

Пути формирования доз внутреннего облучения сельских жителей Брянской области после аварии на ЧАЭС (часть первая)

И.Г. Травникова, Г.Я. Брук, В.Н. Шутов, А.В. Базюкин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Санкт-Петербург

На протяжении всех прошедших после аварии на Чернобыльской АЭС лет нами осуществлялся мониторинг радиационной обстановки населенном пункте Веприн Брянской области России, включающий в себя определение концентраций ^{137}Cs в пищевых продуктах как сельскохозяйственного производства, так и природного происхождения, опрос местного населения о структуре и составе их рационов питания с одновременным измерением содержания ^{137}Cs в организме жителей. Анализ результатов этих многолетних исследований будет разделен на два этапа: 1986–1996 гг. и 1997–2012 гг.

В данной работе, посвященной первому периоду исследований (1986–1996), была реконструирована доза внутреннего облучения населения за 11 лет, прошедших после аварии, а также проведена оценка эффективности комплекса защитных мероприятий, проведенных в данном населенном пункте в указанное время. Показано, что благодаря последним среднюю годовую дозу внутреннего облучения жителей за рассматриваемый период удалось снизить почти в два раза, а именно до 35 мЗв/год вместо ожидаемых 70 мЗв/год. Доза внешнего облучения в течение того же периода времени была близка к полученной дозе внутреннего облучения. Наличие в ареале этого населенного пункта значительных площадей с торфяными и пойменными почвами, характеризующимися высокими коэффициентами перехода радионуклидов из почвы в растительность, привело к более существенному радиоактивному загрязнению выращиваемой сельскохозяйственной продукции, чем в большинстве других хозяйств Брянского региона, что, в свою очередь, определило более высокий вклад этой компоненты в дозу внутреннего облучения населения. Индивидуальное содержание ^{137}Cs в организме жителей достоверно коррелирует с потреблением молока в ранний период после аварии и потреблением лесных грибов в отдаленный период. Вклад даров природы в дозу внутреннего облучения вырос с 6% в 1987 г. до 25% в 1996 г.

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

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) является одной из самых серьезных аварий за всю историю существования атомной энергетики, что в значительной мере определяется наличием в составе радиоактивного выброса долгоживущих радионуклидов, в первую очередь, радионуклидов цезия. Опыт работы по ликвидации ее последствий имеет огромное значение, особенно в плане совершенствования системы защиты населения в случаях крупномасштабных радиационных аварий, не знающих национальных границ.

Мы постараемся показать это на примере одного населенного пункта (н.п.) Брянской области – самой загрязненной российской территории в результате аварии на ЧАЭС. Первое обследование этого н.п. было проведено в 1987 г. Результаты первых лет после аварии были нами подробно описаны и опубликованы в журнале Radiation Protection Dosimetry [1], но объем полученной информации так велик, что мы, представляя наш более чем 25-летний труд, решили разделить его на две части: 1986–1996 гг. и 1997–2012 гг. Данное сообщение посвящено первому периоду.

Рельеф загрязненных территорий России равнинный, климат умеренно-континентальный, с теплым летом и

мягкой зимой, среднегодовое количество осадков колеблется в пределах 500–700 мм.

В почвенном покрове западных районов Брянской области, где поверхностная активность ^{137}Cs достигала 4 МБк/м², а ^{90}Sr – 0,1 МБк/м² [2], преобладают дерново-подзолистые песчаные, супесчаные, а в некоторых районах – торфяно-болотистые почвы. Для них характерно невысокое естественное плодородие, кислая реакция, слабая обеспеченность минеральными питательными веществами. Примерно половину сельскохозяйственных угодий занимали естественные пастбища, луга и сенокосы. Поэтому в регионе были развиты молочное и мясное скотоводство.

Загрязнение почвы, растительности и водоемов радионуклидами ^{137}Cs и ^{134}Cs стало основным фактором внешнего и внутреннего облучения жителей после распада радиоактивного йода в мае – июне 1986 г. [3].

Нами были изучены закономерности формирования дозы внутреннего облучения населения в начальный и отдаленный периоды после аварии на ЧАЭС в населенных пунктах Брянской области, различающихся между собой как типами доминирующих в них почв, так и уровнями проводившихся в них защитных мероприятий [1, 4].

Начиная с июня 1986 г., нами регулярно проводились измерения содержания радионуклидов цезия в организме местных жителей, сопровождаемые опросами, целью которых было изучение структуры и изменений рационов питания населения, связанных с аварией. Изучалась динамика загрязнения радионуклидами цезия различных сельскохозяйственных и природных продуктов, составляющих рацион питания жителей [4].

Настоящее сообщение посвящено населенному пункту Веприн (350 жителей), расположенному в Клиновском районе Брянской области. Загрязнение его территории радионуклидами ^{137}Cs составило около 1 МБк/м² [2]. При выборе объекта исследования учитывались особенности почвенного покрова, влияющие на радиоэкологические параметры. Так, помимо преобладающих в Брянской области дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв с низкой фиксацией цезия, значительную часть сенокосов и пастбищ вокруг н.п. Веприн составляют торфяные и пойменные почвы (около 60%) с еще более низкой фиксацией в них радионуклида. Примерно в 4 км от поселка протекает большая река Ипуть, а непосредственно в самом поселке – речка Вепринка. Кроме того, вокруг расположено несколько мелких озер, используемых населением для ловли рыбы.

Следует отметить, что мероприятия по защите населения, особенно в начальный период после аварии, проводились здесь неинтенсивно и свелись, в основном, к разъяснительной работе: к рекомендациям о нежелательности употребления в пищу тех или иных пищевых продуктов, к запрету на посещение лесов, сбора дикорастущих грибов и лесных ягод, ловли рыбы из местных водоемов. Кроме того, было проведено известкование приусадебных участков, а также в течение первых 3–4 лет в местный магазин поступали в продажу “чистое” (привезенное из незагрязненных районов) молоко и мясные консервы. Тем не менее, можно дать оценку даже этому слабому комплексу защитных мероприятий, что и выполнено в настоящей работе.

Цель исследования – изучение путей формирования доз внутреннего облучения населения за счет алиментарного пути поступления радионуклидов цезия в организм в разные периоды после аварии на примере жителей этого населенного пункта.

Материалы и методы

Основным дозообразующим фактором для жителей западных районов Брянской области после распада радиоактивного йода стало загрязнение почвы, растительности и водоемов радионуклидами цезия. Именно оно определяет и в настоящее время уровни внешнего и внутреннего облучения населения. Для целей нашего анализа были необходимы данные о динамике содержания радионуклидов цезия в пищевых продуктах, потребляемых населением н.п. Веприн; характеристика структуры и состава рационов питания жителей и их изменений после аварии; данные измерений содержания радионуклидов цезия в организме жителей и сведения о реализации ими индивидуальных мер защиты, а также официальная информация Госкомгидромета о средней поверхностной активности ^{137}Cs в почве на территории села и в его ареале.

