

Критерии защиты населения после радиационной аварии: использование радиационного риска для анализа и принятия оптимальных решений по ограничению потребления пищевых продуктов, загрязненных техногенными радионуклидами

В.С. Репин, Л.В. Репин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Целью данной работы является оценка соответствия критерия А, принятого в НРБ-99/2009 в качестве аварийного уровня вмешательства по дозе, допустимым значениям удельной активности ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{131}I в пищевых продуктах в первый год после аварии. Оценки выполнены на основе сопоставления коэффициентов консервативности по дозе и величине риска. Результаты оценки показали, что в равной мере консервативными являются оценки доз и рисков для ^{137}Cs и ^{90}Sr , рассчитанных на основе взвешивания по численности возрастных групп. Для ^{131}I коэффициенты консервативности по дозе и риску существенно отличаются, что свидетельствует о нецелесообразности использования эффективной дозы для оптимизации радиационной защиты в отношении данного радионуклида. Коэффициенты отношения средневзвешенных по численности отдельных возрастных групп значений риска к средневзвешенным значениям эффективных доз для ^{137}Cs и ^{90}Sr близки к номинальному коэффициенту риска смерти от злокачественных новообразований для населения $5 \cdot 10^{-5}$, что подтверждает то, что номинальные коэффициенты риска могут использоваться только для населения в целом. Предложены два варианта критериев оптимизации радиационной защиты населения: 1) по величине средневзвешенного по численности отдельных возрастных групп значению эффективной дозы или 2) по величине средневзвешенного по численности отдельных возрастных групп риска. Показано, что для оптимизации защиты отдельных возрастных групп более предпочтительным критерием является величина риска, рассчитанная для данной возрастной группы, поскольку максимальная эффективная доза некоторой возрастной группы не всегда соответствует максимальному риску.

Ключевые слова: пищевые продукты, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I , удельная активность, доза, риск, критерии вмешательства.

Введение

Основой принятия решений по защите населения при загрязнении пищевых продуктов техногенными радионуклидами являются уровни вмешательства, регламентированные в НРБ-99/2009¹ (таблицы 6.4, 6.5). Критерии для первого года после аварии, согласно НРБ-99/2009, включают как прогнозируемые дозы облучения, предотвращаемые защитным мероприятием, так и уровни загрязнения пищевых продуктов. В работе [1] было показано, что дозы облучения в различных возрастных группах зависят не

только от соответствующих дозовых коэффициентов, но и от массы продуктов, потребляемых в течение года. При этом, как показали расчеты, удельные активности ^{137}Cs – 1000 Бк/кг и ^{90}Sr – 100 Бк/кг в молоке, как правило, одного из наиболее употребляемых населением продуктов, не приводят ни в одной возрастной группе к превышению дозы 5 мЗв/год (уровень вмешательства А) при круглогодичном его потреблении.

Наряду с оценкой прогнозируемых доз облучения населения, принятие временных допустимых уровней загрязнения пищевых продуктов сопровождается оценкой

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

[Norms of the radiation safety (NRB 99/2009): Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Moscow, Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009, 100 p.]

Репин Виктор Степанович

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

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

отдаленных последствий потребления таких продуктов для здоровья. В настоящее время для прогноза отдаленных последствий все чаще используют специальные модели риска [2–4].

Осторожность, которую следует проявлять при использовании номинального коэффициента риска для оценки отдаленных последствий, многократно подчеркивается в 103 публикации МКРЗ [5]. Основная причина такого настороженного отношения кроется в понятии номинального коэффициента, который создан и рассчитан для композитной (смешанной) популяции с целью обоснования единых общемировых пределов доз для персонала и населения, и использование его для конкретной популяции или отдельной возрастной группы является некорректным. Аналогичное предостережение высказано в [6] в отношении применения коэффициента ущерба в области малых доз применительно к российской популяции.

Ряд исследователей в последнее время задаются вопросом, является ли эффективная доза в системе радиационной защиты величиной, гарантирующей защиту на уровне приемлемого риска в различных ситуациях облучения и особенно при внутреннем облучении [7].

Риск-анализ в системе радиационной защиты в последние годы находит все большее распространение, как в научных публикациях [8–13], так и в методических документах². Современные модели риска [2–4] позволяют оценивать показатели риска отдаленных последствий при облучении в любом возрасте для популяций с конкретными демографическими показателями и показателями заболеваемости и смертности.

Цель исследования – оценить соответствие аварийных уровней вмешательства по дозе внутреннего облучения, принятой в НРБ-99/2009 для критерия А (5 мЗв), и допустимых уровней удельной активности ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ¹³¹I в пищевых продуктах в первый год после аварии путем сопоставления подходов, основанных на величине дозы и величине риска.

Материалы и методы

В соответствии с целью сравнение двух подходов по оценке степени консервативности радиационной защиты выполнено для трех радиологически значимых радионуклидов: ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ¹³¹I. Данные радионуклиды различаются по метаболическим свойствам и периодам полураспада.

Подход, основанный на величине эффективной дозы

В таблице 1 приведены дозовые коэффициенты k_d на 1 Бк поступления радионуклида в организм, приведен-

ные в публикациях МКРЗ [14–16] и в основных стандартах безопасности МАГАТЭ [17].

Таблица 1
Дозовые коэффициенты k_d для ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ¹³¹I (Зв/Бк)
[Table 1
Dose coefficients, k_d , for ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr and ¹³¹I (Sv/Bq)]

Возраст, лет [Age, year]	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³¹ I
1	1,2×10 ⁻⁸	7,3×10 ⁻⁸	1,8×10 ⁻⁷
5	9,6×10 ⁻⁹	4,7×10 ⁻⁸	1,0×10 ⁻⁷
10	1,0 ×10 ⁻⁸	6,0×10 ⁻⁸	5,2×10 ⁻⁸
15	1,3×10 ⁻⁸	8,0×10 ⁻⁸	3,4×10 ⁻⁸
Взрослые (>19) [Adult (>19)]	1,3×10 ⁻⁸	2,8×10 ⁻⁸	2,2×10 ⁻⁸

Из таблицы 1 видно, что наибольшие значения дозовых коэффициентов выбранных радионуклидов относятся к лицам разного возраста: 20 лет и старше для ¹³⁷Cs, 15 лет для ⁹⁰Sr и 1 год для ¹³¹I.

