

Оценка доз облучения населения в отдалённом периоде после Чернобыльской аварии

Н.Г. Власова

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

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

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

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

Введение

Оценка доз облучения необходима для принятия решения о вмешательстве в практическую деятельность человека, т.е. о введении противорадиационных мер по снижению доз облучения населения и выявления наиболее облучаемых групп населения с целью оказания им адресной медицинской помощи.

Для решения этой задачи необходима оценка средних годовых эффективных доз (СГЭД) облучения населения радиоактивно загрязнённой территории. В соответствии с Законами Республики Беларусь проводится отнесение населённых пунктов (НП) к зонам радиоактивного загрязнения 1 раз в 5 лет на основании данных о средней годовой эффективной дозе облучения и средней плотно-

сти загрязнения территории населённого пункта радионуклидами цезия-137, стронция-90 и плутония-238, 239, 240 [1, 2].

Для оценки доз внутреннего облучения человека обычно использовали два класса моделей: детерминистские и феноменологические, которые представлены на рисунке 1.

Первый класс моделей основан на определении коэффициентов перехода по звеньям трофической цепи: почва → растение → организм животных → человек. Детерминистские модели включают экологические модели разного вида и сложности типа ECOSYS-87 [3], в которые включены все пути поступления радионуклидов.



Рис. 1. Модели оценки доз внутреннего облучения

Разнообразие почв территории загрязнения чернобыльскими радионуклидами обуславливает варьирование коэффициентов перехода из почвы в сельскохозяйственные растения в диапазоне двух порядков величины. Это делает ограниченным применение детерминистских моделей.

Еще один подход включает элементы экологической модели и скорректированные по данным СИЧ-измерений параметры. Примером может служить модель, предложенная И.А. Лихтаревым и П. Якобом с соавторами [4]. Параметры модели подбирают с учетом региональных особенностей.

В отличие от моделей, которые позволяют оценивать среднюю дозу для конкретного населенного пункта, модель позволяет точнее прогнозировать средние значения для экологически различающихся регионов, а не для конкретного НП, жители которого нуждаются в радиационной защите.

Второй класс – феноменологические модели, основаны на экспериментально полученных данных, характеризующих радиационную обстановку.

К ним относятся методики оценки доз внутреннего облучения, в течение ряда лет используемые странами СНГ на загрязненных в результате аварии территориях [5–9]. Выражение для расчета дозы внутреннего облучения имеет следующий вид:

$$D_{\text{внутр}} = K_{\text{Cs, мол}} * C_{\text{Cs, мол}} + K_{\text{Cs, карт}} * C_{\text{Cs, карт}} \quad (1)$$

где $D_{\text{внутр}}$ – годовая доза внутреннего облучения от ^{137}Cs , мЗв/год;

$K_{\text{Cs, мол}}$ и $K_{\text{Cs, карт}}$ – коэффициенты связи годовой дозы внутреннего облучения с величиной удельного содержания ^{137}Cs в молоке и картофеле, мЗв/год × кг/Бк;

$C_{\text{Cs, мол}}$ – среднее по населенному пункту удельное содержание ^{137}Cs в пробах молока, кБк/л;

$C_{\text{Cs, карт}}$ – среднее по населенному пункту удельное содержание ^{137}Cs в пробах картофеля, кБк/кг.

Модель основана на имитации всего рациона наиболее дозообразующими продуктами питания – молоком и картофелем. При этом молоко моделирует потребление всей животноводческой части рациона, а картофель – всей потребляемой человеком растениеводческой продукции. Значения коэффициентов $K_{\text{Cs, мол}}$ и $K_{\text{Cs, карт}}$ характеризуют особенность рациона различных групп населения.

Проведенный анализ моделей расчета доз внутреннего облучения позволил отметить их особенности. Так, измерения молока и картофеля для оценки дозы внутреннего облучения проводят одномоментно, хотя известно о различиях в условиях загрязнения молока в пастбищный и стойловый период. При отборе проб не учитывают возможность проведения в НП защитных мероприятий и не оценивают их эффективность. Модели не в состоянии гибко и адекватно реагировать на изменения рациона, в частности, увеличение доли потребления пищевых продуктов леса. Модельные оценки в несколько раз превышают фактические значения доз, рассчитанные по данным СИЧ. В отдельных случаях они занижены в связи с неучетом потребления продуктов леса. Эти недостатки моделей увеличивают уровень консерватизма оценки дозы внутреннего облучения.

