	0.35	0.29
Ветковский	Присно	416	237	0.24	0.23
Ветковский	Хальч	1318	394	0.32	0.44
Ельский	Подгалье	277	74	0.37	0.48
Ельский	Заширье	1280	96	0.41	0.29
Наровлянский	Конотоп	130	518	1.36	1.63
Хойникский	Борисовщина	317	179	0.30	0.43
Хойникский	Вить	625	154	0.26	0.37
Чечерский	Ботвиново	512	131	0.19	0.15
Чечерский	Сидоровичи	329	186	0.22	0.41
Кличевский	Должанка	11	74	0.16	0.20
Славгородский	Ходорово	42	336	0.53	0.45
Ельский	Валав. Рудня	206	242	0.74	0.64
Чечерский	Покоть	160	269	0.26	0.65
Брагинский	Соболи	91	366	0.57	0.28

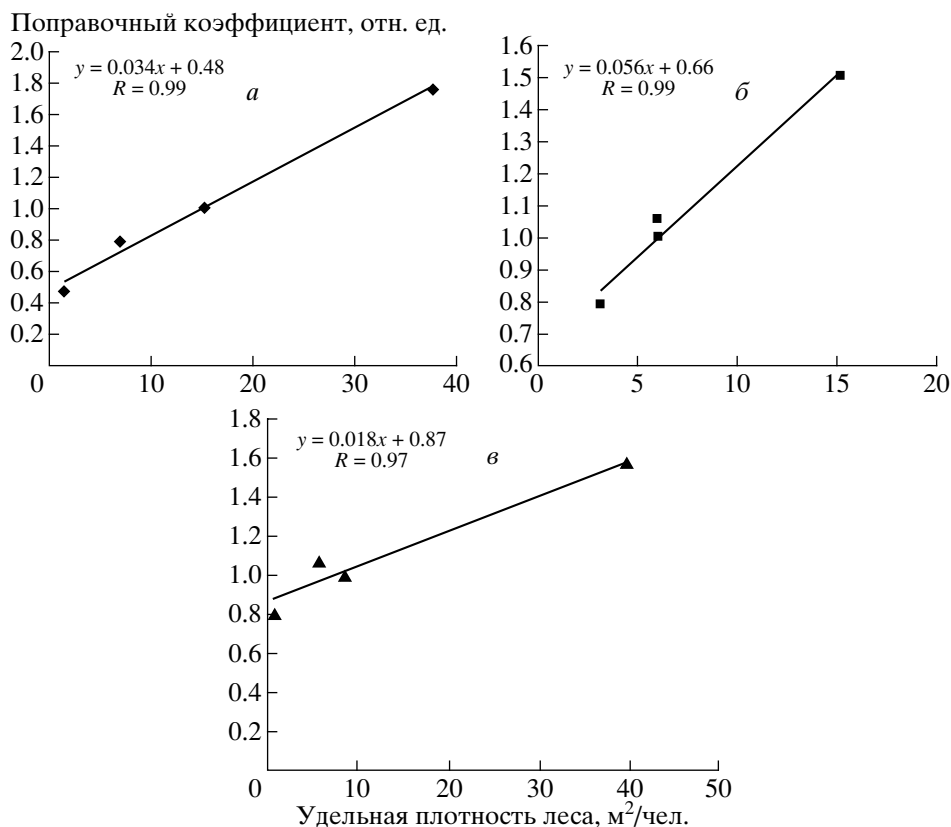


Рис. 2. Регрессионные зависимости $K_{\text{попр}}$ от удельной площади леса. а – Полесский регион, б – Северо-Восточный регион, в – Центральный регион.

стерного анализа на три региона: Полесский, Северо-Восточный и Центральный. Для каждого региона была построена регрессионная модель зависимости суточного поступления ^{137}Cs от плотности загрязнения территории. Полученные регрессионные зависимости представлены на рис. 1.

Значение свободного члена в выражениях для расчета суточного поступления можно интерпретировать как “импорт дозы”.