Доза облучения за счет потребления лицами k -го возраста j -го пищевого продукта, загрязненного i -м радионуклидом, рассчитывалась по формуле:

$$D_{ijk} = C_{ij} \cdot k_{dik} \cdot m_{jk} \cdot t, (1)$$

где C_{ij} – удельная активность i -го радионуклида в j -ом пищевом продукте, принятые равными 1000 Бк/кг для всех трех радионуклидов в соответствии с таблицей 6.5 НРБ-99/2009 для уровня А;

k_{dik} – дозовый коэффициент на 1 Бк поступления радионуклида с пищей (см. табл. 1), Зв/Бк;

m_{jk} – средняя масса потребления лицами k -го возраста j -го пищевого продукта, кг/сут (числовые значения представлены в работе [1]);

t – длительность потребления загрязненного пищевого продукта, сут (для ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr принята равной 365 сут, для ¹³¹I – 30 сут);

Коэффициент консервативности дозового подхода для k -й возрастной группы оценивался следующим образом:

$$K_k^D = \frac{D_A}{D_{ijk}}, (2)$$

где D_A принята равной 5 мЗв/год в соответствии с критерием А принятия решений об ограничении потребления пищевых продуктов (таблица 6.4 НРБ-99/2009).

Кроме доз, в отдельных возрастных группах нередко используется средневзвешенная по численности отдельных возрастных групп величина эффективной дозы:

² Классификация пищевой продукции, обращаемой на рынке, по риску причинения вреда здоровью и имущественных потерь потребителей для организации плановых контрольно-надзорных мероприятий: Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2016. 38 с.

[Classification of the market available food products by the risk of the harm to the health and property losses of the consumers for the development of the planned control and surveillance actions. Methodical guidelines. Moscow. Federal center of hygiene and epidemiology of Rosпотребнадзор, 2016, 38 p.]

МУ 2.1.10.3014-12. Оценка радиационного риска у населения за счёт длительного равномерного техногенного облучения в малых дозах. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2012

[MU 2.1.10.3014-12. Assessment of radiation risks of the public due to the long-term uniform man-made exposure in low doses. Moscow, Federal service on consumer rights protection and human well-being, 2012]

$$D_{ij\text{нас}} = \sum_k D_{ijk} \times P_k, \quad (3)$$

где P_k – доля населения k -й возрастной группы в общей численности населения, а

$$\sum_k P_k = 1.$$

В этом случае степень консервативности оценивается путем подстановки величины $D_{\text{нас}}$ в знаменатель формулы 2.

Подход, основанный на величине риска

Риск злокачественных новообразований от потребления пищевых продуктов с повышенным содержанием техногенных радионуклидов связан с облучением желудочно-кишечного тракта, а также других органов и тканей после всасывания радионуклида в кровь. Распределение радионуклида по органам и тканям, уровни накопления и дозы облучения отдельных органов определяются его метаболическими свойствами. При неравномерном распределении радионуклида поглощенные дозы в отдельных органах могут отличаться в десятки и сотни раз.

Период, в течение которого происходит формирование дозы внутреннего облучения от поступившего радионуклида, может завершиться в течение короткого промежутка времени (недели, месяцы) или продолжаться в течение всей предстоящей жизни с момента поступления. Вероятность негативных последствий для здоровья при равной дозе, как правило, тем выше, чем в более раннем возрасте завершилось формирование полной дозы.

Приемлемые значения пожизненного риска, установленные в НРБ-99/2009 для условий нормальной эксплуатации источников ионизирующих излучений, приняты равными $1,0 \times 10^{-3}$ для персонала и $5,0 \times 10^{-5}$ для населения, а уровень пренебрежимо малого риска принят равным $1,0 \times 10^{-6}$.

Конкретное значение приемлемого риска после аварии может быть принято в процессе оптимизации радиа-

ционной защиты на основе анализа текущей и прогнозируемой радиационной обстановки, оценки вариантов возможных последствий облучения и возможности осуществить те или иные меры защиты, позволяющие снизить риск до уровня, который на некотором временном интервале может считаться приемлемым.

Количественная оценка риска злокачественных новообразований за счет потребления пищевых продуктов, подвергшихся загрязнению техногенными радионуклидами вследствие радиационной аварии, включает:

- оценку коэффициентов риска на 1 Бк активности, поступившей с пищевым продуктом;
- расчет табулированных значений показателей риска на 1 Бк/кг удельной активности пищевого продукта с учетом среднесуточной массы потребления в соответствующих возрастных группах;
- вычисление показателей риска злокачественных новообразований для принятых значений удельной активности радионуклидов в пищевых продуктах с учетом массы потребления продуктов различными возрастными группами;
- определение групп максимального риска.

Наряду с количественной, может быть дана также качественная характеристика риска (например, низкий, умеренный, высокий).

В данной работе для оценки консервативности рискового подхода использованы методические подходы к расчету пожизненных атрибутивных (приписанных) рисков онкологической заболеваемости и смертности, опубликованные Агентством по защите окружающей среды США в работе [4], и результаты расчета рисков, полученные с помощью доступного для использования программного обеспечения «Risk_tab». Коэффициенты приписываемых вероятностей смертности и заболеваемости на 1 Бк поступления различных радионуклидов, рассчитанные с помощью «Risk_tab», даны в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты риска смертности и заболеваемости в различных половозрастных группах на 1 Бк поступления радионуклида в организм с пищевыми продуктами, Бк⁻¹

[Table 2]

Risk coefficients for mortality and morbidity in different age and sex groups per 1 Bq of radionuclide intake into the body with food, Bq⁻¹

Радионуклид [Radionuclide]	Возраст, лет [Age, year]	Мужчины [Male]		Женщины [Female]	
		Смертность [Mortality]	Заболеваемость [Incidence]	Смертность [Mortality]	Заболеваемость [Incidence]
Sr-90	0–4	5,53E-09	7,22E-09	5,70E-09	7,46E-09
	5–9	3,60E-09	4,46E-09	3,69E-09	4,58E-09
	10–14	2,63E-09	3,16E-09	2,68E-09	3,24E-09
	15–19	3,21E-09	3,63E-09	3,25E-09	3,68E-09
	20–29	2,06E-09	2,17E-09	2,08E-09	2,20E-09
	30–39	1,62E-09	1,71E-09	1,63E-09	1,72E-09
	40–49	1,23E-09	1,28E-09	1,23E-09	1,28E-09
	50–59	8,98E-10	9,32E-10	9,00E-10	9,34E-10
	60–69	6,39E-10	6,63E-10	6,41E-10	6,65E-10
>70	3,63E-10	3,73E-10	3,64E-10	3,74E-10	