В «Примечании» к методическим указаниям [5] указано, что результаты расчетных оценок могут в несколько раз превышать фактические значения доз внутреннего облучения от ^{137}Cs , рассчитанных по результатам СИЧ-

измерений. При этом в расчётах не учитывались ограничения на потребление продуктов питания местного производства.

Представленная в Каталоге доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь 1992 г. [10] средняя по НП доза внутреннего облучения являлась консервативной оценкой, которая должна была быть в 2,0–2,5 раза выше средней фактической дозы облучения жителей НП.

Методики определения дозы облучения совершенствовались в связи с необходимостью коррекции численных значений и параметров, используемых в дозиметрических расчетах. Такая коррекция обусловлена постоянными процессами физического распада и миграции радионуклидов в окружающей среде, которые приводят к динамическим изменениям содержания и распределения радионуклидов в почве, воздухе, воде, сельскохозяйственной продукции и, как следствие, в организме человека.

В связи с тем, что был обнаружен значительный вклад в дозу внутреннего облучения пищевых продуктов леса (грибы, лесные ягоды, мясо диких животных), в «молочный» компонент дозы внутреннего облучения в Беларуси ввели коэффициент, учитывающий потребление даров леса.

Для оценки доз внутреннего облучения в России и Украине использовался переход от содержания цезия-137 в пищевых продуктах к дозе. Для этого было введено понятие эффективного рациона. С целью уменьшения объемов исследования пищевых продуктов определяли цезий-137 в молоке (мясомолочный компонент) и картофеле (растительный компонент). В качестве дополнения в России также использовался метод оценки дозы внутреннего облучения по коэффициентам перехода из почвы по пищевой цепочке в организм человека.

В методиках оценки доз внутреннего облучения населения, которые использовали для зонирования в Беларуси, России и Украине, заложен большой запас консерватизма, который обусловлен действием Каталога доз в течение 5 лет. Задачей оценки дозы внутреннего облучения является превышение дозы в период действия Каталога доз, что возможно вследствие значительных вариаций в уровнях загрязнения молока и особенно пищевых продуктов леса в течение этого периода.

Оценка доз внутреннего облучения на основе измерений с помощью СИЧ в основном использовалась для верификации модели, что связано с недостаточным количеством СИЧ в России и Украине.

В то же время оценка доз облучения по результатам СИЧ-измерений является наиболее точной и надежной, т.к. она обусловлена фактически поступившими в организм радионуклидами с реальным рационом питания. Дозы, рассчитанные по поступлению ^{137}Cs с загрязненным молоком и картофелем, с одной стороны, имеют большой запас консерватизма, а с другой – в отдельных случаях не учитывают потребление пищевых продуктов леса, что обуславливает занижение дозы.

В Беларуси введена система дозового мониторинга жителей загрязненных чернобыльскими радионуклидами территорий на основе СИЧ-установок. В настоящее время функционирует 34 СИЧ-установки.

К настоящему времени накоплена база СИЧ-измерений, которая содержала ~ 2,7 млн записей, что

позволило использовать эти данные для разработки методики оценки средних годовых эффективных доз внутреннего облучения.

Сравнение доз внутреннего облучения, рассчитанных по СИЧ-измерениям жителей населенных пунктов, показало, что они в 2,5–3 раза превышают «модельные» оценки [11]. Вместе с тем, наблюдается и обратная зависимость. Это указывает на то, что в методиках не учтено влияние косвенных факторов.

Кроме использования данных СИЧ-измерений при разработке методики оценки среднего значения дозы, в дополнение к прямым факторам (уровню радиоактивного загрязнения) были учтены косвенные факторы, оказывающие влияющие на дозообразование. К их числу, например, 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.

