

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБЛУЧЕНИЕ И РАДИОГЕННЫЙ РИСК

Осипов М.В.

*Южно-Уральский институт биофизики ФМБА РФ, 456780, г. Озёрск, Озёрское шоссе,
19, лаборатория радиационной эпидемиологии, 8-351-30-7-52-36, osipov@subi.su*

Резюме. В статье представлен обзор литературных данных по проблеме оценки отдалённых последствий воздействия диагностического облучения при проведении рентгенорадиологических исследований. Дана оценка современного состояния проблемы, характеристика источников диагностического облучения по уровню дозовой нагрузки, получаемой пациентами. Описаны основные существующие подходы к оценке радиогенного риска в области малых доз и возможность их использования при оценке отдалённых эффектов воздействия при диагностическом облучении пациентов. Приведены сравнительные результаты оценки радиогенного риска для внешнего облучения от различных техногенных источников в широких диапазонах доз. Особое внимание уделено публикациям, содержащим результаты исследований по оценке риска диагностического облучения при проведении компьютерной томографии, которая на сегодняшний день вносит значительный вклад в дозу облучения пациентов. Описаны основные факторы, влияющие на неопределённость оценок радиационного риска в области малых доз, характерных для диагностического облучения. Показана целесообразность дальнейшего изучения радиационного риска в области малых доз, в частности, эпидемиологических исследований в когорте работников производственного объединения «Маяк» - первого в стране предприятия атомной промышленности.

Ключевые слова: медицинское облучение, диагностическое облучение, радиационный риск, рентгенодиагностика, КТ, компьютерная томография, ПО «Маяк»

DIAGNOSTIC EXPOSURE AND RADIOGENIC RISK

Osipov M.V.

*Southern Urals Biophysics Institute, Russian Federation, 456780, Ozyorsk, 19 Ozerskoye
shosse, Laboratory of Radiation Epidemiology, 8-351-30-7-52-36 osipov@subi.su*

Abstract. The article presents a literature review on the problem of assessing the long-term effects of exposure to diagnostic ionizing radiation. An assessment of the current state of the problem, a characteristic of the sources of diagnostic exposure by the dose levels is given. The main approaches to assessing radiogenic risk of low doses and the possibility of their use in

assessing the long-term effects of diagnostic exposure of patients are described. Comparative results of radiogenic risk assessment for external exposure from various industrial sources in wide dose ranges are presented. Particular attention is paid to publications containing the results of studies evaluating the risk of diagnostic exposure during computed tomography, which makes a significant contribution to patient's dose burden. The main factors affecting the uncertainty of the estimates of radiation risk in the low-dose area typical for diagnostic exposure are described. The expediency of further studying the radiation risk in the field of low doses, in particular, epidemiological studies in the Mayak worker cohort, the first nuclear enterprise in former USSR, is shown.

Key words: medical exposure, diagnostic exposure, radiation risk, X-ray, CT, computed tomography, Mayak PA

Введение.

Современное состояние проблемы

Диагностическая визуализация с использованием рентгеновских лучей является неотъемлемой частью современной системы оказания медицинской помощи населению. Исключительная информативность рентгеновского исследования, по сравнению с не лучевыми методами диагностики, способствовала широкому практическому использованию рентгенодиагностики во всём мире [1]. Постоянное совершенствование технологий позволило создать новые высокоинформативные методы рентгенологического исследования, такие как компьютерная томография (КТ), радионуклидная диагностика и интервенционная радиология, которые в настоящее время получили широкое распространение [2,3]. Вместе с этим, воздействие ионизирующего излучения (ИИ) на органы и ткани может приводить неблагоприятным эффектам [4-6], что ставит вопрос о необходимости наблюдения за облученными с целью оценки отдалённых последствий воздействия медицинского диагностического облучения (МДО) и разработке мер по их радиационной защите. Основными предпосылками к изучению вопроса о последствиях воздействия МДО для здоровья пациентов в настоящее время являются рост количества рентгенодиагностических исследований, увеличение дозы облучения пациента за счёт внедрения современных методов диагностической визуализации, а также существующие неопределённости оценки радиогенного риска в области малых доз. По данному вопросу были проанализированы публикации российских и иностранных исследователей, размещённые в открытом доступе в сети PubMed, платформах Scopus, Web of Science и российских научных библиотеках (E-library), а так же рекомендации и регламентирующие документы Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ),

Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), Международного агентства по исследованию рака (МАИР), научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР), Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и других релевантных источников.

Доза медицинского облучения как фактор риска

Ионизирующее излучение (ИИ), используемое в медицинских целях, является вторым по величине источником после естественного радиационного фона, и самым крупным источником техногенной радиации [4]. По данным Международного агентства по исследованию рака (МАИР), средняя величина дозы облучения от природных источников в год составляет 2,4 мЗв, тогда как средняя величина дозы диагностического облучения пациента за одну процедуру может варьировать в широких пределах (к примеру, при рентгенографическом исследовании грудной клетки эта величина составляет 0,14 мЗв, а при компьютерной томографии без контрастного усиления – до 5,7 мЗв), в несколько раз превышая значение накопленной годовой дозы от природного фона [7]. По данным МАГАТЭ, из 15% совокупного облучения от искусственных источников наибольший вклад (около 95%) принадлежит медицинскому облучению, при этом 34% коллективной дозы медицинского диагностического излучения в мире принадлежит компьютерной томографии, доля исследований с использованием которой в зарубежных странах неуклонно растёт [4,8,9]. Тенденция к увеличению количества ежегодных рентгенодиагностических исследований в настоящее время наблюдается и в России, также с преобладанием роста количества исследований с использованием КТ [10-11]. Так, из 251 миллиона диагностических исследований, проведённых в 2013 году в России, 6,5 миллионов исследований (2,6%) были выполнены с использованием КТ, и ожидается дальнейший рост количества таких исследований в нашей стране [12].

