

Эффективность защитных мероприятий по снижению дозы внутреннего облучения радионуклидами цезия жителей зоны радиоактивного загрязнения в первые годы после аварии на ЧАЭС

И.Г. Травникова

ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург

В работе получены и использованы данные о содержании радионуклидов цезия в пищевых продуктах и организме взрослых жителей Брянской области, об их рационе питания и его изменениях в первые годы после аварии на ЧАЭС, о мерах защиты населения от внутреннего облучения. Рассчитана динамика поступления ^{137}Cs в организм и содержания в нем при сохранении традиционной диеты и при замене продуктов на радиационно чистые. Показано, что фактическое содержание ^{137}Cs в организме, как правило, ниже рассчитанного по рациону. Выявлено, что индивидуальное содержание ^{137}Cs в организме коррелирует с размерами потребления мясо-молочных и природных продуктов и с факторами защиты от внутреннего облучения. Количественно оценена эффективность комплекса защитных мер в уменьшении поступления и содержания радионуклидов цезия в организме жителей, а также средней эффективной дозы в первые годы после аварии.

Ключевые слова: авария на ЧАЭС, население, защитные мероприятия, поступление, содержание в организме, доза облучения, зоны загрязнения, радионуклиды цезия, опрос.

Введение

Работа, предлагаемая Вашему вниманию, была выполнена автором в 1986–1989 гг. под руководством профессора М.И. Балонина и опубликована в США в начале 1990-х гг. [23], т.е. фактически по «горячим следам» аварии на ЧАЭС. Она являлась одной из первых работ, отражающих результаты всестороннего изучения эффективности контрмер, предпринятых для снижения дозы внутреннего облучения населения в одной из зон радиоактивного загрязнения. Несмотря на то, что за прошедшие 20 с лишним лет исследователями в этой области накоплен богатейший опыт, данная работа не потеряла своей актуальности и в настоящее время, прежде всего благодаря своим новаторским подходам к анализу и обобщению экспериментальных данных. Работа представляет также несомненный практический интерес для специалистов, работающих в области радиационной гигиены, например, при решении вопросов защиты населения от внутреннего облучения в случае широкомасштабной аварии.

Уникальный характер и тяжелые последствия Чернобыльской аварии в значительной мере определялись наличием в составе радиоактивного выброса долгоживущих радионуклидов и в первую очередь изотопов цезия с массовыми числами -134 и -137. Уже в июне 1986 г. после распада короткоживущих радионуклидов, включая ^{131}I , в дальней зоне аварии излучение ^{134}Cs и ^{137}Cs стало ведущим фактором как внешнего, так и внутреннего облучения населения [1, 2]. Дозиметрический прогноз на основе радиоэкологической модели для конкретных

условий Чернобыльской аварии вскоре предсказал, что вклады радионуклидов цезия в эффективную дозу внешнего и внутреннего облучения сравнимы по величине, по крайней мере, в течение первого года [3, 4]. В этот период уровень внутреннего облучения жителей, главным образом, был обусловлен поверхностным загрязнением радионуклидами растительности. Позднее ведущую роль стало играть поступление радиоактивного цезия в растения через корневую систему. Поэтому вклад внутреннего облучения в эффективную дозу во второй и последующие годы сильно зависел от свойств почвы, как это убедительно показано в [5–7]. По воле случая наибольшее радиоактивное загрязнение пришлось на те местности Украины, Белоруссии и России, где преобладают дерно-подзолистые и торфяные почвы [8]. Коэффициент перехода цезия из почвы в растения в этих регионах относительно высок, и потенциальная роль внутреннего облучения населения вследствие поступления радионуклидов цезия в организм с местной пищей не уступала, а в ряде мест и превышала роль внешнего облучения даже в первые после аварии годы. Роль ингаляции радионуклидов цезия была ничтожно мала по сравнению с пищевым поступлением, особенно при влажном осаждении [3].

Известные меры радиационной защиты позволяют в принципе снизить обе компоненты долгосрочного облучения человека. Однако дезактивация территории населенных пунктов и строений, существенно уменьшающая дозу внешнего облучения, весьма трудоемка и требует больших затрат [9], что и было доказано впоследствии при проведении таких работ в ряде населенных пунктов

Брянской области. Напротив, возможности снижения дозы внутреннего облучения населения в зоне аварии довольно разнообразны, и некоторые меры защиты не являются дорогостоящими*.

С точки зрения теории оптимизации, ряд мер защиты от внутреннего облучения населения целесообразно применять при относительно низком радиоактивном загрязнении местности – по нашим оценкам, от 0,1 ТБк/км² ¹³⁷Cs (3 Ки/км²) и ниже.

В реальных условиях радиоактивного загрязнения юго-западных районов Брянской области в 1986–1990 гг. был применен комплекс долгосрочных мер радиационной защиты от внутреннего облучения, как в сфере крупного сельскохозяйственного производства, так и в личных подсобных хозяйствах местного населения [7, 10, 23]. Предметом данного сообщения являются именно эти контрмеры.

В исследуемом нами регионе около половины населения проживало в городе Новозыбкове (далее «город»), а остальные – в селах и поселках городского типа. Жители города приобретали мясные и молочные продукты преимущественно в государственных магазинах, а овощи и фрукты – как в магазинах, так и на рынке. Сельские жители питались, главным образом, продукцией небольших собственных приусадебных хозяйств. Большая часть местного населения употребляла также в пищу «дары природы»: дикорастущие грибы, лесные ягоды, рыбу [10].

Вскоре после аварии на ЧАЭС, в мае 1986 г. в г. Новозыбкове прекратили продажу мясных и молочных продуктов, произведенных на загрязненной территории Новозыбковского района. Была организована поставка «чистых» продуктов из дальних районов, не затронутых аварией. Жители города и сел КТ были информированы о необходимости отказаться от употребления в пищу местных животных продуктов, листовых овощей и ранних ягод, а также дикорастущих грибов и рыбы из местных водоемов. В августе 1986 г. скот из личных хозяйств жителей был принудительно закуплен государственными органами. Населению было также рекомендовано проводить отпуск вне загрязненной территории, осенью тщательно перекопать личные огороды, внести известь, навоз и минеральные удобрения, прекратить выращивание некоторых сельскохозяйственных культур (например, бобовых, активно накапливающих калий и его аналог цезий), изменить способы приготовления некоторых блюд (делать сливные супы, вымачивать грибы и др.), подвергать местные пищевые продукты радиометрическому контролю.

До жителей НТ такая информация доводилась не так активно, молочный скот у них не был принудительно закуплен государством, а поставка «чистой» продукции началась значительно позднее, чем в населенных пунктах, отнесенных к КТ.

Корректная оценка эффективности перечисленных мер защиты населения от внутреннего облучения была дана на основе количественного сравнения поступления радионуклидов в организм, их содержания в теле и дозы. Эти величины тесно связаны между собой. Необходимо было сравнить их потенциально возможные значения (без защитных мероприятий) и реально наблюдаемые. Возможен анализ групповых средних значений и анализ результатов индивидуального обследования и опроса жителей. В данной работе реализовано несколько таких подходов к оценке эффективности защиты от внутреннего облучения радионуклидами цезия жителей загрязненных районов Брянской области в первые годы после аварии на ЧАЭС.

Материалы и методы

Измерение содержания радионуклидов цезия в пищевых продуктах

Обобщенная характеристика содержания радионуклидов цезия в многочисленных компонентах рациона питания местных жителей в зависимости от времени, прошедшего после аварии, потребовала привлечения большого числа результатов анализа. Всего нами за 1986–1990 гг. использовано в расчетах около 12,5 тыс. измерений различных продуктов. Лишь часть этих измерений была выполнена в лабораториях нашего института с применением стандартных радиохимических и гамма-спектрометрических методик, аттестованных метрологической службой СССР [12]. Местные органы санитарно-эпидемиологической службы контролировали радиоактивное загрязнение пищевых продуктов с помощью бета-радиометров, не обладающих энергоселективностью. Результаты этих измерений использовались нами только после верификации, включающей проверку калибровочных факторов с помощью аттестованных образцовых растворов радионуклидов цезия и учитывающей вклад радионуклидов ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs в состав радионуклидной смеси.

Учитывая относительную однородность почвенных условий в изучаемом регионе (преобладание дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв) и широкий диапазон плотности загрязнения почвы радионуклидами, мы сочли целесообразным представить обобщенные

Следует отметить, что пострадавшие регионы сразу после аварии были по степени загрязнения радионуклидами ¹³⁷Cs (σ^{137Cs}) условно разделены на зоны. Территории с уровнями загрязнения ($\sigma < 0,6$ ТБк/км² или 15 Ки/км²) были отнесены к первой зоне – здесь не предполагалось проведения защитных мероприятий, кроме дополнительного внесения калийных и фосфорных удобрений, уменьшающих выход радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию. В нашей работе эта зона обозначена НТ (наблюдаемая территория). Территории с уровнями загрязнения между ($\sigma \geq 0,6$ ТБк/км², или 15 Ки/км²) и ($\sigma < 1,5$ ТБк/км², или 40 Ки/км²) были отнесены ко второй зоне, а с ($\sigma > 1,5$ ТБк/км² или 40 Ки/км²) – к третьей зоне. Вторая и третья зоны получили также название «зоны жесткого контроля», в нашей работе – КТ (контролируемая территория). Именно к этой зоне был применен комплекс мер радиационной защиты населения от внутреннего облучения, явившийся предметом нашего исследования. Пятнистый характер загрязнения территорий стал причиной того, что Госкомгидрометом СССР [11], отвечавшем за зонирование, все очаги радиоактивного загрязнения не были выявлены сразу, и летом 1987 г. в результате уточнения радиационной обстановки в юго-западных районах Брянской области (чему активно способствовали работы нашего института), часть населенных пунктов, ранее отнесенных к НТ, была переведена в КТ.

данные о содержании радионуклидов цезия в пищевых продуктах в стандартизованном виде. Для этого удельную активность ^{137}Cs в продуктах С (Бк/кг) делили на плотность загрязнения почвы этим же радионуклидом $\sigma^{137}\text{Cs}$ (ТБк/км²) (по данным Госкомгидромета СССР [11]) и получали стандартизованный показатель (10^{-9} км²/кг). Эту величину – аналог коэффициента перехода, следует трактовать как долю активности радионуклида, которая переходит с единицы площади почвы в единицу массы продукта. Наряду с ^{137}Cs , во всех пробах присутствовал ^{134}Cs . Отношение активности ^{134}Cs к активности ^{137}Cs в биосфере Брянской области, равное 0,5:1 в мае 1986 г., в дальнейшем уменьшалось по экспоненте с периодом 2 года. Наличие ^{134}Cs учитывали и при расчете дозы.

Карта индивидуального опроса «Цезий».

Выбор обследуемых групп населения

Первое массовое индивидуальное обследование жителей, проживающих в юго-западных районах Брянской области, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС радионуклидами цезия, было проведено нами в августе – сентябре 1987 г. с использованием специально разработанной для этой цели карты опроса «Цезий» (табл. 1).

В карту вносили индивидуальные сведения (пп. 1–6), данные опроса о среднегодовом рационе питания человека до аварии на ЧАЭС (п. 7), об изменениях рациона питания после аварии (п. 8), об индивидуальных мерах защиты от поступления радионуклидов в организм с пищей (п. 9), а также результаты радиометрии ^{134}Cs + ^{137}Cs в организме обследуемого (п. 10).

В п. 7 вносили не только количество потребляемых продуктов, но и источник их производства (приобретения): личное приусадебное хозяйство (рынок) или крупное общественное хозяйство (государственный магазин). Это было необходимо, так как вследствие разной технологии животноводства концентрация радионуклидов в молоке из общественного хозяйства, как правило, была в 1,5–3 раза меньше, чем в личных хозяйствах того же села.

В п. 8 указывали дату, количество и источник поступления продуктов при каждом изменении рациона питания.

В п. 9 указывали действие и дату.

В п. 10 вносили как данные измерения содержания радионуклидов цезия в организме человека в день обследования, так и данные других измерений этого же индивидуума (до 8 раз) из личных данных и архива института. Это позволяло точнее оценить индивидуальную дозу внутреннего облучения человека.

