

Модель оценки средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей населенных пунктов зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа

О.С. Кравцова

ФГУН «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

Проанализированы результаты радиационно-гигиенических обследований населенных пунктов, расположенных на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, образованного в результате аварии 1957 года на ПО "Маяк". Проведено стохастическое моделирование дозы внутреннего облучения жителей 4-х населенных пунктов, обусловленной потреблением сельскохозяйственных пищевых продуктов местного производства. Предложена модель для прогнозной оценки средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей населенных пунктов зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, ВУРС, население, дозы, критическая группа, ^{90}Sr , ^{137}Cs .

Введение

В радиационной защите окружающей среды и человека, базирующейся на принципах, разработанных Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ), важное место занимает концепция «критической группы». Если доза для критической группы будет ниже пределов и ограничений, то из этого следует, что другие представители населения получают более низкие дозы.

В восстановительный период широкомасштабной радиационной аварии для определения критической группы необходимо проведение широкомасштабных инструментальных исследований. Таким образом, напрямую выделяют конкретных, наиболее облучаемых представителей населения. Для экономии финансовых и временных ресурсов разрабатываются модели, позволяющие выделить гипотетическую группу населения. Для некоторой комбинации концентраций радионуклидов и характеристик поведенческих привычек населения расчетные дозы такой группы будут самыми высокими. Такая группа и будет являться критической.

В Рекомендациях МКРЗ (Публикация 101 и 103) [1] вводится понятие «репрезентативный индивидуум» ("the representative individual"), которое характеризует наиболее облучаемых представителей населения и является эквивалентом (и заменой) понятия «средний представитель критической группы», предложенного в предыдущих рекомендациях МКРЗ. «Репрезентативный индивидуум» может относиться как к конкретному человеку, так и к гипотетически определенному. В случае оценки доз облучения гипотетических представителей населения МКРЗ рекомендует определить «репрезентативного индивидуума» таким образом, чтобы вероятность того, что любой представитель населения получает дозу облучения выше дозы облучения «репрезентативного человека», была менее 5%.

В настоящее время на территории Российской Федерации имеется несколько зон, загрязненных в результате радиационных аварий на предприятиях ядерно-топливного цикла. Одной из наиболее значительных является терри-

тория Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), образованная в результате взрыва емкости с радиоактивными отходами на ПО «Маяк» 29 сентября 1957 г. По оценкам специалистов, суммарная активность выброса составила $2 \cdot 10^7$ Ки [2]. Общая площадь территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению, составила 23 тыс. км². По международной классификации, авария 1957 г. относится к тяжелым (класс 6), последствия которых проявляются в региональном масштабе и требуют осуществления мер защиты здоровья населения.

На современном (восстановительном) этапе радиационной аварии для оценки средней годовой эффективной дозы облучения (СГЭД), обусловленной техногенными источниками, значимыми радионуклидами являются ^{90}Sr и ^{137}Cs . При этом наибольший вклад в дозу дает внутреннее облучение [3].

Основной целью настоящего исследования является разработка модели оценки СГЭД внутреннего облучения критических групп жителей населенных пунктов зоны ВУРС от инкорпорированных радионуклидов (^{90}Sr или ^{137}Cs) за счет потребления сельскохозяйственных продуктов местного производства. Для достижения этой цели исследуется соотношение средней годовой дозы облучения критической группы населения и средней годовой дозы облучения населения в целом. Такой подход позволит прогнозировать уровни облучения представителей критической группы (по внутреннему облучению).

Материалы и методы исследования

Рассматриваемая когорта относится к жителям сельских населенных пунктов, расположенных на территории ВУРС. Основным источником внутреннего облучения для этих жителей является потребление сельскохозяйственных пищевых продуктов, произведенных в личных подсобных хозяйствах. Исследовались дозы облучения жителей 4 населенных пунктов: Багаряк, Татарская Карболка, Красный Партизан, Сарыкульмяк Челябинской области. Территории практически всех этих населенных

пунктов (НП), помимо радиационного воздействия аварии 1957 г., также подверглись воздействию ветрового переноса твердых радиоактивных отходов с берегов озера Карачай в 1967 г. (по современным данным, суммарный запас ^{90}Sr от этого радиационного инцидента составлял 800 Ки, а ^{137}Cs – 2 360 Ки [5]). Все населенные пункты в настоящее время подвержены влиянию действующего предприятия – ПО «Маяк». Численность населения каждого из рассматриваемых населенных пунктов не превышает 2000 человек.

