

А.Н. Меняйло, В.В. Кашеев, Е.А. Пряхин, С.Ю. Чекин, М.А. Максютлов, К.А. Туманов, В.К. Иванов

ПРОГНОЗ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ НАСЕЛЕНИЯ НА ЗАГРЯЗНЁННЫХ ^{137}Cs ТЕРРИТОРИЯХ РОССИИ В СООТВЕТСТВИИ С СОВРЕМЕННЫМИ РЕКОМЕНДАЦИЯМИ МКРЗ

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск

Контактное лицо: А.Н. Меняйло, nrer@obninsk.com.

РЕФЕРАТ

Цель: Проведение расчетов радиационного вреда для населения, проживающего в настоящее время (в 2020 г.) на территориях России, загрязнённых ^{137}Cs после Чернобыльской аварии 1986 г.

Материал и методы: Радиационный вред рассчитывался двумя способами: по исходной методике МКРЗ и приближённо, как произведение номинального коэффициента риска НРБ-99/2009 на эффективную дозу (номинальный радиационный вред). Для расчетов по методике МКРЗ оценка эквивалентных доз проводилась с использованием дозовых коэффициентов Американского агентства по защите окружающей среды (ЕРА). Численность исследуемого населения загрязнённых территорий на начало 2020 г. составила 142676 человек (65205 мужчин и 77471 женщин). В основном, это население Брянской и Тульской областей, 85,5 % и 10 % от общей численности соответственно. Средняя накопленная эффективная доза населения составила 30,6 мЗв, а максимальная индивидуальная накопленная доза – 707 мЗв.

Результаты: В 2020 г. для мужчин в возрасте 44 года и для женщин в возрасте 55 лет номинальный радиационный вред приблизительно равен значению радиационного вреда, рассчитанного по методике МКРЗ. При этом номинальный вред существенно (до 2,3 раза) занижен для младших и завышен для старших возрастов. В 2020 г. критическими группами населения, имеющими максимальные накопленные дозы и максимальный радиационный вред, являются мужчины в возрасте 34 года женщины в возрасте 35 лет. Для этих групп населения средние накопленные эффективные дозы составили 35,3и 39,2 мЗв, а средний радиационный вред – $2,6 \times 10^{-3}$ и $4,2 \times 10^{-3}$ для мужчин и женщин соответственно. Для 11,8 % населения (8,3 % мужчин и 14,8 % женщин) индивидуальный радиационный вред, рассчитанный по методике МКРЗ, превышает значение $3,5 \times 10^{-3}$, соответствующее предельному приросту индивидуального риска для населения за 70 лет облучения, устанавливаемому НРБ-99/2009 для нормальных условий облучения. Максимальный радиационный вред $3,9 \times 10^{-2}$ найден для женщины Красногорского района Брянской области в возрасте 37 лет при накопленной эффективной дозе 392 мЗв.

Выводы: Результаты данной работы могут быть использованы при подготовке рекомендаций органам здравоохранения по улучшению медицинского наблюдения за гражданами, проживающими на загрязнённых радионуклидами территориях, а также при разработке нормативных документов по оказанию адресной медицинской помощи лицам из групп повышенного радиационного риска с использованием методов персонализированной медицины.

Ключевые слова: пожизненный радиационный риск, НРБ-99/2009, чернобыльская авария, ^{137}Cs , население загрязнённых территорий, модели радиационного риска, номинальный коэффициент риска

Для цитирования: Меняйло А.Н., Кашеев В.В., Пряхин Е.А., Чекин С.Ю., Максютлов М.А., Туманов К.А., Иванов В.К. Прогноз радиационных рисков населения, проживающего на загрязнённых ^{137}Cs территориях России, в соответствии с современными рекомендациями МКРЗ. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):45–52

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-45-52

Введение

После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. особую опасность для населения загрязнённых радионуклидами территорий России представлял сравнительно долгоживущий радиоизотоп ^{137}Cs . На основе данных о плотностях выпадений в населённых пунктах с плотностью выпадения ^{137}Cs свыше 37 кБк/м² были реконструированы значения эффективных доз проживавшего там населения. Годовая динамика накопления доз внешнего и внутреннего облучения всего тела была реконструирована у населения 386 населённых пунктов Брянской, Тульской, Орловской и Калужской областей России.

Согласно современным рекомендациям МКРЗ [1], «(156) При ретроспективной оценке доз у отдельных индивидуумов, дозы у которых могли существенно превысить пределы дозы, эффективная доза может дать первую приблизительную оценку суммарного вреда». Например, умножение номинального коэффициента риска МКРЗ [1] для населения на эффективную дозу могло бы дать такую приблизительную оценку номинального радиационного вреда.

Однако эффективные дозы всё же не рекомендуются использовать для оценок индивидуального риска или вреда: «(157) ... Дозы в органах и тканях, а не эффективные дозы, требуются для оценки вероятности индукции рака у облученных индивидуумов» [1].

Динамика эквивалентных доз в органах и тканях человека, проживающего на загрязнённых ^{137}Cs территориях, может быть рассчитана исходя из реконструированной динамики годовых эффективных доз населения от ^{137}Cs в каждом из населённых пунктов. В этом случае можно получить оценку радиационных рисков и вреда, непосредственно следуя приведённым выше рекомендациям МКРЗ [1] и соответствующим алгоритмам расчёта.

Основной целью работы является расчёт в соответствии с современными рекомендациями МКРЗ [1], пожизненных радиационных рисков и радиационного вреда для населения, проживающего в настоящее время (в 2020 г.) на загрязнённых ^{137}Cs территориях России. Сравнение с величинами номинального радиационного вреда позволит оценить консервативность этих номинальных величин, применяемых в качестве

защитных, по сравнению с современными оценками, полученными для разных половозрастных групп населения. Для российского населения такой анализ проводится впервые.