Известно, что социальные и экономические условия жизни сельских жителей в разных населенных пунктах неодинаковы. Очевидно, что чем меньше НП, чем дальше он расположен от локального центра, тем относительно хуже социальные и экономические условия жизни его жителей и тем больше степень натурализации в личном подсобном хозяйстве. Отличается и демографический состав населения: в малых НП меньше детей, больше людей пожилого возраста. В силу этих причин потребление загрязненных продуктов, а следовательно, и доза в малых НП должна быть выше, чем в крупных.

Выявлена зависимость усредненной дозы внутреннего облучения сельских жителей от численности жителей в населенном пункте: чем меньше населенный пункт, тем выше доза внутреннего облучения [12].

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

В каждом отдельном случае необходимо изучить характеристику территории, на которой находится НП. Так, многочисленными исследованиями установлена исключительно важная роль в дозообразовании «лесного» фактора [13].

Проведенный анализ выявил регрессионную зависимость дозы внутреннего облучения от коэффициента перехода радионуклидов в цепи «почва→молоко» с высоким коэффициентом корреляции [14].

Материалы и методы

Для разработки методики оценки средних годовых эффективных доз внутреннего облучения населения для цели зонирования загрязнённой территории были использованы результаты СИЧ-измерений двумя способами: непосредственный расчет средней годовой дозы из статистически обоснованного набора СИЧ-измерений

для конкретного населённого пункта и в качестве основы для разработки модельных оценок. Оценка доз облучения по СИЧ-измерениям более достоверна и надежна, так как она обусловлена фактически поступившим в организм ¹³⁷Cs с реальным рационом питания.

Материалами для проведения исследования явились данные Государственного дозиметрического регистра о дозах внутреннего облучения, рассчитанных по результатам 400 000 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

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 [13–15].

Уровень загрязнения сельскохозяйственной продукции местного производства и произрастания ¹³⁷Cs практически полностью обуславливает дозу внутреннего облучения сельских жителей. Зависит он от свойств почвы.

Значения коэффициента перехода радионуклида ¹³⁷Cs 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.

В исследованиях показано, что на почвах с кислой реакцией почвенного раствора коэффициент перехода в растение в 1,5–2 раза выше, чем на почвах с нейтральной и щелочной реакцией. Влажный режим почв также влияет на значение коэффициента перехода. На заливных почвах доступность ¹³⁷Cs для растений в 1,5 раза выше, чем на суходольных.

Для проведения обобщенных оценок все многообразие почвенных различий объединили в группы почв, значимо 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 [16]. 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; торфяно-болотные.

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

Продукты	Коэффициент перехода радионуклида ^{137}Cs , м ² /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

При этом допустили, что значения коэффициента перехода на пойменных почвах в 1,5 раза выше, чем на соответствующих суходолах. Для расчета коэффициента перехода на заливных (пойменных) почвах использовали выражение:

$$K_n^{IV} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 K_n^i \quad \text{или} \quad (2)$$

$$K_n^{IV} = \frac{1}{3} \cdot 1,5 \cdot K_n^I + \frac{1}{3} \cdot 1,5 \cdot K_n^{II} + \frac{1}{3} \cdot 1,5 \cdot K_n^{III}$$

где K_n^{IV} – коэффициент перехода для продукта, полученного на пойменных почвах;

K_n^i – коэффициент перехода для продукта, полученного на i -й группе почв.

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. Эколого-географические особенности территории НП, а именно: наличие продуктивного леса, естественных или искусственных водоемов, ягодных болот, формируют соответствующий жизненный уклад сельских жителей и поведенческие пищевые привычки, которые обладают известной консервативностью. Социальное поведение сельского человека Гомельской области заметно отличается от поведения городского жителя и жителя безлесных крупных сельских населенных пунктов. Установлено [15], что доза внутреннего облучения жителей лесных сельских НП превышает таковую у жителей безлесных населенных пунктов. В последние годы произошло практически полное восстановление доаварийного социального поведения и пищевых привычек людей, которые были нарушены запрещающими мерами и ограничениями в первые годы после аварии. Это привело к увеличению в рационе питания пищевых продуктов леса.

