

М.В. Осипов

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО И МЕДИЦИНСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЗДОРОВЬЕ

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики ФМБА России, Озёрск

Контактное лицо: Михаил Викторович Осипов, e-mail: osipov@subi.su

### РЕФЕРАТ

Представлен анализ данных литературы по проблеме влияния профессионального и медицинского диагностического облучения на здоровье человека. Рассмотрены публикации российских и иностранных исследователей, размещённые в открытом доступе в международных базах данных PubMed, Scopus, российской национальной библиографической базе данных научного цитирования (РИНЦ), а также в других релевантных источниках. Приведена оценка современного состояния проблемы, рассмотрены характеристики источников и доз облучения, описаны основные подходы к оценке отдалённых эффектов вследствие воздействия производственного и диагностического облучения. Представлены сравнительные результаты оценки радиогенного риска для профессионального облучения от различных источников излучений, отмечен особый вклад исследований в когорте персонала ПО «Маяк». Особое внимание уделено публикациям, содержащим результаты исследований по оценке риска медицинского диагностического облучения при компьютерной томографии, которая на сегодняшний день вносит наибольший вклад в дозу диагностического облучения пациентов. Показана целесообразность комплексного изучения проблемы оценки отдалённых последствий вследствие сочетанного воздействия диагностического и профессионального облучения на персонал предприятий ядерно-промышленного комплекса.

**Ключевые слова:** профессиональное облучение, диагностическое облучение, радиационный риск, компьютерная томография, малые дозы

**Для цитирования:** Осипов М.В. Сравнительный анализ влияния профессионального и медицинского облучения на здоровье // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 3. С. 80–87. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-80-87

M.V. Osipov

## Comparative Analysis of the Impact of Occupational and Medical Radiation Exposure on Health

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics, Ozyorsk, Russia

Contact person: M.V. Osipov, e-mail: osipov@subi.su

### ABSTRACT

The review of the literature aimed on assessing the occupational and medical diagnostic radiation exposure impact on human health. Main Russian and international publications in open access international databases as PubMed, Scopus, RSCI, and relevant sources are considered. The current state of the problem is assessed, radiation sources and doses are characterized, and the key approaches to assessing the long-term effects of occupational and medical diagnostic radiation exposure are described. Comparative results of assessing the radiogenic risk of occupational radiation from various sources are presented, noting the significant contribution of Mayak PA cohort study. Particular attention is given to publications containing the results of studies assessing the risk of medical diagnostic exposure due to computed tomography, which currently makes the largest contribution to the cumulative diagnostic radiation dose burden of patients. The need for a comprehensive study of the long-term consequences of exposure to diagnostic and occupational radiation among personnel of nuclear industrial complex enterprises is demonstrated.

**Keywords:** occupational exposure, diagnostic exposure, radiation risk, computed tomography, low doses

**For citation:** Osipov MV. Comparative Analysis of the Impact of Occupational and Medical Radiation Exposure on Health. Medical Radiology and Radiation Safety. 2026;71(3):80–87. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-80-87

### Проблематика исследования

В эпоху научно-технического прогресса искусственные источники облучения – от ядерной энергетики до медицины – становятся неотъемлемой частью современной жизни, в связи с чем изучение их воздействия на здоровье человека приобретает особую актуальность. Ионизирующее излучение, способное проникать сквозь ткани живого организма и взаимодействовать с генетическим аппаратом клетки, вызывает повреждение молекул ДНК в виде одно- и двуниевых разрывов, модификации оснований, кластерным повреждением нитей ДНК, конформационным модификациям, и инверсии

генов, что может приводить к возникновению мутаций соматических и герминативных клеток. Мутации соматических клеток могут являться причиной их онкогенной трансформации и развития отдалённых эффектов для здоровья, таких как злокачественные новообразования [1] и нераковая патология [2], а мутации в половых клетках – причиной развития наследственных нарушений у потомства облучённых [3]. Изучение радиационно-индуцированного канцерогенеза является основной задачей эпидемиологических исследований контингента лиц, находящегося в контакте с техногенными источниками ионизирующего излучения. Наибольший интерес

для исследователей в настоящее время представляет оценка канцерогенных эффектов, возникающих вследствие воздействия малых доз ионизирующего излучения от техногенного облучения двух основных видов:

1. Профессиональное облучение в условиях штатной эксплуатации источников техногенной радиации (атомные электростанции, предприятия ядерной промышленности).
2. Медицинское диагностическое облучение пациентов (рентгеновские обследования, компьютерная томография, радионуклидная диагностика).

Для медицинского персонала и лиц, находящихся в зоне проведения диагностических процедур, облучение от медицинских источников рассматривается как техногенное, поскольку происходит в рамках профессиональной деятельности [4]. Особенностью оценки радиационного риска у медицинского персонала [5], и работников предприятий ядерно-промышленного комплекса является возможность сочетанного воздействия различных источников ионизирующего излучения от внешнего гамма-излучения и инкорпорированных альфа-излучающих радионуклидов [6]. Дополнительным источником радиационных рисков, которым подвергаются работники радиационно-опасных предприятий в течение жизни, является техногенное медицинское облучение за счёт прохождения диагностических процедур [7, 8].

Задачей данного обзора является сравнительный анализ эффектов, которые формируются при воздействии профессионального облучения работников ядерной промышленности и медицинского диагностического облучения пациентов, в контексте выработки дальнейшей стратегии оценки радиационных рисков с целью разработки мер по минимизации неблагоприятных последствий для здоровья персонала радиационно-опасных объектов и населения, проживающего вблизи них.

### Облучение в результате профессиональной деятельности

К профессиональному облучению относится воздействие ионизирующего излучения на организм работника в процессе его трудовой деятельности, связанное с источниками ионизирующей радиации. Профессиональному облучению подвергаются работники атомной промышленности, работники предприятий по производству и переработке ядерных материалов, лица, работающие на предприятиях по добыче урановых руд, медицинские работники (врачи-рентгенологи, рентгены хирурги, рентгено техники и медицинские физики), работники авиации и военно-космических сил, а также сотрудники научных организаций, занимающихся изучением проблем воздействия ионизирующей радиации [1, 3, 5, 9].