В табл. 3 приводятся результаты оценок ДВО, выполненные по регрессионным модельным зависимостям и статистически достоверным результатам СИЧ-измерений для некоторых НП трех регионов. Расчет дозы внутреннего облучения по суточному поступлению ^{137}Cs выполняли, используя выражение (4):

$$E_{\text{КГ}}^{\text{int}} = 2.5 \times 10^{-3} q_{\text{КГ}} \times 120/M, \text{ мЗв/год}, \quad (8)$$

где $E_{\text{КГ}}^{\text{int}}$ – средняя годовая эффективная ДВО КГ жителей НП, мЗв/год; M – масса репрезентативного (стандартного человека), равная 70 кг; 120 – кратность накопления; дозовый коэффициент 2.5×10^{-3} (мЗв/год)/(кБк/кг).

Данные табл. 3 показывают хорошую сходимость результатов, рассчитанных по модели и ре-

зультатам СИЧ-измерений для НП всех трех регионов, расположенных на территориях с различной плотностью загрязнения.

Определение поправочных коэффициентов от косвенных факторов формирования дозы

Модельные оценки ДВО в каждом из трех регионов получали для усредненного по региону значения удельной площади продуктивного леса. В НП, в которых эта величина отличается от среднерегионального значения, необходимо внести поправки на косвенные факторы: число жителей и площадь леса. С этой целью была проведена классификация НП каждого региона по численности жителей и удельной площади леса в ареале НП (площадь леса в радиусе 5 км вокруг НП, отнесенная к числу жителей).

Для проведения классификации в каждом регионе выбраны только те НП, в которых количество и качество проведенных СИЧ-измерений соответствовали статистически достоверным условиям. Такой выбор позволяет свести неопределенности оценок дозы по прямым СИЧ-измерениям к минимуму.

Таблица 4. Сравнение ДВО, представленных в Каталоге-92, рассчитанных по модели и с введенным $K_{\text{попр}}$ для жителей некоторых НП

Населенный пункт	Численность жителей, чел.	Площадь леса, отн. ед.	Плотность загрязнения ^{137}Cs , кБк/м ²	Доза внутреннего облучения, мЗв/год		
				каталог-92	модель	модель с $K_{\text{попр}}$
Добрынь	679	0.12	233	0.60	0.72	0.36
Будки	184	0.35	269	0.70	0.80	0.54
Вербовичи	231	0.15	567	1.40	1.46	0.80
Головчицы	446	0.27	394	0.70	1.08	0.58
Киров	406	0.79	507	1.10	1.33	0.90
Наровля	8500	0.17	307	0.60	0.89	0.43
Бакуны	123	0.07	268	0.40	0.43	0.32
Брагин	3700	0.01	475	0.50	0.73	0.48
Бурки	385	0.06	268	0.30	0.43	0.29
Соболи	91	0.02	366	0.10	0.57	0.40
Микуличи	240	0.04	454	0.30	0.70	0.48
Листвин	203	0.02	441	0.50	0.68	0.46
Селище	15	0.01	366	0.30	0.31	0.28
Корма	6200	0.01	382	0.30	0.32	0.27
Сычман	138	0.39	243	0.30	0.39	0.40
Зори	182	0.12	346	0.20	0.30	0.23

Поправки на влияние фактора леса вносили с помощью поправочных коэффициентов, которые являются множителями, изменяющими дозу в зависимости от значения удельной площади леса конкретного НП. Для нахождения поправочных коэффициентов в выборку для построения регрессии добавляли виртуальную точку, равную среднему значению удельной площади леса в выборке с соответствующим значением дозы, которое принимали за 1. Остальные дозовые показатели в выборках выражали в виде приведенных значений, которые рассчитывали при помощи соотношения:

$$K_{\text{попр}} = \frac{E_{\text{КГ}_i}^{\text{int}}}{E_{\text{КГ}}^{\text{int}}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{попр}}$ – значение поправочного коэффициента, отн. ед., $E_{\text{КГ}_i}^{\text{int}}$ – i -е значение ДВО, используемое в выборках, мЗв/год; $E_{\text{КГ}}^{\text{int}}$ – значение ДВО для средней величины удельной площади леса, мЗв/год.