Как и наличие леса вблизи населенных пунктов, численность жителей также является значимым косвенным

фактором формирования дозы внутреннего облучения сельских жителей. Малые и средние населенные пункты, как правило, обладают слаборазвитой транспортной сетью и инфраструктурой. Их жители ведут хозяйство, близкое к натуральному.

Названные факторы: значение коэффициента перехода радионуклидов ^{137}Cs в цепи почва→молоко, кислотность почв, расстояние до леса, численность жителей в населенном пункте, а также площадь лесной территории, приходящаяся на душу населения, были взяты в качестве признаков для проведения классификации населенных пунктов по условиям формирования дозы внутреннего облучения.

Классификация НП по прямым формирующим дозу внутреннего облучения факторам проведена для Гомельской области.

К прямым дозообразующим факторам отнесли коэффициенты перехода радионуклида ^{137}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:

$$I_{\text{почв}} = K_{\text{доств}}^{\text{эф.}} \cdot K_{\text{кисл}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{доств}}^{\text{эф.}}$ – эффективный коэффициент перехода в условный рацион, отн. ед.

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

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

$$K_{\text{доств}}^{\text{эф.}} = \sum E_i \cdot K_i^{\text{доств.}}, \quad (4)$$

где E_i – доля i -й группы почв в районе, отн. ед

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

В таблице 1 представлены коэффициенты перехода для основных пищевых продуктов. С учётом этих данных был составлен так называемый «условный рацион» питания сельского жителя. В качестве допущения было принято, что СГЭД внутреннего облучения жителей сельских НП формируется из расчета: 40% от потребления молока, 40% от потребления грибов и 20% от потребления картофеля и мяса говядины и свинины.

Коэффициент перехода в «условный рацион» из i -й группы почв определяется по выражению:

$$K_i^{\text{доств.}} = 0,4 \cdot K_i^{\text{мол}} + 0,4 \cdot K_i^{\text{гр}} + 0,2 \left(\frac{K_i^{\text{м.св.}} + K_i^{\text{м.гов.}} + K_i^{\text{карт}}}{3} \right), \quad (5)$$

где $K_i^{\text{мол}}$ – коэффициент перехода из i -й группы почв в молоко;

$K_i^{\text{гр}}$ – коэффициент перехода из i -й группы почв в грибы;

$K_i^{\text{м.св.}}$ – коэффициент перехода из i -й группы почв в мясо свинины;

$K_i^{\text{м.гов.}}$ – коэффициент перехода из i -й группы почв в мясо говядины;

$K_i^{\text{карт}}$ – коэффициент перехода из i -й группы почв в картофель.

Для расчета коэффициента кислотности использовали выражение:

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

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

Расчет $K_{\text{кисл}}$ выполнен на основе картографического материала.

Для упрощения классификации данные таблицы 1 пронормировали на величину коэффициента перехода для II группы почв (легко- и среднесуглинистые), имеющей наименьшие значения для всех продуктов. Рассчитанные значения коэффициента перехода в «условный рацион» ($K_i^{\text{досм}}$) для каждой группы почв Гомельской области, взвешенные по «условному рациону», составляют:

- 2,8 – для песчаных и супесчаных почв (I группа),
- 1,0 – для легко- и средне суглинистых почв (II группа),
- 6,6 – для торфяно-болотных почв (III группа),
- 5,0 – для пойменных почв (IV группа).

Для расчета эффективного коэффициента перехода в условный рацион (η) вычислили долю каждой группы почв района. Рассчитанные по выражению (3) значения почвенного индекса для каждого района представлены в таблице 2.

Приведенные в таблице 2 районы Гомельской области были классифицированы на 3 региона: Полесский, Центральный, Северо-Восточный.

С целью совершенствования классификации добавили так называемый «интегральный показатель леса».

В том случае, если площадь леса в районе была менее 25% от общей площади, то «почвенный индекс» умножали на 1, на 1,25 – если площадь леса составляла от 25 до 55%, на 1,5 – если площадь леса составляет более 55% площади района.

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 [17]. Количество НП по регионам представлено в таблице 3.

В Полесский регион вошли: Ельский, Лельчицкий и Наровлянский районы.

В Центральный регион вошли Брагинский, Житковичский, Калинковичский, Мозырский, Речицкий, Рогачевский, Петриковский, Светлогорский и Хойникский районы.