Радио- нуклид [Radio- nuclide]	Возраст, лет [Age, year]	Мужчины [Male]		Женщины [Female]	
		Смертность [Mortality]	Заболеваемость [Incidence]	Смертность [Mortality]	Заболеваемость [Incidence]
I-131	0–4	1,16E-09	1,10E-08	1,17E-09	1,10E-08
	5–9	5,58E-10	5,30E-09	5,66E-10	5,31E-09
	10–14	2,89E-10	2,71E-09	2,94E-10	2,72E-09
	15–19	1,74E-10	1,62E-09	1,78E-10	1,63E-09
	20–29	6,35E-11	5,56E-10	6,59E-11	5,59E-10
	30–39	4,85E-11	4,31E-10	4,95E-11	4,33E-10
	40–49	3,66E-11	3,23E-10	3,69E-11	3,23E-10
	50–59	2,61E-11	2,23E-10	2,64E-11	2,23E-10
	60–69	1,66E-11	1,37E-10	1,68E-11	1,37E-10
>70	6,67E-12	5,35E-11	6,74E-12	5,36E-11	
Cs-137	0–4	1,15E-09	1,78E-09	1,53E-09	2,32E-09
	5–9	9,68E-10	1,46E-09	1,32E-09	1,96E-09
	10–14	1,08E-09	1,61E-09	1,52E-09	2,24E-09
	15–19	1,24E-09	1,84E-09	1,77E-09	2,58E-09
	20–29	8,09E-10	1,12E-09	1,23E-09	1,71E-09
	30–39	5,36E-10	7,45E-10	7,05E-10	9,82E-10
	40–49	3,43E-10	4,49E-10	3,96E-10	5,23E-10
	50–59	2,88E-10	3,80E-10	3,33E-10	4,44E-10
	60–69	2,00E-10	2,70E-10	2,33E-10	3,17E-10
>70	8,94E-11	1,17E-10	1,01E-10	1,33E-10	

Сравнивая максимальные значения риска и максимальные значения дозовых коэффициентов, представленные в таблицах 1 и 2, можно видеть, что только для ¹³¹I максимальный риск относится к самой младшей возрастной группе, тогда как для ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs максимальные значения риска смещены в сторону меньшего возраста по сравнению с возрастом для максимальных дозовых коэффициентов для этих радионуклидов.

Количественная оценка риска для отдельных возрастных групп населения

Значения риска R_{ijk} дополнительной смертности или заболеваемости в отдельных возрастных k -х группах населения, обусловленного потреблением в течение времени Δt i -го пищевого продукта, содержащего j -й техногенный радионуклид, могут быть рассчитаны в соответствии с формулой 4:

$$R_{ijk} = (r_{mjk} \cdot q_{mk} + r_{fjk} \cdot q_{fk}) \times m_{ik} \times A_{ji} \times \Delta t, (4)$$

где:

r_{fjk} и r_{mjk} – коэффициенты риска смерти или заболевания за счет поступления 1 Бк активности j -го радионуклида женщинам (f) или мужчинам (m) из k -й возрастной группы, Бк⁻¹ (см. табл. 2);

q_{fk} и q_{mk} – доли женщин и мужчин в k -й возрастной группе (табл. 3);

m_{ik} – среднесуточное потребление i -го продукта в k -й возрастной группе, кг/сут ;

Δt – длительность потребления загрязненного пищевого продукта, сут;

A_{ji} – удельная активность j -го радионуклида в i -м пищевом продукте, Бк/кг.

Таблица 3

Относительные доли женщин q_{fk} и мужчин q_{mk} в различных k -ых возрастных группах населения (рассчитано по данным Росстата за 2015 г. [18])

[Table 3]

The relative proportions of female q_{fk} and male q_{mk} different k -th age groups of the population (calculated according to Rosstat data for 2015 [18])

Возрастная группа [Age group]	q_{fk}	q_{mk}
0–4	0,486	0,514
5–9	0,488	0,512
10–14	0,488	0,512
15–19	0,491	0,509
20–29	0,501	0,499
30–39	0,511	0,489
40–49	0,525	0,475
50–59	0,562	0,438
60–69	0,610	0,390
>70	0,712	0,288

Коэффициент консервативности рискованного подхода для k -й возрастной группы оценивался следующим образом:

$$K_k^R = \frac{R_{accepted}}{R_{ijk}}, \quad (5)$$

где $R_{accepted}$ – приемлемая величина риска, соответствующая эффективной дозе 5 мЗв и принятая равной $2,5 \cdot 10^{-4}$;

R_{ijk} – расчетная величина риска для k -й возрастной группы.

Количественная оценка риска для населения в целом

Расчет показателей риска, R_{ij} , (дополнительной смертности или заболеваемости) для ситуации потребления населением в целом (всеми возрастными группами) i -го пищевого продукта с удельной активностью j -го радионуклида A_{ji} может быть выполнен с помощью формулы 6.

$$R_{ij} = \sum (r_{mjk} \cdot f_{mk} + r_{fjk} \cdot f_{fk}) \times \overline{m}_{ik} \times A_{ji} \times \Delta t = r_{ij} \times A_{ji} \times \Delta t \quad (6)$$

где:

r_{fjk} и r_{mjk} – коэффициенты риска смерти или заболевания за счет поступления 1 Бк активности j -го радионуклида женщинам и мужчинам из k -й возрастной группы, Бк⁻¹;

f_{fk} и f_{mk} – доли женщин и мужчин в k -й возрастной группе от полной численности населения РФ (табл. 4);

\overline{m}_{ik} – среднесуточное потребление i -го продукта в k -й возрастной группе, кг/сут;

Δt – длительность потребления загрязненных пищевых продуктов, сут;

A_{ji} – удельная активность j -го радионуклида в i -м пищевом продукте, принятая равной 1 Бк/кг;

r_{ij} – табулированные значения коэффициентов риска для населения, полученные путем суммирования значений риска для отдельных возрастных групп (с учетом их вклада в общую численность населения) при условии, что удельная активность j -го радионуклида в i -м пищевом продукте A_{ji} равна 1 Бк/кг, потребляется в течение суток, а масса потребляемого i -го продукта соответствует среднесуточному потреблению в соответствующих возрастных группах, Бк⁻¹·кгсут⁻¹ (табл. 5).