В сельскохозяйственных угодьях Веприна преобладают, составляя около 60%, торфяные и пойменные почвы, чем оно радикально отличается от большинства других населенных пунктов Брянской области, где преобладают дерново-подзолистые песчаные и супесчаные почвы.

В качестве параметра, характеризующего миграцию радионуклидов в экосистеме, нами был использован коэффициент перехода (КП) (м²/кг), равный отношению удельной активности радионуклида в пробах растительности или в пищевых продуктах (Бк/кг) к поверхностной активности радионуклида в почве (Бк/м²). Коэффициент перехода формально характеризует долю активности, содержащейся на участке почвы площадью 1 м², которая переходит в 1 кг растительности или в 1 кг пищевого продукта [5].

Для расчета КП в сельскохозяйственную продукцию поверхностная активность ^{137}Cs в почве ($\sigma_{^{137}\text{Cs}}$) была усреднена для всего населенного пункта (1,0 МБк/м²) [2]. При отборе дикорастущих грибов, лесных ягод (даров природы) и образцов луговых трав одновременно с участков их произрастания отбирались также пробы почвы.

Пробы целинной почвы отбирали с ровных участков площадью не менее 100 м², удаленных от края леса, дорог, строений не менее чем на 50 м, пробоотборником диаметром 5 см с глубины 0–15 см. Ниже этих глубин корни естественных трав практически отсутствовали и обнаруживались лишь следовые количества ^{137}Cs . На каждом пастбище отбирали не менее 5 проб одновременно. Как правило, такого количества проб было достаточно для адекватной оценки средних уровней поверхностного загрязнения почвы, несмотря на известный факт «пятнистости» Чернобыльских выпадений, который наблюдался даже в пределах отдельных пастбищ.

Пробы травяной растительности – в основном, смесь естественных злаковых культур – отбирали на тех же участках, что и почву, а затем высушивали их до воздушно-сухого состояния при температуре около 100° С. Проба с каждого участка представляла собой объединенный образец из четырех проб, собранных с квадратов площадью 0,25 м².

Пробы пищевых продуктов отбирались, в основном, радиологическими службами Клиновской и Брянской СЭС и измерялись на их аппаратуре. Периодически во время экспедиций пробы продуктов отбирались и нами – с целью проведения интеркалибровки гамма-спектрометрических и радиохимических методов анализа. Основное внимание было уделено отбору и анализу проб пищевых продуктов, дающих наиболее значимый вклад в формирование доз внутреннего облучения населения. В первые годы после аварии это были мясо-молочные продукты, а в последние годы возрос вклад природных пищевых продуктов.

Всего в этот период было проанализировано более 4 тысяч проб пищевых продуктов и объектов окружающей среды.

Концентрацию и удельную активность ^{137}Cs в пробах определяли на сцинтилляционном гамма-спектрометре с детектором NaI(Tl) диаметром 110 мм, имеющим «колодец» для пробы объемом 200 см³. При этом измерялась суммарная активность ^{137}Cs и ^{134}Cs , а содержание ^{137}Cs рассчитывалось с учетом исходного начального соотношения $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ в выпадениях, равного 0,54. Минимальная детектируемая активность (МДА) радионуклидов цезия – около 2 Бк на пробу при времени изме-

рения 30 мин и относительной погрешности измерения 30%. Содержание радионуклидов цезия в пробах, меньшее МДА, определяли по сурьмяно-йодидной радиохимической методике [6].

Индивидуальное обследование жителей Веприна мы провели впервые в июле – августе 1987 г. и повторили в 1990, 1993 и 1996 гг. Кроме того, измерения содержания радионуклидов цезия в организме жителей были проведены во время всеобщей диспансеризации осенью 1986 г. и 1989 г. Наш первый опрос подробно описан в работе [4], там же приведена анкета, которую мы использовали. В нее, помимо общих данных, входили вопросы о потреблении 8 наиболее значимых дозообразующих пищевых продуктов, составляющих рацион питания населения, и источниках поступления этих продуктов. Устанавливались изменения, произошедшие в пищевом рационе после аварии на ЧАЭС и связанные с ней, а также индивидуальные защитные меры, применяемые каждым из обследуемых жителей. Одновременно с опросом проводились измерения содержания ^{137}Cs в их организме.

Все проведенные опросы имели много общего, в частности, использовались однотипные анкеты, но существовали и различия. Первый опрос ставил своей целью установить доаварийные рационы питания и изменения в них для каждого из опрошенных жителей, связанные с проводившимися после аварии защитными мероприятиями. Основная задача последующих опросов состояла в оценке текущих рационов питания, и в учете, хотя бы в качественном виде, потребления природных пищевых продуктов (дикорастущих грибов, лесных ягод и рыбы из местных водоемов), вклад которых в формирование дозы внутреннего облучения жителей возрастал с каждым годом, прошедшим после аварии.

Имея данные о рационе, его структуре и радиоактивном загрязнении основных компонентов, его составляющих, можно оценить поступление радионуклидов в организм, а следовательно, и дозу внутреннего облучения человека. Последнюю можно оценить также, имея данные о содержании радионуклидов цезия в организме в разные периоды времени после аварии.

Для проведения массовых измерений содержания радионуклидов ^{137}Cs и ^{134}Cs в теле жителей загрязненных территорий в Ленинградском институте радиационной гигиены в первые месяцы после аварии были разработаны специальные оперативные методики, позволившие уже в 1986 г. использовать геологоразведочные сцинтилляционные радиометры «СРП-68-01» с кристаллом NaI(Tl) размером 25×20 мм (производство СССР), а также одноканальные радиометры «RFT-20046» («Роботрон 20046») с кристаллом NaI(Tl) размером 25×25 или 40×40 мм (производство бывшей ГДР), которые в 1988–1989 гг. для повышения чувствительности были снабжены детекторами типа БДЭГ с кристаллом NaI(Tl) размером 63×63 мм (производство СССР) [7]. В 1996 г. использовали приборы «СКИФ-3» (производство России) с этими же детекторами. Калибровка всех указанных приборов производилась в Институте радиационной гигиены с помощью метрологически аттестованных фантомов тела человека различной массы [8], а также при измерении добровольцев, принявших внутрь известное количество так называемой «Чернобыльской смеси» – ^{137}Cs + ^{134}Cs .