В Северо-Восточный регион вошли Буда-Кошелевский, Ветковский, Гомельский, Добрушский, Жлобинский, Кормянский, Лоевский и Чечерский районы.

Таблица 2

Значения «почвенного индекса» для районов Гомельской области

№	Район	Доля i-группы почв, отн.ед.				$K_{\text{досм}}^{\text{эф.}}$	$K_{\text{кисл}}$	Почвенный индекс, I почв
1	Брагинский	0,37	0,23	0,33	0,07	3,9	1,45	6,0
2	Буда-Кошелевский	0,13	0,83	0,04	–	1,5	1,65	2,5
3	Ветковский	0,18	0,48	–	0,34	2,7	1,75	4,7
4	Гомельский	0,58	0,10	0,01	0,31	3,3	1,55	5,1
5	Добрушский	0,62	0,32	0,06	–	2,5	1,45	3,6
6	Ельский	0,74	–	0,26	–	3,7	1,75	6,5
7	Житковичский	0,63	–	0,18	0,19	3,8	1,55	5,9
8	Жлобинский	0,29	0,45	0,03	0,23	2,7	1,55	4,2
9	Калинковичский	0,57	0,16	0,23	0,04	3,4	1,55	5,3
10	Кормянский	–	0,79	–	0,21	1,9	1,85	3,5
11	Лельчицкий	0,51	0,13	0,32	0,04	3,8	1,85	7,0
12	Лоевский	0,34	0,51	0,02	0,13	2,4	1,65	4,0
13	Мозырский	0,65	–	0,06	0,29	3,7	1,75	6,5
14	Наровлянский	0,97	–	–	0,03	2,9	1,65	4,8
15	Речицкий	0,48	0,17	0,08	0,27	3,3	1,55	5,1
16	Рогачевский	–	0,56	0,19	0,25	3,0	1,85	4,9
17	Петриковский	0,74	–	0,16	0,10	2,8	1,75	5,6
18	Светлогорский	0,55	0,06	0,10	0,29	3,7	1,85	6,8
19	Хойникский	0,53	0,01	0,25	0,21	4,1	1,35	5,5
20	Чечерский	0,24	0,54	0,22	–	2,6	1,75	4,6

Количество населенных пунктов, вошедших в обучающую выборку каждого региона

Таблица 3

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

Для построения регрессионных моделей дозы внутреннего облучения на плотность загрязнения территории населенные пункты были объединены в группы с примерно одинаковой плотностью загрязнения территорий: менее 37 кБк/м², 37–62 кБк/м², 63–106 кБк/м², 107–179 кБк/м², 180–302 кБк/м², 303–511 кБк/м². Среднее значение плотности загрязнения по диапазонам составило: 24 кБк/м², 50 кБк/м², 84 кБк/м², 135 кБк/м², 221 кБк/м², 381 кБк/м² 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 регионов представлены на рисунке 2.

Параметры уравнения регрессии вида $y=a+bx$ представлены в таблице 4.

Из таблицы 4 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 региона – на 35%, для Северо-Восточного региона – на 40%.

В то же время коэффициент регрессии b остался почти без изменения, что свидетельствует о том, что зависимость дозы внутреннего облучения от плотности загрязнения сохраняется.

Верификация модели оценки дозы внутреннего облучения по прямым факторам

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 5 представлены значения средних годовых доз внутреннего облучения, рассчитанные по модели и по результатам СИЧ-измерений для жителей исследуемых населенных пунктов.

Данные таблицы 5 показывают хорошую 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.