Для анализа использовались данные радиационно-гигиенических обследований, проводимых санитарной службой Челябинской области, и данные выборочных обследований, проводимых Санкт-Петербургским НИИ радиационной гигиены. Сформированный банк данных содержит информацию об уровнях концентраций радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в пищевых продуктах. Были выделены категории сельскохозяйственных пищевых продуктов, характерных для этой территории и оказывающих наибольшее влияние на формирование дозы внутреннего облучения: молоко, мясо домашнего скота (говядина, свинина, конина), картофель, овощи-корнеплоды (свекла, морковь), зеленые листовые овощи (укроп, лук-перо), другие овощные культуры (капуста, огурцы, томаты, кабачки). Для получения наиболее полной информации об уровнях загрязнения этих пищевых продуктов взяты данные за 8-летний период (2000–2007 годы). Объем выборки значений удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs в сельскохозяйственных продуктах по 4 населенным пунктам составил 3657 исследований. Большая часть (~3100) исследований приходится на молоко и картофель. Все исследования выполнены радиохимическим методом [6]. Отбор и подготовка проб пищевых продуктов осуществлялись в соответствии с методическими указаниями [7].

Потребление сельскохозяйственных пищевых продуктов оценивалось методом анкетных опросов местных жителей, полученных в 1993 году санитарной службой и в 2004–2005 годах Институтом радиационной гигиены. Форма анкетных опросов была построена таким образом, чтобы учитывать потребление пищевых продуктов, производимых в пределах населенного пункта и его ареала землепользования. Для огородных культур оценивался урожай, получаемый в личном подсобном хозяйстве. Анкетированием в целом был охвачен рацион приблизительно 920 местных жителей. Рационы питания жителей были оценены для следующих возрастных категорий: дети, подростки, взрослые.

Оценка текущих (средних годовых) эффективных доз внутреннего облучения проводилась по поступлению радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs с пищевыми продуктами местного производства (1):

$$E^{\text{int}} = 365 \cdot \sum_i d_i \cdot \sum_j C_{ji} \cdot V_j \cdot K_j, \quad (1)$$

где i – радионуклид, d_i – соответствующий дозовый коэффициент для возрастной категории (Публикация 72 МКРЗ [8]), j – пищевой продукт, C_{ji} – концентрация радионуклида в пищевом продукте, V_j – суточное потребление, K_j – коэффициент кулинарной обработки [9].

Для определения соотношения СГЭД представителей критической группы населения и СГЭД всех жителей населенного пункта было решено применить стохастичес-

кое (вероятностное) моделирование. Прогнозирование вероятных уровней доз облучения жителей рассматриваемых населенных пунктов проводилось методом Монте-Карло (пакет Crystal Ball) на основе характеристик распределения концентраций радионуклидов в пищевых продуктах и характеристик потребления этих пищевых продуктов. Параметр испытаний (проходов) модели принят равным 10 000, доверительный уровень – 95%.

Моделируемая доза облучения E_M^{int} , в соответствии с (1), зависит от параметров распределения f_1 удельной активности A_{ji} радионуклидов в пищевых продуктах и параметров распределения потребления пищевых продуктов f_2 . Характер распределения f_1 оценивался статистическими методами. Поскольку количественная характеристика потребления является конечной положительной величиной, форма распределения f_2 была принята как «треугольная» с минимальным (min), средним (mean) и максимальным (max) значениями.

Критерием определения средней дозы облучения представителей критической группы $E_{M \text{ крит.средн.}}^{\text{int}}$, основываясь на рекомендациях МКРЗ [1], был принят 95-процентный квантиль в распределении E_M^{int} .