В данной работе представлены результаты обследования 300 взрослых жителей г. Новозыбкова (0,8 ТБк/км²) и 455 жителей, проживающих в 6 селах на загрязненной территории. Из них 2 села Новозыбковского района – Старый Вышков (1,3 ТБк/км²) и Красный Камень (1,5 ТБк/км²), село Гастенка Клиновского района (0,4 ТБк/км²), а также г. Новозыбков относились к так называемой «контролируемой территории» (КТ). 3 других села Клиновского района: Веприн (1,1 ТБк/км²), Ущерпье (0,8 ТБк/км²) и Унеча (0,6 ТБк/км²) – относились в период обследования к НТ. Вскоре после нашего опроса осенью 1987 г. три последних села были также причислены к КТ. Жителям было настоятельно рекомендовано не употреблять в пищу местные мясо-молочные и природные про-

дукты. Однако молочный скот из личных хозяйств в этих селах не был, как в КТ, принудительно закуплен государством, поэтому некоторая часть населения пренебрегала данными советами.

Результаты опроса и измерений содержания радионуклидов цезия в организме обследуемых жителей были обработаны и проанализированы стандартными статистическими методами.

Демографическая характеристика обследованных контингентов населения приведена в таблице 2.

Измерение содержания радионуклидов цезия в организме человека

Измерение содержания радионуклидов цезия в организме проводили одновременно с опросом жителей в августе – сентябре 1987 г. Для этого использовали транспортальные радиометры фирмы «Robotron» (модель 20046 производства ГДР) со сцинтилляционным спектрометрическим датчиком NaI(Tl) размером 40×40 мм. Сигналы регистрировали в энергетическом диапазоне 0,5–1,0 МэВ, куда попадают основные пики гамма-излучения ^{134}Cs и ^{137}Cs . Предварительно на стационарном спектрометре излучений человека (СИЧ) в нашем институте было установлено, что в теле жителей Брянской области с осени 1986 г. другие гамма-излучающие радионуклиды не детектируются. Измерения проводили в положении обследуемого «сидя согнувшись» с детектором у нижней части живота или «стоя» с детектором у поясницы [7, 13]. Время измерения составляло 100 с, практический предел чувствительности в теле взрослого – 5–7 кБк.

Калибровка методики измерений была проведена на 6 добровольцах – сотрудниках нашего института, принявших перорально аттестованный раствор ^{134}Cs + ^{137}Cs в соотношении, характерном для Чернобыльской аварии [14]. Методика была аттестована метрологической службой СССР.

Результаты и обсуждение

Динамика содержания радионуклидов цезия в пищевых продуктах

Подробная динамика стандартизованного содержания ^{137}Cs в некоторых сельскохозяйственных животных и растительных, а также природных продуктах Брянского региона за первые годы, прошедшие после аварии, представлена в таблице 3. Приведены среднеарифметические показатели и их стандартные ошибки. Число измерений в каждой клетке – от нескольких десятков до нескольких сотен, а в среднем – более 100. По данным таблицы 3 легко оценить, что во многих клетках стандартное отклонение близко по величине среднеарифметическому значению. В сочетании с отсутствием отрицательных данных это свидетельствует о выраженной правосторонней асимметрии их частотного распределения, форма которого близка к логарифмически нормальной. Это справедливо и для таблиц 4–6, представленных далее.

Авария произошла весной, в начале вегетационного периода, и поэтому поверхностное загрязнение затронуло в первую очередь луговые травы и раннюю столовую зелень, набравшие к этому времени достаточную биомассу. Пятнистость выпадений и биологические особенности этих видов растительности привели к тому, что уровни загрязнения их радионуклидами цезия в мае 1986 г., нормированные на плотность загрязнения, колебались от $1 \cdot 10^{-9}$

Таблица 1

Карта индивидуального опроса «Цезий» № _____

1. Ф.И.О. _____
2. Пол _____ 3. Дата рождения « _____ » _____ 19 _____ г. 4. Масса тела _____ кг.
5. Постоянный адрес _____
6. Место работы, должность _____
7. Обычный рацион питания до мая 1986 года (кг/сут):

Источник	Молоко, молочные продукты	Мясо, мясные продукты	Хлеб, зерновые продукты	Картофель	Овощи, корнеплоды	Фрукты	Яйца	Рыба	Грибы
Личное хозяйство (рынок)									
Государственные магазины									

8. Особенности рациона питания после мая 1986 года

Период	Ограничения «в целом»	Молоко	Мясо	Рыба местная	Зелень	Овощи, фрукты	Грибы	Лесные ягоды	Яйца
Май – лето 1986 г.									
Осень 1986 г. – осень 1987 г.									

9. Другие защитные мероприятия:

- а) выезд из зоны _____
- б) сдача государству скота и птицы _____
- в) перекопка огорода, внесение в почву извести, навоза, минеральных удобрений _____
- г) замена с/х культур на личном участке _____
- д) изменение способов приготовления пищи _____
- е) радиометрический контроль личных продуктов _____

10. Результаты радиометрии тела:

Дата	Прибор	Время измерения, с	N, имп/с	Nф, имп/с	Q, кБк	Примечание

Дата заполнения « ____ » _____ 1987 г. Исполнитель _____ (Ф.И.О.)

Таблица 2

Краткая демографическая характеристика обследованных групп населения

Показатель	Город		Сёла КТ		Сёла НТ	
Пол	М	Ж	М	Ж	М	Ж
Численность	106	194	83	165	87	120
Возраст*, лет	41±12	38±11	50±16	51±13	46±15	49±14
Масса тела*, кг	71±16	70±14	69±16	67±11	69±13	66±13

* – среднеарифметическое значение и стандартное отклонение.

Таблица 3

Динамика стандартизованного содержания ^{137}Cs в некоторых сельскохозяйственных и природных пищевых продуктах местного производства в юго-западных районах Брянской области: (Бк/кг)/(ТБк/км²)= 10⁻⁹ км²/кг*

Вид продуктов	1986 год					1987 год				1988 год	
	Май	Июнь	Июль	Август	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна
Сельскохозяйственные животные:											
Молоко частное	36,6±4,1	17,4±2,0	11,5±1,2	9,5±1,0	6,2±1,0	3,2±0,1	4,6±0,6	5,6±0,6	3,8±0,6	2,3±0,1	2,9±0,3
Молоко колхозное	30,3±3,4	14,4±1,7	9,5±0,9	7,7±0,9	4,5±0,9	1,7±0,2	3,2±0,6	4,4±0,2	2, ±0,6	1,2±0,1	1,9±0,3
Мясо (говядина)	–	12,8±2,7	28,6±2,7	20,2±3,5	11,8±0,8	7,7±0,4	8,3±0,4	8,9±0,8	6,2±0,9	3,3±0,4	4,2±0,6
Мясо (свинина)	–	7,4±2,7	12,2±3,1	9,0±1,4	6,3±0,5	3,0±0,2	3,7±0,3	3,5±0,3	0,5	1,6±0,2	2,0±0,3
Яйцо	30,3±6,2	12,1±2,8	6,0±1,2	2,4±1,0	1,0±0,2	0,5±0,1	0,5				0,1
Сельскохозяйственные растительные:											
Картофель	–		0,07±0,01					0,07±0,01			
Корнеплоды	–		0,2±0,02					0,1±0,01			
Овощи	–		0,3±0,1					0,2			
Фрукты и са- довые ягоды	–	5,0±0,4	3,5±0,5		4,5±0,6			0,6±0,1			
Зелень столовая	–	6,1±1,5	0,6±0,1		0,5±0,1			0,4±0,1			
Природные:											
Рыба из местных водоемов	25±10				11±4		13±1		3,5±0,5		5,0±0,6
Грибы дико- растущие	–		11±4					13±5			
Ягоды лесные	–		20±6		9±2			6,3±1,0			

* – среднеарифметическое значение и стандартная ошибка.

до 500·10⁻⁹ км²/кг. К концу лета 1986 г. уровни загрязнения их снизились на 2–3 порядка, благодаря выветриванию и росту биомассы.

Динамика концентрации ^{137}Cs в коровьем молоке отражает изменение содержания этого радионуклида в кормовых культурах. В первое после аварии лето доминировало поверхностное загрязнение растений, сменившееся в дальнейшем корневым поступлением радионуклидов с добавками от вторичного ветрового подъема, вклад которого по данным разных авторов, мог достигать 15–40% [15, 16].

Как видно из представленных в таблице 3 данных, концентрация ^{137}Cs в молоке имела волнообразно убывающий характер. Максимумы кривой приходились на пастбищный (летний) период содержания животных, минимумы – на стойловый (зимний) период, что отражало разные уровни загрязнения кормов. Летом коровы питались преимущественно смесью луговых трав, растущих на целинных почвах, а зимой основными кормами животных в общественных хо-

зяйствах являлись менее загрязненные радионуклидами силос, различные фуражные культуры (корнеплоды и др.) и комбикорма, а доля сена составляла не более 10–15%. Несколько иначе обстояло дело в личных подсобных хозяйствах. Так как под пастбища и сенокосы населению выделялись, как правило, болота и лесные опушки, где растительность была наиболее загрязнена ^{137}Cs , а доля сена в зимнем рационе домашних животных составляла обычно более 50%, то и уровни загрязнения коровьего молока, производимого в личных хозяйствах, были в среднем летом в 1,2 раза, а зимой – в 2 раза выше, чем в общественных.

По результатам более четырехлетнего наблюдения за содержанием ^{137}Cs в коровьем молоке, производимом в 10 колхозах Брянской области после аварии на ЧАЭС, показано, что стандартизованная средняя концентрация ^{137}Cs в нем $\bar{C}(t)$ в единицах 10⁻⁹ км²/л, равная $C(t)/\sigma$, в единицах (Бк/л)/(ТБк/км²), хорошо аппроксимируется формулой:

$$\bar{C}(t) = (70 \pm 14) \cdot \exp\{-\ln 2 \cdot t / (0,06 \pm 0,003)\} + (3,3 \pm 0,4) \cdot \exp\{-\ln 2 \cdot t / (1,2 \pm 0,1)\} \times \{1 + (1,2 \pm 0,2) \cdot (1 + \sin 2\pi t)\}, \quad (1)$$

где время t выражено в годах.

Приведены также средние значения параметров и их стандартные ошибки.

Первая экспонента с периодом $0,06 \pm 0,003$ года (22 дня) преимущественно отражала процесс очистки пастбищной травы от поверхностных радиоактивных загрязнений, а вторая – с периодом $1,2 \pm 0,1$ года – уменьшение перехода ^{137}Cs из почвы в траву и в организм коровы. Ожидаемое замедление последнего процесса выявить в эти первые годы не удалось.

Аналогично убывало и колебалось по сезонам содержание цезия в мясе крупного рогатого скота и других домашних животных.

Содержание ^{137}Cs в куриных яйцах, получаемых в личных хозяйствах, снизилось в течение лета 1986 г. более чем на порядок, а за 2 года – почти на два порядка величины.

Как видно из данных, представленных в таблице 3, уровни загрязнения картофеля и овощей, являющихся важными компонентами рациона питания, были невелики и медленно изменялись со временем.

Из продуктов природной экосистемы можно отметить снижение содержания радионуклидов цезия в рыбе из местных водоемов, также сопровождающееся сезонными колебаниями. Лесные ягоды, среди которых наиболее загрязненной в 1986 г. была ранняя земляника, в следующее лето содержали значительно меньше цезия, при этом на первое место вышла черника.

Уровни же загрязнения дикорастущих грибов не уменьшились, поскольку ^{137}Cs , заглубляясь в лесную подстилку, становится доступнее мицелию грибов.

Хлеб, крупы, мучные изделия, составляющие существенную часть рациона питания, не были с самого начала загрязнены радионуклидами цезия, так как производились из привозного зерна, а использование в их производстве местных яиц и молочного обрата было запрещено санэпидслужбой.

Следует особо остановиться на содержании ^{137}Cs в пищевых продуктах, составляющих рацион питания жителей

г. Новозыбкова (табл. 4). В первой декаде мая 1986 г. в торговую сеть города прекратили поставлять загрязненное радионуклидами молоко из окрестных колхозов и совхозов. Оно было заменено сначала сухим, произведенным до аварии на ЧАЭС, а затем свежим молоком, привезенным из районов Брянской области, практически не загрязненных радиоактивными выпадениями. Населению города было запрещено потребление мяса, яиц, ранней зелени, дикорастущих грибов, лесных ягод и рыбы из местных водоемов. Была также запрещена продажа этих продуктов на рынках. Продукты, поставляемые в торговую сеть города (государственные магазины), проходили строгий радиометрический контроль и были загрязнены существенно ниже принятых нормативов ВДУ-86 (Временные допустимые уровни загрязнения) [19]. В результате принятых мер было существенно ограничено содержание радионуклидов цезия в рационе питания жителей.