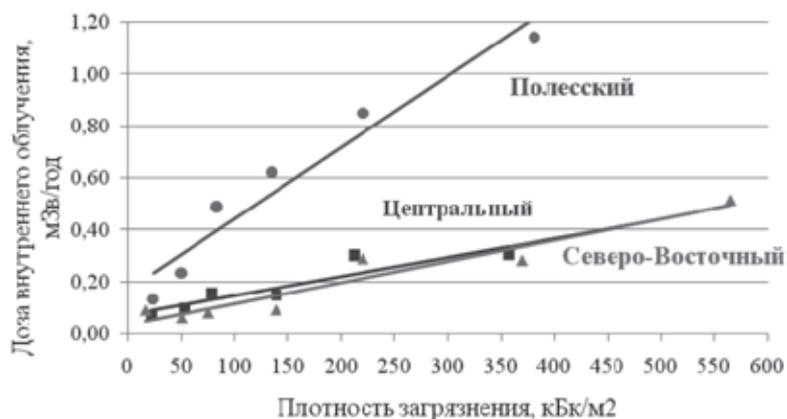


Рис. 2. Зависимость дозы внутреннего облучения от плотности загрязнения территории в 3 регионах

Параметры уравнения регрессии и коэффициенты корреляции

Таблица 4

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

Дозы внутреннего облучения некоторых населенных пунктов, оцененные двумя способами

Район	Населенный пункт	Численность населения	σCs , кБк/м ²	Средняя доза внутреннего облучения, мЗв/год		Модель/СИЧ
				По модели	По СИЧ	
Гомельская область						
Брагинский	Дублин	300	191	0,211	0,164	1,29
	Малейки	356	127	0,166	0,105	1,58
	Углы	266	97	0,144	0,174	0,83
	Шкураты	201	142	0,176	0,129	1,36
Ветковский	Ветка	8100	370	0,330	0,337	0,98
Гомельский	Головинцы	804	39	0,066	0,100	0,66
Добрушский	Добруш	18800	91	0,107	0,095	1,13
Ельский	Валавск	730	236	0,817	0,596	1,37
	Добрынь	679	199	0,713	0,559	1,28
	Дуброва	351	81	0,383	0,335	1,14
	Засинцы	296	78	0,377	0,285	1,32
Житковичский	Люденевичи	1016	39	0,104	0,072	1,44
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
	Велетин	410	205	0,220	0,156	1,41
	Козелужье	510	108	0,153	0,142	1,08
Чечерский	Чечерск	7800	223	0,213	0,246	0,87
Могилёвская область						
Быховский	Селец	444	105	0,150	0,131	1,15
Костюковиский	Бел. Дуброва	774	137	0,143	0,101	1,42
	Прудок	6	489	0,425	0,333	1,28
Краснопольский	Выдренка	75	328	0,297	0,325	0,91
	Палуж 2	67	545	0,470	0,550	0,85
Чериковский	Речица	453	295	0,270	0,146	1,85

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 значений, «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 среднерегиональных, 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 пунктов 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 облуче-

ния 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 3 представлены регрессионные зависимости относительного значения дозы внутреннего облучения жителей от удельной площади леса.

В таблице 6 представлены параметры уравнений регрессии и коэффициенты корреляции для трёх регионов.

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

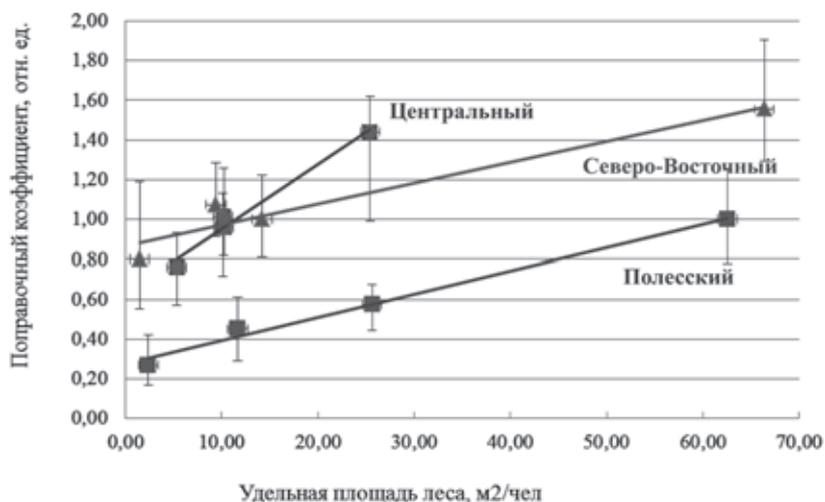


Рис. 3. Зависимость поправочного коэффициента $K_{поп}$ от удельной плотности леса

Таблица 6

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

По результатам была разработана инструкция по применению «Оценка средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территориях, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС, для зонирования», поданная на утверждение в Министерство здравоохранения Республики Беларусь, которая, в свою очередь, была использована для создания очередного «Каталога средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь», который будет действовать с 2015 по 2020 г.