Измеряли число импульсов в энергетическом диапазоне гамма-излучения 0.5–1.0 МэВ (основные пики ^{137}Cs и ^{134}Cs) в положении обследуемого лица «сидя согнувшись» с детектором у нижней части живота или «стоя» – с детектором у пояса. Время измерения – 100 с, относительная погрешность измерений – до 50% в положении «сидя согнувшись» и до 30% – в положении «стоя», чувствительность методики – 3–5 кБк и 2–4 кБк $^{134,137}\text{Cs}$ в теле взрослого человека при использовании Роботрона-20046 с детекторами 40×40 мм и 63×63 мм соответственно [7].

Расчет содержания радионуклидов цезия в организме жителей, проживающих на загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС территориях, проводили в соответствии с методикой, разработанной в нашем институте. Согласно этой методике, формула расчета активности по результату измерения в общем виде выглядит следующим образом:

$$A = K \cdot M(\text{или } T) \cdot (P - K_{\gamma} \cdot P_{\phi}), \quad (1)$$

где: A – содержание радионуклидов цезия в организме обследуемого;

K – калибровочный коэффициент;

P – показания прибора при измерении человека;

P_{ϕ} – среднее значение фона прибора;

M – масса тела человека;

T – обхват талии;

K_{γ} – коэффициент экранирования внешнего гамма-фона телом человека, отн. ед.; этот коэффициент различен для лиц с разными значениями M и T.

Следует иметь в виду, что реальная доза внутреннего облучения населения более тесно связана с содержанием $^{134,137}\text{Cs}$ в организме жителей, измеренным с помощью спектрометра излучений человека (СИЧ), чем с рассчитанным по поступлению с рационом питания. В связи с высокой вариабельностью содержания радионуклидов в отдельных пищевых продуктах и в рационе жителей в целом, а также вследствие применения населением защитных мероприятий, близость оценок доз внутреннего облучения, рассчитанных двумя указанными способами, может служить критерием качества проводимых нами опросов населения.

Дозу внутреннего облучения E_{int} оценивали по поступлению смеси l-x радионуклидов с пищей в период времени от t_1 до t_2 (сут) по формуле:

$$E_{\text{int}}(t_1, t_2) = \sum_l dk_l \cdot \int_{t_1}^{t_2} I_l(t) dt, \text{ мЗв}, \quad (2)$$

где: dk_l – дозовый коэффициент для пищевого поступления l-го нуклида в организм взрослого, мЗв/Бк [МКРЗ-67]; $I_l(t)$ – суточное поступление l-го нуклида в организм с пищей, Бк/сут.

Суточное поступление нуклидов в организм складывается из поступления с различными продуктами – компонентами рациона:

$$I_l(t) = \sum_p C_{lp}(t) \cdot V_{lp}, \text{ Бк/сут}, \quad (3)$$

где: $C_{lp}(t)$ – удельная активность (концентрация) l-го нуклида в p-м пищевом продукте, Бк/кг(л);

V_{lp} – суточное потребление p-го пищевого продукта, содержащего l-й радионуклид, кг(л)/сут.

Результаты первых измерений содержания радионуклидов цезия в организме жителей Веприна, проведенных в августе – сентябре 1986 г. (во время всеобщей диспансеризации населения, пострадавшего в результате аварии на ЧАЭС), послужили основой для реконструкции уровней поступления радионуклидов и расчета дозы внутреннего облучения за предшествующий (начальный) период времени. Форму функции поступления в этот период времени задавали как сумму поступления $^{134,137}\text{Cs}$ с молоком в период «поверхностного» загрязнения растительности и в период ее «корневого» загрязнения.

Неизвестные параметры для использования их в приведенной выше общей формуле определяли численным решением уравнения:

$$\overline{Q}_{137}^1 = \int_0^{t_1} I_{137}(\tau) \cdot R(t_1 - \tau) d\tau, \text{ Бк}, \quad (4)$$

где $R_{(t)} = 0,9 \cdot \exp(-\ln 2 \cdot t/90)$, отн.ед., – функция удержания ^{137}Cs в организме взрослых лиц обоего пола [9, 10].

Функция поступления ^{134}Cs в организм за тот же период времени определяется с учетом соотношения ^{134}Cs и ^{137}Cs в выпадениях «чернобыльского» происхождения.

Дозу внутреннего облучения жителей за последующий (отдаленный) период времени за счет преимущественно «корневого» загрязнения растительности вычисляли с использованием, в первую очередь, данных серии СИЧ-измерений. При этом дозу облучения радионуклидами цезия за период (t_m, t_q) рассчитывали по упрощенной формуле «методом трапеций»:

$$E(t_m, t_q) = \sum_j kd_j \sum_{n=m}^{q-1} \frac{(Q_1/M)_n + (Q_1/M)_{n+1}}{2} \cdot (t_{n+1} - t_n), \text{ мЗв}, \quad (5)$$

где: n – порядковый номер СИЧ-измерения содержания радионуклидов цезия в организме жителей;

m, q – начальный и конечный порядковые номера СИЧ-измерений в данном населенном пункте;

$(Q_1/M)_n$ – среднее значение отношения активности l -го радионуклида ($^{134}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}$) в теле жителей Q_1 , Бк, к массе тела M , кг, по данным n -го измерения;

kd_j – дозовый коэффициент перехода от удельного содержания ^{137}Cs и ^{134}Cs в теле Q_1/M к мощности дозы, (мЗв·кг)/(Бк·сут); kd для ^{137}Cs равен $6,3 \cdot 10^{-6}$ (мЗв·кг)/(Бк·сут);

t_n – время с момента аварии до момента n -го СИЧ-измерения, сут;

$(t_{n+1} - t_n)$, – интервал времени между двумя последовательными СИЧ-измерениями, сут.

Доза внутреннего облучения E_r , обусловленная «корневым» поступлением l -х долгоживущих радионуклидов ($^{137}\text{Cs}, ^{134}\text{Cs}, ^{90}\text{Sr}$) в 1986–1996 гг., представляет сумму по радионуклидам l и годам j :

$$E_r = \sum_l dk_l \cdot \sum_j Y_l(j), \text{ мЗв}, \quad (6)$$

где: j – текущий календарный год;

$Y_l(j)$ – среднее поступление l -го радионуклида в организм человека за j -й календарный год вследствие «корневого» пути загрязнения растительности, Бк/год. В 1986 г. началом «корневого» пути поступления радионуклидов в организм жителей считали 1 июля;

dk_l – дозовый коэффициент для l -го радионуклида, мЗв/Бк, [МКРЗ-67]; dk для ^{137}Cs равен $1,3 \cdot 10^{-5}$ мЗв/Бк.