Состав рациона питания взрослого населения до и после аварии

В таблице 5 представлены результаты тщательного опроса взрослых жителей Брянского региона об их рационе питания и источниках получения пищевых продуктов до аварии на ЧАЭС. Приведены среднеарифметические величины, стандартные ошибки которых составляют от 5 до 15% (в среднем 9%) среднего значения.

Питание городского и сельского населения до аварии различалось как количеством потребляемых продуктов, так и источниками их получения. Новозыбков относится к числу малых городов, где более 60% опрошенных лиц имели приусадебное хозяйство. Около 40% массы рациона питания его жителей составляли продукты из личного хозяйства или с местного рынка.

Продукты из личного подсобного хозяйства сельских жителей составляли более 80% массы рациона. Рационы питания сельских и городских жителей различались, в основном, потреблением молока. Жители села потребляли его в среднем в 2,5 раза больше, чем городские. При этом молоко в селе поступало в рацион практически полностью из личных хозяйств, а в городе вклад такого молока не превышал 15–20%. Около 14%

Таблица 4

Среднее содержание ^{137}Cs в основных продуктах питания жителей г. Новозыбкова Брянской области после аварии на ЧАЭС, кБк/кг*

Продукт	Источник	1986					1987		
		Май	Июнь	Июль	Август	Осень	Зима	Весна	Лето
Молоко	Частный сектор	10,9±1,9 (44)	5,3±1,7 (26)	2,5±0,4 (22)	1,3±0,2 (36)	0,90±0,17 (34)	1,5±0,2 (37)	2,0±0,4 (25)	0,7±0,2 (8)
Молоко	Магазин	0,7±0,2 (7)	0,4±0,1 (5)	0,4±0,03 (17)	0,4±0,06 (5)	0,22±0,04 (10)	0,26±0,04 (10)	0,4±0,14 (29)	
Мясо	Магазин	0,90±0,17 (222)							
Яйца	Магазин	1,2±0,2 (3)	0,50±0,25 (3)	0,27±0,03 (29)		0,26±0,04 (30)		0,37±0,04 (31)	
Картофель	Частный сектор	–			0,04±0,04 (75)				

* – среднеарифметическое значение и стандартная ошибка, в скобках указано количество проб.

Таблица 5

Рацион питания взрослых жителей Брянского региона до аварии на ЧАЭС (кг/сут)

Источник	Молоко, молочные продукты	Мясо, мясные продукты	Хлеб	Картофель	Овощи	Фрукты	Яйца	Рыба
Город:								
Личное хозяйство, рынок	0,06(м) 0,04(ж)	0,01(м) 0,01(ж)	– –	0,31(м) 0,24(ж)	0,19(м) 0,17(ж)	0,14(м) 0,13(ж)	0,01(м) 0,00(ж)	0,05(м) 0,03(ж)
Магазин	0,24(м) 0,22(ж)	0,17(м) 0,13(ж)	0,39(м) 0,26(ж)	0,13(м) 0,14(ж)	0,08(м) 0,11(ж)	0,06(м) 0,09	0,04(м) 0,03(ж)	0,04(м) 0,06(ж)
Итого:	0,30(м) 0,26(ж)	0,18(м) 0,14(ж)	0,39(м) 0,26(ж)	0,44(м) 0,38(ж)	0,27(м) 0,28(ж)	0,20(м) 0,22(ж)	0,05(м) 0,03(ж)	0,09(м) 0,09(ж)
Село:								
Личное хозяйство, рынок	0,76(м) 0,56(ж)	0,18(м) 0,17(ж)	– –	0,66(м) 0,55(ж)	0,30(м) 0,27(ж)	0,15(м) 0,15(ж)	0,07(м) 0,04(ж)	0,04(м) 0,03(ж)
Магазин	0,02(м) 0,01(ж)	0,02(м) 0,02(ж)	0,39(м) 0,28(ж)	0,01(м) 0,01(ж)	0,00(м) 0,01(ж)	0,00(м) 0,01(ж)	0,00(м) 0,01(ж)	0,08(м) 0,08(м)
Итого:	0,78(м) 0,57(ж)	0,20(м) 0,19(ж)	0,39(м) 0,28(ж)	0,67(м) 0,56(ж)	0,30(м) 0,28(ж)	0,15(м) 0,16(ж)	0,07(м) 0,05(ж)	0,12(м) 0,11(ж)

М – мужчины; Ж – женщины.

опрошенных вообще не потребляли молока (16% – в городе, 12% – в селе). При этом 15% сельских жителей потребляли более 1 л молока в сутки. В селе традиционно несколько выше потребление картофеля. Что касается потребления рыбы из местных водоемов, то нам представляется, что опрашиваемые несколько преувеличивали это значение.

Авария на ЧАЭС резко деформировала рационы питания всех контингентов населения. Снижение потребления населением местных пищевых продуктов началось с мая 1986 г. по рекомендации санитарно-эпидемиологической службы. На рисунках 1 и 2 показана динамика этого процесса по месяцам (согласно данным опроса) в форме среднеарифметического суточного потребления взрослыми жителями КТ и НТ молока и мяса из личных хозяйств. Стандартные ошибки составляли от 5 до 15% средних величин.

К осени 1986 г. потребление молока из личных хозяйств в селах КТ упало до 1–3% от доаварийного уровня, так как весь молочный скот в августе – сентябре здесь был принудительно закуплен государством. Население перешло на потребление молока, поставляемого с государственных молокозаводов в магазины. Однако количество его составило лишь около 40% прежнего потребления. В селах НТ, не отнесенных летом 1986 г. к КТ, где молочный скот был оставлен в личном пользовании жителей, потребление молока из личных хозяйств тоже снизилось до 45% от первоначального, а потребление молока из государственной розничной сети возросло лишь на 6–7%, т.е. общее количество потребляемого молока уменьшилось вдвое. В городе уменьшение общего потребления молока составило 15–20%.

Потребление мяса из личных хозяйств уменьшилось в селах КТ до 40%, а в селах НТ – до 80–85% от доаварийного количества (см. рис. 2). Несмотря на то, что потребление мяса, поставляемого в торговую сеть, увеличилось в несколько раз, общее потребление мяса и мясных продуктов как в городе, так и в селе снизилось на 10–30%. Потребление яиц городскими жителями осталось на прежнем уровне, в селах КТ оно снизилось на 20–30%, а в селах НТ возросло на 10–20%.

Кроме того, в регионе резко изменилось потребление «даров природы»: дикорастущих грибов, лесных ягод и рыбы из местных водоемов. Потребление грибов и рыбы уменьшилось в городе в 6–8 раз, ягод – в 3–5 раз, в селах КТ грибов и рыбы – в 4–5 раз, ягод – в 3 раза. В селах НТ потребление всех природных продуктов снизилось в 1,5–3 раза.

Как будет показано ниже, изменения в структуре питания населения Брянского региона, последовавшие за аварией на ЧАЭС, позволили резко снизить дозу внутреннего облучения. Однако, несмотря на попытку скомпенсировать уменьшение животных продуктов местного производства привозными, радиационно чистыми продуктами, это удалось в силу различных причин лишь частично. Тем самым были созданы условия для белкового, микроэлементного и витаминного дефицита, что могло негативно отразиться на здоровье населения.

Оценка поступления радионуклидов
в организм жителей

Среднюю стандартизованную скорость поступления ^{137}Cs в организм взрослых жителей Брянской зоны радиоактивного загрязнения $i(t)$, в единицах $10^{-9}\text{кМ}^2/\text{сут}$, мы оценили

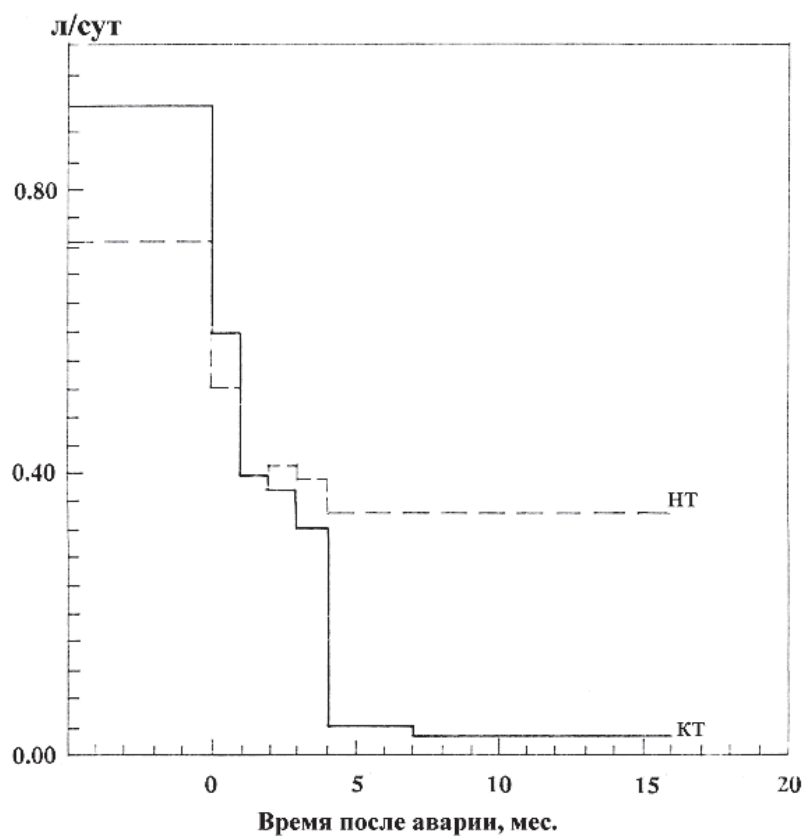


Рис. 1. Изменение среднесуточного потребления молока из личных хозяйств после аварии на ЧАЭС ($t=0$) взрослым населением КТ и НТ

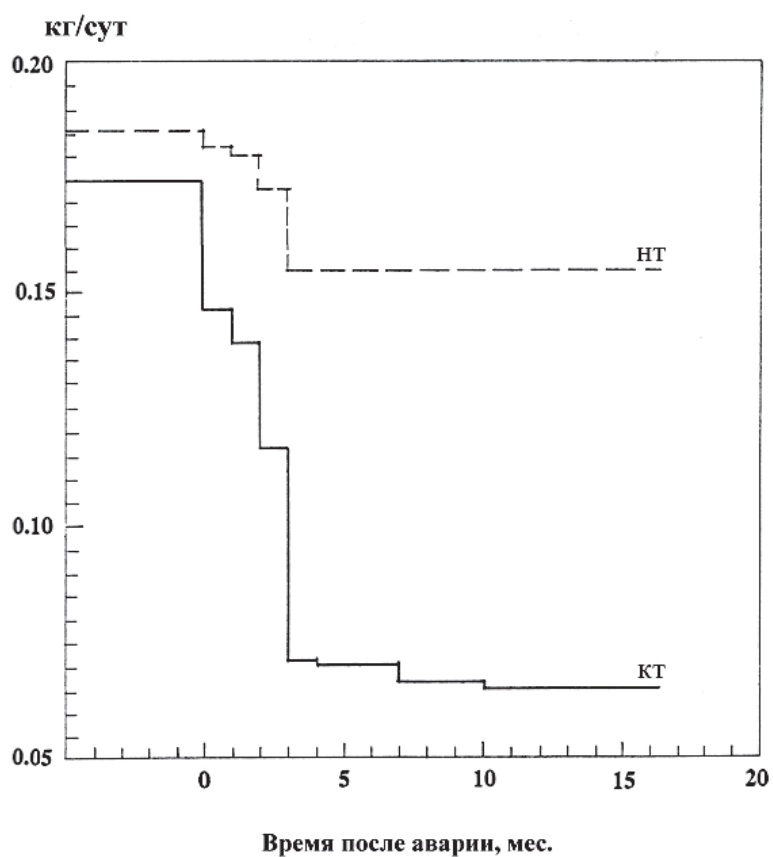


Рис. 2. Изменение среднесуточного потребления мяса из личных хозяйств после аварии на ЧАЭС ($t=0$) взрослым населением КТ и НТ

путем суммирования поступления с каждым видом пищевых продуктов, а последнее определили как произведение среднесуточного потребления этих продуктов (кг/сут) на стандартизованную удельную активность $\bar{C}(t)$ (10^{-9} кБк/кг). Для того чтобы оценить среднюю скорость поступления ^{137}Cs жителям конкретного села $\bar{C}(t)$ (Бк/сут), достаточно предыдущую стандартизованную величину умножить на поверхностную активность ^{137}Cs на почве σ (ТБк/км²) в этом селе и вокруг него, а для города – на среднее значение σ на территории, откуда в город поставляются пищевые продукты. Для г. Новозыбкова – это Новозыбковский район со средней поверхностной активностью ^{137}Cs на почве 0,8 ТБк/км².