Профессиональное облучение в штатных условиях эксплуатации техногенных источников представляет собой хроническое контролируемое воздействие ионизирующего излучения от различных источников в области малых доз. Согласно действующим нормам радиационной безопасности, персонал группы А подвергается воздействию ионизирующего излучения от всех источников в дозах не более 20 мЗв/год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год [4]. Однако даже с учётом нормирования, в течение длительного периода трудовой деятельности работника суммарная величина эффективной дозы от различных источников профессионального облучения может возрастать до значительных величин (до 1 Зв за 50 лет трудового стажа, и более). Облучение в таких дозах считается источником потенциального риска развития радиационно-индуцированных стохастических эффектов [10, 11].

По данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), профессиональному облучению подвергаются около 22,8 млн чел. по всему миру, включая работников атомных электростанций, предприятий по изготовлению и переработке ядерных материалов, а также работников медицинских учреждений, при этом 13 млн чел. подвергается профессиональному воздействию от природных источников, а 9,8 млн – от антропогенных источников, доля облучения медицинских работников среди которых составляет 75% [12].

Промышленное использование ядерной энергетики приобретает все более значимую роль в глобальном мире, обеспечивая низкоуглеродную генерацию электроэнергии и способствуя борьбе с изменением климата. По данным на начало 2024 г., в мире эксплуатируется около 440 ядерных реакторов в 32 странах, которые производят примерно 10% мировой электроэнергии (около 2500 ТВт·ч в год). Наибольшее количество действующих АЭС находится в США (94 действующих реактора). Сфера деятельности ядерной энергетики постоянно расширяется за счёт строительства новых атомных станций, особенно в странах Азии и Ближнего Востока, таких как Китай (55 работающих реакторных установок), Индия (22 действующих реактора) [13]. Кроме того, сообщается о перспективных проектах, связанных с внепланетарным использованием атомной энергии [14]. Приведённые данные свидетельствуют о тенденции к росту количества лиц, подвергающихся воздействию профессионального облучения в связи с работой на атомных станциях, и подверженных потенциальным рискам для здоровья.

Рост промышленного использования ядерной энергии сопровождается закономерным увеличением коллективной дозы облучения населения всего мира, однако при этом современная ядерная энергетика вносит минимальный вклад в дозу облучения всего населения Земли. По данным НКДАР ООН [15], глобальная коллективная доза населения планеты от штатной эксплуатации ядерных реакторов составляет около 0,002 мЗв на человека в год (или 0,0002% от естественного радиационного фона). Рост коллективной дозы облучения населения от ядерной энергетики с 1990-х годов не превышает 0,001–0,002 мЗв/год, несмотря на увеличение числа вводимых в эксплуатацию атомных станций.

За прошедшие десятилетия ядерная энергетика не раз сталкивалась с вызовами радиационной безопасности в результате возникновения радиационных инцидентов при эксплуатации радиационно-опасных объектов, повлекших за собой облучение персонала и населения [16]. Последствия аварийного облучения привели к повышению локальных рисков здоровью как для персонала радиационно-опасных производств, занятых в ликвидации последствий радиационных аварий [17, 18], так и населения, проживающего на близлежащих территориях [19–21]. При этом доза техногенного облучения населения всего мира в результате радиационных аварий существенно не возросла (например, коллективная доза облучения населения от последствий аварии на АЭС Фукусимы оценивается НКДАР на уровне 0,003 мЗв за всю жизнь, а средняя доза облучения населения Земли от Чернобыльской аварии – около 0,12 мЗв на 1 человека за всю жизнь). По сравнению с радиационными инцидентами, локальные дозы облучения персонала радиационно-опасных предприятий, преимущественно в ранние годы их эксплуатации существенно выше. Так, персонал ПО «Маяк» в результате профессиональной деятельности мог подвергаться воздействию внешнего гамма-излучения от реакторных установок, и внутреннего альфа-излучения от радиоактивных аэрозолей в

воздухе производственных помещений [22]. Среднее значение накопленной дозы внешнего гамма-излучения в когорте работников, нанятых на основные производства ПО «Маяк» в ранний период эксплуатации производства (1948–1958 гг.) составила 748 мГр.

Исследования когорты работников ПО «Маяк» показали, что профессиональное облучение работников, облученных в высоких дозах, является значимым фактором риска развития заболеваний и состояний, характерных для радиационного поражения (острая лучевая болезнь, лейкозы), и отдаленных последствий в виде увеличения заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО) различных локализаций, а также нераковых заболеваний [23–28]. Избыточный относительный риск (ИОР) смерти от лейкозов оценивался примерно в 3,0 на 1 Гр дозы, поглощенной в красном костном мозге [24]. Радиационный риск смерти от солидных злокачественных новообразований, кроме рака легких, печени и костной ткани, на 1 Гр внешней дозы гамма-облучения составил 0,16 (95% ДИ 0,07–0,26), и 0,12 (95% ДИ 0,03–0,21) после учёта модификации риска по внутреннему облучению [26]. Влияние внутреннего альфа-излучения от инкорпорированного  $^{239}\text{Pu}$ , поступавшего ингаляционным путём в организм работников радиохимических и плутониевых производств ПО «Маяк», было значимо связано с увеличением риска смерти от рака лёгкого (ИОР 0,11–0,13 на 1 Гр), но при этом модифицировалось влиянием нерадиационного фактора – курения [29].

Сочетанное воздействие источников внешнего и внутреннего облучения с ингаляционным путём поступления характерно также для работников по добыче урана [30, 31], средние дозы облучения которых за счёт ингаляции альфа-активных частиц  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  и его дочерних продуктов распада, а также внешнего гамма-излучения могли достигать нескольких грей [32]. В зарубежных исследованиях рисков профессионального облучения работников по добыче урана отмечается, что доля случаев рака лёгкого, связанного с профессиональным воздействием радона, варьировала в широких пределах от 0,2% до 26%. Причиной вариативности является влияние сторонних факторов риска, в частности, экспозиции бытовых источников радона [33].