В настоящее время диагностическое облучение по уровням своего воздействия конкурирует и с другими радиационными факторами: техногенным облучением населения в результате радиационных аварий и облучением персонала атомной промышленности. По данным исследований в когорте реки Теча (Н.Б. Шагина, 2012), доза медицинского диагностического облучения у пациентов, накопленная за всю жизнь, может превышать аналогичную дозу, полученную в результате их проживания на радиационно-загрязнённой территории, среднее значение которой составляет 40 мГр [13]. Исследования в когорте работников ПО «Маяк» также показали, что при реальном снижении дозы профессионального облучения среднегодовые дозы от медицинского облучения с начала 1960-х гг. начали превышать дозы профессионального облучения работников [14]. С появлением современных методов диагностической визуализации (КТ, ПЭТ-КТ) годовая

эффективная доза облучения пациента в некоторых случаях может достигать и превышать предельные уровни техногенного облучения персонала групп «А» и «Б» [12]. При этом, лучевая нагрузка на пациента при различных видах рентгенодиагностики не одинакова.

Для сравнения, в таблице 1 приведены типовые значения поглощённой дозы при некоторых рентгенодиагностических исследованиях, в зависимости от облучаемой области, которые могут быть использованы для оценки радиационного риска: [цитировано по Brenner, 2007]:

Таблица 1: Типовые органные дозы при различных рентгенологических исследованиях

Исследование	Релевантный орган	Поглощённая доза в органе, мГр
Дентальная рентгенография	Головной мозг	0,005
Грудная клетка РА*	Лёгкое	0,01
Грудная клетка LA*	Лёгкое	0,15
Маммография	Молочная железа	3,0
КТ брюшной полости (взрослый)	Желудок	10,0
Исследование с барием	Толстая кишка	15,0
КТ брюшной полости (ребенок)	Желудок	20,0
КТ-ангиография	Лёгкое	40,0 – 100,0

*РА – передне-задняя проекция; LA – боковая проекция

Как следует из таблицы, традиционная рентгенография характеризуется относительно низкими уровнями облучения пациентов. Однако при современных видах рентгенодиагностики (компьютерной томографии), поглощённая доза может возрастать более чем в 100 раз, по сравнению с традиционной рентгенографией, при этом доза при одном и том же исследовании у детей выше, чем у взрослых. Таким образом, диагностическое облучение в настоящее время имеет тенденцию к росту, в основном, за счёт современных методов диагностики (КТ), и в некоторых случаях может превышать уровни облучения за счёт естественного радиационного фона, а также уровни производственного облучения в штатных условиях работников атомной промышленности.

Источники информации о радиационном риске

Основным источником информации о радиационном риске, связанным с воздействием внешнего облучения, является когорта выживших после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки (Life Span Study, когорта LSS), которая на сегодняшний день остаётся базовым исследованием, дающим детальную информацию об отдалённых последствиях воздействия ионизирующего облучения на человека [22]. Основными преимуществами этого исследования является объём когорты, включающей

более 70 000 мужчин и женщин всех возрастов, около 30 000 из которых подвергались облучению в малых дозах до 100 мГр, а также данные по заболеваемости и смертности, собранные за период наблюдения более 60 лет. В исследовании D. L. Preston (2007) показано, что по достижении возраста 70 лет после воздействия облучения в возрасте 30 лет в дозе 1 Гр показатели заболеваемости солидными раками достоверно увеличиваются на 35% (90% ДИ 0,28; 0,43) у мужчин и на 58% (0,43; 0,69) у женщин.

Исследования в когортах рабочих атомной промышленности, атомных электростанций также дают информацию о риске в результате воздействия техногенного облучения от различных источников в широком диапазоне доз [23-28]. Так, исследования по анализу риска смертности от солидных злокачественных новообразований (ЗНО) в когорте персонала ПО «Маяк» показали статистически значимый эффект ($p < 0,001$) для внешнего гамма-излучения с оценкой избыточного относительного риска (ИОР) смерти от солидных раков на 1 Гр накопленной дозы облучения, равной 0,15. Данный эффект не имел зависимости от пола, но различался в зависимости от возраста: была отмечена тенденция к снижению радиационного риска смертности от солидных опухолей с увеличением возраста на момент первого контакта с облучением [26]. Влияние внешнего гамма-облучения, оцененное в мультипликативной модели с учётом влияния инкорпорированного плутония в организме работников [29], а также фактора курения, в исследовании по анализу риска смертности от ЗНО лёгкого также показало наличие связи (ИОР на 1 Гр составил от 0,11 до 0,13). При этом, влияние малых доз диагностического облучения при аджустировании по наличию производственного фактора не приводило к статистически значимому повышению риска смерти от ЗНО [30]. Таким образом, можно предположить, что статистически значимое влияние внешнего облучения на канцерогенный риск проявляется в случае высоких доз облучения (сценарий когорты LSS), либо в сочетании с другими видами облучения (внутреннее облучение работников ПО «Маяк» в результате воздействия инкорпорированного плутония).

В отличие от производственного облучения работников атомной промышленности, диагностическое облучение пациентов имеет свои особенности, связанные с эпизодическим, локальным воздействием малых доз облучения, а также повторяемостью эпизодов облучения в течение жизни и корреляцией с состоянием здоровья обследованного, поэтому экстраполяция результатов описанных исследований для сценариев диагностического облучения должна применяться с осторожностью. Наиболее информативным для оценки радиационного риска при действии диагностического облучения является проведение эпидемиологических исследований, в которых

коэффициент радиационного риска рассчитывается на основании фактически наблюдаемых величин – заболеваемости и смертности от ЗНО.