Степень консервативности рискованного подхода для населения в целом оценивалась по формуле:

$$K_{нас}^R = \frac{R_{приемл}}{R_{нас}}, \quad (7)$$

где $R_{нас}$ – средневзвешенная по численности возрастных групп величина риска, связанная с потреблением пищевого продукта с рассматриваемым значением удельной активности в течение года или иного срока.

Таблица 4

Относительный вклад в общую численность городского и сельского населения женщин f_{fk} и мужчин f_{mk} в различных k -х возрастных группах населения (рассчитано по данным Росстата за 2015 г. [18])

[Table 4

Relative contribution to the total number of urban and rural population of females f_{fk} and males f_{mk} of different k -th age groups of the population (calculated according to the Rosstat data for 2015 [18])

Возраст [Age]	Городское население [Urban population]		Сельское население [Rural population]	
	f_{fk}	f_{mk}	f_{fk}	f_{mk}
0–4	0,0296	0,0313	0,0343	0,0361
5–9	0,0255	0,0268	0,0302	0,0316
10–14	0,0225	0,0236	0,0273	0,0287
15–19	0,0222	0,0230	0,0246	0,0266
20–29	0,0782	0,0780	0,0611	0,0706
30–39	0,0837	0,0802	0,0671	0,0707
40–49	0,0695	0,0628	0,0652	0,0647
50–59	0,0819	0,0638	0,0825	0,0771
60–69	0,0661	0,0423	0,0589	0,0450
>70	0,0635	0,0257	0,0687	0,0291

Численные значения $R_{нас}$ для Sr-90 и Cs-137, полученные из условия потребления молока с удельными активностями 1000 Бк/кг и 100 Бк/кг и длительностью потребления в течение года, а также для I-131 с удельной активностью 1000 Бк/кг и длительностью потребления в течение 30 суток представлены в таблице 6.

Таблица 5

Коэффициенты риска смерти от злокачественных новообразований (ЗНО) для населения, взвешенные по численности возрастных групп и массе потребления пищевых продуктов с учетом возраста потребления Бк⁻¹·кгсут⁻¹

[Table 5

Risk coefficients for death from malignant neoplasms for the population, weighted by the number of age groups and the mass of food consumption, taking into account the age of consumption Bq⁻¹·kg·day⁻¹

Радионуклид [Radionuclide]	Коэффициент риска смерти для населения от ЗНО, Бк ⁻¹ ·кгсут ⁻¹ [Death risk coefficients for population from malignant neoplasms, Bq ⁻¹ ·kg·day ⁻¹]						
	Хлеб [Bread]	Картофель [Potatoes]	Овощи [Vegetables]	Фрукты [Fruits]	Мясо [Meat]	Рыба [Fish]	Молоко [Milk]
Cs-137	1,52E-10	9,76E-11	1,62E-10	1,43E-10	1,3E-10	3,9E-11	1,52E-10
Sr-90	3,98E-10	2,57E-10	4,25E-10	3,86E-10	3,37E-10	1,06E-10	1,18E-09
I-131	2,94E-11	2,01E-11	3,18E-11	3,52E-11	2,4E-11	9,44E-12	9,39E-11

Средневзвешенные по численности возрастных групп и уровням потребления молока значения риска для населения
 Таблица 6
 [Table 6]

Weighted by the number of age groups and milk consumption levels, the average risk values for the population]

Радионуклид [Radionuclid]	Удельная активность, Бк/кг [Activity concentration, Bq/kg]	Длительность потребления, сут [Durability of consumption, days]	Средневзвешенный риск $R_{нас}$ [Weighted average risk $R_{нас}$]
Cs-137	1000	365	1,61E-04
Sr-90	100	365	4,31E-05
I-131	1000	30	2,82E-06

Качественная характеристика риска

Количественные оценки риска, полученные на основе расчета, могут быть сопоставлены с их качественной характеристикой. В таблице 7 приведены числовые значения риска и соответствующие им качественные характеристики. Данная классификация рисков согласуется с классификациями, предложенными в международных документах [5, 8, 19] и в российских методических документах³, и позволяет определить местоположение на данной шкале полученных результатов расчета риска и сравнить его с величиной допустимого риска, принятого на основе оптимизации радиационной защиты.

Для примера, приведенного в таблице 6, полученные значения риска для населения квалифицируются в соответствии с таблицей 7 как низкий, очень низкий и минимальный.

Оценка консервативности дозового и рискового подходов

На рисунках 1–3 показаны возрастные распределения эффективных доз и рисков смерти для соответствующих

значений удельной активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в молоке и молочных продуктах, употребляемых в течение 365 суток, и аналогичное распределение для ¹³¹I при длительности употребления молока 30 суток.

Обращают на себя внимание особенности изменения доз и рисков, начиная с возраста 20 лет: эффективные дозы остаются на одном уровне, поскольку дозовые коэффициенты остаются неизменными для взрослого населения, тогда как риски с возрастом уменьшаются.

Другой особенностью представленных данных являются различия в возрастах, соответствующих максимальным значениям эффективных доз и рисков для ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr: максимальные значения риска смещаются в сторону младших возрастов.

Важно отметить, что на рисунках слева нет случаев превышения дозового критерия 5 мЗв/год для всех рассматриваемых радионуклидов, тогда как имеет место превышение уровня риска $2,5 \times 10^{-4}$ для цезия-137 в возрастных группах от 10 до 30 лет.