Стандартизованную скорость поступления $i(t)$ мы определили для условий без защитных мероприятий с «неизменным» (доаварийным) рационом питания и для условий «защитного» рациона, когда жители лишь частично потребляли местные продукты питания, а в продуктах, поставляемых из других регионов, концентрация радионуклидов ^{137}Cs была на 2–3 порядка величины меньше, чем в местных.

Результаты вычислений $i(t)$ для условий «без защитных мероприятий» приведены в таблице 6 для мужчин. Для тех продуктов, количественное потребление которых трудно уточнить при опросе (столовая зелень, дикорастущие грибы, лесные ягоды и т.д.), мы использовали интервальные оценки, определенные нами из собственных и литературных данных: для зелени и грибов – от 0 до 0,1 кг/сут, а для лесных ягод – от 0 до 0,5 кг/сут. Поэтому возможная загрязненность рациона также имеет интервальную оценку: для тех жителей, которые не едят ни зелени, ни грибов, ни ягод, и для тех, кто потребляет эти продукты в максимальном количестве.

Из данных таблицы 6 следует, что при обычном рационе питания поступление радионуклидов цезия в организм жителей, проживающих на загрязненной территории, происходило бы в основном за счет потребления сельскохозяйственных животных продуктов, особенно молочных. Вклад этой группы продуктов в общее поступление составил бы 50–70% для городских и 70–90% для сельских жителей и изменялся бы так же, как изменялась концентрация радионуклидов цезия в молоке, уменьшаясь зимой и увеличиваясь летом.

Вклад сельскохозяйственных растительных продуктов в поступление радионуклидов цезия в организм жителей с неизменным рационом был бы невелик и для городских, и для сельских жителей. Он составил бы около 5% для людей, пьющих молоко, и не более 30% для тех, кто вообще не потребляет молочных продуктов.

Вклад природных продуктов в этот период также не был бы определяющим.

Из сравнения данных, представленных в таблице 6, следует, что при условии отсутствия защитных мероприятий и равном загрязнении почвы радионуклидами цезия, средние уровни поступления его в организм сельских жителей оказались бы в 1,5–2 раза выше, чем у городских, в силу особенностей рациона. При этом происходило бы естественное снижение инкорпорации со временем: в 3–4 раза с мая – лета 1986 г. до лета 1987 г. и еще в 1,5 раза – до лета 1988 г.

Рассмотрев теоретически возможное поступление радионуклидов цезия в организм жителей, проживающих на загрязненной в результате аварии на ЧАЭС территории

Брянской области, с доаварийным рационом, перейдем к оценке реальных уровней инкорпорации. Эта оценка была сделана нами по данным проведенного опроса об изменениях рациона питания, связанных с проведением защитных мероприятий (см. рис. 1, 2, табл. 1). Одним из важных защитных мероприятий по уменьшению поступления радионуклидов в организм является изменение способа приготовления пищи. Например, при варке картофеля до 30% ^{137}Cs переходит в воду, а при варке овощей и других корнеплодов – от 10% до 20%. Тщательное мытье фруктов и ягод уменьшает поступление ^{137}Cs примерно на 10%, а столовой зелени – до 60%, вымачивание грибов – на 50% и т.д.

Схема расчета, представленного в таблице 7, аналогична предыдущей, использованной в таблице 6. При этом нужно иметь в виду, что данные, касающиеся НТ, после осени 1987 г. носят условный характер, поскольку обследованные нами села в этот период были уже отнесены к КТ, что могло вызвать более кардинальные изменения рациона питания населения. Для расчетов мы использовали данные о динамике загрязнения сельскохозяйственных и природных продуктов (см. табл. 3), а также продуктов питания, поступавших в торговую сеть (см. табл. 4).

В г. Новозыбкове, благодаря раннему прекращению продажи загрязненного молока, была резко снижена инкорпорация радионуклидов цезия уже в мае 1986 г., и роль молочных продуктов в этом процессе уменьшена за первый год до 10–35%. В селах КТ радикальное снижение инкорпорации ^{137}Cs было связано с принудительным удалением осенью 1986 г. молочного скота из личных подсобных хозяйств (см. рис. 1). Поскольку в селах НТ этого не было сделано, то процесс снижения связан с меньшими изменениями рациона, носил более плавный характер и меньше отличался от доаварийного. У всех контингентов населения прослеживалось перераспределение вкладов основных составляющих рациона питания в суммарное поступление радионуклидов цезия в организм. У городских жителей и в селах КТ вклад радионуклидов цезия в поступление в организм обследуемых с молоком и молочными продуктами практически сравнялся с вкладом мяса.

Наименьшие изменения коснулись потребления сельскохозяйственных растительных продуктов. Они в условиях поставок радиационно чистых продуктов питания в торговую сеть становились основными поставщиками ^{137}Cs населению, наряду с продуктами природного происхождения, запрет на потребление которых повсеместно сыграл свою положительную роль.

Защитное влияние изменений в рационах питания населения на поступление радионуклидов цезия в организм, его зависимость от объема этих защитных мероприятий без труда прослеживается при сравнении данных, представленных в таблицах 6 и 7. Количественная же оценка эффективности этих мер будет дана далее.

Содержание радионуклидов цезия в организме жителей Брянского региона

Рассчитанная нами ранее стандартизованная скорость поступления $i(t)$ ^{137}Cs в организм взрослых жителей Брянской области позволяет с помощью интеграла-

Таблица 6

Стандартизованная скорость поступления ^{137}Cs в организм взрослых мужчин Брянского региона с рационом питания, неизменным в результате аварии на ЧАЭС ($10^{-9} \text{ км}^2/\text{сут}$)

Тип продукта		1986					1987				1988	
		Май	Июнь	Июль	Август	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна
Сельскохозяйственные, животные:												
Молоко	(Г)* (С)**	9,5 27,9	4,5 13,2	3,0 8,8	2,4 7,2	1,5 4,7	0,6 2,4	1,0 3,5	1,4 4,3	0,85 2,90	0,4 1,7	0,6 2,2
Свинина	(Г) (С)	1,6 1,6	1,3 1,3	2,2 2,2	1,6 1,6	1,1 1,1	0,5 0,5	0,7 0,7	0,6 0,6	0,5 0,5	0,3 0,3	0,3 0,4
Яйца	(Г) (С)	1,4 2,1	0,5 0,8	0,3 0,4	0,1 0,2	0,05 0,04	0,02 0,04	0,02 0,04	0,02 0,04	0,02 0,04	0,02 0,04	– –
Сельскохозяйственные, растительные:												
Картофель	(Г)	–		0,02				0,02				
	(С)	–		0,05				0,05				
Фрукты, садо- вые ягоды	(Г)	–	1,0	0,7		0,9			0,10			
	(С)	–	0,8	0,5		0,7			0,09			
Столовая зелень	(Г)	0–10	0–0,6	0–0,06		0–0,05			0–0,04			
	(С)	0–10	0–0,6	0–0,06		0–0,05			0–0,04			
Корнеплоды и другие овощи	(Г)	–		0,07				0,03				
	(С)	–		0,08				0,05				
Природные продукты:												
Рыба из мест- ных водоемов	(Г)	1,3				0,6		0,7		0,20		0,25
	(С)	1,0				0,4		0,5		0,15		0,20
Дикорастущие грибы	(Г)	–		0–1,1					0–1,3			
	(С)	–		0–1,1					0–1,3			
Лесные ягоды	(Г)	–		0–1,0		0–0,5			0–0,3			
	(С)	–		0–1,0		0–0,5			0–0,3			
И т о г о:	(Г)	13,8–23,8	8,6–9,2	7,6–9,8	6,2–8,4	4,2–5,9	2,7–4,4	3,4–5,1	2,9–4,5	1,7–3,4	1,1–2,7	1,3–3,0
	(С)	32,6–42,6	17,1–17,7	13,0–15,2	10,6–12,8	7,1–8,8	4,2–5,8	5,6–7,2	5,6–7,3	3,8–5,4	2,4–4,0	3,0–4,7

* (Г) – город; ** (С) – село.

Таблица 7

Стандартизованная скорость поступления ^{137}Cs в организм взрослых мужчин Брянского региона с рационом питания, измененным в результате аварии на ЧАЭС, $10^{-9} \text{ км}^2/\text{сут}$

Тип продукта		1986					1987				1988	
		Май	Июнь	Июль	Август	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	весна
Сельскохозяйственные, животные:												
Молоко	(Г)*	3 22,4 19,4	0,3	0,25	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
	(КТ)**		7,2	4,6	3,4	0,4	0,2	0,25	0,3	0,3	0,2	0,2
	(НТ)***		7,0	4,8	3,8	2,2	1,2	1,7	2,0	1,4	0,8	1,0
Свинина	(Г)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
	(КТ)	1,4	1,1	1,8	1,1	0,6	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
	(НТ)	1,7	1,4	2,2	1,6	1,0	0,5	0,6	0,6	0,4	0,3	0,3
Яйца	(Г)	0,25	0,1	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	(КТ)	1,6	0,6	0,3	0,1	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	(НТ)	2,9	1,1	0,6	0,2	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Таблица 7 (окончание)

Тип продукта		1986					1987				1988	
		Май	Июнь	Июль	Август	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	весна
Сельскохозяйственные, растительные:												
Картофель	(Г)	–		0,02					0,02			
	(КТ)	–		0,03					0,03			
	(НТ)	–		0,03					0,03			
Фрукты, садовые ягоды	(Г)	–	0–0,15	0–0,1		0–0,13			0–0,1			
	(КТ)	–	0,2	0,1		0,2			0,03			
	(НТ)	–	0,5	0,3		0,4			0,05			
Столовая зелень	(Г)	0–4,0	0–0,2	0–0,02		0–0,02			0–0,02			
	(КТ)	0–4,0	0–0,2	0–0,02		0–0,02			0–0,02			
	(НТ)	0–4,0	0–0,2	0–0,02		0–0,02			0–0,02			
Корнеплоды и другие овощи	(Г)	–		0,05					0,03			
	(КТ)	–		0,07					0,03			
	(НТ)	–		0,07					0,03			
Природные продукты:												
Рыба из местных водоемов	(Г)	0–0,2				0–0,1		0–0,1		0–0,03		0–0,04
	(КТ)	0,25				0,1		0,1		0,04		0,05
	(НТ)	0,5				0,2		0,25		0,07		0,1
Дикорастущие грибы	(Г)	–		0–0,1					0–0,1			
	(КТ)	–		0–0,15					0–0,2			
	(НТ)	–		0–0,3					0–0,35			
Лесные ягоды	(Г)	–		0–0,2		0–0,2			0–0,1			
	(КТ)	–		0–0,3		0–0,2			0–0,1			
	(НТ)	–		0–0,6		0–0,3			0–0,2			
Итого:	(Г)	3,5–7,7	0,6–1,2	0,6–1,2	0,5–1,1	0,4–0,9	0,4–0,9	0,5–1,0	0,5–0,9	0,4–0,7	0,3–0,6	0,3–0,6
	(КТ)	25,6–29,7	9,4–9,6	7,2–7,6	5,1–5,5	1,4–1,8	0,9–1,3	1,1–1,4	0,8–1,1	0,8–1,1	0,6–0,9	0,6–0,9
	(НТ)	24,5–28,5	10,5–10,7	8,5–9,4	6,5–7,4	4,0–4,6	2,4–3,1	3,1–3,7	3,0–3,6	2,0–2,6	1,3–1,9	1,6–2,1

* (Г) – город; ** (КТ) – контролируемая территория; *** (НТ) – наблюдаемая территория.

