

А.Н. Меняйло, С.Ю. Чекин, М.А. Максютов, Е.В. Кочергина, О.К. Власов, Н.В. Щукина, П.В. Кащеева

ПРОГНОЗ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ РАКА ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ СРЕДИ НАСЕЛЕНИЯ РАЙОНОВ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВСЛЕДСТВИЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС, С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ОЦЕНОК МОДЕЛЕЙ РИСКА

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

Контактное лицо: Александр Николаевич Меняйло, e-mail: nrer@obninsk.com

РЕФЕРАТ

Цель: Прогноз пожизненного атрибутивного радиационного риска заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО) щитовидной железы и выделение групп повышенного радиационного риска (ГПР) для населения Брянской области, проживающего в настоящее время (на начало 2023 г.) в шести районах, наиболее загрязненных радионуклидами после аварии на Чернобыльской АЭС, на основе консервативного подхода с учетом факторов неопределенности доз и параметров математических моделей риска.

Материал и методы: Математической моделью радиационного риска заболеваемости ЗНО щитовидной железы является модель, рекомендованная Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ). Оценка неопределённостей радиационных рисков проводилась методом имитационного моделирования, т.е. путем многократного расчета случайных реализаций риска с использованием разыгранных по статистическим законам нормального или логнормального распределения всех параметров, участвующих в расчете этого риска. По набору случайных реализаций оценивались 95 %-ые доверительные границы рисков. В качестве исходных данных для расчета использовалась Единая федеральная база данных Национального радиационно-эпидемиологического регистра (НРЭР), содержащая реконструированные поглощенные дозы в щитовидной железе у населения.

Результаты: На начало 2023 г. максимальными радиационными рисками ЗНО щитовидной железы характеризуется группа 37–40-летних женщин. По консервативным оценкам (по верхним 95 % доверительным границам оценок радиационных рисков) до 19,9 % лиц из этой группы в будущем могут столкнуться с развитием радиационно-обусловленных ЗНО щитовидной железы, а для 37-летних женщин эта доля может составить до 30,0 %. Наибольший риск прогнозируется для лиц, проживающих в Красногорском районе Брянской области. Радиационно-обусловленные ЗНО щитовидной железы могут развиться у 40,1 % лиц из этой группы. Радиационные риски ЗНО щитовидной железы у мужчин до 10 раз ниже, чем у женщин. Для 74,5 % лиц от численности всей исследованной когорты прогнозируется превышение предельного индивидуального риска $5,0 \times 10^{-5}$, установленного НРБ-99/2009 для населения в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения.

Выводы: В настоящее время (с 2023 г. и пожизненно) население наиболее загрязненных районов Брянской области продолжает находиться под высоким риском развития радиационно-обусловленных ЗНО щитовидной железы. В группу максимального риска следует выделить женщин в возрасте 0–3 года на момент облучения (в 1986 г.). Результаты данной работы могут быть использованы при подготовке рекомендаций органами здравоохранения по улучшению медицинского наблюдения за облученными гражданами.

Ключевые слова: пожизненный атрибутивный радиационный риск, Чернобыльская авария, злокачественное новообразование, щитовидная железа, население загрязненных территорий, модели радиационного риска, поглощенная доза

Для цитирования: Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Максютов М.А., Кочергина Е.В., Власов О.К., Щукина Н.В., Кащеева П.В. Прогноз радиационных рисков рака щитовидной железы среди населения районов Брянской области, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, с учетом неопределенностей оценок моделей риска // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 4. С. 51–57. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-4-51-57

DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-4-51-57

A.N. Menyajlo, S.Yu. Chekin, M.A. Maksioutov, E.V. Kochergina, O.K. Vlasov, N.V. Shchukina, P.V. Kascheeva

Forecast of Radiation Risks of Thyroid Cancer among the Population of Areas of the Bryansk Region Contaminated as a Result of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant, allowing for Uncertainties in Risk Model Estimates

A.F. Tsyb Medical Radiological Research Centre – branch of the National Medical Research Radiological Centre,
Obninsk, Russia

Contact person: A.N. Menyajlo, e-mail: nrer@obninsk.com

ABSTRACT

Purpose: Forecasting the lifetime attributable radiation risk of incidence with malignant neoplasm (MN) of the thyroid gland and identifying groups of increased radiation risk (HR) for the population of the Bryansk region currently (at the beginning of 2023) living in six areas most contaminated with radionuclides after the accident at Chernobyl NPP, based on a conservative approach, taking into account dose uncertainty factors and parameters of mathematical risk models.

Material and methods: The mathematical model of the radiation risk of thyroid cancer is the model recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). The uncertainty assessment of radiation risks was carried out by simulation modeling, i.e. by multiple calculation of random realizations of the risk using the normal or log-normal distribution of all parameters involved in the calculation of this risk. Based on a set of random realizations, 95 % confidence limits of risks were estimated. The Unified Federal Database of the

National Radiation and Epidemiological Register (NRER) containing reconstructed absorbed doses in the thyroid gland in the population was used as the initial data for the calculation.

Results: At the beginning of 2023, the group of 37–40-year-old women is characterized by the maximum radiation risks of thyroid cancer. According to conservative estimates (according to the upper 95 % confidence limits of radiation risk assessments), up to 19.9 % of people from this group may experience the development of radiation-induced thyroid cancer in the future, and for 37-year-old women this proportion can be up to 30.0 %. The greatest risk is predicted for people living in the Krasnogorsk district of the Bryansk region. Radiation-induced thyroid cancer can develop in 40.1 % of individuals from this group. Radiation risks of thyroid cancer in men are up to 10 times lower than in women. For 74.5 % of the population of the entire studied cohort, it is predicted that the maximum individual risk of 5.0×10^{-5} , established by NRB-99/2009 for the population under normal operation of ionizing radiation sources, will be exceeded.