Анализ риска от воздействия диагностического облучения

Оценка риска от воздействия МДО в течение длительного времени является предметом научных дискуссий. Среди многочисленных научных публикаций в российских и зарубежных издательствах, посвящённых оценке риска в области малых доз диагностического облучения, исследователями приводятся различные точки зрения на проблему радиационного риска, связанного с воздействием малых доз ионизирующего излучения. Исследования касаются различных контингентов лиц (население, врачи-радиологи) и возрастных групп, с учётом различных радиационных (количество процедур, вид излучателя и характер облучения, наличие контакта с производственным облучением) и нерадиационных (пол, возраст на момент обследования, состояние здоровья) факторов риска.

Отсутствие единой позиции научного сообщества по вопросу влияния малых доз облучения в XX веке и необходимость выработки единой стратегии радиационной защиты пациентов при диагностическом облучении привело к принятию линейной беспороговой концепции, которая была предложена МКРЗ [31]. Согласно данной концепции, риск в результате воздействия ИИ существует при любой сколь угодно малой дозе, при этом вероятность развития стохастических эффектов (злокачественных новообразований) прямо пропорциональна дозе облучения. На основании данной гипотезы на сегодняшний день сформированы требования по радиационно-гигиеническому нормированию уровней облучения пациентов при диагностическом облучении. В то же время, многие эксперты международных научных организаций [32] признают, что при использовании ЛБК в области малых доз (к которым в большинстве случаев относится диагностическое облучение) возможна переоценка риска, связанная со многими факторами, важную роль среди которых играет сценарий облучения и наличие восстановительных процессов в организме [33]. Так, в исследовании смертности от ЗНО легкого в когорте 64 172 канадских больных туберкулезом [34], из которых 39% подверглись фракционированному облучению грудной клетки при рентгеноскопии в средней суммарной дозе на легкое порядка 1,02 Зв, не было выявлено положительной связи между риском и дозой (относительный риск на 1 Зв составляет 1,00 (95% ДИ 0,94 – 1,07)). Полученные результаты не согласуются с исследованиями в когорте LSS [22], где относительный риск смертности от рака лёгкого составил 1,60 (95% ДИ 1,27 – 1,99). По мнению авторов [34], это означает, что риск развития рака легкого при таком сценарии облучения, вероятно,

будет ниже, чем прогнозируется современными моделями радиационного риска. По мнению европейских исследователей [35] для уровней диагностического облучения в диапазоне сверхмалых доз от 0,1 до 20 мЗв не получено убедительных доказательств существования избыточного радиогенного риска, что связано с нелинейностью эффектов в области доз ниже 100 мЗв и влиянием защитных механизмов на клеточном уровне (репарации и апоптоза).

В исследовании когорты из 79 959 радиологов (С. Lee, 2015), подвергавшихся профессиональному облучению в малых дозах (накопленная средняя доза в коже головы, шеи и рук составила 55 мГр), хотя и выявлено достоверное увеличение пожизненного радиационного риска развития базально-клеточной карциномы кожи в зависимости от возраста начала облучения [36], однако при этом статистически значимых эффектов для других локализаций злокачественных новообразований не найдено.

В то же время, экстраполяция значений ИОР в область малых доз при использовании линейной беспороговой концепции может приводить к результатам, показывающим существование повышенного риска при рентгенодиагностических обследованиях, связанных с воздействием более высокой дозы, чем при традиционной рентгенографии. При процедурах, связанных с воздействием облучения в более высоких дозах, к примеру, при коронарной ангиопластике с использованием рентгеновского контроля [37] в ретроспективном исследовании методом случай-контроль сообщается о повышенном лейкомогенном риске (в 1,56 выше в течение 3-х лет после экспозиции) у пациентов, подобранных по полу, количеству исследований и времени после интервенционной процедуры. По данным исследователей (D.J. Brenner, 2004), накопленная пациентом доза диагностического облучения от нескольких КТ в течение всей жизни пациента сравнима с самой низкой дозовой категорией в когорте LSS (5–50 мЗв; среднее значение 20 мЗв). С учётом того, что КТ-сканирование всего тела (протокол whole body) является сценарием относительно равномерного облучения, сходным со сценарием острого облучения в Хиросиме и Нагасаки, было сделано предположение, что величина радиационного риска сопоставима с величиной риска, полученной в когорте LSS, где был установлен повышенный риск смертности от рака [22]. Таким образом, предполагаемый риск смерти от рака (всех локализаций) среди пациентов в возрасте 45 лет, планирующих проходить ежегодные КТ-обследования всего тела до 75 лет (30 обследований), без учета различий в сценариях облучения будет соответствовать порядка 1,9%. В исследовании (Pierce et al., 2012), величина избыточного относительного риска смерти от ЗНО после проведения КТ у пациентов, облученных в возрасте от 0 до 21 года [38], также оцененная с использованием модели МКРЗ, составила 0,36 на 1 Гр

поглощённой дозы для лейкозов и миелодиспластических заболеваний, и 0,23 для опухолей головного мозга.

По данным российских исследователей [39-42], наиболее информативным показателем является оценка пожизненного атрибутивного риска онкологической заболеваемости и смертности при малых дозах диагностического облучения с учётом индивидуальных характеристик пациента (возраста, размера и массы тела). Основываясь на номинальных коэффициентах риска, предложенных МКРЗ, установлено, что пожизненный атрибутивный риск, заболеваемости ЗНО лёгкого для мужчин в возрасте 60 лет при поглощённой дозе в лёгком, равной 1 мГр, может составлять 0,06 на 10 000 человек [40]. Однако исследований, позволяющих проверить соответствие прогнозируемых и фактических значений радиационного риска, не проводилось.