Степень консервативности дозового и рискового подходов для отдельных возрастных групп оценены для мак-

Сопоставление количественных и качественных характеристик риска

Таблица 7

[Table 7]

Scale of quantitative and qualitative characteristics of risk]

Качественная характеристика [Qualitative characteristics]	↑	Количественная характеристика [Quantitative characteristic]
Существенный [Essential]	■	$3 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$
Умеренный [Moderate]	■	$10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$
Низкий [Low]	■	$10^{-4} - 10^{-3}$
Очень низкий [Very low]	■	$10^{-5} - 10^{-4}$
Минимальный [Minimum]	■	$10^{-6} - 10^{-5}$
Пренебрежимо малый [Negligible]		$< 10^{-6}$

³ Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований: Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2015. 42 с.

[Assessment of radiation risks of patients undergoing diagnostic examinations with the use of ionizing radiation. Methodical guidelines. Moscow. Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2015, 42 p.]

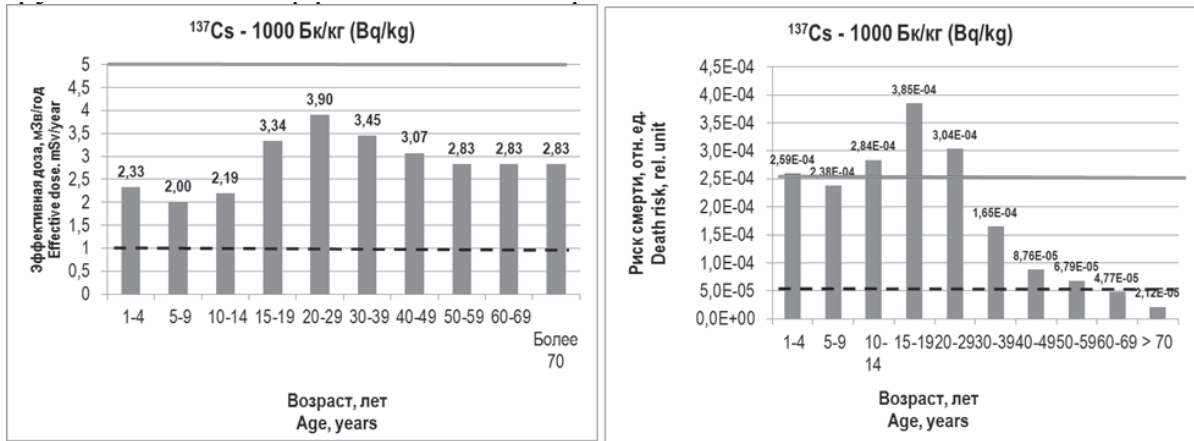


Рис. 1. Эффективные дозы облучения (слева) и риски смерти (справа) при потреблении молока и молочных продуктов с удельной активностью ^{137}Cs 1000 Бк/кг в течение года (прерывистой и сплошной линией слева обозначены значения эффективных доз 1 и 5 мЗв, а справа – уровни риска $5,0 \times 10^{-5}$ и $2,5 \times 10^{-4}$ соответственно)

[Fig. 1. Effective doses (left) and risks of death (right) when milk are consumed with activity concentration of ^{137}Cs 1000 Bq/kg during the year. (The broken and solid line on the left indicates effective doses of 5.0 10^{-5} and 2.5 10^{-4} , respectively)]

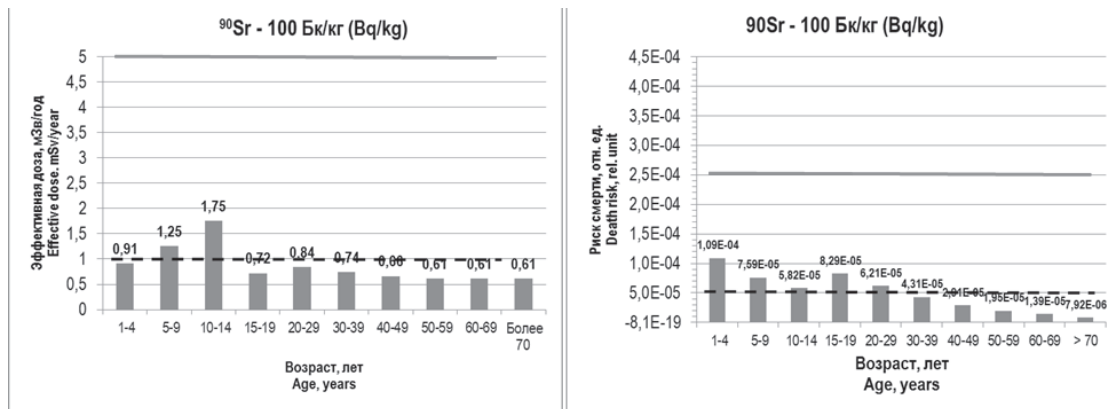


Рис. 2. Эффективные дозы облучения (слева) и риски смерти (справа) при потреблении молока и молочных продуктов с удельной активностью ^{90}Sr 100 Бк/кг в течение года (прерывистой и сплошной линией слева обозначены значения эффективных доз 1 и 5 мЗв, а справа – уровни риска $5,0 \times 10^{-5}$ и $2,5 \times 10^{-4}$ соответственно)

[Fig. 2. Effective doses (left) and risks of death (right) when milk are consumed with activity concentration of ^{90}Sr 100 Bq/kg during the year. (The broken and solid line on the left indicates effective doses of 1 and 5 mSv, and to the right – the risk levels of 5.0×10^{-5} and 2.5×10^{-4} , respectively)]