Результаты работы имеют большое значение при планировании и оптимизации оказания адресной медицинской помощи населению загрязнённых радионуклидами территорий.

Материал и методы

В 2007 г. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) в своей Публикации 103 [1] предложила математические модели для оценки радиационных рисков, основанные в основном на наблюдениях за когортой выживших после атомной бомбардировки в 1945 г. городов Хиросима и Нагасаки (когорты LSS). Особенностью этих моделей является принятие концепции линейной беспороговой модели, т.е. модели оценки зависимости доза-эффект, предполагающей, что в диапазоне малых доз риск развития рака, вызванный облучением, прямо пропорционален дозе этого облучения.

Чтобы оценить радиационный риск для здоровья человека в конкретной популяции, в Публикации 103 МКРЗ [1] рекомендуется рассчитывать значение пожизненного атрибутивного риска (LAR) с использованием моделей риска, основанных на заболеваемости, для следующих локализаций солидных раков: все солидные, пищевод, желудок, толстая кишка, печень, лёгкое, молочная железа, яичник, мочевой пузырь, щитовидная железа, остальные солидные, а также модели риска для лейкозов [2]. Также для внутреннего облучения в данной работе проводился учёт рисков развития рака кости, модели для которой нет в [1]. Для этой локализации в данной работе используются модели, предложенные НКДАР ООН [3].

В данной работе оцениваемой метрикой риска является так называемый радиационный вред. В основе этой величины лежит метрика радиационного риска – пожизненный атрибутивный риск (LAR – от англ. Lifetime Attributable Risk). Подробное описание методики расчёта LAR на основе моделей радиационных рисков МКРЗ уже было опубликовано ранее [4]. Кратко напомним основные понятия.

Пусть λ_0 – показатель фоновой заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО) или смертности от них (отношение числа случаев за один год к полному числу лиц, находящихся под наблюдением за этот год). Воздействие радиации приводит к увеличению λ_0 на некоторую дополнительную величину $\Delta\lambda$. Согласно МКРЗ [1] радиогенный риск $\Delta\lambda$ математически может быть представлен в виде двух форм: аддитивной и мультипликативной. В аддитивной форме EAR не зависит от фоновой заболеваемости, т.е. $\Delta\lambda = EAR$, где EAR – это избыточный абсолютный риск (от англ. Excess Absolute Risk). В мультипликативной модели $\Delta\lambda = \lambda_0 \cdot ERR$, где безразмерная величина ERR есть избыточный относительный риск (от англ. Excess Relative Risk).

Два этих подхода в определении величины $\Delta\lambda$ дают разный численный результат для популяций,

отличных от тех, на которых строились модели радиационного риска. В этом случае МКРЗ рекомендует вычислять $\Delta\lambda$ как взвешенную сумму аддитивного и мультипликативного подходов [1].

Величина $\Delta\lambda$ зависит от пола, локализации новообразования, возраста при облучении, дозы облучения, возраста, на который ведётся расчёт (возраст дожития). В работе [4] подробно даны формулы, по которым следует проводить расчёт $\Delta\lambda$ согласно МКРЗ. Но там не приводится модель расчёта EAR и ERR для рака костной ткани, приведём её ниже.

Для рака костной ткани использовалась модель НКДАР 2006 [3], которая была приведена в соответствующем отчёте этой организации в табл. 52. Там даны как мультипликативная, так и аддитивная модели радиационно-обусловленной заболеваемости раком кости. Формула (1) описывает мультипликативную модель, а (2) – аддитивную.

$$ERR_{\text{однокр.}}^{\text{НКДАР}}(a, d) = d^2 \cdot 6,90379 \cdot 10^7 \cdot a^{-4,472}, \quad (1)$$

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{НКДАР}}(d) = d^2 \cdot 9,32940 \cdot 10^{-6}. \quad (2)$$

Здесь d – доза облучения в Гр; a – возраст, на который рассчитывается риск.

НКДАР 2006 [3] не даёт указаний, как усреднять мультипликативную и аддитивную модель, но в данной работе мы примем вес каждой модели, равный 0,5.

Пожизненный атрибутивный риск (LAR) характеризует количество избыточных над фоновым числом раковых заболеваний или смертей, которые могут произойти в течение всей последующей жизни после облучения группы лиц, у которых одинаковы модифицирующие риск факторы (пол, возраст при облучении и др.). На индивидуальном уровне величина LAR для малых доз облучения приблизительно равна вероятности радиационно обусловленного возникновения ЗНО или смерти от него.

LAR возникновения ЗНО вычисляется путём суммирования $\Delta\lambda$ по возрастам дожития с весом вероятности здорового (без возникновения ЗНО заданной локализации) дожития до этого возраста. LAR смерти от ЗНО вычисляется путём суммирования $\Delta\lambda$ по возрастам дожития с весом вероятности дожития до этого возраста и доли летальности (определяется из отношения фоновых показателей онкосмертности к онкозаболеваемости) от заданной локализации опухоли в этом возрасте.

Также МКРЗ [1] указывает, что следует разделять полученные значения пожизненных атрибутивных рисков на величину $DDREF$. $DDREF$ – это «экспертно оцененный параметр, который объясняет обычно сниженную биологическую эффективность (на единицу дозы) радиационного воздействия малых доз и малых мощностей доз, если сравнивать ее с эффективностью высоких доз и высоких мощностей доз». МКРЗ принимает величину $DDREF$, равной 2.