Среднее годовое поступление l -го радионуклида в организм взрослых жителей с пищей $Y_l(j)$ рассчитывали по формуле:

$$Y_l(j) = 365 \cdot \sum_p V_{lp}(j) \cdot C_{lp}(j), \text{ Бк/год}, \quad (7)$$

где: $C_{lp}(j)$ – средняя удельная активность (концентрация) l -го нуклида в p -м пищевом продукте в течение j -го календарного года, Бк/кг(л);

$V_{lp}(j)$ – среднее суточное потребление p -го пищевого продукта, содержащего l -й радионуклид, в течение j -го календарного года, кг(л)/сут (определяли по результатам индивидуальных опросов местных жителей о рационах их питания);

365 – количество дней в году, сут/год.

Научные результаты и выводы, полученные в данной работе, основаны на материалах математико-статистического анализа, проведенного с помощью пакета программ STATISTICA, версия 5.0.

Результаты и обсуждение

Закономерности поступления радионуклидов в организм жителей, проживающих на загрязненных территориях, зависят от многочисленных природных и социальных факторов, а также от особенностей сложившейся на этих территориях радиационной обстановки. К природным факторам относятся, в первую очередь, почвенно-климатические.

Данные о содержании ^{137}Cs в пищевых продуктах, собранных на приусадебных участках Веприна, а также на территории общественного хозяйства, к которому принадлежит этот населенный пункт, представлены в динамике на рисунках 1, 2 и в таблице 1. В этой же таблице представлены средние величины коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в пищевые продукты. Они оказались выше, чем полученные нами ранее усредненные по всем загрязненным районам Брянской области значения: для молока – примерно в 4–5 раз, для картофеля – в 1,5–2,0 раза [3, 8].

На рисунке 1 показана динамика изменения КП ^{137}Cs из почвы в молоко, а на рисунке 2 – в картофель. Пробы были отобраны в разные годы в частных хозяйствах Веприна и в других населенных пунктах данного общественного хозяйства, которые сходны между собой по типам доминирующих в них почв.

Динамика изменения концентрации ^{137}Cs в коровьем молоке отражает темп изменения содержания этого радионуклида в естественных травах и кормовых культурах. Ранее на большом массиве данных нами было показано, что в целом на Брянщине снижение содержания ^{137}Cs в естественных травах, а с ними и в молоке, в первые 4–6 лет после аварии происходило по экспоненциальному закону с периодом полуочищения около 1 года [4–6], что было характерно и для подзолистых почв, и для черноземов. В последующие годы этот процесс существенно замедлился: период полуочищения составил к 1998 г. примерно 10 лет [6]. Анализ аналогичных данных для Веприна (только по молоку нами было проанализировано более 2700 проб, начиная с 1987 г.) показал, что снижение концентрации ^{137}Cs в молоке происходило в несколько раз медленнее, чем в среднем по Брянской области.

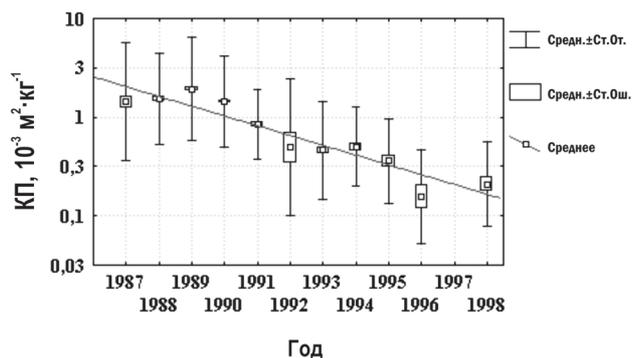


Рис. 1. Динамика изменения со временем коэффициентов перехода (КП) ¹³⁷Cs из почвы в молоко

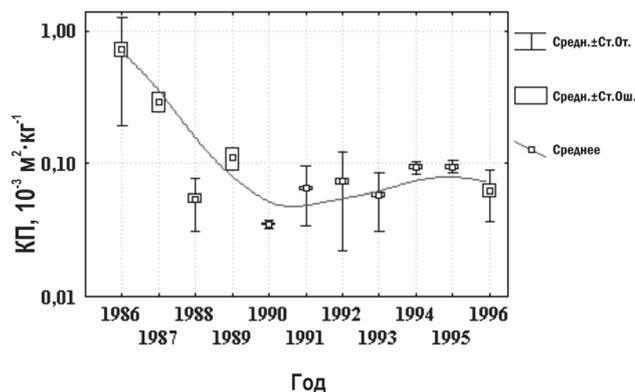


Рис. 2. Динамика изменения со временем коэффициентов перехода (КП) ¹³⁷Cs из почвы в картофель

Таблица 1

Среднее содержание ¹³⁷Cs в основных продуктах питания жителей н.п. Веприн (1994–1996 гг.)

Продукт	Количество проб	¹³⁷ Cs, Бк/кг		КП _{Cs} , ×10 ⁻³ м ² /кг	
		Среднее	Стандартное отклонение		
Сельскохозяйственные животные продукты	Молоко	54	315	250	0,46
	Сметана	4	110	100	–
	Творог	3	234	210	–
	Говядина	12	680	450	1,0
	Свинина	5	194	136	0,28
	Яйца	13	22	12	0,032
Сельскохозяйственные растительные продукты	Картофель	104	45	20	0,065
	Морковь	13	29	19	0,042
	Свекла	9	24	25	0,035
	Капуста	4	35	12	0,051
	Помидоры	4	21	14	0,030
	Фасоль	3	67	7	0,097
	Щавель	5	126	23	0,18
	Яблоки	4	13	6	0,019
	Мед	5	164	120	0,24
	Дары природы	<i>Лесные ягоды</i>			
Черника		15	3720	1370	5,4
Малина		4	190	80	0,28
<i>Грибы</i>					
Лисички		7	2550	4820	3,7
Маслята		4	14500	6800	21
Сыроежки		7	8980	5590	13
<i>Рыба (река)</i>					
Плотва		15	110	56	–
Щука		17	240	240	–
Карась		13	252	137	–
Окунь		14	141	122	–
Линь		7	96	52	–
<i>Рыба (озеро)</i>					
Карась	57	730	1100	1,1	

Период полуочистения этого продукта от ^{137}Cs оказался равным 3,2 года, причем в течение всего 12-летнего периода наблюдения мы не обнаружили достоверного изменения этого параметра. На пастбищах, где пасется молочный скот местного населения, преобладают торфяные и пойменные почвы. КП ^{137}Cs из этих почв в травы и молоко в 5–10 раз выше, чем из дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв [1, 4], так как из-за невысокого содержания глинистых минералов эти почвы (торфяные и пойменные) сорбируют ^{137}Cs еще слабее, чем дерново-подзолистые и, как мы полагаем, очищение со временем травяной растительности и молока обусловлено в данном случае не только необменной сорбцией цезия на почвенных минералах, но и вертикальной миграцией радионуклида, скорость которой для переувлажненных торфяных и пойменных почв существенно выше, чем для почв с малым содержанием органического вещества.