свертки оценить и ожидаемое среднее содержание этого нуклида $\bar{Q}$ (Бк) в организме жителей рассматриваемого населенного пункта в зависимости от времени:

$$\bar{Q}(t) = \int_0^t i(\tau) \cdot \sigma \cdot R(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

где: σ , ТБк/км², – средняя поверхностная активность ¹³⁷Cs на почве;

$R(t)$, отн.ед., – функция удержания ¹³⁷Cs в теле человека.

В качестве параметров удержания были использованы данные О.В. Лебедева и соавт. [14], полученные летом 1986 г. на 28 женщинах и 24 мужчинах, выехавших из зоны радиоактивного загрязнения в Ленинград. Согласно результатам этих наблюдений, длительный период полувыведения ¹³⁷Cs из организма составлял 73±13 сут у женщин и 97±17 сут у мужчин. В наших вычислениях принято: $R(t) = 0,9 \exp(-\ln 2/100)$, что хорошо согласуется с рекомендациями МКРЗ [20].

Для сравнения результатов расчета и натурных данных, полученных в селах с разными уровнями загрязнения почвы ¹³⁷Cs, наряду с $\bar{Q}(t)$, вычислено стандартизован-

ное среднее содержание $\bar{q}(t)$, равное $\bar{Q}(t)/\sigma$. Единицы $\bar{q}(t) \rightarrow 10^{-9}$ км².

Результаты вычислений представлены на рисунках 3, 4, 5 для мужчин города, сел КТ и сел НТ соответственно. В качестве функции поступления принята зависимость от времени содержания ¹³⁷Cs в усредненном рационе питания жителей – неизменном (доаварийном) и изменившемся в результате проводившихся защитных мероприятий. На рисунках 3, 4 и 5 расчетное содержание, соответствующее поступлению с недеформированным рационом питания, изображено заштрихованной полосой «а», а с деформированным – полосой «б». Верхняя и нижняя границы полос соответствуют лицам с разными пищевыми привычками в потреблении природных продуктов и столовой зелени, о чем говорилось ранее.

На этих рисунках изображены также результаты выборочной радиометрии населения, в основу которых легли данные таблицы 8, где представлены результаты приблизительно 8000 измерений содержания ¹³⁴Cs + ¹³⁷Cs в организме взрослых жителей юго-западных рай-

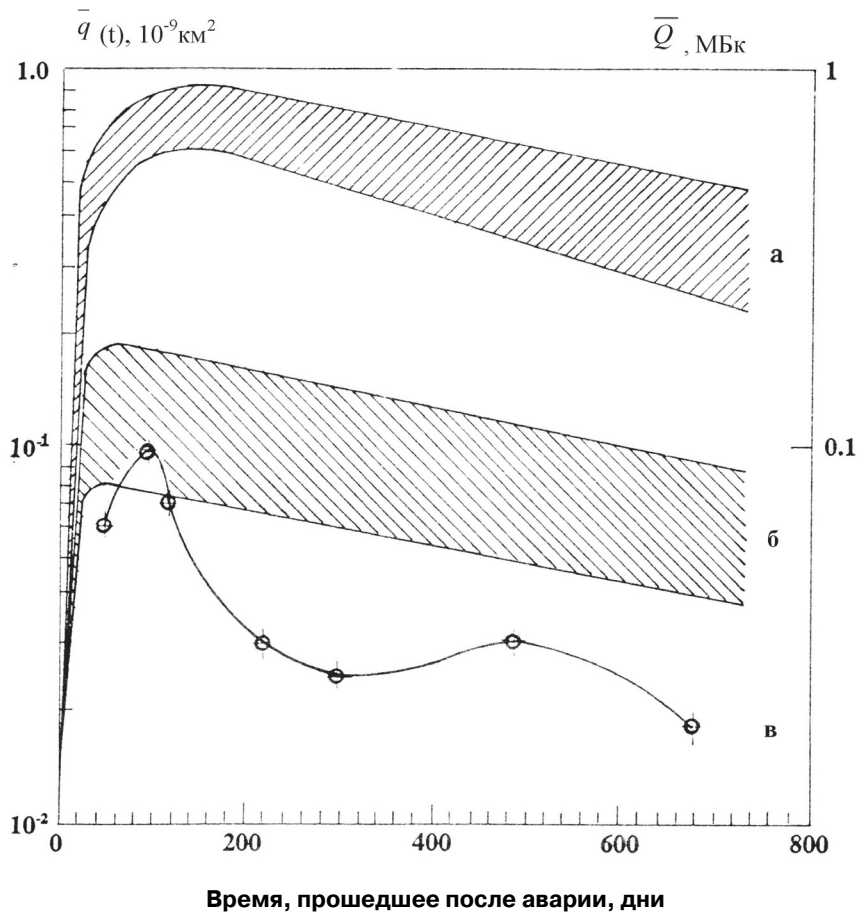


Рис. 3. Среднее стандартизованное содержание ^{137}Cs в организме взрослых мужчин г. Новозыбкова после аварии на ЧАЭС: а – рассчитанное по поступлению с доаварийным рационом питания; б – рассчитанное по поступлению с измененным рационом питания; в – данные реальных измерений

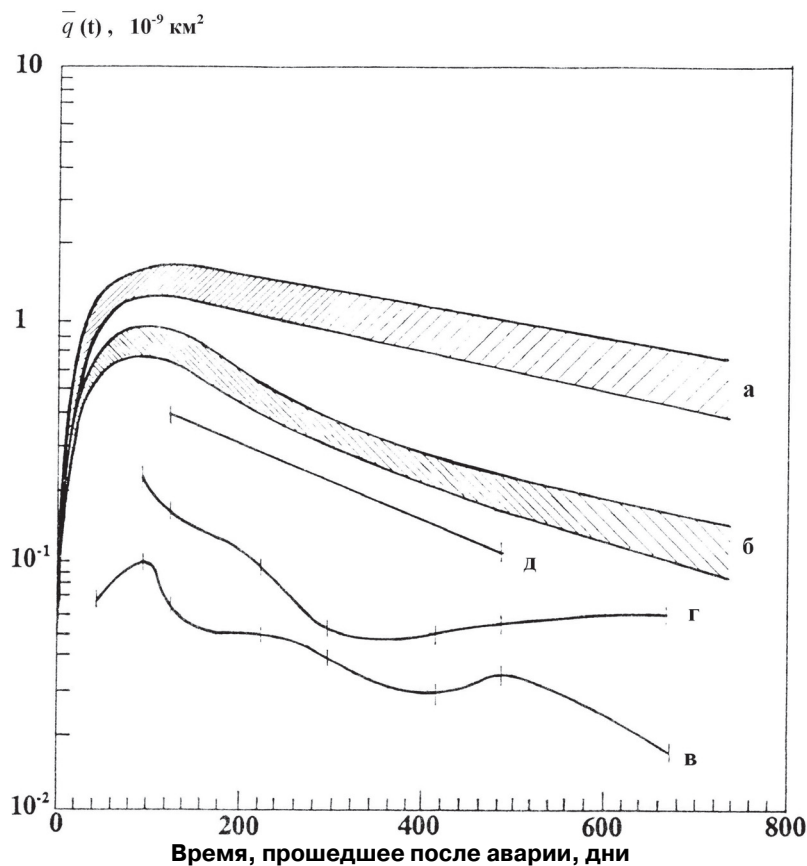


Рис. 4. Среднее стандартизованное содержание ^{137}Cs в организме взрослых мужчин сел КТ после аварии на ЧАЭС: а – рассчитанное по поступлению с доаварийным рационом питания; б – рассчитанное по поступлению с измененным рационом питания. Данные реальных измерений: в – Старый Вышков; г – Красный Камень; д – Гастенка

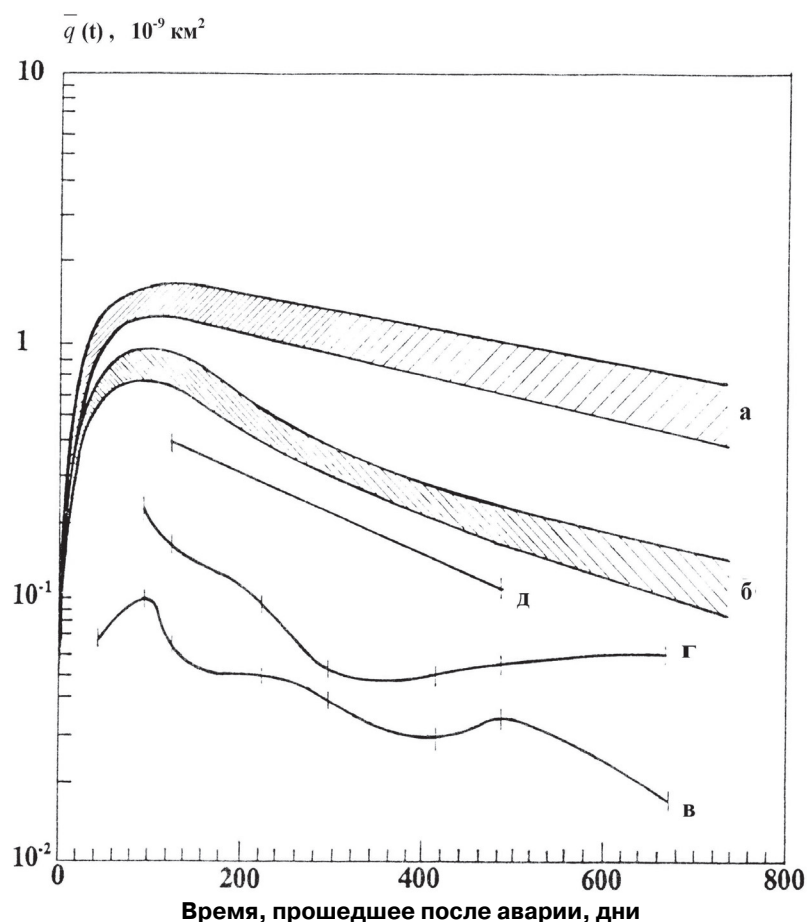


Рис. 5. Среднее стандартизованное содержание ^{137}Cs в организме взрослых мужчин сел НТ после аварии на ЧАЭС: а – рассчитанное по поступлению с доаварийным рационом питания; б – рассчитанное по поступлению с измененным рационом питания. Данные реальных измерений: в – Ущерпье; г – Веприн; д – Унеча

онов Брянской области, проведенных в течение первых двух лет после аварии с использованием методик, описанных нами ранее в этой работе, а также в [13]. На рисунке 3 – это кривая «в», а на рисунках 4 и 5 – кривые «в», «г» и «д». Данные представлены в форме стандартизованного (деленного на σ , ТБк/км²) среднеарифметического содержания ^{137}Cs в теле мужчин и его стандартной ошибки.

Максимум как расчетного, так и фактического содержания радионуклидов цезия в организме жителей зоны радиоактивного загрязнения приходится на лето 1986 г. Этот максимум связан с поверхностным загрязнением биосферы радионуклидами, которое естественным путем удаляется за 2–3 месяца. Последующее снижение инкорпорированной активности определяется двумя факторами: естественной очисткой пищевой цепи от радионуклидов цезия (молоко, например, на первом этапе с периодом 1,2 года) и мерами защиты населения от внутреннего облучения. Влияние первого из них более выражено у жителей НТ (см. рис. 5), второго – у жителей КТ (см. рис. 3, 4). В обоих случаях на форму кривых влияет задержка ^{137}Cs в организме мужчин с периодом около 100 суток.

На рисунках 3–5 отметим сходство формы расчетных кривых «б», соответствующих реальному, измененному рациону питания, и кривых, аппроксимирующих результаты натурных измерений. В то же время обращает на себя внимание, что почти все результаты натурных измерений лежат ниже расчетных кривых

«б». Происходит это, по-видимому, из-за того, что наш расчет основан на данных о содержании ^{137}Cs в пищевых продуктах, обобщенных по всему Брянскому региону. В него входят, в частности, районы с низким уровнем загрязнения, где не применялись защитные меры в сельскохозяйственном производстве, а потому содержание ^{137}Cs может быть относительно выше. Тем самым несколько переоценивается расчетная инкорпорация ^{137}Cs жителями обследуемых сел. Подтверждением этому соображению служит факт лучшего совпадения расчетных и натурных данных в г. Новозыбкове. Здесь для расчета нами использованы сведения о содержании нуклида в пищевых продуктах торговой сети именно этого города, а не всего Брянского региона. Другое соображение – консервативная переоценка в расчете размера инкорпорации в мае 1986 г. Роль радиоактивного загрязнения пищевых продуктов в этот период очень важна в формировании дозы внутреннего облучения населения, но именно ранний этап этого процесса изучен наименее надежно.