Наблюдение за лицами, подвергшихся МДО в детском возрасте, представляют наибольший интерес с точки зрения возможности оценки пожизненного риска вследствие большей чувствительности лиц детского возраста к воздействию ионизирующего облучения [43]. Показано, что пожизненный риск у лиц, проходивших исследование в детском возрасте, выше, чем у взрослых, и достоверно связан с дозой [44]. Расчетное значение пожизненного риска смертности от рака, связанного с облучением на КТ в возрасте 1 года, составляет 0,18% при облучении органов брюшной полости и 0,07% для головы, что на порядок выше, чем у взрослых, хотя эти цифры по-прежнему демонстрируют небольшое увеличение смертности от рака по сравнению с естественным фоновым уровнем.

В масштабном исследовании (J.D. Mathews, 2013) среди 680 211 австралийских детей и подростков, проходивших диагностическое обследование на КТ, показано увеличение относительного риска заболеваемости ЗНО всех типов в зависимости от количества предшествующих КТ-исследований [45]. При средней величине эффективной дозы за одно КТ исследование, равной 4,5 мЗв, избыточный риск смерти от онкологического заболевания составил 0,035 на 1 мЗв. Таким образом, предполагалось, что каждое из 1800 исследований в детском возрасте может приводить к смерти от злокачественного новообразования в результате воздействия рентгеновского излучения КТ-сканера. При этом, исследователи указывают, что полученные значения коэффициентов избыточного относительного риска на единицу дозы могли быть подвержены действию обратной причинно-следственной связи: у часто обследуемых пациентов с большей вероятностью могли наблюдаться изменения, связанные с исследуемыми эффектами, нежели у редко обследованных пациентов, что подтверждается и другими исследованиями [46]. Также сообщается о повышенном риске развития

злокачественных опухолей у пациентов детского возраста (удвоение коэффициента риска лейкемии у детей при дозе на костный мозг в несколько десятков мГр (Wakeford, 2010)), риске развития опухолей щитовидной железы, а также возникновение последующих ЗНО центральной нервной системы после проведения лучевой терапии у детей по поводу наличия злокачественного новообразования (Neglia, 2006), и при воздействии малых доз диагностического облучения [47-51]. Отмечается, что при увеличении возраста на момент облучения величина радиационного риска снижается [52].

Таким образом, исследования, в которых используется экстраполяция риска из области высоких доз в области доз ниже 100 мГр (диапазон доз для большинства рентгенодиагностических исследований и КТ), свидетельствуют о повышенном радиационном риске, характерном как для взрослых, так и для детей. Вместе с этим, значительно варьирующие сочетания значимых факторов риска, таких как пол, возраст пациента на момент облучения, продолжительность наблюдения за когортой, влияние других видов облучения, исходное состояние здоровья пациентов и влияние обратной причинно-следственной связи, а также существующие неопределённости оценки доз диагностического облучения затрудняет сравнение результатов исследований [53]. Отсутствие детерминированных эффектов в результате воздействия малых доз облучения, и варьирующая в широких пределах статистическая значимость результатов оценки риска развития стохастических эффектов, к которым относится большинство эпизодов диагностического облучения, являются причиной научных дискуссий по вопросу оценки величины радиационного риска при воздействии МДО. Существование альтернативных точек зрения исследователей [54] говорит об отсутствии единой концепции понимания радиационного риска при малых дозах медицинского облучения. Для ответа на вопрос о количественной оценке радиационного риска в области малых доз проводимые исследования должны соответствовать следующим критериям:

- когортное исследование, либо исследование по методу случай-контроль в когорте
- достаточный объём исследования (десятки и сотни тысяч обследованных)
- достаточное количество случаев, рассматриваемых в качестве эффекта
- достаточный период наблюдения, предполагающий возможность развития отдалённых последствий с учётом их латентного периода
- многофакторный анализ с учётом возможных радиационных и нерадиационных факторов, которые могут влиять на оценку риска

Ограничения, влияющие на сравнимость результатов различных исследований по оценке радиационного риска в области малых доз:

- различные объёмы когорты и различная статистическая мощность исследований

- различные сценарии облучения (острое однократное, фракционированное, пролонгированное)
- различная облучаемая область (равномерное облучение всего тела, локальное облучение исследуемого органа в зоне интереса)
- различные дозы и дозовые интервалы (от нескольких мЗв до сотен мЗв)
- различный возраст облученных
- различное состояние здоровья (облученные при профилактических осмотрах, пациенты в процессе лучевой терапии по поводу ЗНО)
- отсутствие контрольной группы пациентов с нулевой дозой диагностического облучения.

Заключение

Медицинское диагностическое облучение широко применяется во всем мире, и количество обследований с его использованием с каждым годом растёт. Наряду с увеличением количества источников облучения (рентгенодиагностической аппаратуры), увеличивается и доля современных методов диагностики, сопряжённых с большей, по сравнению с конвенциональной радиологией, лучевой нагрузкой на пациента (КТ, ПЭК-КТ). При этом уровни диагностического облучения пациентов, как правило, остаются в области малых доз, где детерминированные эффекты от воздействия облучения не наблюдаются, а вероятные стохастические эффекты требуют проведения эпидемиологического исследования с длительным периодом наблюдения учётом влияния модифицирующих эффект факторов.