Рисунок 2 показывает, что уровни загрязнения ^{137}Cs картофеля, который является важным компонентом рациона питания местных жителей, не очень велики и вообще мало изменились за последние 6–7 лет (с 1990 по 1996 г.). В первые же после аварии годы концентрация ^{137}Cs в картофеле уменьшалась с периодом около 1 года, что совпадало с данными из других загрязненных районов Брянской области. Это объясняется тем, что, в отличие от естественных луговых трав, картофель растет на окультуренных почвах, где используются удобрения, задерживающие переход радионуклидов.

В отличие от продуктов сельскохозяйственного производства, естественная дезактивация которых в Веприне происходила медленнее, чем в целом в Брянской области, но тем не менее имела место, мы практически не обнаружили достоверного снижения КП ^{137}Cs из почвы в природные продукты (лесные ягоды и дикорастущие грибы) – не только в Веприне, но и в других загрязненных районах региона [11, 12].

Важнейшим социальным фактором, формирующим поступление радионуклидов в организм, является рацион питания населения и его структура. Рацион питания взрослых жителей н.п. Веприн в динамике представлен в таблице 2.

Как видно из результатов проведенных нами опросов, авария резко деформировала рационы питания жителей, проживающих на загрязненных территориях. Особенно это касается потребления молока и молочных продуктов местного производства. Даже в Веприне – населенном пункте, где молочный скот не был принудительно закуплен государством, а оставлен в личном пользовании жителей, – произошла деформация рациона питания населения. Не слишком изменившись вначале (снижение потребления молока в первой декаде мая 1986 г., по сравнению с доаварийным рационом составило всего около 7%), к 1987 г. потребление молока местного производства снизилось почти вдвое, а к 1990 г. упало в 6,5 раз, составив всего около 15% от первоначального, доаварийного уровня.

Таблица 2

Среднесуточное потребление основных продуктов питания взрослыми жителями н.п. Веприн до и после аварии на ЧАЭС по результатам проведенных опросов, кг/сут

Продукты питания	Источник поступления	Год (количество опрошенных жителей)				
		1985 (58)	1987 (58)	1990 (80)	1993 (53)	1996 (38)
Молоко и молочные продукты	Личное хозяйство	0,78±0,08	0,41±0,08	0,12±0,02	0,40±0,07	0,52±0,07
	Магазин	–	–	0,11±0,02	0,02±0,01	–
	Итого	0,78±0,08	0,41±0,08	0,23±0,03	0,42±0,07	0,52±0,07
Мясо и мясные продукты	Личное хозяйство	0,17±0,01	0,15±0,01	0,05±0,004	0,13±0,02	0,13±0,02
	Магазин	–	0,03±0,01	0,11±0,01	0,01±0,004	0,02±0,01
	Итого	0,17±0,01	0,18±0,01	0,16±0,01	0,14±0,02	0,15±0,02
Хлеб	Магазин	0,33±0,02	0,33±0,02	0,32±0,01	0,35±0,04	0,31±0,02
Картофель	Личное хозяйство	0,66±0,05	0,66±0,05	0,49±0,01	0,59±0,04	0,58±0,04
Овощи	Личное хозяйство	0,33±0,02	0,33±0,02	0,15±0,01	0,23±0,02	0,22±0,01
	Магазин	–	–	0,04±0,01	0,02±0,01	0,01±0,01
	Итого	0,33±0,02	0,33±0,02	0,19±0,01	0,25±0,02	0,23±0,01
Фрукты	Личное хозяйство	0,19±0,01	0,19±0,01	0,006±0,003	0,10±0,02	0,16±0,01
	Магазин	–	–	0,12±0,01	0,05±0,02	0,01±0,003
	Итого	0,19±0,01	0,19±0,01	0,13±0,01	0,15±0,03	0,17±0,01
Яйца	Личное хозяйство	0,075±0,01	0,064±0,01	0,013±0,01	0,051±0,007	0,036±0,005
	Магазин	–	–	–	0,005±0,003	–
	Итого	0,075±0,01	0,064±0,01	0,013±0,01	0,056±0,008	0,036±0,005
Рыба	Местные водоемы (река, озеро)	0,024±0,01	0,013±0,01	0,005±0,002	0,025±0,008	0,023±0,007
	Магазин (морская)	0,010±0,005	0,010±0,005	0,042±0,005	0,022±0,014	0,021±0,005
	Итого	0,034±0,011	0,023±0,011	0,047±0,005	0,047±0,016	0,044±0,009

При этом потребление молока из государственной торговой сети увеличилось, но даже суммарное количество потребляемого молока не достигло доаварийного уровня, составив от него всего около 30%. Распад СССР и изменения в экономической ситуации привели к тому, что продажа молока через государственную торговую сеть существенно сократилась, и население снова стало потреблять больше молока из личных подсобных хозяйств. Тем не менее, к 1996 г. потребление этого продукта так и не достигло доаварийного уровня, а составило лишь 65% от него (рис. 3).

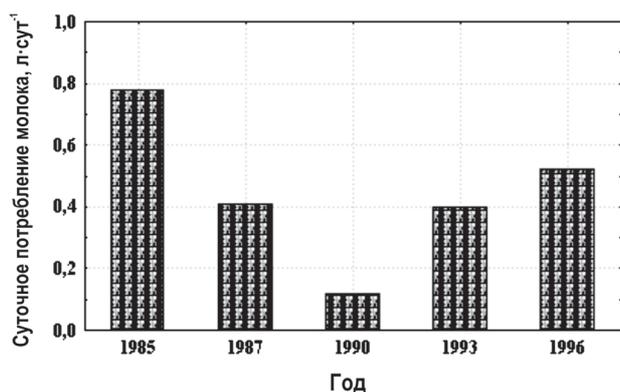


Рис. 3. Среднесуточное потребление молока из частных хозяйств взрослыми жителями н.п. Веприн до аварии на ЧАЭС и в первые годы после нее

В таблице 3 представлены численные значения среднесуточного поступления радионуклидов ¹³⁷Cs в организм взрослых жителей н.п. Веприн в различные годы после аварии на ЧАЭС, а также вклад в это поступление различных групп потребляемых продуктов.