Соотношение $K_{\text{крит.}}$ средней дозы облучения для критической группы и средней дозы облучения для всех жителей населенного пункта $E_{M \text{ н.п.средн.}}^{\text{int}}$ определяется по выражению (2):

$$K_{\text{крит.}} = E_{M \text{ крит.средн.}}^{\text{int}} / E_{M \text{ н.п.средн.}}^{\text{int}}. \quad (2)$$

Таким образом, для прогнозирования уровней СГЭД внутреннего облучения от инкорпорированного радионуклида (^{90}Sr или ^{137}Cs) критической группы жителей населенного пункта, расположенного на территории неотселенной части ВУРС, за счет потребления сельскохозяйственных пищевых продуктов местного производства можно воспользоваться следующим выражением (3):

$$E_{\text{крит.средн.}}^{\text{int}} = K_{\text{крит.}} \cdot E_{\text{н.п.средн.}}^{\text{int}}, \quad (3)$$

Оценка численного значения параметра проводилась в отдельности для радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs для каждой рассматриваемой возрастной категории.

Результаты и обсуждение

Результаты радиационно-гигиенического обследования населенных пунктов, расположенных на территории ВУРС, представлены в табл.1–2.

Анализ уровней содержания радионуклидов в молоке, отобранном в частном секторе за 2000–2007 гг., свидетельствует об использовании территории санитарно-охранной зоны ВУРС населением с целью выпаса молочного скота и заготовления кормов. Максимальное значение концентрации ^{90}Sr в молоке, отобранном в населенном пункте Татарская Караболка, свидетельствует о превышении действующего санитарного норматива – 25 Бк/кг [10]. Превышений норматива на содержание ^{137}Cs отмечено не было.

Уровни концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в пробах картофеля в населенных пунктах невысокие и нормативы не превышают. Наиболее высокие значения концентрации ^{90}Sr были обнаружены в картофеле с. Татарская Караболка.

В мясопродуктах, произведенных на исследуемых территориях, содержание радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr значительно ниже действующих нормативов.

Наиболее загрязненными сельскохозяйственными пищевыми продуктами являются овощные культуры. Практически во всех населенных пунктах присутствует превышение действующего норматива по ^{90}Sr . Так, в населенном пункте Багаряк отмечено превышение допустимого уровня по ^{90}Sr почти в 14 раз (в пробе капусты). Это объясняется присутствием на территории этих населенных пунктов «вторичного загрязнения» почвы приусадебных хозяйств ^{90}Sr [11]. При этом в пределах одного населенного пункта значения плотности загрязнения ^{90}Sr почвы приусадебных хозяйств могут варьировать, к примеру, от 0,8 Ки/км² до 18 Ки/км² (с. Татарская Караболка).

Оценка параметров, характеризующих рационы питания, проводилась для 3 возрастных категорий по тем же категориям продуктов, что и оценка параметров распределений концентраций радионуклидов. Анализ рациона питания показал различие уровней потребления одних и тех же пищевых продуктов среди возрастных категорий жителей разных населенных пунктов, что объясняется различным социально-экономическим благополучием НП, национальными традициями и личными предпочтениями опрошенных жителей. Тем не менее в среднем показатели потребления по исследуемым группам пищевых продуктов были относительно сходны.

Рис. 1 иллюстрирует структуру потребления пищевых продуктов местного производства подростками.

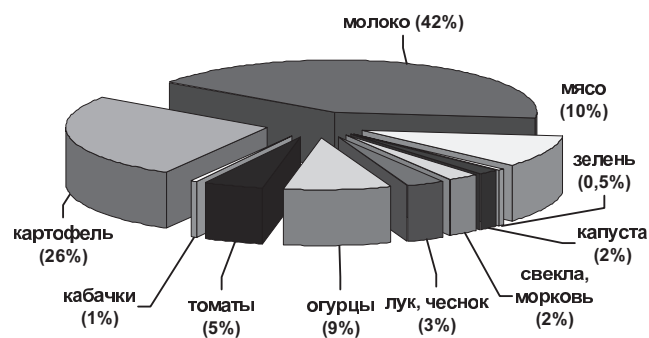


Рис. 1. Структура потребления пищевых продуктов местного производства подростками

Для определения характеристик распределений удельной активности в пробах f_1 были оценены статистические параметры и для наглядности построены вероятностные графики. Анализ показал, что большинство распределений имеют логарифмический характер (рис. 2).