Обобщение литературы по проблеме показало, что, несмотря на существующее большое количество публикаций, посвященных оценке риска при МДО, в настоящее время не представлено единой методики оценки радиационного риска, а также количественных критериев обоснования рентгенодиагностического исследования. Определение соотношения пользы и возможного вреда от применения медицинского диагностического облучения в каждом конкретном случае производится врачом эмпирически. Для обеспечения работников системы здравоохранения актуальной информацией о последствиях воздействия малых доз диагностического облучения на организм пациента, а также количественными критериями обоснования МДО необходимо проведение эпидемиологических исследований, обеспечивающих фактологическую базу для реализации существующего потенциала для снижения лучевой нагрузки на пациента и соответственно, связанного с этим радиационного риска. Несмотря на обширные знания, полученные в ходе проведённых многочисленных эпидемиологических исследований

радиационного риска вследствие воздействия ионизирующего излучения, вопрос о влиянии малых доз диагностического облучения на здоровье человека остаётся открытым.

Литература

1. Agard E.T. Healthful radiation. *Health Physics*. 1997; 72(1): 97-99.
2. Brenner D.J., Hall E.J. Computed tomography-an increasing source of radiation exposure // *N Engl J Med* 2007; 357: 2277-2284.
3. World Health Organization, Future Use of New Imaging Technologies in Developing Countries: Report of WHO Scientific Group, Technical Report Series 723, WHO, Geneva (1983).
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly. New York. United Nations; 2000.
5. Pierce D.A., Preston D.L. Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors // *Radiat Res*. 2000; 154: 178–86.
6. Preston D.L., 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.
7. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. World Health Organization. Ionizing radiation, part 1: X- and gamma (γ)-radiation, and neutrons. International Agency for Research on Cancer. 2000; 75: 508 p.
8. Medical Radiation Exposures. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly. 2008. 293 p.
9. Kalra M.K., Maher M.M., D'Souza R., Saini S. Multidetector Computed Tomography Technology: Current Status and Emerging Developments // *J Comput Assist Tomogr* 2004; 28: S2–S6.
10. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А., Кальницкий С.А., Репин В.С., Сарычева С.С., Чипига Л.А. Современные уровни медицинского облучения в России // *Радиационная гигиена*. 2015; 8(3): 67-79.
11. Дозы облучения населения Российской Федерации в 1999-2012 годах: Серия справочников. Барковский А.Н., Барышков Н.И., Кормановская Т.А. [и др.]. –СПб. 2000-2013.
12. Барковский А.Н., Братилова А.А., Кормановская Т.А., Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов. Динамика доз облучения населения Российской Федерации за период с 2003 по 2018 гг // *Радиационная гигиена*. 2019; 12(4): 96-122. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-96-122.

13. Шагина Н.Б., Голиков В.Ю., Дегтева М.О., Воробьева М.И., Анспо Л.Р., Напье Б.А. Реконструкция индивидуальных доз медицинского облучения для когорты реки Теча // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2012, Т. 57, № 3, С.13-25.

14. Туков А.Р., Бирюков А.П., Шафранский И.Л. Учет дополнительных компонент доз облучения при радиационно-эпидемиологических исследованиях лиц, подвергшихся воздействию ионизирующей радиации // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2014; 59 (1): 43 – 49.

15. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105. Annals of the ICRP. 2007; 37(8): 63 p.

16. Голиков В.Ю., Балонов М.И., Кальницкий С.А., Братилова А.А., Сарычева С.С., Шацкий И.Г., Водоватов А.В. Уровни облучения пациентов при проведении рентгенологических исследований в Санкт-Петербурге и Ленинградской области // Радиационная гигиена. 2011; 4 (1): 5–13.

17. Jacobi W. The concept of effective dose: a proposal for the combination of organ doses // Radiat Environ Biophys 1975; 12:101–109.

18. McCollough C.H., Schueler B.A. Calculation of effective dose. Med Phys 2000; 27:828–837.

19. International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 26. Oxford, UK: Pergamon Press, 1977.

20. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP. 2007; 37(2-4): 332 p.

21. Brenner D.J., Elliston C.D. Estimated radiation risks potentially associated with full-body CT screening. Radiology. 2004; 232:735–738.

22. Preston D., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S., Nishi N., Soda M., Mabuchi K., Kodama K. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958–1998. Radiation Research, 2007; 168: 1–64.

23. Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., Gilbert E., Hakama M., Hill C., et al. The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: estimates of radiation-related cancer risks. Radiation Research. 2007; 167(4): 396–416.

24. Wiggs L.D., Johnson E.R., Cox-DeVore C.A., Voelz GL. Mortality through 1990 among white male workers at the Los Alamos National Laboratory: Considering exposures to plutonium and external ionizing radiation. Health Phys. 1994; 67(6): 577–88.

25. Koshurnikova N. A., Shilnikova N. S., Okatenko P. V. Characteristics of the Cohort of Workers at the Mayak Nuclear Complex. Radiation Research. 1999; 152: 352 – 362.