Расчеты были сделаны на основе данных наших опросов о рационах питания местного населения и их изменениях, связанных с аварией, а также с использованием усредненных данных о загрязнении местных пищевых продуктов. Среднее потребление грибов населением,

полученное из наших предыдущих исследований [11, 12], составило 5 кг/год. Кроме того, были приняты следующие коэффициенты кулинарной обработки, отражающие потери радионуклида при приготовлении пищи: 0,8 – для овощей, 0,5 – для грибов и 1 (т.е. без потерь) – для остальных пищевых продуктов. Вкладом в поступление ¹³⁷Cs в организм с привозными пищевыми продуктами можно было пренебречь в силу их малой загрязненности [5, 11, 13].

Таким образом, анализ рационов питания позволяет сделать вывод: после аварии на ЧАЭС потребление молока и молочных продуктов из личных подсобных хозяйств жителями н.п. Веприн резко уменьшилось, деформировав при этом привычную структуру питания населения. Потребление мяса, яиц, рыбы осталось практически на прежнем уровне с небольшими вариациями, изменились лишь источники потребления. Это же относится и к растительным сельскохозяйственным продуктам.

Следует напомнить, что мероприятия по защите населения н.п. Веприн после аварии свелись, в основном, к разъяснительной работе: к рекомендациям о нежелательности употребления в пищу молока, молочных продуктов и мяса из личных хозяйств, к запрету на посещение лесов, сбора дикорастущих грибов и лесных ягод и ловли рыбы из местных водоемов. Правда, после отнесения н.п. Веприн в 1987 г. (на основании наших исследований) к контролируемой зоне в местный магазин стали завозить так называемые «чистые продукты» с территорий, не подвергшихся радиоактивному загрязнению, но распад Советского Союза и последовавшее за этим изменение экономической ситуации привели к тому, что население вынуждено было вернуться к потреблению продуктов местного происхождения, в том числе и даров природы.

Тем не менее, даже такие не очень жесткие ограничительные меры привели к уменьшению содержания радионуклидов цезия в организме взрослых жителей, которое было зафиксировано нашими многочисленными исследованиями и представлено на рисунке 4.

Таблица 3

Среднее суточное поступление ¹³⁷Cs в организм взрослых жителей н.п. Веприн в разные годы после аварии на ЧАЭС (Бк/сут) и вклад отдельных продуктов в суммарное поступление (%)

Группа продуктов	Продукт	1987	1990	1993	1996
Сельскохозяйственные животные	Молоко	1110 (70%)	175 (57%)	240 (62,8%)	166 (54,3%)
	Мясо	190 (12%)	33 (10,7%)	36 (9,4%)	35 (11,5%)
	Яйца	13 (0,82%)	1,1 (0,36%)	2,3 (0,6%)	0,8 (0,26%)
	Всего	1310 (83%)	209 (68%)	278(72,7%)	202 (66,1%)
Сельскохозяйственные растительные	Картофель	121 (7,7%)	24 (7,8%)	21 (5,5%)	21 (6,9%)
	Овощи	45 (2,8%)	5,3 (1,7%)	6,1 (1,6%)	5,8 (1,9%)
	Фрукты	6,7 (0,42%)	0,08 (0,03%)	1,3 (0,33%)	2,1 (0,69%)
	Всего	173 (11%)	29,4 (9,6%)	28,4(7,4%)	28,9 (9,5%)
Природные	Грибы	66 (4,2%)	66 (21,5%)	66 (17,3%)	66 (21,6%)
	Рыба	28 (1,8%)	2,5 (0,81%)	9,7 (2,5%)	8,9 (2,9%)
	Всего	94 (6,0%)	68,5 (22,3%)	75,7 (19,8%)	74,9 (24,5%)
Всего	-	1580	307	382	306

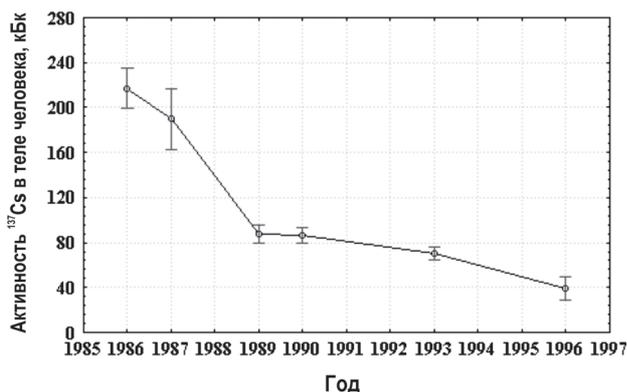


Рис. 4. Среднее содержание ^{137}Cs в организме взрослых жителей н.п. Веприн в разные годы после аварии на ЧАЭС

Кроме влияния перечисленных выше защитных мероприятий, на уменьшение содержания радионуклидов цезия в организме жителей, безусловно, влияло также и естественное очищение окружающей среды, представленное на рисунках 1, 2 и в таблице 1, несмотря на ослабление запретов и возвращение к традиционным источникам местных продуктов питания.

Нашей главной задачей было изучение путей формирования доз внутреннего облучения населения за счет алиментарного пути поступления радионуклидов цезия в организм жителей в разные периоды после аварии на ЧАЭС.

Представляет интерес сравнить дозовые оценки, полученные в результате использования разных вариантов расчета: по данным о радиоактивном загрязнении пищевых продуктов и структуре рационов питания жителей поселка в доаварийный период и после аварии, а также по данным СИЧ-измерений. Для примера рассмотрим 1987, 1990, 1993 и 1996 гг. Это сравнение выполним только для одного радионуклида – ^{137}Cs .

Следует отметить, анализируя данные таблицы 3, что колебания в потреблении различных продуктов питания, приведшие к уменьшению поступления ^{134}Cs и ^{137}Cs в организм связаны с одновременным уменьшением перехода этих радионуклидов в растительность. Потребление молока и молочных продуктов из личных хозяйств, например, снизилось с 70% в 1987 г. до 54% в 1996 г., но уменьшилось также и содержание радионуклидов в этих продуктах (см. рис. 1). В целом, в период 1987–1996 гг. вклад потребления сельскохозяйственных животных продуктов в поступление ^{137}Cs в организм сократился с 83% до 66%, сельскохозяйственных растительных продуктов – колебался в пределах 10%, а потребление даров природы выросло с 6% до 25%, в основном за счет увеличения потребления дикорастущих грибов – с 4% до 22%.