Оценке радиационных рисков среди персонала атомной промышленности посвящён ряд эпидемиологических исследований в различных странах [34–38]. Наиболее крупным считается исследование объединённой когорты работников атомной промышленности из 15 стран (включая США, Великобританию, Германию, Францию, Канаду и Корею), которое насчитывает 407 391 человек, подвергавшихся профессиональному облучению в малых и сверхмалых дозах внешнего облучения (средняя накопленная доза облучения работника составила 19,4 мЗв) [34]. Результаты исследования указывают на наличие небольшого избыточного риска рака даже при низких дозах и низкой мощности дозы, типичных для работников атомной отрасли. Так, ИОР смертности от всех причин среди работников составил 0,42 на 1 Зв (90% ДИ 0,07–0,79). Основной вклад в этот показатель вносила смертность от всех видов рака (ИОР/Зв 0,97; 90% ДИ 0,28–1,77). Значимая связь с дозой внешнего облучения была обнаружена для рака лёгкого (ИОР/Зв 1,86; 90% ДИ 0,49–3,63). Наблюдалась пограничная статистическая значимость для множественной миеломы (ИОР/Зв 6,15; 90% ДИ <0–20,6). При этом на оценки риска существенно влиял эффект «здорового работника» [35]. В исследовании когорты INWORKS, включающей 308 297 работников ядерной отрасли из нескольких стран Европы и США, при относительно низких средних дозах

облучения (1,1 мЗв в год) было установлено статистически значимое повышение риска смерти от лейкозов (без учёта хронического лимфоцитарного лейкоза) на уровне 2,96 на 1 Гр (90% ДИ: 1,17–5,21), а также солидных опухолей. Наиболее значимыми эффектами являлись развитие лейкемии (ИОР на 1 Гр 1,93), и рак лёгкого (ИОР 0,87; 95% ДИ 0,05–2,04). Отмечается, что канцерогенные риски были выше для женщин, и они возрастали при дозах облучения свыше 0,5 Зв. Полученные данные подтверждаются последующими исследованиями с расширенным периодом наблюдения (10,7 млн человеко-лет) [36], где была отмечена более сильная зависимость доза–эффект в диапазоне низких доз. При относительно низких средних дозах внешнего облучения (20,9 мЗв в пересчете на дозу, поглощённую в толстой кишке) было установлено статистически значимое повышение риска смерти от злокачественных новообразований. При этом накопленные в течение трудового стажа дозы внешнего облучения профессионалов, как правило, не превышали 100 мЗв, с незначительным вкладом внутреннего облучения. Основные результаты исследования свидетельствуют о наличии значимого ИОР смерти от всех видов рака, который составил 0,53 на 1 Гр (90% ДИ 0,30–0,77), и солидных раков (ИОР 0,52 на 1 Гр, 90% ДИ 0,27–0,77). В исследовании установлена линейная связь между дозой облучения и риском развития солидных раков в диапазоне низких доз (0–100 мЗв). У работников, нанятых после 1965 г. (с более качественным дозиметрическим контролем), ИОР достигал 1,44 на Гр (90% ДИ: 0,65–2,32), что значительно превышает оценку риска для работников, нанятых в ранние годы.

Показатель ИОР смерти от солидных опухолей в исследовании когорты из 101 363 работников ядерных объектов США составил 0,19 на 1 Зв дозы облучения, поглощённой в толстой кишке (95% ДИ –0,10, 0,52) [37]. В исследовании [38] получено значимое увеличение риска смерти для рака желудка, легких, печени, толстой кишки, молочной железы, желчного пузыря, пищевода, мочевого пузыря и яичников, но не выявлено значимого увеличения риска ЗНО прямой кишки, поджелудочной железы, матки, простаты и почек. Показана обратная зависимость риска от возраста работников: риск смерти от солидных раков возрастал на 29% за каждое десятилетие снижения возраста на момент облучения (95% ДИ 17–41%). Наименьший диапазон доз, при котором наблюдался значимый избыточный относительный риск для всех солидных раков, составил 0–200 мГр.

Уровни профессионального облучения медицинских работников являются более низкими, чем у профессионалов атомной отрасли, и в настоящее время в целом имеют тенденцию к снижению [9, 39]. Эффективные дозы для рентгенологов и медицинских физиков, как правило, не превышают 0,5 мЗв в год, в связи с чем накопленная доза за весь период трудовой деятельности составляет порядка 20–30 мЗв, и в последние годы имеет тенденцию к дальнейшему снижению [39, 40]. Так, в исследовании когорты из 79 959 радиологов, подвергавшихся профессиональному облучению в малых дозах при проведении рентгенодиагностических исследований (накопленная средняя поглощённая доза в коже головы, шеи и рук составила 55 мГр), выявлено достоверное увеличение пожизненного радиационного риска развития только для базально-клеточной карциномы кожи в зависимости от возраста начала облучения [41], однако статистически значимых эффектов для других локализаций не было найдено.

Значительный рост дозы профессионального облучения медицинских работников наблюдается за счёт об-

лучения хрусталика глаза при проведении рентгенохирургических вмешательств (от 2 до 16,9 мЗв за квартал) [42]. Исследование [43] показало, что, несмотря на соблюдение нормативных уровней облучения (средний годовой уровень облучения персонала составил 4,75 мЗв, при этом 95% работников получали дозу ниже 20 мЗв/год, что соответствует установленным нормам), работники отделений интервенционной радиологии имели статистически значимо повышенный риск развития злокачественных новообразований в течение жизни по сравнению с общей популяцией. Пожизненный атрибутивный риск развития рака для работников интервенционной радиологии составил 3,3% при средней продолжительности работы 25 лет. Величина пожизненного риска (LAR) для всех видов рака в совокупности до выхода на пенсию составляла 338 (ДИ 95% 90,3–796,1) на 100 тыс. чел для мужчин-радиологов, 121 (ДИ 95% 33,5–288,7) на 100 тыс. чел. для мужчин-рентгенологов, и 156 (ДИ 95% 41,1–390,6) на 100 тыс. чел. для женщин-рентгенолаборантов. Наибольший риск наблюдался для женщин-работниц (4,1%) по сравнению с мужчинами (2,7%). Вклад в канцерогенный риск вносили рак молочной железы (27,8% от общего риска у женщин), рак лёгкого (17,9%) и рак щитовидной железы (15,6%) [43].

Представленные результаты крупных когортных исследований профессионалов показали, что хроническое воздействие ионизирующего излучения является фактором риска развития различных видов злокачественных новообразований, включая солидные раки и злокачественные новообразования органов системы гемопоэза. В некоторых случаях следствием воздействия ионизирующего излучения являлись нарушения в работе сердечно-сосудистой системы и эндокринные расстройства, а облучение хрусталика глаза являлось причиной развития радиогенной катаракты. Радиационно-индуцированные эффекты, в основном, являются стохастическими, имеют латентный период развития от 2 до 50 лет и более, и варьируют в зависимости от пола, возраста, вида излучения и полученной дозы. Дозы облучения работников варьировали в зависимости от профессии и условий труда, а также сочетания источников радиационного воздействия. Показано, что сочетание внешнего и внутреннего облучения (к примеру, у работников урановых рудников и предприятий по переработке ядерного топлива) приводит к более высокому радиогенному риску.