Conclusions: At present (since 2023 and for life), the population of the most polluted districts of the Bryansk region continues to be at a high risk of developing radiation-induced thyroid cancers. Women at the age of 0–3 years at the time of exposure (in 1986) should be allocated to the maximum risk group. The results of this work can be used in the preparation of recommendations by health authorities to improve medical monitoring of exposed citizens.

Keywords: lifetime attributable risk, Chernobyl accident, malignant neoplasm, thyroid gland, population of contaminated territories, radiation risk models, absorbed dose

For citation: Menyajlo AN, Chekin SYu, Maksioutov MA, Kochergina EV, Vlasov OK, Shchukina NV, Kascheeva PV. Forecast of Radiation Risks of Thyroid Cancer among the Population of Areas of the Bryansk Region Contaminated as a Result of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant, allowing for Uncertainties in Risk Model Estimates. Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68(4):51–57. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-4-51-57

Введение

В Международной шкале ядерных и радиологических событий (ИНЕС) [1] для сопоставления радиоактивных выбросов различного радиоизотопного состава по уровню эффективной дозы и тяжести последствий используется понятие радиологической эквивалентности относительно выброса ^{131}I . Несмотря на то, что изначально выбор этого референсного изотопа был исторически обусловленным и связанным с физикой реакторов, опыт исследования последствий радиационных аварий наивысшего (седьмого) уровня опасности, а именно – аварий на Чернобыльской АЭС и на АЭС в Фукусиме, показал, что их основным радиологическим последствием для населения является именно воздействие радиоизотопов йода на щитовидную железу (ЩЖ) [2]. Поскольку это воздействие сосредоточено в одном органе, согласно современным рекомендациям МКРЗ [3], наиболее адекватную оценку последствий для здоровья человека предоставляет оценка радиационного риска на основе поглощенной дозы в органе.

При оценке долговременных радиологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС прогноз заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО) ЩЖ до сих пор имеет большое значение при планировании и оптимизации оказания адресной медицинской помощи населению загрязненных радионуклидами территорий [4]. Оценкам доз населения после аварийных выбросов, а также коэффициентам моделей радиационных рисков присущи неотъемлемые неопределенности [5]. В настоящее время, принимая во внимание общий принцип МКРЗ консервативных оценок безопасности, обсуждается важность понимания степени этого консерватизма и неопределенности для решения практических задач радиационной защиты [6].

Целью данной работы является прогноз пожизненного атрибутивного радиационного риска (LAR, от англ. Lifetime Attributable Risk) ЗНО ЩЖ и выделение групп повышенного радиационного риска (ГПР) для населения Брянской области, проживающего в районах, наиболее загрязненных радионуклидами после аварии на Чернобыльской АЭС, на основе консервативного подхода с учетом факторов неопределенностей доз и параметров математических моделей риска.

Материал и методы

В данной работе источником информации о дозах излучения радиоизотопов йода в ЩЖ населения за-

грязненных районов Брянской области являлась Единая федеральная база данных (ЕФБД) Национального радиационно-эпидемиологического регистра (НРЭР) [4]. Эта база данных содержит оценки индивидуализированных (для каждого возраста при поступлении йода в организм) поглощенных доз в ЩЖ лиц из населения, реконструированных по официальной методике [7], на основе данных о плотности загрязнения территорий радионуклидами цезия. Средние в возрастных группах дозы в ЩЖ у населения по населенным пунктам были опубликованы ранее [8].

Оценки пожизненного атрибутивного радиационного риска (LAR) ЗНО ЩЖ вычислялись для населения шести районов Брянской области, наиболее загрязненных радионуклидами после аварии на Чернобыльской АЭС: для Гордеевского, Злынковского, Климовского, Клинцовского, Красногорского и Новозыбковского районов. Для минимизации неопределенности оценок доз и радиационных рисков были отобраны лица с реконструированной поглощенной дозой в ЩЖ, постоянно проживавшие с 1986 по 2022 гг. в исследуемых районах Брянской области, у которых до 2022 г. включительно не было зарегистрировано случаев заболеваний ЗНО. Общая численность исследуемого населения на конец 2022 г. составила 39604 чел.: 15483 мужчины и 24121 женщины. На рис. 1 представлено половозрастное распределение исследуемого населения в 2022 г.

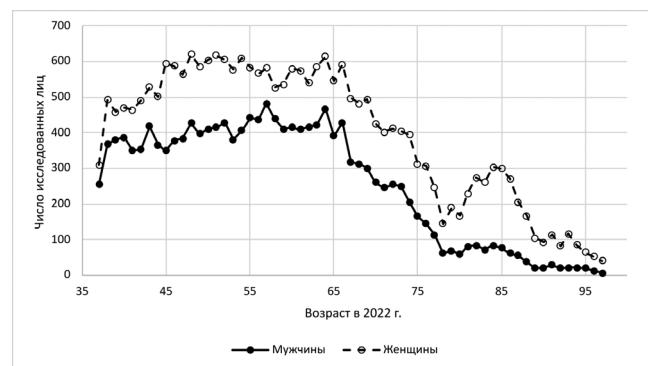


Рис. 1. Половозрастное распределение численности исследуемого населения в 2022 г.