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

В таблице 7 представлено распределение НП и численности жителей Беларуси по дозовым диапазонам, превышающим и равным 1 мЗв/год.

Как видно из данных таблицы 7, СГЭД превысила 1 мЗв/год в 79 НП из 2400, в которых проживает ~ 23 000 человек. Ни в одном из НП СГЭД не превысила 5 мЗв/год. По Каталогу доз 2009 г. из 2613 населенных пунктов в 193 населенных пунктах суммарная эффективная доза облучения превышала или равнялась 1 мЗв/год.

Проведен сравнительный анализ СГЭД облучения жителей НП, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, представленных в 4 Каталогах доз: 1992, 2004, 2009 и 2015.

На рисунке 4 представлены интегральные распределения СГЭД жителей НП, расположенных в зонах радиоактивного загрязнения, соответствующие четырём периодам. Как видно из рисунка 4 и данных таблицы 8, наблюдается общая тенденция к снижению СГЭД.

Таблица 7

Распределение населённых 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	18 339
	Могилёвская	44	3443	8	245
	Итого	191	48128	79	23 266
=1	Гомельская	2	6214	-	-

Окончание таблицы 7

Диапазон СГЭД, мЗв/год	Область	Количество НП	Каталог-2009		Каталог-2015	
			Численность проживающего населения, чел.	Количество НП	Численность проживающего населения, чел.	Количество НП
	Итого	2	6214	–	–	
Включая						
>1 – <2	Брестская	5	4841	4	4682	
	Гомельская	120	37196	58	17277	
	Могилёвская	38	3362	8	245	
	Итого	165	45399		22204	
≥2 – <3	Гомельская	17	2132	9	1062	
	Итого	21	2210	9	1062	
≥3 – <4	Гомельская	1	1	–	–	
	Могилёвская	2	3	–	–	
	Итого	3	4	–	–	
≥4	Гомельская	4	515	–	–	
	Итого	4	515	--	–	

Кумулятивные вероятности

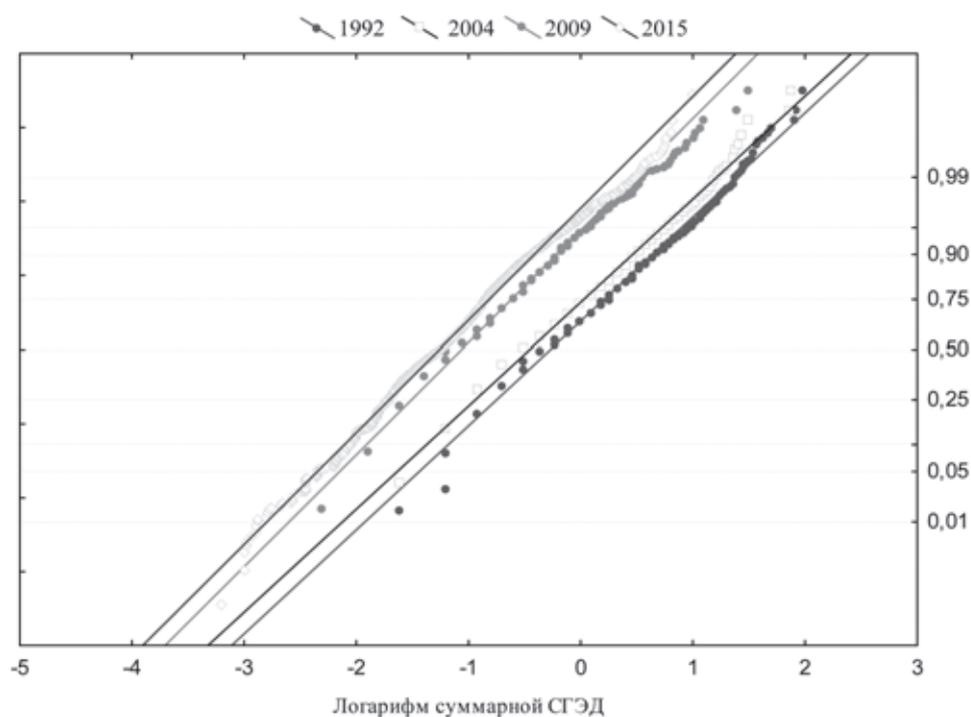


Рис. 4. Распределение СГЭД облучения жителей НП, расположенных в зонах радиоактивного загрязнения