Третье соображение состоит в том, что жители, информированные о радиационной опасности, используют некоторые дополнительные к замене пищевых продуктов меры индивидуальной защиты, рассмотренные ниже.

Обращает на себя внимание различие в стандартизованном содержании ^{137}Cs в организме жителей трех сел

Таблица 8

**Содержание $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ $\bar{Q}_\Sigma$ (кБк $\pm$ стандартная ошибка)
в организме взрослых жителей юго-западных регионов Брянской области**

НП (количество жителей)	Зона	^{137}Cs (ГБк/км ²)	Пол	Июнь 1986		Июль – август 1986		Август – сентябрь 1986		Декабрь 1986	
				$\bar{Q}$	n*	$\bar{Q}$	n	$\bar{Q}$	n	$\bar{Q}$	n
Новозыбков (46 000)	КТ	0,8	жен	48 $\pm$ 4	149	63 $\pm$ 5	300	63 $\pm$ 6	352	24 $\pm$ 2	160
			муж	70 $\pm$ 9	62	118 $\pm$ 28	60	81 $\pm$ 4	285	33 $\pm$ 3	62
Старый Вышков (745)	КТ	1,3	жен	122 $\pm$ 34	24	118 $\pm$ 19	210	93 $\pm$ 5	260	37 $\pm$ 2	76 77
			муж	148 $\pm$ 25	38	185 $\pm$ 10	209	118 $\pm$ 7	206	89 $\pm$ 6	
Красный Камень (261)	КТ	1,5	жен	–	–	359 $\pm$ 30	100	237 $\pm$ 36	18 22	111 $\pm$ 7	105
			муж	–	–	528 $\pm$ 49	62	337 $\pm$ 70		211 $\pm$ 21	56
Гастенка (196)	КТ	0,4	жен	–	–	–	–	170 $\pm$ 10	121 69	–	–
			муж	–	–	–	–	237 $\pm$ 15		–	–
Ущерпье (1430)	НТ	0,8	жен	–	–	148 $\pm$ 12	67 64	152 $\pm$ 9	172	–	–
			муж	–	–	318 $\pm$ 26		222 $\pm$ 13	178	–	–
Веприн (276)	НТ	1,1	жен	–	–	–	–	318 $\pm$ 23	98 72	–	–
			муж	–	–	–	–	329 $\pm$ 31		–	–
Унеча (336)	НТ	0,6	жен	–	–	–	–	281 $\pm$ 39	30 31	–	–
			муж	–	–	–	–	463 $\pm$ 76		–	–

Продолжение таблицы 8

НП (количество жителей)	Зона	^{137}Cs (ГБк/км ²)	Пол	Февраль – апрель 1987		Июнь 1987		Август – сентябрь 1987		Февраль – март 1988	
				$\bar{Q}$	n	$\bar{Q}$	n	$\bar{Q}$	n	$\bar{Q}$	n
Новозыбков (46 000)	КТ	0,8	жен	16 $\pm$ 1	431	–	–	22 $\pm$ 1	201	12 $\pm$ 2	334
			муж	27 $\pm$ 1	485	–	–	31 $\pm$ 2	114	18 $\pm$ 2	520
Старый Вышков (745)	КТ	1,3	жен	44 $\pm$ 2	170	44 $\pm$ 5	22 16	41 $\pm$ 6	46	13 $\pm$ 2	51
			муж	70 $\pm$ 5	163	52 $\pm$ 8		56 $\pm$ 6	47	23 $\pm$ 3	38
Красный Камень (261)	КТ	1,5	жен	63 $\pm$ 4	75 47	63 $\pm$ 4	119	59 $\pm$ 7	60 24	39 $\pm$ 5	84
			муж	104 $\pm$ 8		89 $\pm$ 12	57	100 $\pm$ 21		57 $\pm$ 5	60
Гастенка (196)	КТ	0,4	жен	–	–	–	–	44 $\pm$ 4	59 17	–	–
			муж	–	–	–	–	56 $\pm$ 6		–	–
Ущерпье (1430)	НТ	0,8	жен	130 $\pm$ 13	57 36	178 $\pm$ 16	116	192 $\pm$ 23	72 31	48 $\pm$ 6	68
			муж	244 $\pm$ 40		230 $\pm$ 18	100	233 $\pm$ 32		74 $\pm$ 14	37
Веприн (276)	НТ	1,1	жен	–	–	–	–	248 $\pm$ 33	28 38	126 $\pm$ 11	57
			муж	–	–	–	–	274 $\pm$ 33		133 $\pm$ 13	32
Унеча (336)	НТ	0,6	жен	207 $\pm$ 31	43 48	–	–	252 $\pm$ 29	31 29	135 $\pm$ 10	45
			муж	255 $\pm$ 32		–	–	389 $\pm$ 52		197 $\pm$ 10	43

n – число обследованных лиц.

КТ (см. рис. 4) в ранний период. До введения строгих административных мер (принудительная закупка молочного скота государством) решающее влияние на уровень инкорпорации имело следование рекомендациям санитарной службы, самоограничение в потреблении местных продуктов. Более энергичные действия санитарной службы г. Новозыбкова и Новозыбковского района (см. кривые «В» и «Г» на рисунке 4) снизили уровни внутреннего облу-

чения по сравнению с Клиновским районом (кривая «Д» на том же рисунке 4).

Обратившись еще раз к таблице 8, отметим более высокое содержание радионуклидов цезия в организме мужчин, чем в организме женщин, – в среднем, в 1,5 $\pm$ 0,1 раза, что в значительной мере объясняется разницей их периода полувыведения, который у мужчин, по данным [14], больше в 1,4 раза.

Индивидуальный корреляционный анализ

Наряду с групповым анализом закономерностей формирования дозы внутреннего облучения населения и эффективности защитных мероприятий, нами предпринята попытка исследовать тот же круг вопросов методами индивидуального статистического анализа. Мы изучали связь индивидуальных признаков со стандартизованным (деленным на σ) содержанием ^{137}Cs в организме данного человека в следующие периоды: через 4 месяца (август – сентябрь 1986 г.) и через 16 месяцев (август – сентябрь 1987 г.) после аварии на ЧАЭС – в период нашего опроса. Для этого вычисляли либо коэффициент линейной корреляции между количественными признаками, либо величину хи-квадрат, если признак имел качественный характер. Связь считали статистически достоверной при $p > 0,95$.

В таблице 9 приведены результаты анализа корреляции между содержанием ^{137}Cs в организме человека и количеством потребляемых им животных продуктов. У городских жителей установлена достоверная корреляция лишь между потреблением мяса и содержанием радионуклидов ^{137}Cs в организме только для второго периода (через 16 месяцев). Этот факт подчеркивает роль мясных продуктов в инкорпорации радионуклидов цезия при снабжении населения радиационно чистыми молочными продуктами. С другой стороны, недостоверность прочих связей косвенно подтверждает, что радионуклиды цезия попадали населению г. Новозыбкова, главным образом, в ранний (начальный) период после аварии, и среднее потребление животных продуктов через 4 и 16 месяцев не является для него определяющим.

Таблица 9

Вероятность статистически достоверной связи (р) между индивидуальным стандартизованным содержанием ^{137}Cs (q , 10^{-9} км²) в организме мужчин через 4 и 16 месяцев после аварии на ЧАЭС и среднесуточным потреблением животных продуктов в этот период

Продукт	Период потребления, мес.	Город		Село	
		q (4)	q (16)	q (4)	q (16)
Молоко	0–4	<0,95	–	>0,99	–
	4–16	–	<0,95	–	>0,99
Мясо	0–4	<0,95	–	>0,95	–
	4–16	–	>0,99	–	>0,99
Яйца	0–4	<0,95	–	>0,95	–
	4–16	–	<0,95	–	>0,99

Напротив, у сельских жителей корреляция инкорпорированной активности ^{137}Cs с потреблением животных продуктов высоко достоверна и подтверждает их ведущую роль в формировании дозы внутреннего облучения в рассматриваемый период.

Влияния потребления столовой зелени на уровни инкорпорированной активности ни в 1986 г., ни в 1987 г. не выявлено.

Что касается природных продуктов, то осенью 1986 г. отмечена статистически достоверная связь инкорпорированной активности только с потреблением грибов, а осенью 1987 г. статистически достоверная связь установ-

лена уже не только с потреблением дикорастущих грибов, но и с потреблением лесных ягод и рыбы из местных водоемов. Ко второму исследованию жители большинства обследуемых населенных пунктов более года получали радиационно чистые мясо-молочные продукты, и поэтому роль природных продуктов в поступлении радионуклидов в организм относительно возросла.

Кроме рациона питания, мы, по данным нашего опроса, рассмотрели влияние ряда факторов индивидуальной защиты. Так, отъезды из зоны радиоактивного загрязнения на различные сроки, которые предприняли 28% городских жителей, не уменьшили достоверно содержание радионуклидов цезия в организме. По-видимому, другие осуществленные защитные мероприятия настолько уменьшили поступление радионуклидов цезия в организм с рационом питания, что отъезды горожан на короткие сроки (в среднем 1 месяц) не имели значения. В селах достоверная корреляционная связь ($p > 0,95$) между отъездами из зоны и содержанием в организме радионуклидов цезия для женщин установлена и в первый, и во второй период, а для мужчин – только осенью 1987 г. Дело в том, что женщины, особенно беременные и имеющие маленьких детей, были принудительно вывезены в первое и второе после аварии лето на длительные (2 месяца и более) сроки в чистые регионы.

Важное значение имеет установление связи между содержанием радионуклидов цезия в организме жителей и способами обработки ими своего огорода (табл. 10). В нашей анкете (см. табл. 1) были выделены следующие признаки: наличие огорода вообще, если «да», то проводилось ли известкование почвы, внесение навоза, минеральных удобрений, прекращение возделывания некоторых сельскохозяйственных культур.

Таблица 10

Вероятность статистически достоверной связи (р) между индивидуальным стандартизованным содержанием ^{137}Cs (q , 10^{-9} км²) в организме мужчин через 4 и 16 месяцев после аварии на ЧАЭС и их индивидуальными мерами защиты

Меры защиты	Город		Село	
	q (4)	q (16)	q (4)	q (16)
Принудительная закупка молочного скота	–	–	>0,99	>0,99
Наличие приусадебного хозяйства	<0,95	<0,95	<0,95	>0,95
Внесение извести	<0,95	<0,95	>0,99	>0,99
Внесение навоза	–	–	>0,99	>0,99
Внесение минеральных удобрений	–	–	>0,99	>0,99
Радиометрия продуктов питания	<0,95	<0,95	>0,95	>0,99
Дополнительная обработка пищи	<0,95	<0,95		

Для жителей города продукция собственных огородов не являлась решающей в инкорпорации радионуклидов. Достоверной статистической связи ни с самим фактом наличия огорода, ни с одним из способов его обработки у

городского населения не выявлено. Напротив, у сельских жителей установлена статистически достоверная связь инкорпорированной активности радионуклидов цезия со всеми способами обработки огорода. У лиц, которые вносили в почву известь и рекомендованные минеральные удобрения, содержание ^{137}Cs в организме было ниже, чем у тех, кто этого не делал. Причин этому может быть две: как истинное (реальное) снижение перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственные культуры, так и тот факт, что лица, применявшие эти мероприятия, настороженно относятся к радиационному фактору в целом и ограничивают потребление местных продуктов (эффект «радиационной самозащиты»). У лиц, которые вносили в почву еще и навоз, содержание ^{137}Cs оказалось выше, чем у тех, кто этого не делал. Возможно, это объясняется тем, что они вносили в почву навоз 1986 г., который мог дать некоторую добавку в содержание радионуклидов цезия в продуктах. Кроме того, навоз в почву вносили, как правило, люди, у которых не был изъят молочный скот и которые, несмотря на запрет, продолжали потреблять молоко, хотя и в меньших количествах.

Дополнительная обработка пищи (тщательная очистка и промывка продуктов, изготовление сливных супов, вымачивание грибов и т.д.), а также добровольная радиометрия потребляемых местных продуктов у городских жителей не имеют достоверной связи с содержанием радионуклидов цезия в организме. У сельских же жителей достоверная статистическая связь установлена лишь с обоими признаками одновременно (см. табл. 10).