Fig. 1. Sex and age distribution of the study population in 2022

Среднее значение поглощенной дозы в ЩЖ среди исследуемого населения составило 149,4 мГр, при общем разбросе индивидуализированных доз от 6,6 до 3551 мГр (всего 1239 различных значений реконструированных поглощенных доз). Распределение реконструированных значений поглощенных доз в ЩЖ представлено диаграммой рассеяния на рис. 2.

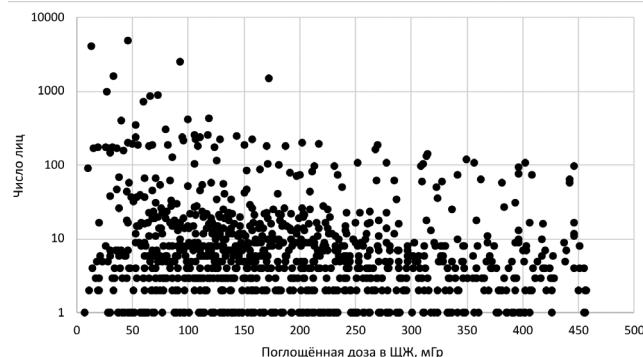


Fig. 2. Distribution of the reconstructed thyroid absorbed doses for the study population

Зависимости средней по району поглощенной дозы в ЩЖ от возраста на момент облучения для населения шести исследуемых районов Брянской области представлены на рис. 3 и 4 (для мужчин и женщин соответственно).

Из этих рисунков видно, что максимальная доза в ЩЖ наблюдалась у лиц, бывшими детьми на момент аварии на Чернобыльской АЭС. Так, доза новорожденных в 9–22 раз больше дозы 30-летних лиц из населения. Наибольшая доза была получена проживающими в Красногорском районе Брянской области. В этом районе доза в среднем в 3 раза больше, чем по остальным исследуемым районам.

Для расчета радиационных рисков в данной работе применяется метрика пожизненного атрибутивного радиационного риска (LAR) заболеваемости ЗНО ЩЖ. Величина LAR – это интегральный показатель риска, характеризующий радиационные последствия в целом за период жизни человека. Эта величина характеризует избыточное число радиационно-обусловленных ЗНО ЩЖ, превышающих фоновое (в отсутствии облучения) число таких ЗНО, которые могут возникнуть после облучения в течение всей последующей жизни в исследуемой когорте. Величина LAR складывается из избыточных годовых интенсивностей абсолютного риска (EAR, от англ. Excess Absolute Rate) для каждого будущего возраста дожития после текущего возраста, с весом вероятности дожития до этого будущего возраста. При этом величина EAR характеризует избыточный годовой показатель заболеваемости, по сравнению с таковым в необлученной группе лиц.

$$LAR(s, e, g, d) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{100} S(s, e, a) \cdot EAR(s, g, a, d), \quad (1)$$

где s – категориальная переменная пола (две категории – мужчины и женщины); e – текущий возраст (на начало 2023 г.), в годах; g – возраст на момент облучения, в годах; a – будущий возраст дожития, в годах; d – поглощенная доза в ЩЖ, Гр; EAR – избыточная годовая интенсивность абсолютного риска, 1/год; $DDREF=2$ – фактор эффективности дозы и мощности дозы.

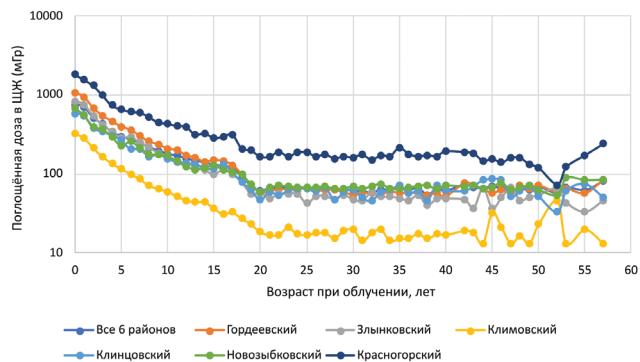


Рис. 3. Средняя поглощенная доза в щитовидной железе среди мужского населения шести исследуемых районов Брянской области в зависимости от возраста на момент облучения

Fig. 3. The average absorbed dose in the thyroid gland for the male population of the six study districts of the Bryansk region, depending on age at the time of exposure

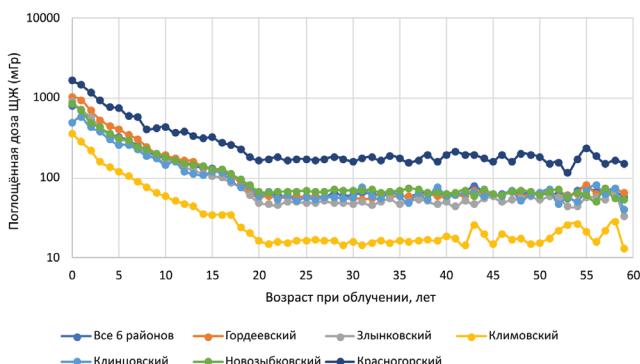


Рис. 4. Средняя поглощенная доза в щитовидной железе среди женского населения шести исследуемых районов Брянской области в зависимости от возраста на момент облучения

Fig. 4. The average absorbed dose in the thyroid gland for the female population of the six study districts of the Bryansk region, depending on age at the time of exposure

Расчет по моделям радиационного риска МКРЗ [3] подразумевает применение так называемого фактора эффективности дозы и мощности дозы (DDREF, от англ. Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor), снижающего оценки радиационного риска в 2 раза для малых доз облучения и/или малых мощностей доз, по сравнению с условиями острого облучения населения при атомных бомбардировках японских городов Хиросима и Нагасаки в 1945 г. Согласно МКРЗ [3], 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». Этот коэффициент по рекомендации МКРЗ следует брать равным 2, что и делается при выполнении расчетов по формуле (1).