Радиационный вред для каждой локализации ЗНО МКРЗ [1] определяется на основе LAR с поправками на потерянные годы жизни и качество жизни не смертельных ЗНО. Значения радиационного вреда исполь-

зуются затем для расчёта взвешивающих коэффициентов тканей и определения эффективной дозы.

В данной работе проведён расчёт радиационного вреда для населения территорий России, загрязнённых ^{137}Cs в результате Чернобыльской аварии.

Согласно рекомендациям МКРЗ [1] радиационный вред для ткани c определяется следующим образом:

$$D_T = R_{T,c} \cdot [k_c + q_c \cdot (1 - k_c)] \cdot l_c. \quad (3)$$

Здесь $R_{T,c}$ – номинальный риск заболеваемости раком локализации c ; q_c – весовой множитель (от 0 до 1), отражающий снижение качества жизни из-за серьёзного заболевания; k_c – средняя потеря времени жизни из-за заболевания в сравнении с нормальной продолжительностью жизни, выражаемая как отношение к среднему для всех раков; k_c – доля летальности.

В свою очередь коэффициент q_c определяется следующим образом:

$$q_c = q_{\min} + k_c \cdot (1 - q_{\min}). \quad (4)$$

Здесь $q_{\min}$ – минимальный весовой множитель для несмертельных раков. МКРЗ в Публикации 103 установила, что для всех локализаций опухолей, кроме рака щитовидной железы и кожи данный коэффициент принимается равным 0,1.

В [1] оценивались номинальные риски, поэтому, все приведённые коэффициенты брались усреднёнными по полу, возрасту и исследуемым популяциям. Однако для вычисления индивидуализированных рисков населения следует брать неусреднённые коэффициенты. Поэтому в данной статье вместо номинального риска заболеваемости используется LAR заболеваемости ЗНО.

Величина λ в данной работе вычисляется как отношение потерянных лет жизни вследствие радиационно-индуцированного рака заданной локализации (в терминологии НКДАР ООН [3] обозначается $YLLRIC$ – от англ. years of life lost per radiation-induced cancer) к значению $YLLRIC$, полученному по всем локализациям опухолей в целом.

Величину $YLLRIC$ можно приблизительно определить как отношение числа потерянных лет жизни в следствии возникновения ЗНО к LAR смерти от него. Более точно вместо LAR нужно брать $REID$ (от англ. risk of exposure induced death). Отличие между LAR и $REID$ несущественное для малых доз и заключается в разном способе вычисления вероятности дожития.

В итоге с учётом (3) и (4) получим следующую формулу для вычисления радиационного вреда:

$$\begin{aligned} Detriment(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \\ = \frac{l(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)}{DDREF} \\ \cdot \sum_{a=e}^{a_{\max}} \left[S'(s, c, e, a) \cdot \delta\lambda(s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) \cdot \right. \\ \left. \cdot [q_{\min} + k(s, a, c) \cdot (2 - k(s, a, c)) \cdot (1 - q_{\min})] \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

Здесь s – пол; c – локализация опухоли; n – количество облучений; $g_1, \dots, g_n$ – возраста на момент облучения; $d_1, \dots, d_n$ – соответствующие дозы облучения, полученные органом или тканью c ; $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы; e – текущий возраст человека, в котором он жив; a – возраст дожития; S' – вероятность здорового дожития от возраста e до возраста a ; $a_{\max}$ – максимальный возраст дожития. МКРЗ [1] в качестве $a_{\max}$ принимает 100 лет; k – доля летальности.

В данной работе проводилось вычисление суммарного радиационного вреда от внутреннего и внешнего облучений.

Внутреннее облучение человека характеризуется длительным облучением организма. После попадания определённого радионуклида или радионуклидной смеси в организм в возрасте e_0 , динамика ежегодных эквивалентных доз $H_T(e - e_0)$ в конкретном органе или ткани T с течением времени $t = e - e_0$ может быть получена из базы данных дозовых коэффициентов. При ежегодном поступлении радионуклидов в организм эти облучения накладываются друг на друга. Подробно описание методики вычисления LAR от внутреннего облучения при однократном поступлении в организм человека заданного радионуклида уже было ранее опубликовано [3]. Методика основана на вычислении эквивалентных доз облучения по заданному значению ожидаемой эффективной дозы с использованием базы данных дозовых коэффициентов (Зв/Бк) для заданного радионуклида и типа поступления. В работе [4] применялась база данных дозовых коэффициентов, разработанная МКРЗ [5], но в этой статье для построения базы данных дозовых коэффициентов использовался набор утилит под общим названием Dose and Risk Calculation Software (DCAL) [6]. Данный программный комплекс был разработан Американским агентством по защите окружающей среды, англ.: United States Environmental Protection Agency (EPA).

При многократном поступлении радионуклидов в организм итоговый риск вычисляется как сумма рисков от отдельных ежегодных поступлений.

В данной работе вычисления для внутреннего облучения проводились только для поступления с пищей изотопов ^{137}Cs . Программный комплекс DCAL [6] даёт значения дозовых коэффициентов для этого радионуклида на 27 лет после облучения. Ожидаемые эффективные дозы для внутреннего облучения преобразовывались в набор эквивалентных доз на органы и ткани. Распределение эквивалентных доз при внутреннем облучении ^{137}Cs по органам и тканям при заданной единичной ожидаемой эффективной дозе представлено на рис. 1. Из этого рисунка видно, что при поступлении в организм изотопа ^{137}Cs доза облучения распределяется по организму человека практически равномерно.

Итоговый риск для внутреннего облучения вычислялся как сумма рисков по всем органам и тканям, для которых есть модели МКРЗ (кроме «все солидные раки»), лейкозов, и модели риска для локализации кости, полученной от НКДАР ООН [3].