Наличие достоверной связи между содержанием радионуклидов цезия в организме обследуемых жителей и, по крайней мере, с тремя компонентами рациона питания (молоко, мясо и яйца) делает возможной реконструкцию индивидуальных доз внутреннего облучения с помощью многофакторного анализа и с использованием данных, полученных нами из индивидуальных опросов населения. Результаты этого анализа и будут представлены далее.

Общее обсуждение

В этой части работы мы сравниваем дозы внутреннего облучения, рассчитанные нами, исходя из доаварийного (неизмененного) и резко деформированного в результате аварии на ЧАЭС рациона питания. Такой расчет позволил нам оценить эффективность защитных мероприятий, направленных на уменьшение поступления радионуклидов цезия с рационом питания.

Расчет годовой дозы внутреннего облучения

Средняя эффективная доза внутреннего облучения взрослых жителей каждого обследуемого населенного пункта радионуклидами цезия $\bar{E}$ за первый (1.05.86 – 1.05.87) и второй (1.05.87 – 1.05.88) годы после аварии на ЧАЭС была вычислена, как и содержание ^{137}Cs в организме жителей (см. рис. 3–5), в трех вариантах:

- 1) по возможному поступлению с неизмененным рационом питания;
- 2) по поступлению с резко деформированным после аварии на ЧАЭС («защитным») рационом;
- 3) по фактически измеренному у жителей среднему содержанию $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ в организме.

Дозовые коэффициенты были взяты из данных Публикации МКРЗ [21] для взрослых: $d_{137} = 6,4$ и $d_{134} = 10,7$ (мЗв·кг)/(Бк·сут).

Среднюю дозу внутреннего облучения по поступлению за период от t_1 до t_2 вычисляли интегрированием (2) с учетом наличия ^{134}Cs .

$$\bar{E}(t_1, t_2) = \frac{d_{137}}{\bar{M}} \int_{t_1}^{t_2} \bar{Q}(t) dt + \frac{d_{134}}{\bar{M}} \int_{t_1}^{t_2} 0,5 \bar{Q}(t) \exp(-\ln 2 t/756) dt, \text{ мЗв} \quad (3)$$

где $\bar{M}$ (кг) – средняя масса тела (см. табл. 2).

Среднюю дозу по фактическому содержанию радионуклидов цезия в организме жителей мы вычисляли аналогично (3) после аппроксимации результатов измерений плавной кривой. Аппроксимация выполнена в виде функции (2), где форму функции поступления $i(t)$ задавали из таблицы 7, а постоянный коэффициент подбирали методом наименьших квадратов.

Результаты расчетной оценки возможной дозы по поступлению радионуклидов цезия с неизменным и деформированным рационами показаны в таблице 11. Наибольшая возможная доза на единицу поверхностной активности приходится на сельских жителей, доаварийный рацион питания которых включал 0,8 л молока в сутки. Аналогичная доза в городе оказалась в 1,5–2 раза ниже. Ожидаемое снижение дозы за второй год по сравнению с дозой за первый год (в среднем, 1,5 раза) относительно невелико при неизменном рационе, но резко ускоряется защитными мерами.

Таблица 11

Средние стандартизованные дозы внутреннего облучения $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$, рассчитанные, исходя из рационов питания, для мужчин обследуемого региона (мкЗв·км²/ГБк)

Тип населенного пункта	Зона	Рацион питания	Первый год после аварии*	Второй год после аварии**
Город	КТ	Доаварийный	26–38	16–27
		Послеаварийный	3,5–8,4	2,9–6,0
Село	КТ	Доаварийный	51–62	31–40
		Послеаварийный	27–31	7,7–10,0
Село	НТ	Доаварийный	51–62	31–40
		Послеаварийный	34–37	17–21

* – первые 365 дней после аварии на ЧАЭС;

** – 365–730 дней после аварии на ЧАЭС.

Дозиметрические данные, представленные в таблицах 12 и 13, полученные по результатам выборочного измерения содержания радионуклидов цезия в организме жителей, позволяют верифицировать расчетные результаты и вытекающие из них выводы. Общая тенденция – фактическая доза ниже рассчитанной по рациону питания уже обсуждалась ранее. В остальном предсказанные расчетом закономерности подтверждаются. Доза на единицу поверхностной активности значительно ниже (в среднем, в 3 раза за два года) в селах КТ, чем в селах НТ, и еще в два раза она ниже в городе (см. табл. 13). Обращает на себя внимание быстрое снижение годовой дозы у жителей КТ – в 2–3 раза за год, против менее чем 1,5 раза в селах НТ. Доза у женщин в 1,3–1,5 раза ниже, чем у мужчин. Наибольшая среди обследуемого контингента средняя доза 26 мЗв за 2 года была зарегистрирована у мужчин

села Унеча Клиновского района, где активные меры радиационной защиты были введены лишь с осени 1987 г., а наименьшая (в 12 раз) – у женщин г. Новозыбкова. При этом поверхностная активность радионуклидов цезия на почве в г. Новозыбкове и с. Унеча практически одинаковы, что наглядно демонстрирует возможности защитных мер.

Таблица 12

Средние дозы внутреннего облучения ^{134}Cs + ^{137}Cs , рассчитанные, исходя из измеренного содержания их в организме взрослых жителей обследуемого региона (мкЗв)

Населенный пункт	^{137}Cs (ТБк/ км ²)	Пол	Год после аварии	
			Первый*	Второй**
г. Новозыбков (КТ)	0,8	Муж.	2,0	1,0
		Жен.	1,3	0,8
Старый Вышков (КТ)	1,3	Муж.	3,7	2,1
		Жен.	2,7	1,5
Красный Камень (КТ)	1,5	Муж.	10,4	2,7
		Жен.	7,6	2,0
Гастенка (КТ)	0,4	Муж.	5,6	1,8
		Жен.	4,3	1,6
Ущерпье (НТ)	0,8	Муж.	9,1	8,0
		Жен.	5,6	6,1
Веприн (НТ)	1,1	Муж.	11,1	9,6
		Жен.	10,9	9,2
Унеча (НТ)	0,6	Муж.	14,8	11,2
		Жен.	10,0	8,4

* – первые 365 дней после аварии на ЧАЭС;

** – 365–730 дней после аварии на ЧАЭС.

Таблица 13

Средние стандартизованные дозы внутреннего облучения ^{134}Cs + ^{137}Cs , рассчитанные, исходя из измеренного содержания их в организме взрослых жителей обследуемого региона (мкЗв км²/ ГБк)

Тип населенного пункта	Зона	Пол	Год после аварии	
			Первый*	Второй**
Город	КТ	Муж.	2,5	1,3
		Жен.	1,6	1,0
Село	КТ	Муж.	5,6±1,7***	2,1±0,4
		Жен.	4,1±1,3	1,7±0,4
Село	НТ	Муж.	13,4±5,0	11,2±3,3
		Жен.	9,0±3,5	8,8±2,3

* – первые 365 дней после аварии на ЧАЭС;

** – 365–730 дней после аварии на ЧАЭС;

*** – среднеарифметическое значение и стандартная ошибка.

Количественная оценка эффективности защитных мер

Эффективность мер защиты населения зоны радиоактивного загрязнения от внутреннего облучения радионуклидами цезия мы определили как долю (в %): 1) поступления, 2) содержания, 3) дозы, сэкономленных благодаря этим мерам. В таблице 14 представлены средние результаты соответствующих вычислений, относящихся к лету

1986 г., первому и второму году после аварии, а также к сумме показателей за 2 года.

По каждой группе населенных пунктов приведены три показателя: 1) снижение расчетного поступления ^{137}Cs в организм; 2) снижение содержания ^{137}Cs в организме (только для лета 1986 г.); 3) снижение дозы внутреннего облучения жителей излучением ^{134}Cs + ^{137}Cs .

Во всех трех вариантах за исходную основу приняты показатели, которые были бы достигнуты при неизменном рационе питания и прежних источниках снабжения продуктами. Все три показателя тесно связаны между собой. Однако первый из них отражает влияние только изменения рациона питания и источника поступления продуктов. Второй и третий, основанные на измерениях инкорпорированной активности у людей, отражают весь комплекс мероприятий по защите местного населения от внутреннего облучения радионуклидами цезия, включая индивидуальные. Наиболее значимым является показатель снижения дозы внутреннего облучения.

Из данных таблицы 14 можно судить о высокой эффективности в целом мер защиты населения от внутреннего облучения радионуклидами цезия. Лишь в мае и летом 1986 г., согласно нашему опросу, поступление радионуклидов цезия в организм сельских жителей с рационом питания было уменьшено в 1,5 раза, а позднее – уже в 2–5 раз. Однако, по данным радиометрии, фактическая эффективность защиты населения была выше: содержание ^{134}Cs + ^{137}Cs было примерно на 80% ниже возможного (в том случае, если бы меры защиты не реализовывались). Наибольшая эффективность защиты в ранний период была достигнута в г. Новозыбкове благодаря оперативному переходу на снабжение жителей радиационно чистыми продуктами: доза внутреннего облучения была снижена на 92% за два первых года после аварии. При этом следует отметить село Старый Вышков, отнесенное к зоне КТ, где запрет санитарной службы на потребление местных продуктов возымел такое сильное действие на жителей, что снижение дозы внутреннего облучения оказалось даже выше, чем в городе – на 95% за 2 года. В других селах КТ основной эффект принесло принудительное изъятие из личных хозяйств молочного скота в августе 1986 г. В селах НТ эта мера не проводилась, и кратность снижения дозы была меньше (см. табл. 14).

Фактическая эффективность комплекса защитных мер, оцененная по уменьшению дозы, оказывается значительно выше расчетной оценки по поступлению, учитывающей только изменение рациона. С одной стороны, это обусловлено неточностью расчетного метода, но также и применяемыми индивидуальными мерами защиты. В качестве верхней оценки эффективности комплекса индивидуальных мер защиты можно принять усредненную за год разность (в %) между эффективностью снижения дозы и расчетного поступления (см. табл. 14). Тогда максимально возможная эффективность комплекса индивидуальных мер защиты составляет: в г. Новозыбкове – 9% за первый год и 20% за второй год после аварии; в селах КТ – 36 и 14%; в селах НТ – 38 и 20% соответственно. Разделить или хотя бы ранжировать влияние отдельных мер индивидуальной защиты не представляется возможным, поскольку отдельные жители, как правило, применяли либо весь комплекс мер, либо не применяли их вообще.

Таблица 14

Эффективность защитных мероприятий по уменьшению поступления в организм, содержания в нем радионуклидов цезия и дозы внутреннего облучения от ^{134}Cs + ^{137}Cs , (%)***

Тип населенного пункта	Зона	Параметр	Лето 1986	Первый год после аварии*	Второй год после аварии**	Два года после аварии
Город	КТ	Поступление	81	83	73	80
		Содержание	87	–	–	–
		Доза	–	92	93	92
Село	КТ	Поступление	39	54	80	61
		Содержание	86	–	–	–
		Доза	–	90	94	92
Село	НТ	Поступление	32	38	48	41
		Содержание	76	–	–	–
		Доза	–	76	68	73

* – первые 365 дней после аварии на ЧАЭС;

** – 365–730 дней после аварии на ЧАЭС;

*** – отношение реально наблюдаемых величин к тем, что могли бы иметь место без защитных мероприятий.

Сравнение доз внутреннего и внешнего облучения

Расчетный прогноз дозы внутреннего облучения по цепи «содержание ^{134}Cs + ^{137}Cs в продуктах→рацион питания→поступление в организм→содержание в организме→доза» выполнен на основе среднеарифметических характеристик, хотя частотное распределение двух исходных величин асимметрично. Ранее мы говорили о том, что это распределение по форме близко к логнормальному, причем стандартное отклонение близко по величине к среднему арифметическому. Наиболее адекватным методом прогноза результата перемножения и суперпозиции двух и трех стохастических величин является метод Монте-Карло. Однако теоретический анализ этих операций с позиций математической статистики показал, что результирующая величина (поступление в организм, содержание в организме или доза) также распределена по логнормальному закону. Среднее арифметическое этой величины равно сумме произведений средних арифметических исходных величин, как это и сделано выше, и лишь среднеквадратическое отклонение увеличивается до 1,5–2 среднего. Таким образом, расчетные средние на рисунках 3–5 именно те характеристики, которые следует сравнивать со средним содержанием радионуклидов в организме, показанным в таблице 8 и на тех же рисунках и полученным в результате радиометрии жителей. Оценка доверительных интервалов при этом сравнении требует дополнительного статистического анализа. Выбор среднеарифметических показателей в качестве основных обусловлен тем, что именно они непосредственно связаны с оценкой коллективной дозы и прогнозом медицинских последствий.