Для расчета пожизненного риска развития ЗНО ЩЖ использовалась модель избыточной годовой интенсивности относительного риска (ERR, от англ. Excess Relative Rate) МКРЗ [3]:

$$ERR(s, g, d) = \beta_s \cdot d \cdot 0,44^{0,1 \cdot (g-30)}, \quad (2)$$

где коэффициент $\beta = 0,53$ для мужчин и $\beta=1,05$ для женщин; остальные обозначения соответствуют обозначениям в формуле (1).

При этом EAR представляется мультипликативной, по отношению к фоновому годовому показателю заболеваемости, моделью интенсивности радиационного риска:

$$EAR(s, g, a, d) = \lambda_0(s, a) \cdot ERR(s, g, d), \quad (3)$$

где $\lambda_0(s, a)$ – фоновый (в отсутствии облучения) годовой показатель заболеваемости ЗНО ЩЖ для исследуемого населения (в данной работе использовались фоновые показатели для Брянской области [9]), 1/год; остальные обозначения соответствуют обозначениям в формуле (1).

Оценка неопределенностей LAR в данной работе осуществлялась методом имитационного моделирования. Этот метод предполагает многократные случайные численные реализации переменных и параметров, входящих в модель LAR (1), по заданным статистическим законам, что приводит к получению набора случайных реализаций LAR. По этому набору оценивается неопределенность величины LAR, а именно ее 95 %-ые нижние и верхние доверительные границы (ДГ).

В настоящей работе для получения случайных реализаций LAR случайным образом разыгрывались параметры β_s из модели (2), а также поглощенная доза d в ЩЖ. Параметры β_s разыгрывались по закону нормального распределения со стандартным отклонением, равным 0,0457 [10]. Поглощенная доза в ЩЖ разыгрывалась по закону логнормального распределения. В качестве характеристики разброса случайных реализаций поглощенной дозы в ЩЖ использовалось стандартное геометрическое отклонение (СГО), равное 2,2, которое приблизительно одинаково для населения всех загрязненных районов Брянской области [4].

Для получения оценок 95 %-ых ДГ случайной величины LAR использовалось 1000 случайных реализаций этого риска, что дает приемлемую точность и при этом требуется небольшое время вычислений.

Результаты

На рис. 5 и 6 представлены значения LAR с 95 % ДГ в зависимости от возраста в 2023 г. для мужчин и женщин соответственно. Из этих рисунков видно, что у лиц, которые были новорожденными на момент аварии на Чернобыльской АЭС (возраст 37 лет в 2023 г.), до сих пор сохраняется существенный риск радиационно-обусловленного развития ЗНО ЩЖ. Особенно это касается лиц женского пола, так как коэффициент риска на единицу дозы у женщин до 10 раз выше коэффициента риска мужчин. В исследуемой группе лиц среди 37-летних женщин пожизненно ожидается 35 случаев ЗНО ЩЖ. Так как всего в исследуемой когорте в этом возрасте наблюдалось 309 женщин, у 11 % женщин, которые были новорожденными на момент аварии на Чернобыльской АЭС, ожидается появление ЗНО ЩЖ.

Если использовать консервативную оценку риска по верхней 95 %-ой ДГ, то радиационно-обусловленные ЗНО ЩЖ следует ожидать у 30 % женщин. Для 37-летних мужчин аналогичные оценки будут составлять 1,2 % от общей численности группы при использовании в расчетах средней оценки риска, и 3,1 %, если использовать верхнюю 95 %-ую ДГ риска.

С увеличением возраста риски уменьшаются: для 55-летних женщин в исследуемой когорте LAR становится менее 0,002, и около 0,0002 – для 55-летних мужчин.

Всего в исследуемой когорте ожидается 18 избыточных радиационно-обусловленных случаев ЗНО ЩЖ

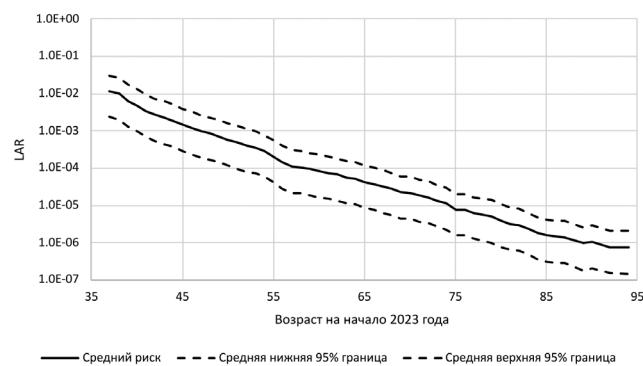


Рис. 5. Величины LAR заболеваемости ЗНО щитовидной железы среди мужчин, проживающих на начало 2023 г. в шести исследуемых облученных районах Брянской области

Fig. 5. LAR of thyroid cancer incidence for the male population at the beginning of 2023 in the six studied exposed districts of the Bryansk region