Уровень внешнего облучения вычислялся как сумма рисков, полученных для всех солидных раков и

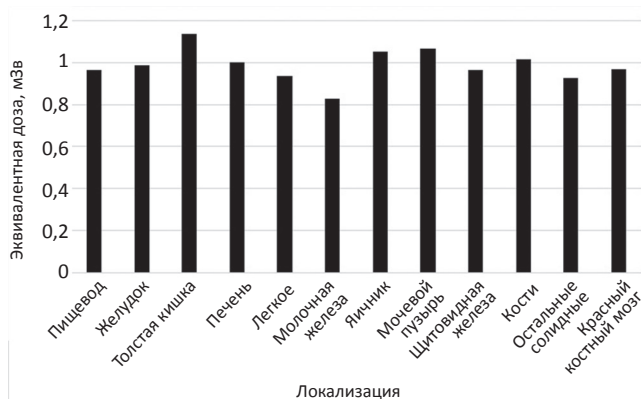


Рис. 1. Распределение эквивалентных доз при поступлении в организм взрослого человека с пищей изотопов ^{137}Cs при ожидаемой эффективной дозе, равной 1 мЗв

Fig.1. Distribution of equivalent doses when ^{137}Cs enters the body of an adult with food at an expected effective dose of 1 mSv

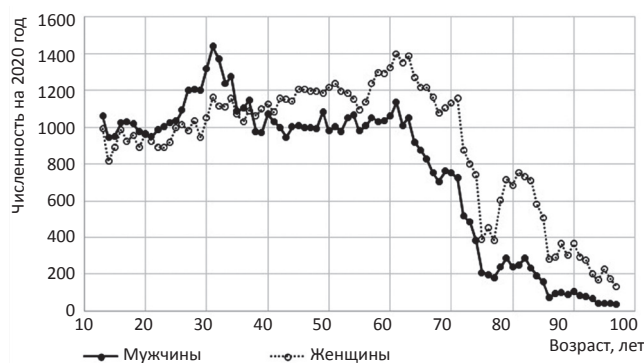


Рис. 2. Распределение численности исследуемого населения по возрасту
Fig. 2. Population distribution by age



Рис. 3. Среднее значение и верхняя граница 95 % суммарной (внешней и внутренней) эффективной дозы в зависимости от возраста исследуемого населения на начало 2020 г.

Fig. 3. Average value and upper limit 95 % of the total (external and internal) effective dose, depending on the age of the studied population at the beginning of 2020

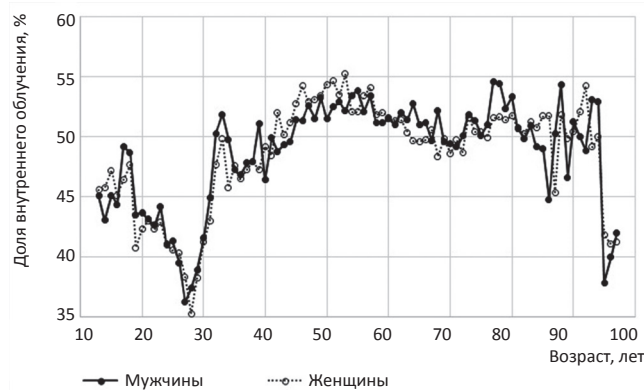


Рис. 4. Доля внутреннего облучения (% по эффективной дозе) в общем облучении исследуемого населения
Fig. 4. Share of internal exposure (% by effective dose) in the exposure of the population under study

лейкозов по эффективной дозе, с использованием соответствующих моделей риска МКРЗ.

В данной работе потенциальный (реализующийся в будущем) радиационный вред рассчитывается для облученного населения, проживающего на начало 2020 г. на загрязненных в результате Чернобыльской аварии территориях России и зарегистрированного в Национальном радиационно-эпидемиологическом регистре (НРЭР) [7]. Радиационный вред для этого населения в основном определяется внешним и внутренним облучением от радионуклида ^{137}Cs .

Численность населения загрязненных территорий на начало 2020 г. по данным НРЭР [7] составила 142676 человек (65205 мужчин и 77471 женщин). В основном, это население Брянской и Тульской областей, 85,5 % и 10 % от общей численности соответственно. Половозрастное распределение населения представлено на рис. 2.

Для реконструкции динамики эквивалентных доз в органах и тканях человека использовались годовые

дозы внешнего облучения и годовые ожидаемые эффективные дозы (ОЭД) внутреннего облучения населения от ^{137}Cs из базы данных НРЭР [7].

На рис. 3 представлена зависимость суммарной (внешней и внутренней) накопленной эффективной дозы по возрастам исследуемого населения. Максимальная индивидуальная доза составляет 707,15 мЗв.

Рис. 4 показывает, что вклад ОЭД внутреннего облучения от ^{137}Cs в суммарную эффективную дозу облучения населения является существенным, зависит от возраста и составляет, в основном, 45–55 %.