Наряду с групповым анализом, индивидуальный корреляционный анализ независимо показал:

- важную роль животных продуктов, в первую очередь, молока из личных хозяйств, в накоплении радионуклидов цезия в организме сельских жителей зоны радиоактивного загрязнения;
- определенную роль в этом процессе природных продуктов;
- возможность достоверного снижения внутреннего облучения жителей с помощью комплекса простых мер

«радиационной самозащиты», в число которых входят ограничение потребления местных продуктов питания;

– внесение в почву огорода рекомендованных удобрений;

– радиометрический контроль и бракераж продуктов питания (в первую очередь, природных);

– простые приемы в приготовлении пищи из местных продуктов и т.д.

Кроме того, наличие достоверной корреляции индивидуального содержания радионуклидов цезия в организме, по меньшей мере, с тремя количественными характеристиками рациона питания – потреблением молока, мяса, яиц – открывает возможность реконструкции индивидуальной дозы внутреннего облучения на основе метода множественной регрессии по результатам опроса человека об особенностях его питания за предыдущий период.

При оценке значимости представленного материала нельзя обойтись без сопоставления дозы внутреннего и внешнего облучения населения.

Как показано в [22], средняя доза внешнего облучения взрослых жителей г. Новозыбова составила 6 и 2 мЗв за первый и второй годы после аварии, а в стандартизованной форме – 9 и 3,2 (мкЗв·км²/ГБк) соответственно. Для всех сел средние дозы внешнего облучения взрослых жителей в стандартизованной форме были 15 и 5 (мкЗв·км²/ГБк) за первый и второй годы. Сравнение этих доз с данными таблиц 11 и 13 приводит к заключению, что реализация описанных мер по снижению внутреннего облучения радикально повлияла как на величину суммарной дозы облучения, так и на ее структуру. В отсутствие мер защиты средняя стандартизованная эффективная доза внешнего и внутреннего облучения мужчин за 2 года (без учета дозы от радионуклидов йода) ожидалась 53–77 и 104–122 (мкЗв·км²/ГБк) в г. Новозыбоке и селах соответственно, причем вклад внутреннего облучения составил бы около 80%. Фактическая средняя доза уменьшена до 16, 28 и 45 (мкЗв·км²/ГБк) в городе, селах КТ и НТ соответственно, причем вклад внутреннего облучения невелик и составляет 24%, 28% и 55%.

Подчеркнем, что именно благодаря описанным защитным мероприятиям средняя доза облучения во всех

населенных пунктах зоны радиоактивного загрязнения Брянской области, включая те, где плотность ^{137}Cs на почве достигает 3 ТБк/км², не превысила аварийных нормативов 100 мЗв за первый и 30 мЗв за второй год после аварии на ЧАЭС.

Целесообразность мер защиты от внутреннего облучения, эффективность которых рассмотрена выше, была обоснована лишь необходимостью соблюдения дозовых нормативов, экономические же аспекты и анализ их с позиций современной теории оптимизации в данной работе не рассматривались.

Как следует из наших данных и данных работы [7], столь долгосрочные и широкомасштабные меры защиты от внутреннего облучения целесообразны на территориях с почвами, бедными глинистыми минералами, таких, как Брянская область. Напротив, на территориях, где преобладают черноземы, радионуклиды активно поступают с пищей в организм жителей лишь в ранний период поверхностного загрязнения биосферы. Позднее, в период жесткого связывания радионуклидов цезия почвенными комплексами, в растения через корневую систему ^{137}Cs переходит в гораздо меньших количествах, и описанные активные меры защиты становятся излишними, поскольку доза в этом случае преимущественно обусловлена внешним облучением.

Заключение

Содержание радионуклидов цезия в традиционном рационе питания жителей Брянской области после аварии на ЧАЭС снижалось сначала (май – лето 1986 г.) монотонно (65–85%) вследствие очистки растительности от поверхностного радиоактивного загрязнения, а в дальнейшем – волнообразно, с периодом сезонных колебаний 1 год, что отражает динамику концентрации ^{137}Cs в молоке, аппроксимированную формулой (1).

После аварии на ЧАЭС состав рациона и источники получения продуктов питания для жителей зоны радиоактивного загрязнения значительно изменились вследствие мер защиты. Так, в селах контролируемой территории потребление молока из местных личных хозяйств снизилось к осени 1986 г. в среднем до 2% от прежнего количества, яиц и мяса – до 30–50%, дикорастущих грибов, лесных ягод и рыбы из местных водоемов – на 60–70%. Согласно данным опроса жителей, изменение рациона питания за первые два года после аварии снизило поступление радионуклидов цезия в организм жителей г. Новозыбокова на 80%, сел контролируемой территории – на 60%, сел НТ – на 35–50%.

Содержание $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ в организме сельских жителей статистически достоверно коррелирует со многими факторами, включая:

- потребление молока, мяса и яиц из личного приусадебного хозяйства или местного рынка;
- внесение в почву огорода в личном приусадебном хозяйстве извести, калийных и фосфорных удобрений, навоза;
- отказ от возделывания некоторых сельскохозяйственных культур (бобовых, клубники и др.);
- изменение способов приготовления пищи;
- бракераж продуктов питания с помощью радиометрического контроля;
- отъезд из зоны радиоактивного загрязнения.

Комплекс мер по защите населения от внутреннего облучения обеспечил снижение средней эффективной эквивалентной дозы у взрослых жителей (без учета дозы от радиоизотопов йода) за два первых после аварии на ЧАЭС года на 75–85% в г. Новозыбокове; на 75–80% – в селах КТ и на 60% – в селах НТ, причем вклад внутреннего облучения радионуклидами цезия в общую дозу был снижен до 24%, 28% и 55% соответственно, а сама средняя доза у жителей оказалась на 85% ниже той, что была бы получена без мер защиты.

Кроме того, фактическая средняя доза внутреннего облучения населения, рассчитанная на основании реальных измерений содержания радионуклидов цезия в организме обследуемых, оказалась на 50–80% ниже дозы, рассчитанной по поступлению даже с измененным в результате аварии рационом питания.

Литература

1. International Atomic Energy Agency. Summary report of the post-accident review meeting on the Chernobyl accident. – Vienna: IAEA; Safety Series – № 75-INSAG-1; 1986.
2. Асмолов, В.Г. Авария на Чернобыльской атомной станции: год спустя / В.Г. Асмолов, А.А. Боровой, И.Ф. Демин // Ат. Энергия. – 1988. – № 64(1). – С. 3–23.
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. – New York: United Nations, 1988.
4. Pavlovsky, O.A. Long-term prognosis of individual and collective doses to the population / O.A. Pavlovsky // In: Medical aspects of the Chernobyl accident proceedings of an all-Union conference. – Vienna: IAEA-TECDOC-516. – 1989. – P. 217–228.
5. Прохоров, В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах / В.М. Прохоров. – М.: Энергоиздат, 1981.
6. Knizhnikov, V.A. Intake of radionuclides through food chains as a factor in the exposure of the soviet population after Chernobyl accident / R.M. Barkhudarov [et al.] // Medical aspects of the Chernobyl accident. – Vienna: IAEA. – 1989. – P. 101–116.
7. Shutov, V.N. Caesium and strontium radionuclide migration in the agricultural ecosystems and estimation of internal doses to the population / V.N. Shutov [et al.]; ed. by S. Mervin and M. Balonov // The Chernobyl Papers. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies. Research Enterprises. – 1993. – V. 1 – P. 167–218.
8. Мареи, А.Н. Глобальные выпадения цезия-137 и человек / А.Н. Мареи [и соавт.]. – М.: Атомиздат, 1980.
9. Avetisov, G.M. Protective measures to reduce population doses and effectiveness of these measures / G.M. Avetisov [et al.] // In: Medical aspects of the Chernobyl accident proceedings of an all-Union conference. – Vienna: IAEA-TECDOC-516. – 1989. – P. 151–165.
10. Balonov, M.I., The role of agricultural and natural ecosystems in internal dose formation in inhabitants of the Controlled Area // M.I. Balonov, I.G. Travnikova // Proceeding of a symposium: Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments. Udine. Italy. September 15-17; ISBN 1-8566-539-0. – 1989. – P. 419–430.
11. Данные по радиоактивному загрязнению населенных пунктов РСФСР цезием-137 и стронцием-90 (на июнь 1989 года) / под ред. Ю.А. Израэля. – М.: Гидрометеиздат, 1989.
12. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
13. Долгирев, Е.И. Временные методические указания по экспресс-определению содержания ^{134}Cs и ^{137}Cs в организме человека / Е.И. Долгирев [и соавт.]. – М., 1987.

14. Lebedev, O.V. The correlation between ^{137}Cs half-time and age, body mass and height in individuals contaminated from the Chernobyl accident / O.V. Lebedev, V.A. Yakovlev; ed. by S.Mervin and M.Balonov // The Chernobyl Papers. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies. Research Enterprises. – 1993. – V.1 – P. 221–243
15. Beresford, N.A. The importance of soil adhered to vegetation as a source of radionuclides by grazing animals / N.A. Beresford, B.Y. Howard // 7th report of the IUR working group on soil-to-plant transfer factors. – Bilthoven: RTVM, 1990.
16. Frissel, M. The role of various conditions on the uptake of radiocesium and strontium by food crops, with special reference to Chernobyl cesium / M. Frissel; R.M. Y. Pennders: 7th report of the IUR working group on soil-to-plant transfer factors. – Bilthoven: RIVM, 1990.
17. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and biological effects. – New York: United Nations, 1982.
18. Моисеев, А.А. ^{137}Cs в биосфере / А.А. Моисеев, П.В. Рамзаев. – М.: Атомиздат, 1975.
19. Balonov, M.I. Chernobyl Accident and the Protective Actions Applied / M.I. Balonov; ed. by S. Mervin and M. Balonov // The Chernobyl Papers. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies. Research Enterprises. – 1993. – V.1 – P. 127–166.
20. International Commission on Radiological Protection. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. – Oxford: Pergamon Press, ICRP Publication 30, 1979.
21. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. – Oxford: Pergamon Press, ICRP Publication 56. – Part 1. – 1989.
22. Golikov, V.Yu. Estimation of external gamma radiation doses to the population after the Chernobyl accident / V.Yu. Golikov, M.I. Balonov, A.V. Ponomarev; ed. by S. Mervin and M. Balonov // The Chernobyl Papers. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies. Research Enterprises. – 1993. – V. 1 – P. 247–288.
23. Balonov, M.I. Importance of diet and protective actions of internal dose from ^{137}Cs radionuclides in inhabitants of the Chernobyl region / M.I. Balonov, I.G. Travnikova; ed. by S. Mervin and M. Balonov // The Chernobyl Papers. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies. Research Enterprises. – 1993. – V.1 – P. 127–166.

I.G. Travnikova

Efficiency of protective measures to reduce internal dose from caesium radionuclides for the inhabitants of radioactive contamination area in the first years after the Chernobyl accident

Federal Scientific Organization «Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev» of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Saint-Petersburg

Abstract. In the paper, we use the data on the content of caesium radionuclides in foodstuffs and in Bryansk region adult inhabitant's body, on their food ration and its changes during the first years after the Chernobyl accident, and on the measures to protect the population from internal exposure. We calculate dynamics of ^{137}Cs intake in the body and its contents therein, while maintaining a traditional diet and while replacing food products for radiation-free ones. The results show that the actual ^{137}Cs content in the body is usually below the one calculated on the basis of the food ration. It was found out that individual ^{137}Cs contents in the body correlate with the rate of meat, dairy and natural food products consumption and with factors of protection from internal exposure. The efficiency of the protective measures to reduce the intake and the content of caesium radionuclides in the body of inhabitants, as well as the average effective dose in the first years after the accident has been quantitatively assessed.

Key words: Chernobyl accident, population, protective measures, intake, content in the body, exposure dose, contamination areas, caesium radionuclides, polling.

Поступила: 15.02.2012 г.

И.Г. Травникова
Тел.: 8(812)232-85-16;
E-mail: i_trav@mail.ru