При низких дозах (<100 мЗв) радиационные риски среди профессионально облученных работников характеризуются значительно меньшей величиной, однако статистическая значимость оценок канцерогенного риска достигнута не во всех исследованиях. Эффект облучения в малых дозах может усиливаться при сочетании с другими производственными факторами: воздействием химических веществ, шумом, вибрацией, а также наличием вредных привычек (курение, употребление алкоголя). Для внутреннего альфа-облучения работников за счёт ингаляционного поступления соединений плутония, радона или других альфа-излучающих радионуклидов наиболее характерно возникновение радиационно-индуцированного риска рака органов основного депонирования альфа-частиц (лёгкого, печени, скелета).

В отношении сочетанного воздействия различных техногенных источников излучения, важно отметить, что профессионально облученные работники могут дополнительно подвергаться воздействию медицинского диагностического облучения как пациенты, что обуславливает рост накопленной дозы облучения, и, вероятно, может увеличивать связанные с этим дополнительные риски для здоровья.

### Медицинское облучение пациентов

К медицинскому облучению пациентов относится контролируемое воздействие на организм человека излучения, применяемого для диагностики (рентгенография, флюорография, линейная томография, КТ, радионуклидная диагностика) или лечения заболеваний (лучевая терапия в онкологии, радионуклидная терапия злокачественных новообразований, рентгенохирургия). Медицинское облучение пациентов является преднамеренным и используется для выявления и лечения широкого спектра заболеваний. Коллективные дозы медицинского облучения населения всего мира в настоящее время достигают 3,6 млн человеко-зиверт в год [44]. Медицинское диагностическое облучение во всём мире насчитывает миллиарды процедур в год, при этом отмечается ежегодный рост его применения на 5–10% благодаря распространению компьютерной томографии (КТ), интервенционной радиологии и ядерной медицины [45]. Вклад КТ в суммарную коллективную дозу диагностического облучения населения является наибольшим, для населения России он составляет около 50% совокупной дозы облучения пациентов [45]. Общий вклад процедур ядерной медицины и интервенционной радиологии в дозу облучения населения от диагностических процедур, в настоящее время остаётся сравнительно небольшим (для радионуклидной диагностики около 0,8%).

Наряду с естественным радиационным фоном и профессиональным облучением работников в штатных условиях эксплуатации источников ионизирующего излучения, медицинское облучение, за исключением лучевой терапии, относится к области малых доз. Современные тенденции в состоянии здоровья населения России и мира, такие как старение населения и рост числа онкологических заболеваний, обуславливают увеличение количества проводимых ежегодно медицинских диагностических процедур, что сопровождается ростом дозы диагностического облучения населения [46, 47]. Поскольку в регламентирующих документах нет понятия «максимальная допустимая доза» для диагностического облучения, это может приводить к значительному росту накопленной дозы при проведении многократных исследований, и связанным с этим избыточным радиационным рискам [47]. Примечательно, что по данным российских исследователей на 1994 г., ожидаемая суммарная смертность от рака за счет облучения при рентгенологических исследованиях населения России, на основании моделей МКРЗ 60, прогнозировалась на уровне 10–20 тыс. чел. в год [48]. Современные методики оценки радиационного риска при медицинском облучении, разработанные российскими учёными, отражены в регламентирующих документах (МР 2.6.1.0098-15 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований») и основаны на использовании модели риска Публикации МКРЗ 103, учитывают различные параметры, такие как вид исследования, дозу облучения пациентов в РФ, возраст пациента, и характеристики российской популяции [49]. Величина пожизненного риска, связанного с проведением рентгенодиагностических исследований, варьирует в широких пределах от пренебрежимо малого  $1 \times 10^{-6}$  (доза менее 0,02 мЗв для взрослых) до умеренного риска  $1-3 \times 10^{-3}$  (доза 20–60 мЗв для взрослых) в зависимости от возраста пациента и дозы облучения.

По данным BEIR VII, пожизненный атрибутивный риск смерти от рака при диагностическом облучении всего тела в дозе 10 мЗв оценивается примерно в 0,1% (1 на 1000 чел), варьируя в зависимости от возраста на момент облучения (от 5 до 20 на 10 тыс. чел), однако

данное значение является результатом экстраполяции из области высоких доз (1 Зв и более) с использованием линейной беспороговой модели, а не наблюдаемым значением риска [3]. Оценки же наблюдаемой величины радиационного риска, связанного с воздействием медицинского облучения, существенно различаются. Так, по данным зарубежных исследований [50], при низких дозах облучения (<100 мЗв) коэффициенты относительного риска для медицинского диагностического облучения являются более высокими, чем для выживших после атомных бомбардировок (соотношение оценок ИОР варьирует от 0,1 до 0,7). При средних и высоких дозах (от 100 мЗв до 2 Зв) часть исследований демонстрирует повышенные коэффициенты канцерогенного риска (ИОР до 9,4 на 1 Зв), другая часть – пониженные (ИОР от 0,4 на 1 Зв). При высоких дозах диагностического облучения пациентов (более 2 Зв) во всех исследованиях зафиксированы сниженные риски по сравнению с данными исследований когорты LSS (соотношение ИОР варьирует от 1,3 до 37,0) [47, 50].

Исследования когорт взрослых пациентов, обследованных методом компьютерной томографии в США [52] показали, что 1,5–2% заболеваний злокачественными новообразованиями (29 тыс. случаев в год) могут быть связаны с воздействием рентгеновского излучения при КТ, а риск радиационно-индуцированной смерти от рака возрастает до 1,9% при повторных обследованиях (например, у онкологических пациентов). Исследования когорт детского возраста, диагностически облученных при проведении КТ (австралийская когорта, насчитывающая 680 тыс. детей и подростков), также свидетельствуют об увеличении риска всех видов ЗНО. При этом оценки риска для лиц детского возраста являются более высокими: на каждые 10 мГр дозы рентгеновского облучения коэффициент ИОР для солидных опухолей составил 1,24, для опухолей мозга – 1,35, и для лейкозов – 1,9 [51].

В исследовании [53] показано, что при средней кумулятивной дозе облучения головного мозга 38,5 мГр в результате проведения КТ-исследований лиц детского возраста избыточный риск развития злокачественных новообразований мозга составил 0,86 на 100 мГр (95% ДИ 0,20–2,22). Показано, что избыточный риск развития лейкоза был на 23% выше (ДИ 95% 1,10–1,36), при этом обнаружена статистически незначимая зависимость от дозы облучения: для дозы 5–10 мГр значение ИОР составило 0,90 (95% ДИ 0,69–1,12), для дозы 10–15 мГр – 1,02 (ДИ 95% 0,86–1,18), а для дозы > 15 мГр – 1,13 (ДИ 95% 0,97–1,30), что свидетельствует о возможной нелинейности эффекта в диапазоне сверхмалых доз [54].