Для всех рассматриваемых населенных пунктов было проведено стохастическое моделирование дозы облучения E_M^{int} и определены $K_{\text{крит.}}$ (2). На рис. 3 приведен пример результата моделирования СГЭД внутреннего облучения для жителей НП Татарская Караболка.

Рассчитанные отношения средней дозы облучения для критической группы к средней дозе облучения для всех жителей населенного пункта представлены в таблице 3.

Таблица 1

Удельная активность ^{90}Sr в пищевых продуктах местного производства (населенные пункты зоны ВУРС), Бк/кг

Группа пищевых продуктов	Багаряк		Красный Партизан		Сарыкульмяк		Татарская Караболка		СанПиН [10] Д.У.
	Средн. ± ст.ош.	Макс.	Средн. ± ст.ош.	Макс.	Средн. ± ст.ош.	Макс.	Средн. ± ст.ош.	Макс.	
картофель	1,33 ± 0,13 (110)	6,2	1,23 ± 0,15 (57)	4,9	0,61 ± 0,08 (11)	1,2	2,3 ± 0,24 (164)	25	40
молоко	1,48 ± 0,08 (622)	16	0,68 ± 0,10 (157)	15	1,08 ± 0,08 (56)	3,8	2,5 ± 0,31 (383)	56	25
мясопродукты	0,25 ± 0,21 (22)	0,7	0,50 ± 0,14 (10)	1,6	0,09 ± 0,01 (6)	0,1	0,1 ± 0,1 (6)	32	50
овощи	44 ± 16 (43)	544	21,4 ± 9,4 (17)	144	82 ± 34 (5)	173	46 ± 19 (13)	191	40
овощи (зелень)	132 ± 26 (28)	451	30 ± 9,4 (18)	182	70 ± 14 (10)	164	100 ± 23 (18)	339	40
овощи (корнеплоды)	7,4 ± 1,3 (46)	40	2,2 ± 0,3 (28)	10	1,9 ± 0,2 (2)	2,1	6,8 ± 1,7 (33)	44	40

Таблица 2

Удельная активность ^{137}Cs в пищевых продуктах местного производства (населенные пункты зоны ВУРС), Бк/кг

Группа пищевых продуктов	Багаряк		Красный Партизан		Сарыкульмяк		Татарская Караболка		СанПиН [10] Д.У.
	Средн. ± ст.ош.	Макс.	Средн. ± ст.ош.	Макс.	Средн. ± ст.ош.	Макс.	Средн. ± ст.ош.	Макс.	
картофель	1,6 ± 0,44 (105)	26	0,76 ± 0,18 (55)	5,1	0,92 ± 0,21 (2)	1,1	1,4 ± 0,32 (157)	31	120
молоко	0,83 ± 0,06 (609)	22	1,8 ± 0,35 (143)	30	7,7 ± 1,2 (53)	32	1,8 ± 0,17 (381)	40	100
мясопродукты	2,1 ± 3,1 (24)	10	1,9 ± 0,96 (10)	7,6	0,74 ± 0,33 (3)	1,1	1,2 ± 0,48 (6)	3,3	160
овощи	4,4 ± 1,9 (38)	49	1,4 ± 0,55 (16)	7,7	21 ± 17 (5)	92	6,6 ± 3,1 (9)	29	120
овощи (зелень)	24 ± 6,2 (28)	107	1,8 ± 0,38 (17)	5,3	7,9 ± 2,5 (10)	24	8,1 ± 2,9 (17)	47	120
овощи (корнеплоды)	1,6 ± 0,73 (43)	27	0,26 ± 0,05 (22)	0,99	0,36 ± 0,07 (2)	0,43	1,3 ± 0,22 (29)	3,8	120