Проведенный нами анализ данных, полученных при обследовании 1987 г., выявил достоверную корреляцию между потреблением молока местного производства и содержанием радионуклидов цезия в организме обследуемых: R (коэффициент корреляции)=0,27, N (число обследованных)=58, $p=0,04$. Достоверной связи содержания радионуклидов в организме с потреблением грибов в этот период выявлено не было. Однако с течением

времени ситуация изменилась, и уже в 1996 г. корреляция оказалась достоверной: $R=0,37$, $N=38$, $p=0,05$. Достоверной же корреляции между потреблением местного молока и содержанием радионуклидов цезия в организме в 1996 г. установлено не было, несмотря на то, что потребление молока из личных подсобных хозяйств для данного села являлось по-прежнему основным дозобразующим фактором. Причиной этого противоречия, на наш взгляд, являлось применение ферроцина (Prussian Blue – берлинской лазури) в личных хозяйствах, что позволяло снизить уровни загрязнения молока ^{137}Cs в 5–10 раз [14].

Весьма наглядно сложившуюся ситуацию демонстрирует рисунок 5. На гистограмме показано распределение проб молока из частных хозяйств н.п. Веприн в 1994–1998 гг. Наличие двух пиков с отношением, в среднем равным 7, свидетельствует о двух отдельных процессах: высокие значения КП связаны с наличием торфяных и пойменных почв в ареале села, а низкие – с применением в хозяйствах Prussian Blue. Как указывалось выше, в ареале этого поселка преобладают торфяные и пойменные почвы с низкими коэффициентами фиксации ^{137}Cs .

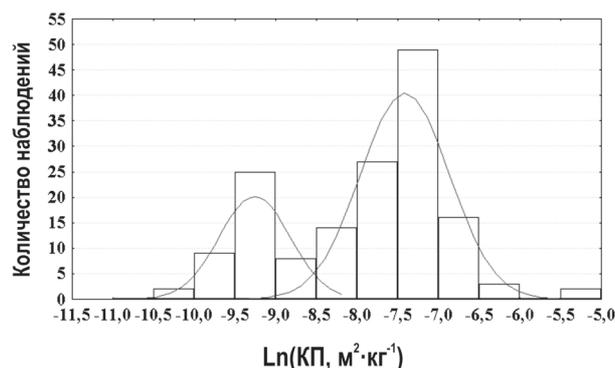


Рис. 5. Частотное распределение концентрации ^{137}Cs в молоке, произведенном в н.п. Веприн в 1994–1998 гг.

Используя данные таблицы 3 и результаты измерений содержания ^{137}Cs в организме жителей (см. рис. 4), мы оценили реальные и возможные (используя доаварийный рацион питания населения) средние годовые эффективные дозы внутреннего облучения ^{137}Cs для взрослых жителей н.п. Веприн (табл. 4).

Таблица 4

Реальные и возможные средние годовые эффективные дозы внутреннего облучения ^{137}Cs взрослых жителей н.п. Веприн, мЗв/год

Вариант оценки дозы	Год			
	1987	1990	1993	1996
По поступлению с доаварийным рационом	12,5	6,6	3,0	2,0
По поступлению с реальным рационом	7,5	1,5	1,8	1,5
По данным СИЧ-измерений	6,3	2,8	2,2	1,3
Кратность снижения дозы *	2,0	2,4	1,4	1,5

* – отношение расчетной оценки дозы по поступлению с доаварийным рационом к оценке по данным СИЧ-измерений.

Удовлетворительное совпадение результатов обоих вариантов расчета дозы указывает на правильность выбранной нами модели оценки, которую мы применяли для жителей, проживающих в зоне Чернобыльской аварии. Определенная недооценка расчетной дозы в 1990 г. связана, на наш взгляд, с опасениями жителей дать реальные данные о потреблении ими молока из личных хозяйств в связи со строгими запретами органов государственного санитарно-эпидемиологического надзора.

В целом, комплекс контрмер по снижению доз внутреннего облучения населения, проводившийся в данном населенном пункте, свелся, в основном, к замене местных мясных и молочных продуктов на привозные – «чистые», к запрету потребления натуральных продуктов (дикорастущих грибов, лесных ягод и рыбы из местных водоемов), а также внесению удобрений на личных приусадебных участках.

Для того, чтобы оценить эффективность этого комплекса защитных мероприятий, нужно сравнить возможную дозу в течение указанных лет, предполагая неизменным рацион с 1985 г., с дозой, которая рассчитана на основе СИЧ-измерений. Сравнение показало, что в 1987–1996 гг. доза внутреннего облучения жителей н.п. Веприн даже за счет этого малого комплекса защитных мероприятий была снижена в 1,4–2,4 раза.

Регулярные измерения содержания ^{137}Cs и ^{134}Cs в организме жителей н.п. Веприн в 1986–1996 гг. (см. рис. 4) позволили оценить эффективную дозу внутреннего облучения, накопленную за это время, в основном, по данным СИЧ-измерений. Дозы в течение тех лет, когда такие измерения не проводились, были определены на основании данных о поступлении радионуклидов с пищевыми продуктами. Формулы для расчета представлены в методическом разделе. Результаты расчетов представлены на рисунке 6.

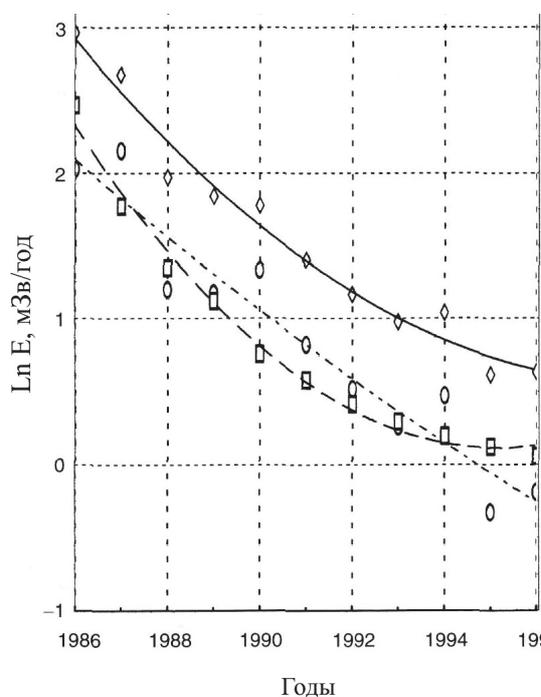


Рис. 6. Динамика изменения средних годовых эффективных доз (E) внутреннего (O), внешнего (□), суммарного (◇) облучения взрослых жителей н.п. Веприн

Таким образом, средняя эффективная доза внутреннего облучения, накопленная за 11 лет после аварии на Чернобыльской АЭС жителями Веприна от всех долгоживущих радионуклидов, составила 35 мЗв. За первый год после аварии доза составила около 10 мЗв (7,6 мЗв только за 1986 г.). Следует отметить, что если бы контрмеры не применялись, доза внутреннего облучения в течение 11 лет была бы в два раза выше (см. табл. 4), т.е. около 70 мЗв.