Таблица 8

Параметры распределения СГЭД облучения жителей населенных, 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 ошибки среднего, мЗв/год	0,35	0,30	0,19	0,14
Верхняя граница ошибки среднего, мЗв/год	1,41	1,17	0,64	0,46

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

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, которая основана на классификации сельских НП Беларуси по региональным особенностям почв, обуславливающим поступление ^{137}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 радионуклидами, будет использован для принятия Постановления Совета министров об отнесении населенных пунктов к соответствующим зонам радиоактивного загрязнения.

Литература

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. Muller, H. Ecosys-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents / H. Muller, G. Prohl // Health Physics. – 1993. – V. 64 (3). – P. 232–252.
4. Likhtarev, I.A. Main Problems in Post-Chernobyl Dozimetry. Proceedings of the International Workshop at Chiba / I.A. Likhtarev [et al.] // Assessment of the Health and Environmental Impact from Radiation Doses due to Released Radionuclides. – 1994. – V. 18–20. – P. 45.
5. 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 утв. глав. гос. сан. вр. СССР А.И. Кондрусевым 05.07.91 № 5792-91. – М., 1991.
6. Методические указания. Определение средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии Чернобыльской АЭС (МУ–2.7.7.001-93)
7. Методические указания. Определение годовой суммарной эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС – Минск, 1998.
8. Реконструкция и прогноз доз облучения населения на территориях Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии ЧАЭС (инструктивно-методические указания) МЗ Украины – Киев, 1998.
9. Методические указания. Оценка эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения лиц, которые проживают на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС – Минск, 2003.
10. Каталог доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь. Утверждено Министром здравоохранения В.С. Казаковым – 19 октября 1992 г. – Минск, 1992.
11. 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. December 1995. // Report EUR 16541EN. – Brussels, Luxembourg, 1996. – 130 p.
12. Evaluation of the Population Dose in Relation to Social and Geographical Factors after the Chernobyl accident / The Cooperation Project № 07 GUS01/7 – Final report. – Ulich, Germany, 1997.
13. Vlasova, N.G. Rural Settlements: Social and Ecological Factors Influencing Dose Formation / N.G. Vlasova, Yu.V. Visenberg // Экологический вестник. – 2007. – № 3 – С. 57–64.
14. 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.
15. Висенберг, Ю.В. Особенности формирования доз внутреннего облучения жителей сельских населенных пунктов в отдаленном периоде Чернобыльской катастрофы: дисс. канд. биол. наук / Ю.В. Висенберг. – Гомель, 2008. – 138 с.
16. Балонов, М.И. Радиационный мониторинг облучения населения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС / М.И. Балонов [и др.] // Руководство МАГАТЭ по ТС проекту RER/9/074. – Вена, 2007. – 119 с.
17. 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

Doses Assessment of Population at Long-term period after the Chernobyl Accident

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

The method for assessment of the average annual effective internal exposure doses of the inhabitants of Belarus Republic contaminated settlements had been developed. The results of the Whole Body measurements had been used as the basis for the model developing. The model for dose estimation is based on the classification of the settlements according to regional characteristics of soils, which cause ^{137}Cs intake with locally produced foodstuff. The model is also based on regression of internal exposure dose on the soil surface activity for each region. The influence 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, Catalog of Average Annual Effective Doses for Residents of the Belarus Republic had been created.

Key words: *internal exposure dose, direct and indirect dose forming factors, dose catalog.*

Н.Г. Власова
Тел.: (0232) 38-95-04

Поступила: 25.08.2014 г.