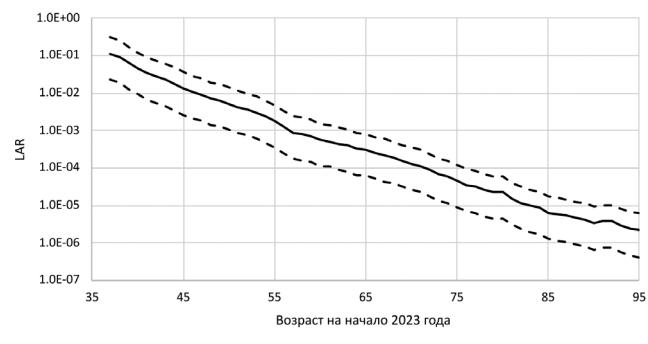


Рис. 6. Величины LAR заболеваемости ЗНО щитовидной железы среди женщин, проживающих на начало 2023 г. в шести исследуемых облученных районах Брянской области

Fig. 6. LAR of thyroid cancer incidence for the female population at the beginning of 2023 in the six studied exposed districts of the Bryansk region

среди мужчин, при 90 %-ом доверительном интервале (ДИ) от 4 случаев до 48 случаев, и 222 избыточных радиационно-обусловленных случая среди женщин (при 90 %-ом ДИ от 44 до 594 случаев). Учитывая, что в исследуемой когорте наблюдаются 15483 мужчины и 24121 женщина, получим, что доля мужчин, у которых ожидаются избыточные радиационно-обусловленные ЗНО ЩЖ, равна 0,11 % (90 %-ый ДИ от 0,025 % до 0,31 %). Аналогичная доля для женского населения составляет 0,92 % (90 %-ый ДИ от 0,18 % до 2,46 %).

Рассмотрим также отдельно группу лиц, достигших возраста 37–40 лет (включительно). В эту группу из исследуемых лиц попадает 1388 мужчин и 1729 женщин. Доля 37–40-летних мужчин, проживающих в загрязненных районах Брянской области, у которых ожидаются в будущем радиационно-обусловленные ЗНО ЩЖ, равна 0,78 % (90 %-ый ДИ от 0,16 % до 2,07 %), а доля женского населения составляет 7,5 % (90 %-ый ДИ от 1,5 % до 19,9 %).

Ниже на рис. 7 и 8 (для мужчин и женщин соответственно) показаны верхние 95 %-ые ДГ LAR заболеваемости ЗНО ЩЖ отдельно по шести исследуемым районам Брянской области.

Из рисунков видно, что наибольший риск заболеваемости ЗНО ЩЖ прогнозируется для лиц, проживающих в Красногорском районе Брянской области, а наименьший риск – в Климовском районе. В исследуемую группу лиц попали 2196 женщин, проживающих в Красногорском районе. Среди этих женщин в будущем

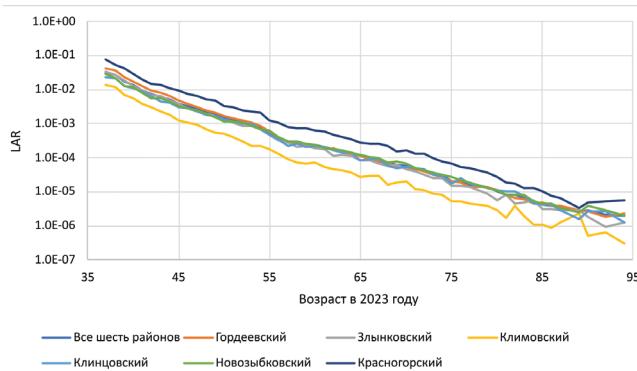


Рис. 7. Верхние 95 %-ые доверительные границы LAR заболеваемости ЗНО щитовидной железы среди мужчин, проживающих на начало 2023 г. в шести исследуемых облученных районах Брянской области (отдельно по районам)

Fig. 7. Upper 95 % confidence limit of the LAR of thyroid cancer incidence for the male population at the beginning of 2023 in the six studied exposed districts of the Bryansk region (separately by districts)

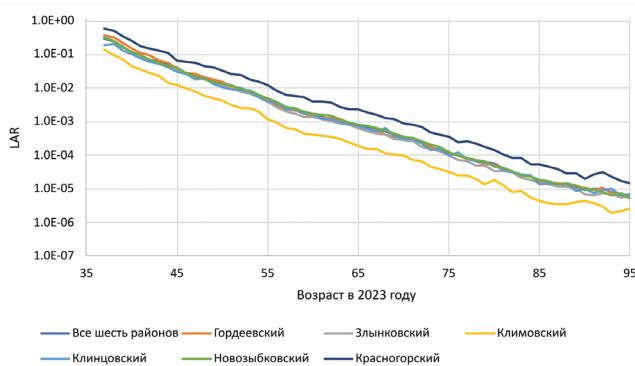


Рис. 8. Верхние 95 %-ые доверительные границы LAR заболеваемости ЗНО щитовидной железы среди женщин, проживающих на начало 2023 г. в шести исследуемых облученных районах Брянской области (отдельно по районам)

Fig. 8. Upper 95 % confidence limit of the LAR of thyroid cancer incidence for the female population at the beginning of 2023 in the six studied exposed districts of the Bryansk region (separately by districts)

ожидается 40 избыточных радиационно-обусловленных случаев ЗНО ЩЖ (1,8 % от общего числа женщин), а верхняя 95 %-ая ДГ доходит до 106 ожидаемых избыточных радиационно-обусловленных случаев (4,8 % от общего числа женщин). Для мужчин Красногорского района ожидаемое число случаев будущих избыточных радиационно-обусловленных случаев ЗНО ЩЖ равно 4 (0,26 % от всех мужчин), а верхняя 95 %-ая ДГ – 11 случаев (0,68 % от всех мужчин).