Динамика суммарной (внешней и внутренней) годовой эффективной дозы населения по календарным годам представлена на рис. 5. После 1992 г. годовые эффективные дозы снижаются до уровня менее 1 мЗв/год, который соответствует пределу доз облучения населения при нормальных условиях эксплуатации источников ионизирующего излучения [9] или остаточ-

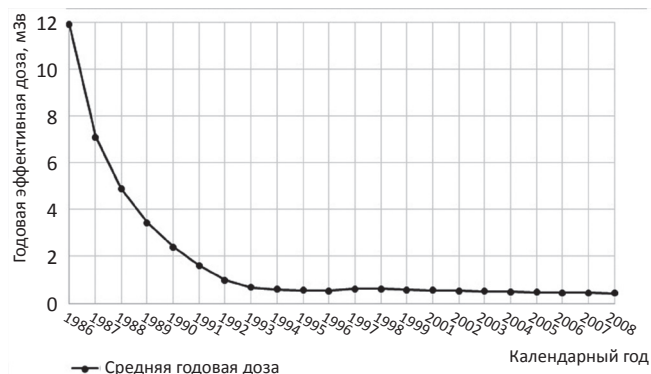


Рис. 5. Распределение по возрастам исследуемого населения среднего значения и верхней границы 95 % суммарной эффективной дозы (внешнего и внутреннего облучения)
Fig. 5. Distribution by age of the studied population of the average value and the upper limit 95 % of the total effective dose (external and internal exposure)

ной радиоактивности в среде обитания человека, при которой вмешательство малообоснованно [1].

Необходимые для расчёта фоновые (в отсутствие облучения) показатели заболеваемости и смертности облучённого населения предполагались равными соответствующим показателям населения России в 2017 г. [8].

Результаты

Расчёт радиационного вреда по методике МКРЗ [1] в данной работе проводился для всех лиц из населения загрязнённых территорий (зарегистрированных в НРЭР) с учётом их пола, возраста и динамики накопления доз с начала облучения и до 2020 г. Значения номинального радиационного вреда для каждого человека были также вычислены путём умножения но-

минального коэффициента риска НРБ [9] ($5,5 \times 10^{-2}/3\text{в}$) на величину накопленной к 2020 г. суммарной (внешней и внутренней) эффективной дозы.

На рис. 6 и 7 представлены величины радиационного вреда МКРЗ и номинального вреда НРБ-99/2009 (для мужского и женского населения соответственно), усреднённые по населению различных возрастных групп. Верхняя граница 95 % для каждой возрастной группы означает, что для 95 % населения данной возрастной группы вред не превышает этого граничного значения.

В 2020 г. максимальная доза облучения накоплена лицами возраста 34 года, всю жизнь проживавшими на загрязнённых в 1986 г. территориях. Максимальные значения радиационного вреда также достигаются в этом возрасте.

Для 95 % населения загрязнённых территорий радиационный вред, рассчитанный по методике МКРЗ [1], не превосходит величины $7,1 \times 10^{-3}$ для мужчин и 11×10^{-3} для женщин. Верхняя граница 95 % номинального вреда для лиц старше 34 лет равна $5,5 \times 10^{-3}$ (независимо от пола). В сравнении с радиационным вредом по МКРЗ, номинальный вред по НРБ-99/2009 существенно (до 2,3 раза) занижен в возрастах младше 50 лет и завышен в старших возрастах.

Для 16868 человек (11,8 % от всего населения) (5391 (8,3 %) мужчин и 11477 (14,8 %) женщин) индивидуальный радиационный вред, рассчитанный по методике МКРЗ [1], превышает предельное значение $3,5 \times 10^{-3}$, соответствующее предельному приросту за 70 лет облучения индивидуального пожизненного риска для населения ($5,0 \times 10^{-5}$ от облучения в течение года [9]).

Максимальное значение радиационного вреда, рассчитанного по методике МКРЗ [1], равно $5,87 \times 10^{-2}$, найдено для женщины в возрасте 37 лет, проживавшей всю жизнь в Красногорском районе Брянской области. Накопленная доза при этом составила 392,3 мЗв,

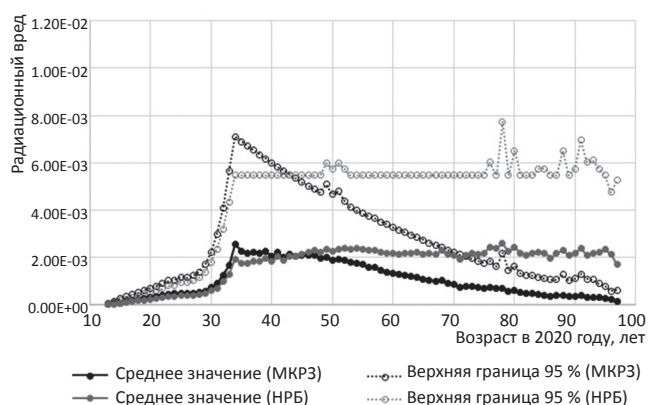


Рис. 6. Средние значения и верхние границы 95 % радиационного вреда, рассчитанные по методике МКРЗ [1], а также соответствующие значения номинального вреда НРБ-99/2009 [3] для различных возрастных групп мужского населения загрязнённых территорий
Fig. 6. Average values and upper limits 95 % of radiation harm calculated by the ICRP method [1], as well as corresponding values of nominal harm according to RSS-99/2009 [3] for different age groups of the male population of contaminated territories

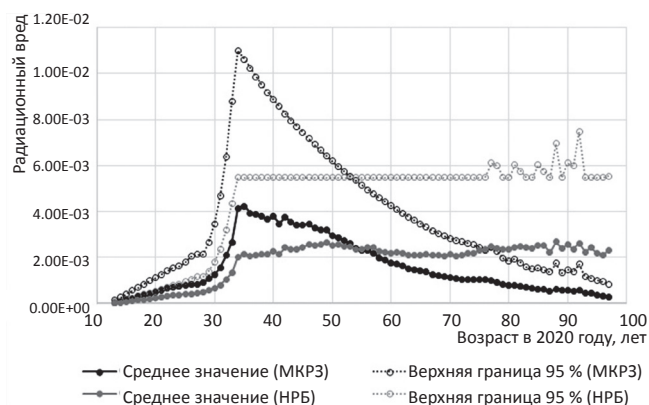


Рис. 7. Средние значения и верхние границы 95 % радиационного вреда, рассчитанные по методике МКРЗ [1], а также соответствующие значения номинального вреда НРБ-99/2009 [3] для различных возрастных групп женского населения загрязнённых территорий
Fig. 7. Average values and upper limits 95 % of radiation harm calculated by the ICRP method [1], as well as corresponding values of nominal harm according to RSS-99/2009 [3] for different age groups of the female population of contaminated territories