26. Shilnikova N. S. et al. Cancer Mortality Risk among Workers at the Mayak Nuclear Complex. *Radiation Research*. 2003; 159: 787–798.
27. Hunter N., Kuznetsova I.S., Labutina E.V., Harrison J.D. Solid Cancer Incidence other than Lung, Liver and Bone in Mayak Worker Cohort: 1948-2004. 2013; 109: 1989-1996.
28. Sokolnikov ME, Gilbert ES, Preston DL, Ron E, Shilnikova NS, Khokhryakov VV, et al. Lung, liver and bone cancer mortality in Mayak workers. *Int J Cancer*. 2008; 123(4): 905–11.
29. Gilbert E., Sokolnikov M. E., Preston D.L., Schonfeld S. J., Schadilov A. E., Vasilenko E. K., Koshurnikova N. A. Lung Cancer Risks from Plutonium: An Updated Analysis of Data from the Mayak Worker Cohort. *Radiat Res*. 2013; 179(3): 332–342. DOI:10.1667/RR3054.1.
30. Осипов М.В., Важенин А.В., Доможирова А.С., Чернова О.Н., Аксенова И.А. Компьютерная томография как фактор риска у онкологических пациентов при наличии профессионального облучения. *Российский электронный журнал лучевой диагностики*. 2019; 9(1):142-147. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-1-142-147.
31. International Commission on Radiological Protection ICRP (1958). *Recommendations of the ICRP*, ICRP Publication 1. Pergamon Press, Oxford.
32. United Nations. *Medical Radiation Exposures. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2010, Fifty-seventh session*. New York 2011.
33. Feinendegen L.E. Evidence for beneficial low level radiation effects and radiation hormesis. *Br J Radiol* 2005; 78: 3–7.
34. Howe G. R. Lung Cancer Mortality between 1950 and 1987 after Exposure to Fractionated Moderate-Dose-Rate Ionizing Radiation in the Canadian Fluoroscopy Cohort Study and the Comparison with Lung Cancer Mortality in the Atomic Bomb Survivors Study. *Radiation Research*. 1995; 142: 295–304.
35. Tubiana M. Dose-effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation: The joint report of the Academie des Sciences (Paris) and of the Academie Nationale de Medecine. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2005; 63: 317–9.
36. Lee T., Sigurdson A.J., Preston D.L., Cahoon E.K. et al. Occupational ionising radiation and risk of basal cell carcinoma in US radiologic technologists (1983-2005) *Occup Environ Med*. 2015; 72(12): 862-9. DOI: 10.1136/oemed-2015-102880.
37. Wei K., Lin H., Hung S., et al. Leukemia Risk After Cardiac Fluoroscopic Interventions Stratified by Procedure Number, Exposure Latent Time, and Sex. A Nationwide Population-Based Case-Control Study. *Medicine*. 2016; 95 (10):e2953. DOI: 10.1097/MD.0000000000002953.

38. Pearce M.S., Salotti J.A., Little M.P., McHugh K., Lee C., Kim K.P., Howe N.L., Ronckers C.M., Rajaraman P., Craft W., Parker L., Berrington de Gonzalez A. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *The Lancet*. 2012; 380.
39. Fomin E.P., Osipov M.V. Pooled database of Ozyorsk population exposed to computed tomography. *REJR* 2019; 9(2): 234-239. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-2-234-239.
40. Иванов В.К., Цыб А.Ф., Метлер Ф.А. Меняйло С.Ю., Кашеев В.В. Радиационные риски медицинского облучения. *Радиация и риск*. 2011; 20(2):17-28.
41. Иванов В.К., Кашеев В.В., Меняйло С.Ю., Пряхин А.Н., Цыб А.Ф., Метлер Ф.А. Оценка радиационного риска медицинского облучения в терминах эффективной и органных доз. *Радиация и риск*. 2012; 21(4):7-23.
42. Кашеев В.В., Пряхин Е.А., Меняйло С.Ю., Чекин С.Ю., Иванов В.К. Расчёт эквивалентных доз в отдельных органах и тканях и величины пожизненного радиационного риска развития рака при проведении типовых обследований с использованием компьютерной томографии. *Радиация и риск*. 2013; 22(3):8-20.
43. World Health Organization, Rational Use of Diagnostic Imaging in Paediatrics: Report of a WHO Study Group, Technical Report Series 757, WHO, Geneva, (1987).
44. Brenner D.J., Elliston C.D., Hall E.J. Berdon W.E. Estimated Risks of Radiation-Induced Fatal Cancer from Pediatric CT. *AJR* 2001;176:289–296.
45. Mathews J.D., Forsythe A.V., Brady Z., Butler M.W. et al. Cancer risk in 680 000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ* 2013; 346:360. DOI: 10.1136/bmj.f2360.
46. Осипов М.В., Сокольников М.Э. Проблемы оценки канцерогенного риска медицинского облучения в когорте персонала предприятия ядерно-промышленного комплекса. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2015; 60 (6): 60-66.
47. Wakeford R., Little M.P., Kendall G.M. Risk of childhood leukemia after low-level exposure to ionizing radiation. *Expert. Rev. Hematol*. 2010; 3 (3): 251–254.
48. Ron E., Lubin J.H., Shore R.E., Mabuchi K., Modan B., Pottern L.M., et al., Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies. *Radiat. Res*. 1995; 141 (3): 259–277.
49. Monty C., 2001. UNSCEAR report 2000: sources and effects of ionizing radiation. *J. Radiol. Prot.* 2000; 21 (1): 83.

50. National Research Council (U.S.), 2006. Committee to assess health risks from exposure to low level of ionizing radiation. In: Health Risks From Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase. Vol. 2 National Academies Press, Washington, D.C.

51. Neglia J.P., Robison L.L., Stovall M., Liu Y., Packer R.J., Hammond S., et al., New primary neoplasms of the central nervous system in survivors of childhood cancer: a report from the Childhood Cancer Survivor Study. J. Natl. Cancer Inst. 2006; 98(21): 1528–1537.

52. UNSCEAR, 2013. Sources, effects and risks of ionizing radiation. In: Volume II, Scientific Annex B. Effects of Radiation Exposure of Children, New York. Available from. http://www.unscear.org/docs/publications/2013/UNSCEAR_2013_Annex-B.pdf. Accessed 2019.

53. Wall B.F., Haylock R., Jansen J., Hillier M.C., Hart D., Shrimpton P.C. Radiation Risks from Medical X-ray Examinations as a Function of Age and Sex of the Patient. Health Protection Agency. Centre for Radiation. Chemical and Environmental Hazards. Chilton, Didcot. Oxfordshire, 2011.