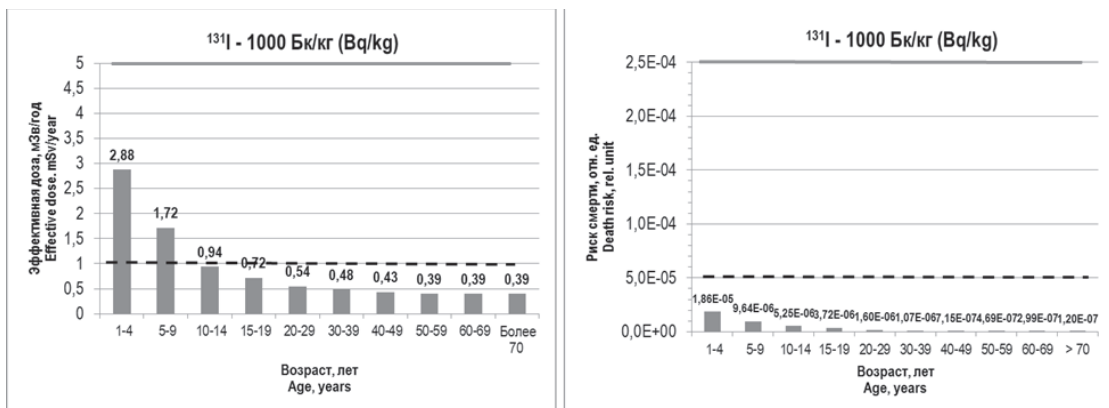


Рис. 3. Эффективные дозы облучения (слева) и риски смерти (справа) при потреблении молока и молочных продуктов с удельной активностью ^{131}I 1000 Бк/кг в течение 30 суток (прерывистой и сплошной линией слева обозначены значения эффективных доз 1 и 5 мЗв, а справа – уровни риска $5,0 \times 10^{-5}$ и $2,5 \times 10^{-4}$ соответственно)

[Fig. 3. Effective doses (left) and risks of death (right) when milk are consumed with activity concentration of ^{131}I 1000 Bq/kg during the year. (The broken and solid line on the left indicates effective doses of 1 and 5 mSv, and to the right – the risk levels of 5.0×10^{-5} and 2.5×10^{-4} , respectively)]

симальных значений доз и рисков, то есть для минимального запаса консервативности уровня вмешательства по удельной активности пищевых продуктов (для всех остальных групп коэффициент консервативности выше).

Для населения в целом степень консервативности целесообразнее оценивать по средневзвешенным по численности отдельных возрастных групп значениям эффективных доз и рисков.

В таблице 8 представлены результаты оценки консервативности дозового и рискового подхода.

Из результатов, представленных в таблице 8, видно, что степень консервативности дозового и рискового подхода при оптимизации радиационной защиты для населения в целом при потреблении продуктов, содержащих ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, оценивается близкими значениями, тогда как для ¹³¹I степень консервативности рискового подхода в 10 раз выше дозового подхода. Важно также отметить, что степень консервативности для населения в целом, как правило, выше, чем степень консервативности для отдельных возрастных групп, как по дозе, так и по риску.

На основе полученных данных представляет интерес рассчитать значения рисков, приходящихся на единицу эффективной дозы, и обусловленных потреблением пищевых продуктов, содержащих цезий-137, стронций-90 и йод-131, и сравнить их с номинальным коэффициентом риска. Такое сравнение представляется возможным, если рассчитать средневзвешенные по численности от-

дельных возрастных групп значения эффективных доз и рисков (см. рис. 1–3, табл. 4). Средневзвешенные значения рассчитывались из тех же условий: потребление молока с удельной активностью 1000 Бк/кг и 100 Бк/кг в течение года для цезия-137, стронция-90 соответственно и 1000 Бк/кг в течение 30 суток йода-131. Результаты расчета представлены в таблице 9.

Сравнивая полученные значения коэффициентов риска с номинальным коэффициентом риска, можно отметить, что для ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr полученные значения достаточно близки к номинальным коэффициентам риска злокачественных новообразований для населения $5,5 \times 10^2 \text{ Зв}^{-1}$. Для ¹³¹I полученное значение коэффициента риска отличается от номинального почти в 10 раз, что, по-видимому, связано с особенностями модели оценки риска и ее параметров для ¹³¹I, а также особенностями метаболизма – избирательным накоплением йода-131 преимущественно в щитовидной железе.

Представленные расчеты коэффициентов риска на единицу дозы подтверждают, по крайней мере, для ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, что номинальные коэффициенты риска применимы исключительно для населения в целом.

Важным элементом оптимизации радиационной защиты является выбор стратегии защиты населения:

- защита населения в целом;
- защита отдельных возрастных групп с максимальными дозами или максимальными рисками.

Таблица 8

Коэффициенты консервативности уровня радиационной защиты населения при использовании дозового и рискового подходов при оптимизации

[Table 8]

Coefficients of conservatism of the level of radiation protection of the population when using the dose and risk approaches to optimization

Радионуклид [Radionuclide]	Дозовый подход [The dose approach]		Рисковый подход [The risk approach]	
	Минимальный коэффициент консервативности для отдельной возрастной группы [Minimum coefficient of conservatism for selected age group]	Коэффициент консервативности для населения [Coefficient of conservatism for population]	Минимальный коэффициент консервативности для отдельной возрастной группы [Minimum coefficient of conservatism for selected age group]	Коэффициент консервативности для населения [Coefficient of conservatism for the population]
Cs-137	1,3 (20–29 лет [years])	1,5	0,7 (15–19 лет)	1,6
Sr-90	2,8 (10–14 лет [years])	5,8	1,8 (1–4 года)	5,8
I-131	1,7 (1–4 года [years])	8,3	13 (1–4 года)	88

Таблица 9

Результаты оценки средневзвешенных значений эффективных доз и рисков и коэффициентов риска на единицу эффективной дозы при потреблении пищевых продуктов, содержащих ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ¹³¹I

[Table 9]

The results of the estimation of the weighted average values of effective doses and risks and risk coefficients per effective dose unit for the consumption of food products containing ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr and ¹³¹I

Радионуклид [Radionuclide]	Средневзвешенная эффективная доза (мЗв) [Weighted average effective dose (Sv)]	Средневзвешенный риск, отн. ед. [Weighted average risk], rel.un.	Коэффициент риска, Зв ⁻¹ [Risk coefficient, Sv ⁻¹]
¹³⁷ Cs	$3,28 \times 10^{-3}$	$1,61 \times 10^{-4}$	$4,90 \times 10^{-2}$
⁹⁰ Sr	$0,86 \times 10^{-3}$	$4,31 \times 10^{-5}$	$5,01 \times 10^{-2}$
¹³¹ I	$0,6 \times 10^{-3}$	$2,82 \times 10^{-6}$	$4,70 \times 10^{-3}$

Дозовый и рисковый подходы позволяют реализовать оба варианта стратегии, однако стратегия защиты всего населения является более предпочтительной, поскольку, во-первых, коэффициенты консервативности близки для дозового и рискового подходов, а во-вторых, коэффициенту риска на единицу дозы близки к номинальному коэффициенту риска для населения. Что касается йода-131, то использование эффективной дозы как меры защиты населения для данного радионуклида не практикуется, а в НРБ-99/2009 используется величина поглощенной дозы.