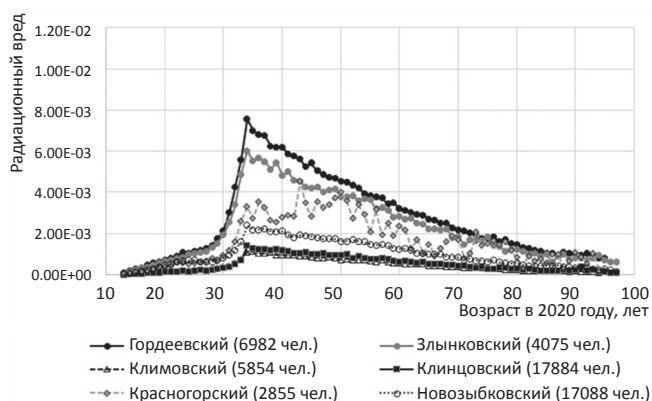


Рис. 8. Радиационный вред (согласно методике МКРЗ) для мужского населения, проживающего в шести загрязнённых районах Брянской области

Fig. 8. Radiation harm (according to the ICRP methodology) for the male population living in six districts of the Bryansk region

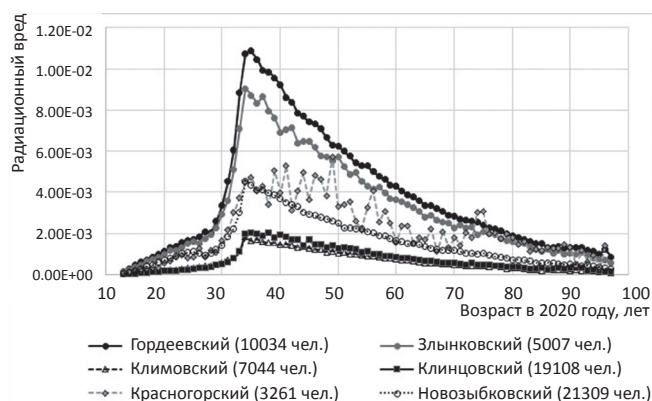


Рис. 9. Радиационный вред (согласно методике МКРЗ) для женского населения, проживающего в шести загрязнённых районах Брянской области

Fig. 9. Radiation harm (according to the ICRP methodology) for the female population living in six districts of the Bryansk region

что существенно меньше максимальной накопленной дозы 707,15 мЗв для исследуемого населения.

Поскольку номинальный вред по НРБ-99/2009 не зависит от пола и возраста, его максимальное значение соответствует максимальной накопленной дозе (для двух женщин в возрасте 56 и 74 года из того же Красногорского района): $5,5 \times 10^{-3} \text{ Зв}^{-1} \times 0,70715 \text{ Зв} = 3,89 \times 10^{-2}$.

Наибольшую дозу облучения имеет население, проживающее в шести загрязнённых районах Брянской области: Гордеевский, Злынковский, Климовский, Клинцовский, Красногорский и Новозыбковский. Население этих районов составляет 82,1 % от всего исследуемого населения. На рис. 8 и 9 приведены средние значения радиационного вреда МКРЗ [1] для мужского и женского населения этих районов соответственно. Из этих рисунков видно, что наибольший потенциальный радиационный вред имеют жители Гордеевского района. Этот вред приближается, а в некоторых случаях даже выше верхней границы 95 % вреда для всего исследуемого населения.

Обсуждение

Неопределённость оценки потенциального радиационного вреда для облучённого населения связана, в основном, с неопределённостью оценки эквивалентных доз облучения в органах и тканях [6], с возможностью выбора различных моделей радиационных рисков, со статистической неопределённостью их параметров, неопределённостью фоновых показателей заболеваемости и смертности исследуемого населения [2, 11].

Общей особенностью международных моделей радиационного риска является то, что они в основном идентифицировались по данным японской когорты лиц, облучённых в 1945 г. (когорты LSS). Для прогноза радиационных рисков населения России от внутреннего (не равномерного по тканям и органам) облучения требуется идентификация моделей радиационных рисков по отдельным локализациям ЗНО на россий-

ских когортах облучённых лиц. Соответствующие радиационно-эпидемиологические исследования проводятся в НРЭР [12, 13], но набор идентифицированных моделей пока не достаточен для прогноза рисков от внутреннего облучения с той степенью подробности, как это возможно при использовании набора моделей МКРЗ [1] или НКДАР ООН [3].

В представленной работе рассмотрен метод расчёта радиационного вреда на основе моделей радиационных рисков, рекомендованных МКРЗ [1]. В отчётах НКДАР ООН [3] и ВОЗ [10] изложены другие модели и методы расчёта радиационных рисков, которые отличаются от моделей МКРЗ [1] как расчётными формулами, так и принятым перечнем локализаций ЗНО.

Набор моделей ВОЗ [10] по локализациям ограничен щитовидной железой, молочной железой и моделью для лейкозов, поэтому он не пригоден для расчёта радиационных рисков человека от внутреннего облучения ^{137}Cs , при котором в разной мере облучаются все органы и ткани. В наборе моделей риска НКДАР ООН [3] по локализациям отсутствует модель для рака яичника, но представлены модели для рака кости, мозга и немеланогенного рака кожи, которые отсутствуют в наборе моделей МКРЗ [1].