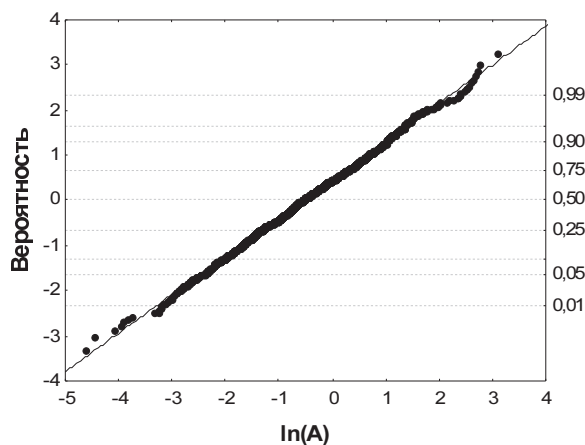
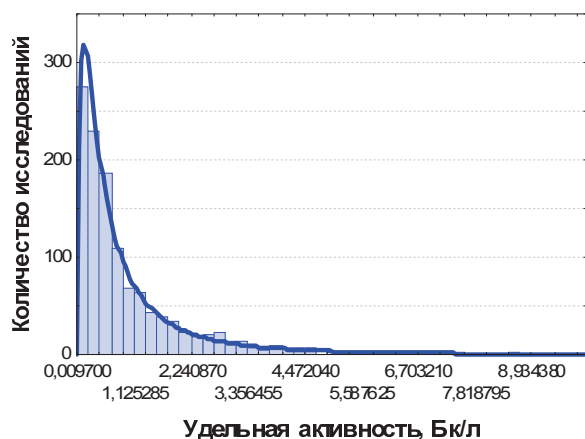


Рис. 2. Частотное распределение удельной активности (A) ⁹⁰Sr в пробах молока НП Багаряк

Таблица 3

Отношения для 3 возрастных категорий жителей исследуемых населенных пунктов

Населенный пункт	¹³⁷ Cs				⁹⁰ Sr			
	дети	подростки	взрослые	сред.	дети	подростки	взрослые	сред.
Багаряк	4,1	4,1	4,1	4,1	3,3	3,6	3,8	3,4
Кр. Партизан	4,3	4,7	4,2	4,3	3,0	3,3	3,4	3,1
Сарыкульмяк	3,9	4,2	3,8	4,0	1,9	2,1	2,3	2,0
Тат. Караболка	4,0	4,2	4,0	4,0	3,6	3,3	3,4	3,6
Среднее значение	–	–	–	4,1	–	–	–	3,0

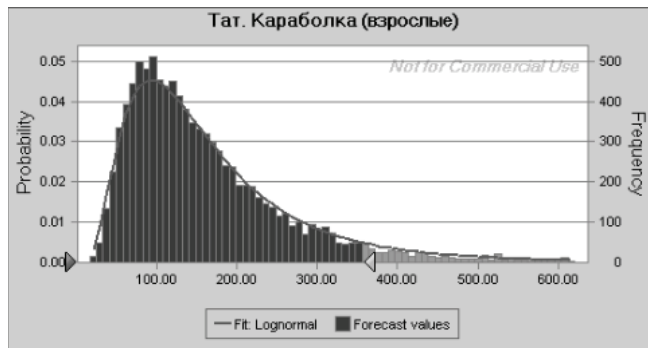


Рис. 3. Результаты стохастического моделирования дозы внутреннего облучения взрослых жителей НП Татарская Караболка

При сравнении между собой групповых значений $K_{крит.}$ в пределах одного населенного пункта не выявлено существенных статистически значимых различий, что позволяет объединить эти группы и определить как среднее значение $K_{крит.}$.

Анализируя результаты оценки значения $K_{крит.}$, можно отметить, что населенные пункты, расположенные по периметру неотселенной части ВУРС, имеют самые высокие значения $K_{крит.}$ для ⁹⁰Sr (НП Багаряк, Красный Партизан, Татарская Караболка). НП Татарская Караболка и Багаряк имеют самые высокие значения $K_{крит.}$, что косвенно указывает на значительную неравномерность поверхностного загрязнения территории населенных пунктов, подтверждая присутствие вторичного загрязнения приусадебных участков ⁹⁰Sr.