По данным других исследователей [55], для уровней диагностического облучения от 0,1 до 20 мЗв не получено убедительных доказательств существования избыточного радиогенного риска развития ЗНО, связанного с дозой диагностического облучения при КТ, что, по мнению исследователей, связано с нелинейностью эффектов в области доз ниже 100 мЗв. Данное предположение согласуется результатами исследования [56] когорты туберкулезных пациентов, получавших фракционированные дозы диагностического облучения от рентгеноскопии, где показано статистически значимое отсутствие увеличения риска (ОР 1,00) для рака лёгкого, что объясняется авторами как адаптивный ответ при низких дозах и фракционированном облучении.

Представленные данные свидетельствуют о том, что вызываемые воздействием рентгеновского излучения канцерогенные эффекты зависят от возраста на момент облучения, вида излучения и, по различным данным, от дозы облучения. Основным нерадиационным фактором,

влияющим на радиационный риск при диагностическом облучении, является возраст пациента. Считается, что дети и подростки более чувствительны к воздействию рентгеновского излучения из-за высокой пролиферативной и метаболической активности тканей и большей продолжительности жизни, в течение которой может развиваться заболевание.

Результаты эпидемиологических исследований показывают статистически значимое увеличение риска злокачественных новообразований при дозах диагностического облучения свыше 100 мЗв, при этом достоверность оценок риска снижается при более низких дозах (50–100 мЗв), однако в некоторых работах коэффициенты относительного риска для медицинского диагностического облучения выше, чем в исследованиях выживших после атомных бомбардировок, что является вопросом для дальнейшего изучения.

### **Особенности влияния профессионального и медицинского диагностического облучения на здоровье человека**

Профессиональное облучение от различных источников характеризуется хроническим, относительно равномерным, контролируемым воздействием малых доз. Индивидуальный пожизненный риск развития канцерогенных эффектов воздействия техногенного облучения для персонала группы А за период трудовой деятельности 50 лет при условии ежегодного облучения в дозе 20 мЗв ограничен величиной  $10^{-3}$  (0,1%). Основными факторами, влияющими на выраженность эффектов профессионального облучения на здоровье работников, являются возраст (с увеличением возраста начала облучения риск снижается), пол (в зависимости от вида облучения, риск может быть более выражен у мужчин или женщин), вредные привычки (курение, профессиональные вредности нерадиационного характера). Достоверные оценки радиационного риска получены в диапазоне средних и высоких доз (более 0,5–1 Зв), однако результаты оценки риска в области малых доз подвержены значительной вариабельности. Для профессионального облучения характерен эффект «здорового работника», который может влиять на величину фонового радиационного риска.

По сравнению с профессиональным облучением, медицинское диагностическое облучение пациентов характеризуется эпизодическим, неравномерным (локальным) воздействием рентгеновского излучения в диапазоне малых и сверхмалых доз (0,01 мЗв при цифровой рентгенографии) до 20–50 мЗв (КТ), со средней годовой дозой от всех видов диагностического облучения на человека около 3 мЗв/год. При этом темп накопления дозы диагностического облучения, по сравнению с хроническим облучением профессионалов, более интенсивный: к примеру, доза рентгеновского облучения, эквивалентная годовой дозе внешнего облучения работника атомной промышленности (более 20 мЗв) может быть получена пациентом при проведении компьютерной томографии брюшной полости в течение нескольких минут [51].

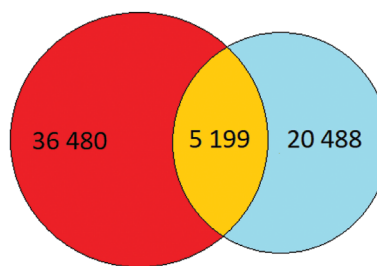
Как и для профессионального облучения, при диагностическом облучении в отношении влияния на здоровье значимым является возраст на дату облучения, пол пациента, и наличие других нерадиационных факторов риска. Достоверные оценки канцерогенного риска получены не во всех исследованиях, при этом для диагностического облучения характерен эффект влияния конфаундинга показания, приводящий к смещению (завышению) оценок радиогенного риска.

Наиболее изучаемыми эффектами влияния на здоровье человека профессионального и медицинского облучения являются канцерогенные эффекты, имеющие стохастическую природу, и зависящие от различных факторов риска: вида и количества источников излучения, продолжительности и равномерности облучения, дозы облучения, возраста на момент облучения, пола, и влияния сторонних факторов, не связанных с облучением. Табл. 1 иллюстрирует основные сходства и различия в сценариях и эффектах профессионального и медицинского диагностического облучения (табл. 1).

Сценарии сочетанного воздействия ионизирующего излучения представляют особый интерес для исследований. Профессиональное облучение работников может сопровождаться дополнительным фактором радиационного риска, связанным с воздействием диагностического облучения при проведении медицинских обследований. Доза диагностического облучения персонала формируется от различных источников рентгеновского облучения (к примеру, ежегодные флюорографические обследования, планарная рентгенография), но в настоящее время в значительной мере дозообразующим фактором при диагностических исследованиях является компьютерная томография [45, 51]. В связи с этим актуальным вопросом является наличие возможного потенцирования эффекта при сочетанном воздействии нескольких радиационных факторов [59].

По собственным данным, полученным в Южно-Уральском федеральном научно-клиническом центре медицинской биофизики ФМБА России за многолетний период наблюдения [57, 58], значимая доля работников ПО «Маяк» подвергалась в течение жизни дополнительному воздействию медицинского облучения при компьютерной томографии. Диаграмма Эйлера (рис. 1) иллюстрирует сочетание воздействия двух факторов радиационного риска – профессионального облучения работников ПО «Маяк», и диагностического облучения от наиболее значимого источника – компьютерной томографии, среди работников ПО «Маяк».