В возрасте 37 лет верхняя 95 %-ая ДГ риска LAR среди женщин Красногорского района доходит до 0,71 (среднее 0,60), а для 40-летних женщин из этого района верхняя 95 %-ая ДГ LAR снижается в 2,7 раза – до 0,26.

Для диапазона возрастов 37–40 лет в исследуемой группе лиц среди мужчин, проживающих в Красногорском районе Брянской области, в будущем ожидается 3 избыточных радиационно-обусловленных случая ЗНО ЩЖ (90 %-ый ДИ от 0 до 7), что соответствует доле 1,78 % (90 %-ый ДИ от 0,35 % до 4,56 %) от их общего числа. Для женщин из исследуемой группы этого возрастного диапазона, проживающих в Красногорском районе, ожидается 21 избыточный радиационно-обусловленный случай ЗНО ЩЖ (90 %-ый ДИ от 4 до 55), что соответствует доле от их численности 15,0 % (90 %-ый ДИ от 3,03 % до 40,1 %).

При определении групп населения с повышенным радиационным риском (ГПР) ЗНО ЩЖ следует использовать предел индивидуального годового риска для населения $5,0 \times 10^{-5}$ в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения, установленный действующими российскими Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [11]. При этом, в соответствии с рекомендациями МКРЗ [3], LAR заболеваемости ЗНО ЩЖ преобразуется в метрику радиационного ущерба, учитывающую такие нерадиационные факторы, как доля летальности ЗНО и фактор относительных потерь здоровой (без ЗНО) жизни. Для ЗНО ЩЖ радиационный ущерб составляет долю 0,40 от радиационных рисков заболеваемости среди мужчин и 0,39 – от радиационных рисков заболеваемости среди женщин [3].

Радиационный ущерб может быть определен по средней оценке риска заболеваемости, или, консервативно, по верхней 95 %-ой ДГ этой оценки. Группа повышенного радиационного риска определяется по превышению радиационным ущербом предела индивидуального годового риска для населения $5,0 \times 10^{-5}$ [11]. В табл. 1 приведена численность ГПР ЗНО ЩЖ по наиболее загрязненным районам Брянской области, включая консервативные оценки численности ГПР.

Табл. 1 демонстрирует, что в настоящее время население наиболее загрязненных районов Брянской области продолжает находиться под высоким риском развития радиационно-обусловленных ЗНО ЩЖ. При определении по средним оценкам радиационных рисков, численность ГПР составляет 62,2 % от численности исследованной когорты населения. Полученные в данной работе консервативные оценки радиационных рисков приводят к увеличению численности ГПР ЗНО ЩЖ на 19,9 % – до 74,5 % от численности всей когорты.

Обсуждение

В данной работе расчеты LAR проведены на основе модели риска ЗНО ЩЖ, предложенной МКРЗ [3]. Другие признанные международные модели риска разрабо-

Таблица 1

Численность групп повышенного риска (ГПР) ЗНО щитовидной железы из исследованной когорты лиц, постоянно проживающих в наиболее загрязненных районах Брянской области (данные на 31.12.2022 г.)

The number of high-risk groups (HRGs) of thyroid cancer from the studied cohort of persons permanently residing in the most polluted districts of the Bryansk region (data as of 12/31/2022)

Район	Пол	Население, чел	ГПР, чел	Доля ГПР, %	ГПР, консервативная оценка, чел	Доля ГПР, консервативная оценка %	Увеличение доли ГПР, %
Гордеевский	М	4162	2039	49,0	2817	67,7	38,2
	Ж	7278	5448	74,9	6045	83,1	11,0
Злынковский	М	1934	993	51,3	1318	68,1	32,7
	Ж	2641	1894	71,7	2134	80,8	12,7
Климовский	М	3391	1328	39,2	1744	51,4	31,3
	Ж	4737	2586	54,6	3371	71,2	30,4
Клинцовский	М	1127	595	52,8	763	67,7	28,2
	Ж	1671	1127	67,4	1282	76,7	13,8
Красногорский	М	1675	1180	70,4	1458	87,0	23,6
	Ж	2196	1851	84,3	1959	89,2	5,8
Новозыбковский	М	3194	1550	48,5	2171	68,0	40,1
	Ж	5598	4032	72,0	4458	79,6	10,6
Все население		39604	24623	62,2	29520	74,5	19,9

таны Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) [12] и Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) [2]. В этих моделях наблюдается существенное отличие от модели МКРЗ. Во-первых, НКДАР ООН и ВОЗ предлагают использовать не только мультиплекативную модель (ERR), а усреднение между мультиплекативной (ERR) и аддитивной моделями (EAR). Также модели НКДАР ООН имеют неопределенность при возрасте на момент облучения 0 лет. Модели радиационных рисков НКДАР ООН и ВОЗ учитывают больший объем накопленных радиационно-эпидемиологических данных, но в данной работе выбор модели МКРЗ [3] для расчета радиационного риска ЗНО ЩЖ обусловлен, в основном, прикладными причинами, а именно тем, что этими моделями обосновываются действующие международные и российские нормы радиационной безопасности.