54. Schultz C.H., Fairley R., Murphy L., Doss M. The Risk of Cancer from CT Scans and Other Sources of Low-Dose Radiation: A Critical Appraisal of Methodologic Quality. 2020; 35(1): 3-16.

References

1. Agard E.T. Healthful radiation. Health Physics. 1997; 72(1): 97-99.
2. Brenner D.J., Hall E.J. Computed tomography-an increasing source of radiation exposure. N Engl J Med 2007; 357: 2277-2284.
3. World Health Organization, Future Use of New Imaging Technologies in Developing Countries: Report of WHO Scientific Group, Technical Report Series 723, WHO, Geneva (1983).
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly. New York. United Nations; 2000.
5. Pierce D.A., Preston D.L. Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. Radiat Res. 2000; 154: 178–86.
6. Preston D.L., 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.
7. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. World Health Organization. Ionizing radiation, part 1: X- and gamma (γ)-radiation, and neutrons. International Agency for Research on Cancer. 2000; 75: 508 p.
8. Medical Radiation Exposures. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly. 2008. 293 p.

9. Kalra M.K., Maher M.M., D'Souza R., Saini S. Multidetector Computed Tomography Technology: Current Status and Emerging Developments. *J Comput Assist Tomogr* 2004; 28: S2–S6.
10. Balonov M.I., Golikov V.Yu., Zvonova I.A., Kalnitsky S.A., Repin V.S., Sarycheva S.S., Chipiga L.A. Current levels of medical exposure in Russia. *Radiation hygiene*. 2015; 8 (3): 67-79. [In Russian].
11. Doses to the population of the Russian Federation in 1999-2012: Series of handbooks. Barkovsky A.N., Baryshkov N.I., Kormanovskaya T.A. SPb. 2000-2013. [In Russian].
12. Barkovsky A.N., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov. Dynamics of doses to the population of the Russian Federation for the period from 2003 to 2018 *Radiation hygiene*. 2019 12 (4): 96-122. DOI: 10.21514 / 1998-426X-2019-12-4-96-122.[In Russian].
13. Shagina N.B., Golikov V.Yu., Degteva M.O., Vorobyova M.I., Anspo L.R., Napier B.A. Reconstruction of individual doses of medical exposure for the Techa cohort. *Medical Radiology and Radiation Safety*, 2012, Volume 57, No. 3, S.13-25. [In Russian].
14. Tukov A.R., Biryukov A.P., Shafransky I.L. Consideration of additional components of radiation doses in radiation and epidemiological studies of individuals exposed to ionizing radiation. *Medical radiology and radiation safety*. 2014; 59 (1): 43 - 49. [In Russian].
15. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105. *Annals of the ICRP*. 2007; 37(8): 63 p.
16. Golikov V.Yu., Balonov M.I., Kalnitsky S.A., Bratilova A.A., Sarycheva S.S., Shatsky I.G., Vodovatov A.V. Radiation levels of patients during x-ray studies in St. Petersburg and the Leningrad region. *Radiation hygiene*. 2011; 4 (1): 5–13. [In Russian].
17. Jacobi W. The concept of effective dose: a proposal for the combination of organ doses. *Radiat Environ Biophys* 1975; 12:101–109.
18. McCollough C.H., Schueler B.A. Calculation of effective dose. *Med Phys* 2000; 27:828–837.
19. International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 26.Oxford, UK: Pergamon Press, 1977.
20. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007; 37(2-4): 332 p.
21. Brenner D.J., Elliston C.D. Estimated radiation risks potentially associated with full-body CT screening. *Radiology*. 2004; 232:735–738.

22. Preston D., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S., Nishi N., Soda M., Mabuchi K., Kodama K. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958–1998. *Radiation Research*, 2007; 168: 1–64.
23. Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., Gilbert E., Hakama M., Hill C., et al. The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: estimates of radiation-related cancer risks. *Radiation Research*. 2007; 167(4): 396–416.
24. Wiggs L.D., Johnson E.R., Cox-DeVore C.A., Voelz GL. Mortality through 1990 among white male workers at the Los Alamos National Laboratory: Considering exposures to plutonium and external ionizing radiation. *Health Phys*. 1994; 67(6): 577–88.
25. Koshurnikova N. A., Shilnikova N. S., Okatenko P. V. Characteristics of the Cohort of Workers at the Mayak Nuclear Complex. *Radiation Research*. 1999; 152: 352 – 362.
26. Shilnikova N. S. et al. Cancer Mortality Risk among Workers at the Mayak Nuclear Complex. *Radiation Research*. 2003; 159: 787–798.
27. Hunter N., Kuznetsova I.S., Labutina E.V., Harrison J.D. Solid Cancer Incidence other than Lung, Liver and Bone in Mayak Worker Cohort: 1948-2004. 2013; 109: 1989-1996.
28. Sokolnikov ME, Gilbert ES, Preston DL, Ron E, Shilnikova NS, Khokhryakov VV, et al. Lung, liver and bone cancer mortality in Mayak workers. *Int J Cancer*. 2008; 123(4): 905–11.
29. Gilbert E., Sokolnikov M. E., Preston D.L., Schonfeld S. J., Schadilov A. E., Vasilenko E. K., Koshurnikova N. A. Lung Cancer Risks from Plutonium: An Updated Analysis of Data from the Mayak Worker Cohort. *Radiat Res*. 2013; 179(3): 332–342. DOI:10.1667/RR3054.1.
30. Osipov M.V., Vazhenin A.V., Domozhirova A.S., Chernova O.N., Aksenova I.A. Computed tomography as a risk factor in cancer patients with occupational exposure. *Russian electronic journal of radiation diagnostics*. 2019 9 (1): 142-147. DOI: 10.21569 / 2222-7415-2019-9-1-142-147. [In Russian].
31. International Commission on Radiological Protection ICRP (1958). *Recommendations of the ICRP*, ICRP Publication 1. Pergamon Press, Oxford.
32. United Nations. *Medical Radiation Exposures. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2010*, Fifty-seventh session. New York 2011.
33. Feinendegen L.E. Evidence for beneficial low level radiation effects and radiation hormesis. *Br J Radiol* 2005; 78: 3–7.
34. Howe G. R. Lung Cancer Mortality between 1950 and 1987 after Exposure to Fractionated Moderate-Dose-Rate Ionizing Radiation in the Canadian Fluoroscopy Cohort Study