Согласно рис. 1, на 31 декабря 2019 г. доля работников ПО «Маяк», нанятых на основные и вспомогательные производства в период с 1948 по 2016 гг., и



● Персонал основных и вспомогательных производств ПО «Маяк» 1948-2016 годов найма (36 480 чел)  
 ● Когорта жителей ЗАТО г. Озёрск, обследованных при помощи КТ (20 488 чел)  
 ● Персонал ПО «Маяк», обследованный при помощи КТ (5 199 чел)

Рис. 1. Производственное и диагностическое облучение за счёт компьютерной томографии среди населения ЗАТО г. Озёрск и персонала ПО «Маяк»

Fig. 1. Occupational and diagnostic radiation exposure due to computed tomography among the population of the closed administrative-territorial entity of Ozersk and personnel of the Mayak Production Association

обследованных при помощи компьютерной томографии в различных медицинских учреждениях Челябинской области за период с 1989 по 2019 гг., составляла 14,3%. Среди населения ЗАТО г. Озёрск, обследованного при помощи КТ за период с 1989 по 2019 гг., доля работников ПО «Маяк» составила 25,4%. Суммарная величина коллективной эффективной дозы 5199 работников за счёт КТ составляет 38119,3 мЗв. Представленные данные свидетельствуют о целесообразности учёта влияния медицинского диагностического облучения при компьютерной томографии при оценке радиационного риска среди профессионально облученного контингента.

**Заключение**

В современном мире профессиональное и медицинское диагностическое облучение относится преимущественно к области малых доз, характеризующихся возникновением отдалённых стохастических эффектов, таких как злокачественные новообразования и генетические нарушения у потомков облученных. Согласно существующим представлениям о радиационном риске,

Таблица 1

**Сходства и различия в сценариях и эффектах профессионального и диагностического облучения**  
**Similarities and differences in the scenarios and effects of occupational and diagnostic radiation exposure**

Характеристика	Профессиональное	Медицинское
Сценарий облучения	Равномерное. Локальное. Органы основного депонирования	Локальное в зоне интереса. Всё тело (КТ, ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ)
Источники	Гамма-, бета-, альфа-излучение, рентгеновское (рентгенохирурги, рентгенолаборанты, физики)	Рентгеновское излучение. Радионуклиды (диагностические и терапевтические процедуры)
Время	Хроническое	Острое. Эпизодическое
Дозы облучения и нормирование	До нескольких Зв (ранние годы найма работников на ПО «Маяк»; шахтёры). Для персонала группы А до 50 мЗв/год, в среднем <20 мЗв в год, до 1 Зв за 50 лет стажа	Средняя доза за год для населения ~3 мЗв. Наиболее высокая при КТ и ПЭТ/КТ (до 25–50 мЗв за процедуру); не нормируется (но предусмотрено ограничение менее 500 мЗв/год)
Релевантные органы и ткани	Всё тело. Красный костный мозг. Для α-и β-радионуклидов – лёгкое, печень, костная ткань. Кисти рук. Хрусталик глаза	Отдельные органы (голова, шея, грудная клетка, брюшная полость и малый таз, конечности). Органы-мишени (радионуклидная диагностика)
Основные эффекты облучения	Солитарные раки, лейкозы. ЗНО лёгкого, печени, костной ткани. Меланома кожи. Нераковые эффекты: сердечно-сосудистые, цереброваскулярные нарушения; плутониевый пневмосклероз. Лучевая катаракта (при высоких дозах)	Солитарные раки. При КТ детского возраста – ЗНО головного мозга, лейкозы. Нераковые эффекты: лейкопения, тромбоцитопения; нарушение нейrogenеза. Нарушения эмбриогенеза (пороки развития и гибель плода). Лучевая катаракта (при высоких дозах)
ИОР/Зв	Для лейкозов: ~3,0 на 1 Зв. Для внешнего облучения риск солитарных ЗНО ~0,16 на 1 Зв. Для внутреннего облучения ~0,12 на 1 Гр	Для всех ЗНО: ~0,035 на 1 мЗв (детские когорты) Для опухолей мозга: ~0,86 на 100 мЗв
Проблемы исследований	Эффект здорового работника. Сопутствующие факторы риска	Влияние обратной причинно-следственной связи. Сопутствующие факторы риска

даже небольшие дозы облучения могут приводить к превышению фонового риска, что говорит о необходимости наблюдения за облученным контингентом с целью количественной оценки потенциального ущерба от воздействия ионизирующего излучения.

В данном контексте диагностически облученный персонал радиационно-опасных производств формирует особую группу риска, для которой совокупная величина канцерогенного риска складывается из двух компонентов: за счёт контролируемого профессионального облучения и дополнительного компонента, связанного с диагностическими обследованиями. Отсутствие нормирования уровней диагностического облучения (за исключением профилактических осмотров) предоставляет возможность для неограниченного роста величины совокупного пожизненного риска среди профессионалов за счёт медицинской составляющей. С учётом расширяющегося ареала применения различных видов медицинского диагностического облучения (КТ, радионуклидная диагностика, ПЭТ, рентгенохирургия) и их доступности для населения, связанный с этим совокупный риск у профессионалов в будущем будет иметь тенденцию к увеличению. Актуальным также является вопрос о на-

личии мультипликативности радиобиологических эффектов сочетанного воздействия различных видов профессионального и диагностического облучения.