Расчеты LAR проводились с учетом неопределенности оценок доз облучения и параметров моделей риска, однако изменение со временем фоновых показателей заболеваемости ЗНО ЩЖ у населения в расчетах не учитывалось. Использовались фиксированные фоновые показатели Брянской области за 2019 г. [9].

Точность оценки доверительных границ при использовании способе имитационного моделирования зависит от числа случайных реализаций LAR, выбранного для оценки этих границ. В данной работе используется 1000 случайных реализаций. Увеличение этого числа пропорционально увеличит время вычислений до неприемлемых значений, а уменьшение – снизит точность оценки доверительных границ. Для того, чтобы оценить с какой точностью будут оценены доверительные границы при 1000 случайных реализаций, были проведены дополнительные исследования. Было получено 1000 оценок верхних 95 %-ых ДГ для LAR заболеваемости ЗНО ЩЖ с поглощенной дозой в ЩЖ, равной 150 мГр, в возрасте при облучении 0 лет. Каждая верхняя 95 %-ая ДГ получена при 1000 случайных реализаций. В результате получено распределение верхних 95 %-ых ДГ (рис. 9). Оказалось, что это распределение хорошо аппроксимируется нормальным распределением. Эту аппроксимацию также можно видеть на рис. 9.

Определим погрешность в определении верхней 95 %-ой ДГ LAR как отношение верхней 95 %-ой ДГ этой величины к среднему значению минус 1. Верхняя 95 %-ая ДГ для верхней 95 %-ой ДГ LAR и среднее значение этой величины определяется по аппроксимации нормальным распределением (рис. 9). В результате получено, что погрешность в определении верхней 95 %-ой ДГ LAR может достигать 8,5 % при использовании 1000 случайных реализаций LAR.

Заключение

Оценки радиационного риска заболеваемости ЗНО ЩЖ среди населения шести наиболее загрязненных районов Брянской области показали, что максимальными рисками на начало 2023 г. характеризуется группа 37–40-летних женщин: по консервативным оценкам до 19,9 % лиц из этой группы максимального риска в будущем могут столкнуться с развитием радиационно-обусловленных ЗНО ЩЖ, а для 37-летних женщин пожизненная доля этих ЗНО может составить до 30,0 %.

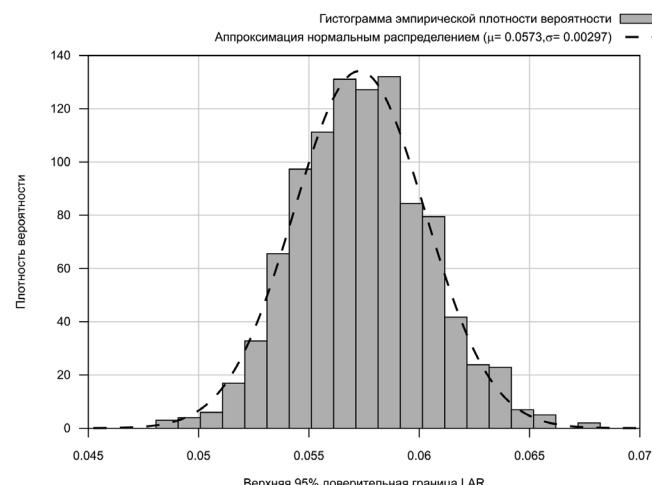


Рис. 9. Гистограмма эмпирической плотности распределения верхних 95 %-ых доверительных границ LAR, каждая из которых получена по 1000 случайных реализаций LAR для случая заболеваемости ЗНО щитовидной железы у женщин при облучении в 0 лет поглощенной дозой 150 мГр с СГО 2,2

Fig. 9. Histogram of the empirical distribution density of the upper 95 % confidence limits of the LAR. Each value of the upper 95 % confidence limit was obtained from 1000 random realizations of the LAR of thyroid cancer incidence in female population with exposure at age 0 and an absorbed dose of 150 mGy and a GSD of 2.2

Наибольший риск возникновения радиационно-обусловленных ЗНО ЩЖ у группы максимального риска (женщины 37–40 лет) прогнозируется для лиц, проживающих в Красногорском районе Брянской области: доля лиц, у которых могут проявиться радиационно-обусловленные ЗНО ЩЖ из этой группы, может доходить до 40,1 % (по консервативной оценке).

Следует отметить, что радиационные риски (LAR) заболеваемости ЗНО ЩЖ у мужчин до 10 раз ниже, чем у женщин.

В настоящее время (с 2023 г. и пожизненно) население наиболее загрязненных районов Брянской области продолжает находиться под высоким риском развития радиационно-обусловленных ЗНО ЩЖ. При консервативных оценках радиационных рисков (с учетом неопределенности оценок доз облучения и неопределенности модели радиационного риска) для 74,5 % лиц от численности исследованной когорты прогнозируется превышение предельного индивидуального риска $5,0 \times 10^{-5}$, установленного НРБ-99/2009 [11] для населения в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения.

Полученные оценки требуют обратить особое внимание органов здравоохранения на женщин, облученных в младенчестве вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, т.к. несмотря на то, что с момента аварии прошло уже больше 36 лет, ожидаемые в будущем радиационные последствия такого облучения в виде избыточной заболеваемости ЗНО щитовидной железы все еще сохраняются на высоком уровне.