and the Comparison with Lung Cancer Mortality in the Atomic Bomb Survivors Study. Radiation Research. 1995; 142: 295–304.

35. Tubiana M. Dose-effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation: The joint report of the Academie des Sciences (Paris) and of the Academie Nationale de Medecine. Int J Radiat Oncol Biol Phys 2005; 63: 317–9.

36. Lee T., Sigurdson A.J., Preston D.L., Cahoon E.K. et al. Occupational ionising radiation and risk of basal cell carcinoma in US radiologic technologists (1983-2005) Occup Environ Med. 2015; 72(12): 862-9. DOI: 10.1136/oemed-2015-102880.

37. Wei K., Lin H., Hung S., at al. Leukemia Risk After Cardiac Fluoroscopic Interventions Stratified by Procedure Number, Exposure Latent Time, and Sex. A Nationwide Population-Based Case-Control Study. Medicine. 2016; 95 (10):e2953. DOI: 10.1097/MD.0000000000002953.

38. Pearce M.S., Salotti J.A., Little M.P., McHugh K., Lee C., Kim K.P., Howe N.L., Ronckers C.M., Rajaraman P., Craft W., Parker L., Berrington de Gonzalez A. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. The Lancet. 2012; 380.

39. Fomin E.P., Osipov M.V. Pooled database of Ozyorsk population exposed to computed tomography. REJR 2019; 9(2): 234-239. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-2-234-239.

40. Ivanov V.K., Tsyb A.F., Metler F.A. Menyaylo S.Yu., Kashcheev V.V. Radiation risks of medical exposure. Radiation and risk. 2011; 20 (2): 17-28. [In Russian].

41. Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Menyaylo S.Yu., Pryakhin A.N., Tsyb A.F., Metler F.A. Assessment of the radiation risk of medical exposure in terms of effective and organ doses. Radiation and risk. 2012; 21 (4): 7-23. [In Russian].

42. Kashcheev V.V., Pryakhin E.A., Menyaylo S.Yu., Chekin S.Yu., Ivanov V.K. Calculation of equivalent doses in individual organs and tissues and the magnitude of the lifetime radiation risk of cancer during type examinations using computed tomography. Radiation and risk. 2013; 22 (3): 8-20. [In Russian].

43. World Health Organization, Rational Use of Diagnostic Imaging in Paediatrics: Report of a WHO Study Group, Technical Report Series 757, WHO, Geneva, (1987).

44. Brenner D.J., Elliston C.D., Hall E.J. Berdon W.E. Estimated Risks of Radiation-Induced Fatal Cancer from Pediatric CT. AJR 2001;176:289–296.

45. Mathews J.D., Forsythe A.V., Brady Z., Butler M.W. et all. Cancer risk in 680 000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. BMJ 2013; 346:360. DOI: 10.1136/bmj.f2360.

46. Osipov M.V., Sokolnikov M.E. Problems of assessing the carcinogenic risk of medical exposure in a cohort of personnel of a nuclear industrial complex enterprise. Medical radiology and radiation safety. 2015; 60 (6): 60-66. [In Russian].
47. Wakeford R., Little M.P., Kendall G.M. Risk of childhood leukemia after low-level exposure to ionizing radiation. Expert. Rev. Hematol. 2010; 3 (3): 251–254.
48. Ron E., Lubin J.H., Shore R.E., Mabuchi K., Modan B., Pottern L.M., et al., Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies. Radiat. Res. 1995; 141 (3): 259–277.
49. Monty C., 2001. UNSCEAR report 2000: sources and effects of ionizing radiation. J. Radiol. Prot. 2000; 21 (1): 83.
50. National Research Council (U.S.), 2006. Committee to assess health risks from exposure to low level of ionizing radiation. In: Health Risks From Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase. Vol. 2 National Academies Press, Washington, D.C.
51. Neglia J.P., Robison L.L., Stovall M., Liu Y., Packer R.J., Hammond S., et al., New primary neoplasms of the central nervous system in survivors of childhood cancer: a report from the Childhood Cancer Survivor Study. J. Natl. Cancer Inst. 2006; 98(21): 1528–1537.
52. UNSCEAR, 2013. Sources, effects and risks of ionizing radiation. In: Volume II, Scientific Annex B. Effects of Radiation Exposure of Children, New York. Available from. http://www.unscear.org/docs/publications/2013/UNSCEAR_2013_Annex-B.pdf. Accessed 2019.
53. Wall B.F., Haylock R., Jansen J., Hillier M.C., Hart D., Shrimpton P.C. Radiation Risks from Medical X-ray Examinations as a Function of Age and Sex of the Patient. Health Protection Agency. Centre for Radiation. Chemical and Environmental Hazards. Chilton, Didcot. Oxfordshire, 2011.
54. Schultz C.H., Fairley R., Murphy L., Doss M. The Risk of Cancer from CT Scans and Other Sources of Low-Dose Radiation: A Critical Appraisal of Methodologic Quality. 2020; 35(1): 3-16.