Сравнивая особенности дозового и рискового подхода, можно отметить, что рисковый подход в отношении отдельных возрастных групп является более предпочтительным, так как эффективная доза не всегда является адекватной мерой риска и, кроме того, возраст, для которого риск является максимальным, не всегда соответствует возрасту с максимальной эффективной дозой.

Из таблицы 7 видно, что для стронция-90 и йода-131 имеется достаточно большой запас консервативности по удельной активности радионуклидов, а значит, можно выбрать более высокие значения удельной активности, чем принято в НРБ-99/2009, учитывая, что в общем руководстве по безопасности GSG-2 [20] даны в 2–3 раза более высокие значения.

Подводя итог обсуждению, можно отметить, что использование рискового подхода, наряду с дозовым подходом к оптимизации радиационной защиты населения, является важным дополнительным инструментом оптимизации, особенно для младших возрастных групп.

Выводы

Результаты сопоставления соответствия аварийного уровня вмешательства по дозе внутреннего облучения 5 мЗв/год, принятого в НРБ-99/2009 в качестве критерия А, и значений допустимой удельной активности ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{131}I в первый год после аварии, полученные с использованием подходов, основанных на величине дозы и величине риска показали:

1. При годовом потреблении молока с удельной активностью ^{137}Cs 1000 Бк/кг оценки консервативности принятых в НРБ значений уровней вмешательства по удельной активности пищевых продуктов, выполненные на основе дозового и рискового подходов для населения в целом, дали удовлетворительную согласованность. При оценке консервативности уровня вмешательства для отдельных возрастных групп показано отсутствие запаса консервативности по риску для возрастных групп от 10 до 30 лет.

2. При годовом потреблении молока с удельной активностью ^{90}Sr 100 Бк/кг имеется примерно 5-кратный запас консервативности уровня вмешательства по дозе и риску для населения в целом и примерно двукратный запас – для возрастных групп с наибольшей дозой и наибольшим риском, причем наибольшие риски относятся к возрастной группе 1–4 года, а наибольшие дозы – к возрастной группе 15–19 лет.

3. При потреблении молока с удельной активностью ^{131}I 1000 Бк/кг в течение 30 сут значение коэффициента консервативности по риску для населения в 10 раз превышает коэффициент консервативности по дозе. Для отдельных возрастных групп коэффициенты консервативности по риску также существенно выше, чем по дозе. Использование эффективной дозы для принятия реше-

ний в отношении уровней вмешательства для йода-131, особенно для детского населения, нецелесообразно.

4. Коэффициенты отношения полученных в данной работе средневзвешенных по численности отдельных возрастных групп значений риска к средневзвешенным значениям эффективных доз для ^{137}Cs и ^{90}Sr близки к номинальному коэффициенту риска злокачественных новообразований для населения $5,5 \times 10^2 \text{ Зв}^{-1}$, что подтверждает приемлемость номинальных коэффициентов риска для оптимизации радиационной защиты для населения в целом при условии оценки средневзвешенного по численности возрастных групп значения эффективной дозы.

5. Оптимизация радиационной защиты населения, основанная на оценке средневзвешенного по численности отдельных возрастных групп значения эффективной дозы или средневзвешенного значения риска, является более предпочтительной, чем по дозе облучения критической группы. Для отдельных возрастных групп более предпочтительной является оптимизация по величине риска, поскольку величина эффективной дозы в младших возрастных группах не всегда является адекватной мерой риска.

Литература

1. Репин, В.С. Критерии защиты населения после радиационной аварии: структура потребления пищевых продуктов и особенности формирования доз внутреннего облучения различных возрастных групп населения Российской Федерации / В.С. Репин // Радиационная гигиена. – 2018. – Т.11, № 2. – С. 18-24.
2. UNSCEAR, 2006. Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY.
3. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C., 2006.
4. Federal Guidance Report 13: Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides [EPA 402-R-99-001], 1999, 335p.
5. Публикация 103-й Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ): пер с англ. / под общей ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 312 с.
6. Репин, Л.В. Об использовании коэффициентов ущерба для количественной оценки последствий воздействия ионизирующего излучения / Л.В. Репин // Радиационная гигиена. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 35-37.
7. Меняйло, А.Н. Пожизненный радиационный риск в результате внешнего и внутреннего облучения: метод оценки / А.Н. Меняйло, С.Ю. Чекин, В.В. Кашеев, М.А. Максютов, А.М. Корело, К.А. Туманов, Е.А. Пряхин, С.С. Ловачев, С.В. Карпенко, П.В. Кашеева, В.К. Иванов // Радиация и риск. – 2018. – Т. 27, № 1. – С. 8-21.
8. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk: ICRP Publication 99. Annals of the ICRP, 2005, Vol. 35, No 4.
9. Онищенко, Г.Г. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин, С.Л. Авалиани, К.А. Буштуева; под ред. Ю.А. Рахманина, Г.Г. Онищенко. – М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
10. Ivanov V.K., Tsyb A.F., Konogorov A.P., Rastopchin E.M., Khait S.E. Case-control analysis of leukaemia among Chernobyl accident emergency workers residing in the Russian Federation, 1986-1993. J. Radiol. Prot., 1997, V. 17, N 3, pp. 137-157.

11. Health Risk Assessment from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Based on a Preliminary Dose Estimation. Publication of the World Health Organization, 2013, 172 p.
12. Сынзыныс, Б.И. Экологический риск / Б.И. Сынзыныс, Е.Н. Тянтова, О.П. Мелехова. – М.: Логос, 2005. – 167 с.
13. Ivanov V.K., Tsyb A.F., Agapov A.M., Panfilov A.P., Kaidalov O.V., Gorski A.I., Maksoutov M.A., Suspitsin Y.V., Vaizer V.I. Concept of optimization of the radiation protection system in the nuclear sector: management of individual cancer risks and providing targeted health care. J. Radiol. Prot., 2006, V. 26, pp. 361-374.
14. ICRP, 1990. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP 20 (2).
15. ICRP, 1993. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23 (3-4)
16. ICRP, 1995. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 3 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 69. Ann. ICRP 25 (1).
17. Радиационная защита и безопасность источников излучения. Международные основные нормы безопасности. Международное Агентство по атомной энергии. – Вена, 2015.
18. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/population/demography/# (дата обращения: 01.08.2018)
19. NCRP – National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation Dose Management for Fluoroscopically-Guided Interventional Medical Procedures. Report No. 168 – 2010.
20. Нормы безопасности МАГАТЭ. Критерии для использования при обеспечении готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. Серия норм безопасности МАГАТЭ № GSG-2, 2012. – 132 с.