По данным В.Ю. Голикова [15], эффективная доза внешнего гамма-излучения взрослого населения в течение первого года после аварии составила 14 мЗв (в 1986 г. – 12 мЗв), а в течение всего периода 1986–1996 гг. – 34 мЗв.

Выводы

1. Рацион питания жителей н.п. Веприн был значительно деформирован в результате аварии на Чернобыльской АЭС из-за санитарных запретов на потребление местных пищевых продуктов, загрязненных радионуклидами. Даже спустя 11 лет после аварии потребление молока и молочных продуктов жителями деревни составило лишь 65% от доаварийного уровня.

2. Вклад сельскохозяйственных продуктов животного происхождения (молоко, мясо и т.д.) в дозу внутреннего облучения населения от радионуклидов цезия снизился с 83% в 1987 г. до 66% в 1996 г., вклад сельскохозяйственной продукции растительного происхождения остался на уровне около 10%, а вклад природных продуктов (дикорастущие грибы, рыба из местных водоемов и т.д.) вырос с 6% в 1987 г. до 25% в 1996 г. Эти закономерности подтверждены корреляцией индивидуального содержания радионуклидов цезия в организме жителей и потреблением ими молока и грибов.

3. Оценки дозы внутреннего облучения, сделанные на основе СИЧ-измерений, хорошо согласуются с оценками, сделанными на основе расчетов по поступлению радионуклидов цезия в организм жителей с пищевыми продуктами. Это указывает на хорошее качество проводимых нами опросов о рационах питания и их изменениях, обусловленных аварией, а также на правильность применяемой модели оценки доз внутреннего облучения.

4. Применение контрмер позволило снизить в среднем в два раза эффективную дозу внутреннего облучения у жителей н.п. Веприн в течение 11 лет после аварии. Доза внутреннего облучения, накопленная за 11 лет жителями Веприна от всех долгоживущих радионуклидов, составила 35 мЗв. В течение первого года после аварии доза составила около 10 мЗв. Если бы контрмеры не применялись, доза внутреннего облучения в течение 11 лет была бы в два раза выше – около 70 мЗв. Эффективная доза внешнего гамма-излучения взрослого населения за период 1986–1996 гг. составила 34 мЗв, включая 14 мЗв за первый год после аварии.

Литература

1. Travnikova, I.G. Contribution of different foodstuffs to the internal exposure of rural inhabitants in Russia after the Chernobyl accident / I.G. Travnikova [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 2001. – V. 93, № 4. – P. 331–339.
2. Roshdyromet. Data Bas of Density of Contamination of the Localities of the Russian Federation with Caesium-137, Strontium-90 and Plutonium-239,240 as for 1 January 1996.
3. Balonov, M.I. Long term exposure of the population of the Russian Federation as a consequence of the accident

- at the Chernobyl power plant / M.I. Balonov [et al.] // In Environmental Impact of Radioactive Releases. Vienna: IAEA. – 1995. – P. 397–411.
4. 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.
 5. 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.
 6. Bruk, G.Y. Dynamics of ^{137}Cs content in agricultural food products produced in regions of Russia contaminated after the Chernobyl accident / G.Y. Bruk [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 1998. – V. 76. – P. 169–178.
 7. Kaidanovsky, G.N. Calibration of radiometers for mass control of incorporated ^{131}I , ^{134}Cs and ^{137}Cs nuclides with the help of volunteers / G.N. Kaidanovsky, E.I. Dolgirev // Radiation Protection Dosimetry. – 1997. – V. 71, № 3. – P. 187–194.
 8. Kovtun, A.N. Metrological Parameters of the unified Calibration whole-body phantom with gamma-emitting radionuclides / A.N. Kovtun [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 2000. – V. 89 (3/4). – P. 239–242.
 9. ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. Ann. ICRP 23 (3/4) Publication 67. – Oxford: Pergamon, 1993.
 10. 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.
 11. Shutov, V.N. The role of mushrooms and berries in formation of internal exposure doses to the population of Russia after the Chernobyl accident / V.N. Shutov [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 1996. – V. 67, № 1. – P. 55–64.
 12. Skuterud, L. Contribution of fungi to radicaesium intake by rural population in Russia / L. Skuterud [et al.] // The Science of the Total Environment. – 1997. – V. 193. – P. 237–242.
 13. Pathway analysis and dose distribution. Report for JCP-5. EUR 1654 1EN. Luxembourg: EU. 1996.
 14. The Use of prussian blue to reduce radiocaesium contamination of milk and meat produced on territories affected by the Chernobyl accident. Report of UNP E11. – 1997. – P. 1–80.
 15. Jacob, P. Exposures from external radiation and from inhalation of resuspended material / P. Jacob [et al.] // The radiological consequences of the Chernobyl accident. Report EUR 16544 EN. – 1996. – P. 251–260.

I.G. Travnikova, G.Ya. Bruk, V.N. Shutov, A.B. Bazjukin

Contribution of different foodstuffs to the internal exposure of the rural inhabitants of the Bryansk region in Russia after the Chernobyl accident

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Saint-Petersburg

Abstract. In a large village Veprin of the Bryansk region of Russia contaminated with radionuclides as a result of the Chernobyl accident, ^{137}Cs concentration in food products of agricultural produce and natural origin was regularly measured, local inhabitants were polled on the composition of their food ration, and ^{137}Cs content in their bodies was at the same time measured. These results were used as the basis for calculation of annual effective doses of internal exposure to inhabitants and for reconstruction of the dose during the entire period after the accident. It will be divided into two stages: 1986–1996 yy and 1997–2012 yy.

In this paper devoted to the first period (1986–1996), internal dose was reconstructed for 11 years after the accident, and the efficiency of countermeasures performed for reduction of the internal dose was assessed. The internal dose to inhabitants during the past 11 years after the accident was shown to be reduced almost twice, namely down to 35 mSv instead of the expected 70 mSv. The dose of external gamma radiation during the same time period is close to the obtained dose of internal exposure. The presence of peat and water-meadow soils in the vicinity of this village that are characterised by high transfer factors for radionuclides from soil to vegetation causes high contribution of internal exposure in the total dose of population exposure. Contribution of natural products to the internal dose grew from 6% in 1987 up to 25% in 1996. Individual content of ^{137}Cs in the body of inhabitants reliably correlates with the consumption of milk in the early period after the accident and with consumption of forest mushrooms in the remote period.

Key words: the Chernobyl accident, population, survey, receipt, content in the body, the dose of internal exposure, zone of the contamination, caesium radionuclides, countermeasures an assessment of the effectiveness of protective measures carried out in the locality.

И.Г. Травникова
Тел.: (812)-233-53-63
E-mail: i_trav@mail.ru

Поступила 23.04.2013 г.