Регрессионные зависимости $K_{\text{попр}}$ от удельной площади леса для трех регионов приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, используемые в качестве обучающей выборки НП трех регионов заметно различаются по показателю удельной площади продуктивного леса вокруг НП. Углы наклона

прямых для расчета поправочных коэффициентов в зависимости от удельной площади леса также существенно различаются по регионам. Это можно объяснить неоднородностью выборок по каждому из них, в основном вследствие двух причин: во-первых, из-за различий распределения численности жителей в НП и лесных площадей в каждом регионе и, во-вторых, из-за неоднородности самих обучающих выборок, сформированных для расчета поправочных коэффициентов. Результаты расчета значений ДВО жителей НП трех регионов с применением поправочного коэффициента косвенных факторов $K_{\text{попр}}$ приведены в табл. 4.

Сравнение результатов расчета ДВО с использованием $K_{\text{попр}}$ с результатами, полученными по базовой модели, показывает существенное влияние косвенных факторов на формирование дозы. Критерием адекватности оценок с учетом $K_{\text{попр}}$ косвенно может быть сопоставление со средними значениями ДВО из Каталога-92 [6].

Косвенные факторы могут оказывать различное влияние на вариацию дозы в каждом конкретном случае по-разному, что требует дополнительного уточнения их роли, поскольку для НП с различной численностью и плотностью леса существуют различия как в значениях средних годовых доз жителей, так и в вариации этих величин. Различия в величине коэффициентов вариации обусловлены как особенностями регионов, так и неоднородностью выборок, используемых

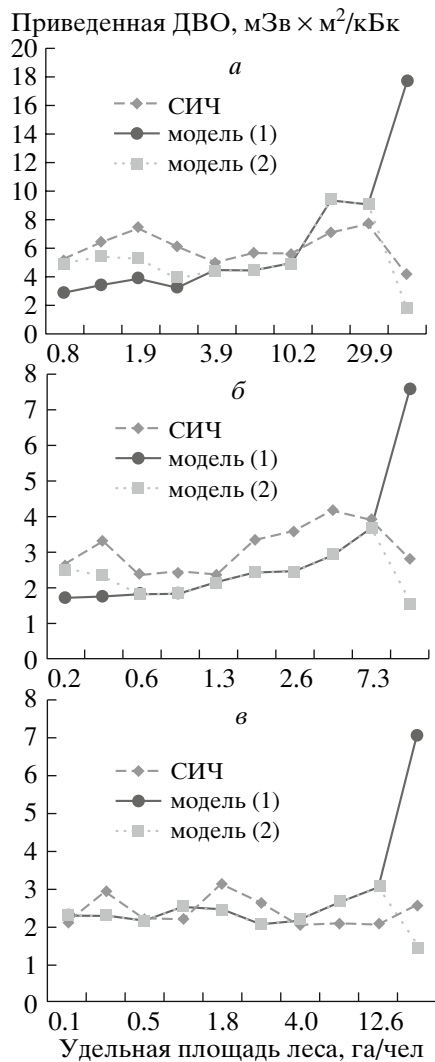


Рис. 3. Зависимость приведенной дозы внутреннего облучения от удельной площади леса для прямых и модельных оценок. а – Полесский регион, б – Северо-Восточный регион, в – Центральный регион.

для расчета поправочных коэффициентов. В связи с этим необходимо было провести дополнительное исследование для определения области применимости поправочных коэффициентов. Для этого были построены региональные зависимости приведенной дозы (ДВО, отнесенной к плотности загрязнения территории) от удельной площади продуктивного леса вокруг НП для обучающей выборки (дозы, оцененные по прямым СИЧ-измерениям) и модельным оценкам с использованием поправочного коэффициента. Если исходить из критерия максимального приближения модельных оценок к результатам прямых СИЧ-измерений, то следует ограничить области применения поправочных коэффициентов.

Используемая в анализе обучающая выборка не является в полной мере представительной для

генеральной совокупности НП в регионе. Это обусловлено неполнотой результатов, накопленных в базе данных СИЧ-измерений. Для некоторых значений удельной плотности леса, которые неодинаковы для различных регионов, не получено статистически значимых доказательств зависимости ДВО от удельной площади леса. Поэтому до формирования в базе данных СИЧ-измерений представительных выборок для регионов, которые можно использовать для анализа, было проделано выборочное применение поправочных коэффициентов по принципу наибольшего приближения к результатам, полученным по прямым СИЧ-измерениям с оценкой по критерию Вилкоксона. На рис. 3 показаны зависимости приведенной дозы от удельной площади продуктивного леса для трех выборок в каждом регионе: по прямым СИЧ-измерениям (1), на основе модельных оценок со сплошным использованием поправочного коэффициента (2) и на основе модельных оценок с выборочным использованием поправочного коэффициента (3).