Таким образом, можно предположить, что для прогнозной оценки СГЭД внутреннего облучения критических групп населения за счет инкорпорированных радионуклидов ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs значения, характеризующие отношение средней дозы облучения критической группы к средней дозе облучения всех жителей населенного пункта, следует принять для ¹³⁷Cs равным 4, а для ⁹⁰Sr – равным 3:

$$E_{137крит.гр.}^{int} = 4 \cdot E_{137н.п.средн.}^{int}, \quad (4)$$

$$E_{90крит.гр.}^{int} = 3 \cdot E_{90н.п.средн.}^{int}, \quad (5)$$

Заключение

Принимая во внимание, что после аварии прошло уже более 50 лет, коэффициент 3 для ⁹⁰Sr указывает на большую неравномерность загрязнения, присутствующую в настоящее время. Если учесть, что на этой территории уровни загрязнения ¹³⁷Cs как объектов окружающей среды, так и пищевых продуктов относительно низкие, а средние уровни загрязнения ⁹⁰Sr в некоторых случаях превышают гигиенические нормативы, следует отметить, что на этой территории уровни доз облучения критических групп населения могут быть на грани допустимых. В первую очередь это относится к подросткам, поскольку эта возрастная категория жителей имеет наибольший дозовый коэффициент по ⁹⁰Sr.

Предложенный подход к прогнозной оценке СГЭД критической группы населения зоны ВУРС, выполненной по результатам современных радиационно-гигиенических обследований, позволит выявить населенные пункты, в

которых критическая группа жителей имеет, возможно, превышение действующего норматива – 1 мЗв/год [12]. В таких населенных пунктах для уточнения СГЭД жителей необходимо проводить углубленные выборочные обследования, которые позволят оценить реальные дозы облучения критической группы населения.

Список использованной литературы

1. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and the Optimisation of Radiological Protection [Текст]: ICRP Publication 101 // Health Physics. The Radiation Safety Journal. 94(4):373-374, April 2008.
2. Романов, Г.Н. Авария 1957 года в ряду мировых ядерных катастроф: ее место и значение [Текст]: Проблемы радиационной и социальной защиты населения, проживающего на неотселенной территории ВУРСа /Г.Н. Романов //Областной экологический альманах: спецвыпуск. Челябинск, 2007.
3. Кравцова, Э.М. Сборник радиационно-гигиенических паспортов административных территорий, входящих в зону радиоактивного загрязнения Челябинской области /Э.М. Кравцова – Челябинск: издатель Татьяна Лурье, 2001 – 364 с.
4. Методические указания (МУ 2.6.1.016-93) [Текст]: «Определение годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии в 1957 г. на производственном объединении «Маяк» и сбросов радиоактивных отходов в реку Теча»: утв. 27.12.1993. – М., 1993.
5. Челябинская область: ликвидация последствий радиационных аварий [Текст]/Под ред. проф. А.В. Аклеева/ – Челябинск, 2005 – 340 с.
6. Методические указания по методам контроля (МУК 2.6.1.717-98) [Текст]: «Радиационный контроль стронция-90 и цезия-137. Пищевые продукты. Отбор проб, анализ и гигиеническая оценка»: утв.08.10.1998 – М., 1998.
7. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды [Текст]/ под ред. А.Н.Марья: утв. 03.12.1979 . – М., 1980.
8. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5 Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients [Текст]: ICRP Publication 72 // Annals of ICRP.-1996.-V 26 (1), Pergamon Press, Oxford.
9. Шутов, В.Н. Защита от радиации [Текст]: Научно-популярное пособие по основам радиационной безопасности населения /В.Н. Шутов [и др.]/ -СПб, 2006 – 80 с.
10. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов [Текст]: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: (СанПиН 2.3.2.1078-01): утв. 14.1.2001. – Взамен СанПиН 2.3.2.560-96. – М.: Минздрав России, 2002 – 168 с.
11. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2004 год [Текст] – М., 2005. Росгидромет, с.129–132.
12. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) [Текст] (: Гигиенические нормативы: (СП 2.6.1.758-99): утв. 02.07.1999 – Взамен НРБ-96. – М. Минздрав России, 1999. – 116 с.

O.S. Kravtsova

The model for evaluation of average annual effective exposure doses of critical groups of Eastern Urals radioactive trace zone population.

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. The article shows the results of radiation hygienic survey of settlements located in the area of Eastern Urals radioactive trace generated after the accident at Production Association “Mayak” in 1957. It presents stochastic simulation of the internal exposure doses of the inhabitants of 4 settlements caused by local agricultural food products consumption. The article also offers the model for predictive evaluation of average annual effective exposure doses of the critical groups of Eastern-Urals radioactive trace zone population.

Key words: radioactive contamination, Eastern-Urals radioactive trace, population, doses, critical group, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs.

Поступила 4.08.08.