Поступила: 01.08.2018 г.

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, руководитель отдела здоровья Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@niirg.ru

Репин Леонид Викторович – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Репин В.С., Репин Л.В. Критерии защиты населения после радиационной аварии: использование радиационного риска для анализа и принятия оптимальных решений по ограничению потребления пищевых продуктов, загрязненных техногенными радионуклидами // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 28-38. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-4 -28-38

Criteria for the protecting of population after radiation accident: use of radiation risk for analysis and optimal decisions making to limit the consumption of food contaminated by technogenic radionuclides

Viktor S. Repin, Leonid V. Repin

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

The purpose of this paper is to assess the compliance of criterion A, adopted in NRB-99/2009 as emergency level of dose intervention, to permissible values of specific activity of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr and ¹³¹I in food products in the first year after the accident. Assessments are made on the basis of comparison of the conservativeness

Viktor S. Repin

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

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: v.repin@niirg.ru

coefficients by dose and the magnitude of the risk. The results of the evaluation showed that estimates of the doses and risks for ^{137}Cs and ^{90}Sr , calculated on the basis of weighting by the number of age groups, are equally conservative. For ^{131}I , the conservative factors for dose and risk vary significantly, which indicates that it is not appropriate to use an effective dose to optimization of radiation protection for the given radionuclide. The ratios of the risk-weighted average weighted by the number of individual age groups to the weighted average effective dose values for ^{137}Cs and ^{90}Sr are close to the nominal risk of death from malignant neoplasms for the population of $5 \cdot 10^{-5}$, which confirms that nominal risk factors can only be used for the general population. Two variants of the criteria for optimization of the radiation protection of the population are proposed: 1) by the value of the average weighted by the number of individual age groups, the value of the effective dose, or 2) the value of the average weighted by the number of individual age groups of risk. It is shown that to optimize the protection of individual age groups, the more preferable criterion is the risk value calculated for a given age group, since the maximum effective dose of some age group does not always correspond to the maximum risk.

Key words: food products, ^{137}Cs , ^{90}Sr , specific activity, radiation dose, risk, intervention level criteria.

References

1. Repin V.S. Criteria for the protection of population after radiation accident: food consumption structure and peculiarities of the internal doses formation of various age groups of the population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018; 11(1): 18-24. (In Russian)
2. UNSCEAR, 2006. Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY.
3. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C., 2006.
4. Federal Guidance Report 13: Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides [EPA 402-R-99-001], 1999, 335p.
5. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4) (In Russian)
6. Repin L.V. On the Use of Detriment Parameters for the Quantitative Evaluation of Radiation Exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2011, V.4, № 1, pp. 35-37. (In Russian)
7. Menyaylo A.N., Chekin S.Yu., Kashcheev V.V., Maksyutov M.A., Korelo A.M., Tumanov K.A., Pryakhin E.A., Lovachev S.S., Karpenko S.V., Kashcheeva P.V., Ivanov V.K. Lifetime radiation risk due to the external and internal exposure: method of assessment. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*, 2018, Vol. 27. № 1, pp. 8-21 (In Russian)
8. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk: ICRP Publication 99. *Annals of the ICRP*, 2005, Vol. 35, No 4.
9. Onishchenko G.G., Novikov S.M., Rakhmanin Yu.A., Avaliani S.L., Bushtueva K.A. Ed.: Rakhmanin Yu.A., Onishchenko G.G. Basics of the assessment of the risk to the health of the public due to the chemical substances contaminating the environment. Moscow, 2002, 408 p. (In Russian)
10. Ivanov V.K., Tsyb A.F., Konogorov A.P., Rastopchin E.M., Khait S.E. Case-control analysis of leukaemia among Chernobyl accident emergency workers residing in the Russian Federation, 1986-1993. *J. Radiol. Prot.*, 1997, V. 17, N 3, pp. 137-157.
11. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, based on a preliminary dose estimation. Publication of the World Health Organization, 2013, 172 p.
12. Synzynys B.I., Tyantova E.N., Melekhova O.P. Ecological risk, Moscow, Logos, 2005, 167 p. (In Russian)
13. Ivanov V.K., Tsyb A.F., Agapov A.M., Panfilov A.P., Kaidalov O.V., Gorski A.I., Maksioutov M.A., Suspitsin Y.V., Vaizer V.I. Concept of optimization of the radiation protection system in the nuclear sector: management of individual cancer risks and providing targeted health care. *Journal of Radiation Protection*, 2006, V. 26, pp. 361-374.
14. ICRP, 1990. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP 20 (2).
15. ICRP, 1993. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23 (3-4).
16. ICRP, 1995. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 3 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 69. Ann. ICRP 25 (1).
17. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards GSR Part 3. IAEA, Vienna, 2015. (In Russian)
18. Official website of the Federal governmental statistical service. – Available on: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/population/demography/# (Accessed: August 01, 2018) (In Russian)
19. NCRP – National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation Dose Management for Fluoroscopically-Guided Interventional Medical Procedures. Report No. 168 – 2010.
20. IAEA Safety Standards Series. Criteria for the provision of the preparedness and response in case of nuclear or radiological emergency. Safety guide № GSG-2, 2012, 132 p. (In Russian)

Received: August 01, 2018

For correspondence: Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, head of healthcare department, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: v.repin@niirg.ru)

Leonid V. Repin – Junior Researcher, Information Analytical Center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Repin V.S., Repin L.V. Criteria for the protecting of population after radiation accident: use of radiation risk for analysis and optimal decisions making to limit the consumption of food contaminated by technogenic radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 4, pp.28-38. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-4-28-38