Как видно из рис. 3, первый и третий варианты в каждом регионе имеют наилучшую сходимость результатов. Исходя из критерия максимального приближения модельных оценок дозы к результатам, полученным по прямым СИЧ-измерениям, было выполнено их сравнение с дозами, рассчитанными по модели со сплошным использованием поправочного коэффициента (зависимость 2 на рис. 3) и с выборочным использованием поправочного коэффициента (зависимость 3 на рис. 3). Статистические параметры распределения трех выборок в каждом регионе приведены на рис. 4

При сравнении выборок по критерию Вилкоксона было установлено, что тотальное (сплошное) использование поправочных коэффициентов в первом регионе обуславливает 28% соответствия эмпирических и рассчитанных по модели данных, а выборочное применение поправочных коэффициентов увеличивает сходимость результата до 36%. Во втором регионе вероятность увеличивается с 63 до 78%, а в третьем с 10 до 79%. Следовательно, можно говорить о том, что выборочное использование поправочных коэффициентов улучшает качество модели и приближает ее к реальной ситуации. Улучшение статистической достоверности обучающих выборок при расширении базы данных СИЧ-измерений позволяет провести более точные оценки ДВО населения.

Таким образом, разработанная модель оценки ДВО, основанная на результатах СИЧ-измерений, может быть использована для целей зонирования загрязненных чернобыльскими радионуклидами территорий.

Неопределенность оценок, выполненных по модели, главным образом, обусловлена неполно-

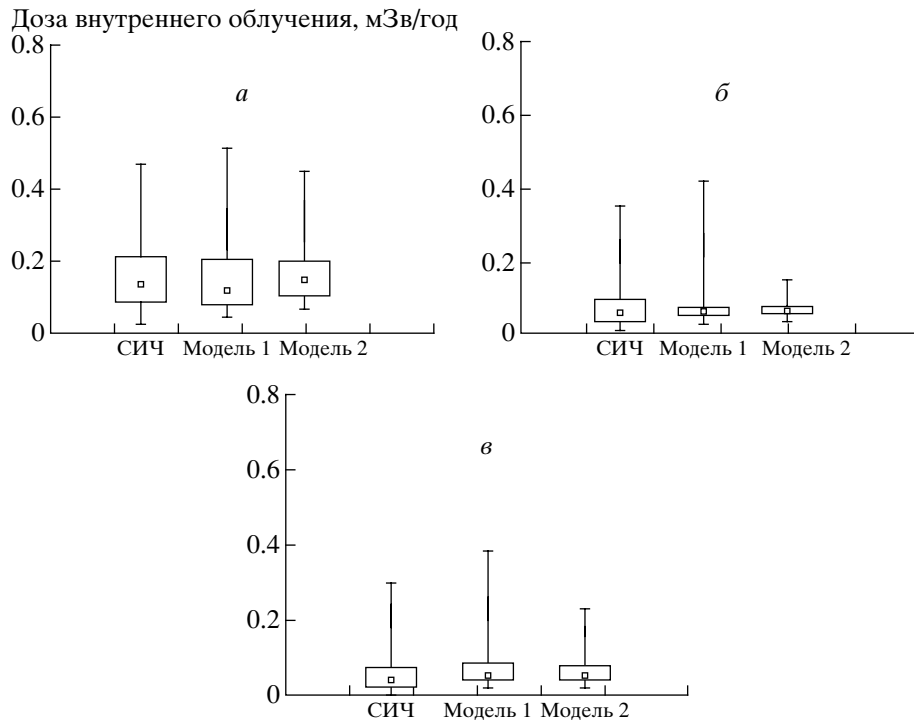


Рис. 4. Распределение дозы внутреннего облучения в выборках, сформированных по прямым СИЧ-измерениям и рассчитанных по модели. *а* – Полесский регион, *б* – Северо-Восточный регион, *в* – Центральный регион.