Результаты данной работы могут быть использованы при подготовке рекомендаций органами здравоохранения по улучшению медицинского наблюдения за облученными гражданами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. International Atomic Energy Agency. The International Nuclear and Radiological Event Scale. User's Manual 2008 Edition. Vienna: IAEA, 2013. 218 p.
2. 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. 172 p.
3. Публикация 103 МКРЗ. / Под общей ред. Киселева М.Ф., Шандалы Н.К.; Пер. с английского. М.: Алана, 2009. 312 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (Дата обращения 06.12.2022 г.).
4. Медицинские радиологические последствия Чернобыля: прогноз и фактические данные спустя 30 лет / Под ред. Иванова В.К., Каприна А.Д. М.: ГЕОС, 2015. 450 с.
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2012 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Scientific Annex B. Uncertainties in Risk Estimates for Radiation-Induced Cancer. New York: United Nation, 2014. 219 p.
6. Sasaki M., Ogino H., Hattori T. Quantitative Evaluation of Conservatism in the Concept of Committed Dose from Internal Exposure for Radiation Workers // J. Radiol. Prot. 2021. V.41, No. 4. P. 1328–1343. DOI: 10.1088/1361-6498/ac057f.
7. Рамзаев П.В., Балонов М.И., Звонова И.А., Братилова А.А., Цыб А.Ф., Питкевич В.А., Степаненко В.Ф., Шишканов Н.Г., Ильин Л.А., Гаврилин Ю.И. Реконструкция дозы излучения радиоизотопов йода в щитовидной железе жите-
- лей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году: Методические указания МУ2.6.1.1000-00. М., 2001.
8. Балонов М.И., Звонова И.Ф., Братилова А.А., Жеско Т.Б., Власов О.К., Шишканов Н.Г., Щукина Н.В. Средние дозы облучения щитовидной железы жителей разного возраста, проживавших в 1986 г. в населенных пунктах Брянской, Тульской, Орловской и Калужской областей, загрязненных радионуклидами вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2002. Спецвыпуск. С. 1–96.
9. Злокачественные новообразования в России в 2019 году (заболеваемость и смертность) / Под ред. Капрена А.Д., Старинского В.В., Шахзадовой А.О. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2020. 252 с.
10. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S., Nishi N., Soda M., Mabuchi K., Kodama K. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958–1998 // Radiat. Res. 2007. V.168, No. 1. P. 1–64.
11. 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.
12. 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: United Nation, 2008.

REFERENCES

1. International Atomic Energy Agency. The International Nuclear and Radiological Event Scale. User's Manual 2008 Edition. Vienna, IAEA, 2013. 218 p.
2. 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. 172 p.
3. ICPR Publication 103. Eds. Kiselev M.F., Shandala N.K. Moscow Publ., 2009. 312 p. URL: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf. (Accessed 06.12.2022) (In Russ.).
4. Meditsinskiye Radiologicheskiye Posledstviya Chernobylja: Prognos i Fakticheskiye Dannyye Spustya 30 Let = Medical Radiological Consequences of Chernobyl: Forecast and Actual Data after 30 Years. Ed. Ivanov V.K., Kaprin A.D. Moscow, GEOS Publ., 2015. 450 p. (In Russ.).
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2012 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Scientific Annex B. Uncertainties in Risk Estimates for Radiation-Induced Cancer. New York, United Nation, 2014. 219 p.
6. Sasaki M., Ogino H., Hattori T. Quantitative Evaluation of Conservatism in the Concept of Committed Dose from Internal Exposure for Radiation Workers. J. Radiol. Prot. 2021;41:4:1328–1343. DOI: 10.1088/1361-6498/ac057f.
7. Ramzayev P.V., Balonov M.I., Zvonova I.A., Bratilova A.A., TSyb A.F., Pitkevich V.A., Stepanenko V.F., SHishkanov N.G., Ilin L.A., Gavrilin YU.I. Rekonstruksiya Dozy Izlucheniya Radioizotopov Yoda v Shchitovidnoy Zheleze Zhiteley Naseleniykh Punktov Rossiyiskoy Federatsii, Podvergshikhsya Radioaktivnomu Zagryazneniyu Vsledstviye Avari na Chernobylskoy AES v 1986 Godu = Reconstruction of the Radiation Dose of Iodine Radioisotopes in the Thyroid Gland of Residents of Settlements of the Russian Federation Exposed to Radioactive Contamination as a Result of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant in 1986. Guidelines MU2.6.1.1000-00. Moscow Publ., 2001 (In Russ.).
8. Balonov M.I., Zvonova I.F., Bratilova A.A., Zhesko T.B., Vlasov O.K., Shishkanov N.G., Shchukina N.V. Average Exposure Doses of the Thyroid Gland of Residents of Different Ages who Lived in 1986 in the Settlements of the Bryansk, Tula, Oryol and Kaluga Regions Contaminated with Radionuclides Due to the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant. Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk. 2002;Special issue:1–96 (In Russ.).
9. Zlokachestvennyye Novoobrazovaniya v Rossii v 2019 Godu (Zabolevayemost i Smertnost) = Malignant Tumors in Russia in 2019 (Morbidity and Mortality). Ed. Kaprin A.D., Starinsky V.V., Shakhzadova A.O. Moscow Publ., 2020. 252 p. (In Russ.).
10. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S., Nishi N., Soda M., Mabuchi K., Kodama K. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958–1998. Radiat. Res. 2007;168:1:1–64. DOI: 10.1667/RR0763.1.
11. Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). Sanitary Rules and regulations. SanPin 2.6.1.2523-09. Moscow Publ., 2009. 100 p. (In Russ.).
12. 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, United Nation, 2008.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.02.2022. Принята к публикации: 27.03.2023.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 20.02.2022. Accepted for publication: 27.03.2023.