Доза облучения костей от ^{137}Cs при его поступлении в организм человека, как показано на рис. 1, мало отличается от доз облучения других органов и тканей, и суммарный радиационный риск для всего организма, рассчитанный только в рамках набора моделей МКРЗ [1], был бы заниженным. Поэтому в данной работе влияние внутреннего облучения от ^{137}Cs на развитие рака кости учитывалось по соответствующей модели НКДАР ООН [3].

Существенным отличием расчёта пожизненных радиационных рисков МКРЗ [1] от расчётов, используемых НКДАР ООН [3] и ВОЗ [10], является применение параметра $DDREF = 2$, в два раза снижающего радиационные риски от их исходных, рассчитанных непосредственно по моделям, значений. Оценка радиационных рисков по методу МКРЗ [1] являются менее

консервативной, чем оценка по методам НКДАР ООН [3] или ВОЗ [10], в которых *DDREF* не используется. Однако в уже сложившейся международной практике разработки систем норм и правил радиационной безопасности, именно модели риска МКРЗ используются для вычисления коэффициентов номинального риска и последующего обоснования дозовых нормативов [9, 14]. Поэтому и в данной работе радиационный вред для населения от загрязнений ^{137}Cs вычислялся в основном с использованием моделей риска МКРЗ [1].

При прогнозе пожизненных радиационных рисков использовались фоновые показатели заболеваемости и смертности российской населения за 2017 г. [7], которые, однако, не будут оставаться постоянными на протяжении временного периода прогноза рисков (порядка 100 лет). Данный подход может занижать прогноз радиационных рисков и потенциального радиационного вреда, если наблюдавшаяся до сих пор тенденция увеличения онкозаболеваемости со временем сохранится и в будущем.

Величина неопределённости полученных в данной работе оценок потенциального радиационного вреда требует отдельного исследования и разработки соответствующих программных средств расчёта.

Заключение

В работе проведены расчеты радиационного вреда для населения, проживающего в настоящее время (в 2020 г.) на территориях России, загрязнённых ^{137}Cs после Чернобыльской аварии. Радиационный вред рассчитывался двумя способами: по исходной методике МКРЗ [1], и приближённо как произведение номинального коэффициента риска по НРБ-99/2009 [9] на эффективную дозу (номинальный радиационный вред).

В 2020 г. для мужчин в возрасте 44 года и для женщин в возрасте 55 лет номинальный радиационный

вред приблизительно равен значению радиационного вреда, рассчитанного по методике МКРЗ [1]. При этом номинальный вред существенно (до 2,3 раза) занижен для младших и завышен для старших возрастов.

В 2020 г. критическими группами населения, имеющими максимальные накопленные дозы и максимальный радиационный вред, являются мужчины в возрасте 34 года и женщины в возрасте 35 лет. Для этих групп населения накопленные средние эффективные дозы составили 35,3 мЗв и 39,2 мЗв, а средний радиационный вред – $2,6 \times 10^{-3}$ и $4,2 \times 10^{-3}$ для мужчин женщин соответственно.

По районам проживания самые высокие показатели как дозы облучения, так и радиационного вреда, наблюдаются для шести районов Брянской области: Гордеевский, Злынковский, Климовский, Клиновский, Красногорский, Новозыбковский.

Для 11,8 % населения (для 8,3 % мужчин и 14,8 % женщин) индивидуальный радиационный вред, рассчитанный по методике МКРЗ [1], превышает предельное значение $3,5 \times 10^{-3}$, соответствующее предельному приросту за 70 лет облучения индивидуального пожизненного риска для населения ($5,0 \times 10^{-5}$ от облучения в течение года [9]) при нормальных условиях облучения. Максимальные радиационный вред $3,9 \times 10^{-2}$ найден для женщины Красногорского района Брянской области в возрасте 35 лет, при накопленной эффективной дозе 392 мЗв.

Результаты данной работы могут быть использованы при подготовке рекомендаций органам здравоохранения по улучшению медицинского наблюдения за облученными гражданами, проживающими на загрязнённых радионуклидами территориях, а также при разработке нормативных документов по оказанию адресной медицинской помощи лицам из групп повышенного радиационного риска с использованием методов персонализированной медицины.

Forecast of Radiation Risks of the Population in the Contaminated ^{137}Cs Territories of Russia, in Accordance with Current ICRP Recommendations

A.N. Menyajlo, V.V. Kashcheev, E.A. Pryakhin, S.Yu. Chekin, M.A. Maksioutov, K.A. Tumanov, V.K. Ivanov

A. Tsyb Medical Radiological Research Center — branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Kaluga region

ABSTRACT

Purpose: Calculations of radiation detriment to the population currently living (in 2020) in the territories of Russia contaminated with ^{137}Cs after the Chernobyl accident in 1986.

Material and methods: Radiation detriment was calculated in two ways: according to the original ICRP method, and approximate calculation as the product of the nominal risk factor of RSS-99/2009 by the effective dose (nominal radiation detriment). For ICRP calculations, equivalent doses were estimated using the dose coefficients of the US Environmental Protection Agency (EPA). The number of the studied population at the beginning of 2020 was 142676 people, 65205 men and 77471 women. This is mainly the population of the Bryansk region and Tula region, 85.5 % and 10 % of the total population, respectively. The average accumulated effective dose of the population was 30.6 mSv, and the maximum individual accumulated dose was 707 mSv.