той базы данных, используемой для моделирования. Всякий раз при формировании обучающей выборки для построения модели необходимо исследовать область применения поправочного коэффициента, который позволяет отразить качественное влияние на формирование средних доз внутреннего облучения наиболее весомых косвенных факторов. Нужно отметить возможность приближения зависимости поправочного коэффициента к экспоненциальному или степенному виду, поскольку, как было показано в работе, при больших значениях удельной площади леса в модельных оценках наблюдается существенное завышение величины дозы внутреннего облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Определение годовых суммарных эффективных эквивалентных доз облучения населения для контролируемых районов РСФСР, УССР, БССР, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС: Методические указания № 5792–91. М., 1991. 10 с.
2. Оценка эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения лиц, которые проживают на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС: Методические указания. Минск, 1998. 12 с.
3. ICRP Publ. 101. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process // Ann. ICRP. V. 42. № 33. Oxford: Pergamon Press, 2006. 103 с.
4. ISRP Publ. 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // Ann. ICRP. Oxford: Pergamon Press, 2007. 332 с.
5. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / Под ред. В.А. Ипатьева. Гомель, 1999. 454 с.
6. Каталог доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь. Минск, 1992.
7. Каталог годовых эффективных доз облучения в 2004 г. (ГЭД_{КГ}-2004) жителей населенных пунктов Республики Беларусь, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения по Постановлению Совета Министров Республики Беларусь № 714 от 30.05.2003 г. “О внесении изменений и дополнений в Постановление СМ Республики Беларусь от 8.08.2002 г. № 1076” (для целей зонирования). Утв. Мин. Здрав. Респ. Беларусь, соглас. Комитета по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Сов. Мин. Респ. Беларусь 8.07.2004 г.
8. Радиационный мониторинг облучения населения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС/ТС проект RER/9/074 / Балонов М.И., Барковский А.Н., Брук Г.Я. и др. Вена (Австрия), 2007. 119 с.
9. Власова Н.Г. // Экол. вестн. 2007. № 2. С. 13–22.
10. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.

11. Рокицкий П.Ф. Биологическая статистика. 3-е изд. Минск: Вышэйш. шк., 1973. 320 с.
12. Лакин Г.Ф. Биометрия: Учеб. пособие для биол. спец. вузов. 4-е изд. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.
13. Боровиков В.П. Программа STATISTICA для студентов и инженеров. 2-е изд. М.: КомпьютерПресс, 2001. 301 с.
14. Проблемы радиационной реабилитации загрязненных территорий / Под общ. ред. В.Ю. Агееца. Гомель: РНПУП “Институт радиологии”, 2004. 121 с.
15. Правила ведения агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2002–2005 гг. / Под ред. И.М. Богдевича. Минск, 2002. 74 с.

Поступила в редакцию
1.10.2008

A Statistical Analysis of the Data Acquired from WBC Measurements for Internal Irradiation Dose Assessment of the Inhabitants of Rural Areas Years after the Chernobyl Accident

N. G. Vlasova, D. N. Drozdov, L. A. Chunikhin

*The Republican Research Center for Radiation Medicine and Human Ecology, Gomel, 246042 Belarus;
e-mail: Natalie_Vlasova@mail.ru*

The method for the assessment of the rural inhabitants internal dose lived in areas of the Republic of Belarus contaminated by the Chernobyl radionuclides was developed. The model is based on the individual internal doses, calculated by the WBC measurements. The data of WBC measurements of the State Dosimetric Register are used for direct assessment of internal irradiation dose, and as a basis for the model development. The dose assessment model is based on the classification of contaminated territories on the regional features of the soils, which cause ^{137}Cs intaking with locally produced foods. The model is also based on regression of daily ^{137}Cs intake on the density contamination of the soil. Such regression model had been made for each region. The influence of indirect factors had been taken into consideration in the dose assessment. These factors are: the number of settlement population, and the forest area around it. Its influents had been taken as correction factors. The factors had been determined from the regression model of the correction factors on a specific forest area for each region.