Для выполнения задач по охране здоровья лиц, работающих с источниками радиационного воздействия на производстве, и населения, проживающего вблизи радиационно-опасных объектов, необходим комплексный подход к оценке рисков с учётом сочетанного воздействия источников профессионального и медицинского облучения. Информационной базой для проведения эпидемиологических исследований по оценке риска от техногенного и медицинского облучения в Южно-Уральском федеральном научно-клиническом центре медицинской биофизики являются регистр персонала ПО «Маяк», медико-дозиметрический регистр компьютерной томографии населения города Озёрск, база данных рентгенодиагностических исследований работников ПО «Маяк», и другие популяционные регистры, предоставляющие медико-демографические данные. Результаты исследований могут быть использованы для разработки рекомендаций по радиационно-гигиеническому нормированию уровней профессионального и диагностического облучения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionizing Radiation. 2008 Report. Vienna, UNSCEAR. 2010. 800 p.
- Tapio S., Little M.P., Kaiser J.C., et al. Ionizing Radiation-Induced Circulatory and Metabolic Diseases. *Environ Int.* 2021;146:106235. Doi: 10.1016/j.envint.2020.106235.
- National Academy of Sciences. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, National Academies Press, 2006. 422 p.
- 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. [*Normy Radiatsionnoy Bezopasnosti (NRB-99/2009). Sanitarnyye Pravila i Normativy (SanPiN 2.6.1.2523-09) = Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). Sanitary Rules and Regulations (SanPiN 2.6.1.2523-09).* Moscow, Federal'nyy Tsentr Gigiyeny i Epidemiologii Rospotrebнадзора Publ., 2009. 100 p. (In Russ.)].
- Veillette J.B., Carrier M.A., Rinfret S., et al. Occupational Risks of Radiation Exposure to Cardiologists. *Curr Cardiol Rep.* 2024;26:6:601-622. Doi: 10.1007/s11886-024-02056-z.
- Tirmarche M. Cancer Risk Following Alpha-Emitter Exposure. *Ann ICRP.* 2018;47:3-4:115-125. Doi: 10.1177/0146645318756247.
- Fournier L., Cléro E., Samson E., et al. Impact of Considering Non-Occupational Radiation Exposure on the Association between Occupational Dose and Solid Cancer among French Nuclear workers. *Occup Environ Med.* 2018;75:3:199-204. Doi: 10.1136/oemed-2017-104341.
- Кащеев В.В., Меняйло А.Н., Пряхин Е.А. и др. Оценка и сравнение радиационных рисков медицинского и профессионального облучений // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2015. Т.24. №.3. С. 5-15. [Kashcheyev V.V., Menyaylo A.N., Pryakhin Ye.A., et al. Assessment and Comparison of Radiation Risks of Medical and Occupational Exposures. *Radiatsiya i Risk (Byulleten' Natsional'nogo Radiatsionno-Epidemiologicheskogo Registra) = Radiation and Risk.* 2015;24:3:5-15 (In Russ.)].
- Li M., Deng L., Zhou W., et al. Trends of Occupational Exposure to Ionizing Radiation in Central China for the Period 2000-2021. *Appl Radiat Isot.* 2024;208:111283. Doi: 10.1016/j.apradiso.2024.111283.
- Tao S.M., Wang L.L., Li M.D., et al. Cancer Risk Associated with Low-Dose Ionizing Radiation: a Systematic Review of Epidemiological and Biological Evidence. *Mutat Res Rev Mutat Res.* 2024;794:108517. Doi: 10.1016/j.mrrev.2024.108517.
- Соснина С.Ф. Последствия прекоцептивного действия ионизирующего излучения: экспериментальные, цитогенетические и молекулярно-генетические исследования (обзор) // Вопросы радиационной безопасности. 2025. № 2. С. 76-89. [Sosnina S.F. Consequences of Preconceptual Action of Ionizing Radiation: Experimental, Cytogenetic and Molecular Genetic Studies (Review). *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Problems.* 2025;2:76-89 (In Russ.)].
- Арсеньев А.И., Новиков С.Н., Арсеньев Е.А. и др. Радиационная безопасность: Учебное пособие для обучающихся в системе высшего и дополнительного профессионального образования. СПб.: НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова, 2024. 204 с. [Arsen'yev A.I., Novikov S.N., Arsen'yev Ye.A., et al. *Radiatsionnaya Bezopasnost = Radiation Safety. A Textbook for Students in the System of Higher and Continuing Professional Education.* St. Petersburg, Natsional'nyy Meditsinskiy Issledovatel'skiy Tsentr Onkologii im. N.N. Petrova Publ., 2024. 204 p. (In Russ.)].
- International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook. Paris, IEA, 2023. 355 p.
- Huff K. Taking Nuclear Energy to the Moon. *Science.* 2025;389:6763:859. Doi: 10.1126/science.aeb6479.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. 2016 Report. Vienna, UNSCEAR, 2017. 486 p.
- Napier B.A., Eslinger P.W., Tolstykh E.I., et al. Calculations of Individual Doses for Techa River Cohort Members Exposed to Atmospheric Radioiodine from Mayak Releases. *J Environ Radioact.* 2017;178-179:156-167. Doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.08.013.
- Beresford N.A., Fesenko S., Konoplev A., et al. Thirty Years after the Chernobyl Accident: What Lessons Have We Learnt? *J Environ Radioact.* 2016;157:77-89. Doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.02.003.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). The Fukushima Daiichi Accident. Vienna, IAEA, 2015. 1254 p.
- Аклеев А.В., Крестинина Л.Ю. Канцерогенный риск у жителей прибрежных сел реки Теча // Вестник Российской академии медицинских наук. 2010. №6. С. 34-9 [Akleyev A.V., Krestinina L.Yu. Carcinogenic Risk for Residents of Villages on the Banks of the Techa River. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Meditsinskikh Nauk = Annals of the Russian Academy of Medical Sciences.* 2010;6:34-9 (In Russ.)].
- Микрюкова Л.Д., Завьялов Д.А. Риск смерти от злокачественных новообразований легких в Уральской когорте аварийно-облученного населения // Радиационная гигиена. 2025. Т.18. №2. С. 7-15. [Mikryukova L.D., Zav'yalov D.A. Risk of Death from Malignant Neoplasms of the Lungs in the Ural Cohort of the Accident-Exposed Population. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene.* 2025;18:2:7-15 (In Russ.)]. Doi: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-7-15
- Muirhead C.R. Cancer after Nuclear Incidents. *Occup Environ Med.* 2001;58:7:482-7;quiz 487-8,431. Doi: 10.1136/oem.58.7.482.
- Кузнецова И.С., Сокольников М.Э., Кабинова Н.Р. и др. Когорта работников ПО «Маяк»: характеристика и основные результаты эпидемиологических исследований // Медицина экстремальных ситуаций. 2025. Т.27. №4. С. 505-515 [Kuznetsova I.S., Sokol'nikov M.E., Kabirova N.R., et al. Cohort of Workers at Mayak Production Association: Characteristics and Main Results of Epidemiological Studies. *Meditsina Ekstremal'nykh Situatsiy = Medicine of Extreme Situations.* 2025;27:4:505-515 (In Russ.)]. Doi: 10.47183/mes.2025-290
- Shore R., Walsh L., Azizova T., Rühm W. Risk of Solid Cancer in Low Dose-Rate Radiation Epidemiological Studies and the Dose-Rate Effectiveness Factor. *Int J Radiat Biol.* 2017;93:10:1064-1078. Doi: 10.1080/09553002.2017.1319090
- Sokolnikov M.E., Stram D., Preston D., et al. Leukemia, Lymphoma, and Multiple Myeloma Mortality in the Russian Mayak Worker Cohort 1948-2015. *Radiat Res.* 2025;204:6:604-623. Doi: 10.1667/RADE-23-00059.1
- Zhuntova G.V., Azizova T.V., Grigoryeva E.S. Risk of Stomach Cancer Incidence in a Cohort of Mayak PA Workers Occupationally Exposed to Ionizing Radiation. *PLoS One.* 2020;15:4:e0231531. Doi: 10.1371/journal.pone.0231531.
- Sokolnikov M.E., Preston D., Gilbert E., et al. Radiation Effects on Mortality from Solid Cancers other than Lung, Liver, and Bone Cancer in the Mayak Worker Cohort: 1948-2008. *PLoS One.* 2015;10:2:e0117784. Doi: 10.1371/journal.pone.0117784.
- Little M.P., Azizova T.V., Richardson D.B., et al. Ionising Radiation and Cardiovascular Disease: Systematic Review and Meta-Analysis. *BMJ.* 2023;380:e072924. Doi: 10.1136/bmj-2022-072924.