Results: In 2020, for men at the age of 44 and for women at the age of 55, the nominal radiation detriment is approximately equal to the value of radiation detriment calculated using the ICRP method. At the same time, the nominal detriment is significantly (up to 2.3 times) underestimated for younger and overestimated for older ages. In 2020, the critical population groups with the highest accumulated doses and maximum radiation detriment are men aged 34 and women aged 35. For these population groups, the average accumulated effective doses were 35.3 mSv and 39.2 mSv, and the average radiation detriment was 2.6×10^{-3} and 4.2×10^{-3} , for

men and women, respectively. For 11.8 % of the population (8.3 % of men and 14.8 % of women), the individual radiation detriment calculated using the ICRP method exceeds the value of 3.5×10^{-3} , which corresponds to the maximum increase in individual risk for the population over 70 years of exposure, established by RSS-99/2009 for normal exposure conditions. The maximum radiation detriment of 3.9×10^{-2} was found for a woman of the Krasnogorsky district of the Bryansk region at the age of 37 years, with an accumulated effective dose of 392 mSv.

Conclusion: The results of this work can be used in preparing recommendations to health authorities on improving medical supervision of exposed citizens living in areas contaminated with radionuclides, as well as in developing regulatory documents for the provision of targeted medical care to people from high radiation risk groups using personalized medicine methods.

Key words: lifetime radiation risk, RSS-99/2009, Chernobyl accident, ^{137}Cs , population of contaminated areas, radiation risk models, nominal risk coefficient

For citation: Menyajlo AN, Kashcheev VV, Pryakhin EA, Chekin SYu, Maksoutov MA, Tumanov KA, Ivanov VK. Forecast of Radiation Risks of the Population Living in the Contaminated ^{137}Cs Territories of Russia, in Accordance with Current ICRP Recommendations. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):45-52. (In Russ.).

DOI: 10.102737/1024-6177-2020-65-3-45-52

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ. Под ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: 2009. 312 с. URL: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (дата обращения 13.04.2020 г.). [ICRP Publication 103. Ed by Kiselev MF, Shandala NK, Moscow. 2009. 312 p. Available from: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (cited 13.04.2020). (In Russ.).]
2. Preston DL, Kusumi S, Tomonaga M, Izumi S, Ron E, Kuramoto A, et al. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950–1987. *Radiat Res.* 1994;137 (Suppl.):68–97.
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 Report Vol. I, Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. New York: 2008.
4. Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., Максютлов М.А., Корело А.М., Туманов К.А. и др. Пожизненный радиационный риск в результате внешнего и внутреннего облучения: метод оценки. *Радиация и риск.* 2018;27(1):5–21. [Menyajlo AN, Chekin SYu, Kashcheev VV, Maksoutov MA, Korelo AM, Tumanov KA, et al. Lifetime attributable risks from external and internal exposure to radiation: method for estimating. *Radiation and Risk.* 2018;27(1):5–21. (In Russ.).]
5. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public; Ver. 3.0, official website. URL: <http://www.icrp.org/page.asp?id=402> (дата обращения 19.05.2020).
6. DCAL Software and Resources. URL: <https://www.epa.gov/radiation/dcal-software-and-resources> (дата обращения 19.05.2020).
7. Медицинские радиологические последствия Чернобыля: прогноз и фактические данные спустя 30 лет. Под ред. В.К. Иванова, А.Д. Каприна. М.: ГЕОС, 2015. 450 с. [Health effects of Chernobyl: Prediction And Actual Data 39 Years after the Accident. Ed. by Ivanov VK, Kaprin AD. Moscow. 2015. 450 p. (In Russ.).]
8. Злокачественные новообразования в России в 2017 году (заболеваемость и смертность). Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2018. [Malignant neoplasms in Russia in 2017 (morbidity and mortality). Ed by Kaprin AD, Starinskiy VV, Petrova GV. Moscow. 2018. (In Russ.).]
9. 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. [Radiation safety standards (RSS-99/2009). Sanitary-epidemiological rules and standards. SP2.6.1.252309. Moscow. 2009. 100 p. (In Russ.).]
10. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation. World Health Organization, 2013.
11. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Radiat Res.* 2007;168:1–64.
12. Иванов В.К., Карпенко С.В., Кашеев В.В., Чекин С.Ю., Максютлов М.А., Туманов К.А., и др. Радиационные риски российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС за период 1992–2017 гг. Часть I: заболеваемость солидными раками. *Радиация и риск.* 2019;28(4):16–30. [Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV, Chekin SYu, Maksoutov MA, Tumanov KA, et al. Radiation risks of Russian liquidators of the Chernobyl accident for the period 1992–2017. Part I: Solid cancer incidence. *Radiation and Risk.* 2019;28(4):16–30. (In Russ.).]
13. Иванов В.К., Карпенко С.В., Кашеев В.В., Чекин С.Ю., Максютлов М.А., Туманов К.А., и др. Радиационные риски российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС за период 1992–2017 гг. Часть II: смертность от солидных раков. *Радиация и риск.* 2020;29(1):18–31. [Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV, Chekin SYu, Maksoutov MA, Tumanov KA, et al. Radiation risks of Russian liquidators of the Chernobyl accident for the period 1992–2017. Part II: Solid cancer mortality. *Radiation and Risk.* 2020;29(1):18–31. (In Russ.).]
14. Радиационная защита и безопасность источников излучения. Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 311 с. [Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. International Basic Safety Standards, GSR Part 3 (Interim), General Safety Requirements. Vienna: IAEA; 2015. 311 p. (In Russ.).]

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 22.06.2020. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 22.06.2020. **Accepted for publication:** 24.06.2020.