28. Azizova T.V., Moseeva M.B., Grigoryeva E.S., Hamada N. Incidence Risks for Cerebrovascular Diseases and Types of Stroke in a Cohort of Mayak PA Workers. *Radiat Environ Biophys*. 2022;61:1:5-16. Doi: 10.1007/s00411-022-00966-6.
29. Stram D.O., Sokolnikov M.E., Napier B.A., et al. Lung Cancer in the Mayak Workers Cohort: Risk Estimation and Uncertainty Analysis. *Radiat Res*. 2021;195:4:334-346. Doi: 10.1667/RADE-20-00094.1.
30. Ritz B. Radiation Exposure and Cancer Mortality in Uranium Processing Workers. *Epidemiology*. 1999;10:5:531-8.
31. Zablotska L.B., Lane R.S.D., Randhawa K. Association between Exposures to Radon and  $\gamma$ -ray Radiation and Histologic Type of Lung Cancer in Eldorado Uranium Mining and Milling Workers from Canada. *Cancer*. 2022;128:17:3204-3216. Doi: 10.1002/cncr.34351.
32. Калинин Д.Е., Тахауов Р.М., Мильто И.В., и др. Анализ заболеваемости злокачественными новообразованиями персонала сибирского химического комбината // Сибирский онкологический журнал. 2021. Т.20. №5. С. 5-17. [Kalinkin D.Ye., Takhauov R.M., Mil'to I.V., et al. Analysis of the Incidence of Malignant Neoplasms among the Personnel of the Siberian Chemical Plant. *Sibirskiy Onkologicheskij Zhurnal* = Siberian Journal of Oncology. 2021;20:5:5-17. (In Russ.)]. Doi: 10.21294/1814-4861-2021-20-5-5-17.
33. Martin-Gisbert L., Garcia G., Teijeiro A., Ruano-Ravina A. Radon Exposure as an Occupational Risk Factor for Lung Cancer in Conventional Workplaces. An Overview. *Expert Rev Respir Med*. 2024;18:12:1041-1046. Doi: 10.1080/17476348.2024.2444363.
34. Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., et al. The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Estimates of Radiation-Related Cancer Risks. *Radiat Res*. 2007;167:4:396-416. Doi: 10.1667/RR0553.1.
35. Leuraud K., Richardson D.B., Cardis E., et al. Ionising Radiation and Risk of Death from Leukaemia and other Cancers in Radiation-Protected Workers: an International Cohort Study (Inworks). *Lancet Haematol*. 2015;2:9:e276-e281. Doi: 10.1016/S2352-3026(15)00094-0.
36. Richardson D.B., Leuraud K., Laurier D., et al. Cancer Mortality after Low Dose Exposure to Ionising Radiation in Workers in France, the United Kingdom, and the United States (Inworks): Cohort Study. *BMJ*. 2023;382:e074520. Doi: 10.1136/bmj-2022-074520.
37. Kelly-Reif K., Bertke S.J., Daniels R.D., et al. Ionizing Radiation and Solid Cancer Mortality among US Nuclear Facility Workers. *International Journal of Epidemiology*. 2023;52:4:1015-1024. Doi: 10.1093/ije/dyad075.
38. Qu S., Gao J., Tang B., et al. Low-Dose Ionizing Radiation Increases the Mortality Risk of Solid Cancers in Nuclear Industry Workers: a Meta-Analysis. *Molec. Clin.Oncol*. 2018;8:703-711. Doi: 10.3892/mco.2018.1590.
39. Baudin C., Vacquier B., Thin G., et al. Occupational Exposure to Ionizing Radiation in Medical Staff: Trends during the 2009-2019 Period in a Multi-centric Study. *Eur Radiol*. 2023;33:8:5675-5684. Doi: 10.1007/s00330-023-09541-z.
40. Костерев В.В., Цовьянов А.Г., Сивенков А.Г., Журавлева В.Е. Радиационная обстановка и дозы облучения в Российской Федерации // Глобальная ядерная безопасность. 2025. Т.15. №2. С.12-23 [Kosterev V.V., Tsov'yanov A.G., Sivenkov A.G., Zhuravleva V.Ye. Radiation Situation and Radiation Doses in the Russian Federation. *Global'naya Yadernaya Bezopasnost'* = Global Nuclear Safety. 2025;15:2:12-23 (In Russ.)]. Doi: 10.26583/gns-2025-02-02.
41. Lee T., Sigurdson A.J., Preston D.L., et al. Occupational Ionizing 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.
42. Sharkey A.R., Gambhir P., Saraskani S., et al. Occupational Radiation Exposure in Doctors: an Analysis of Exposure Rates Over 25 Years. *Br J Radiol*. 2021;94:1127:20210602. Doi: 10.1259/bjr.20210602.
43. Lee W.J., Bang Y.J., Cha E.S. Lifetime Cancer Risks from Occupational Radiation Exposure among Workers at Interventional Radiology Departments. *Int Arch Occup Environ Health*. 2021;94:1:139-145. Doi: 10.1007/s00420-020-01569-8.
44. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I. Sources. Annex A. Medical Radiation Exposures. New York, United Nations, 2010. 472 p.
45. Кащеев В.В., Пряхин Е.А. Медицинское диагностическое облучение: проблема радиационной безопасности: Обзор // Радиация и риск (бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2018. Т.27. №.4. С. 49-64 [Kashcheyev V.V., Pryakhin Ye.A. Medical Diagnostic Irradiation: the Problem of Radiation Safety. Review. *Radiatsiya i Risk (Byulleten' Natsional'nogo Radiatsionno-Epidemiologicheskogo Registra)* = Radiation and Risk. 2018;27:4:49-64 (In Russ.)]. Doi: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-49-64.
46. Rehani M., Nacouzi D. Higher Patient Doses through X-ray Imaging Procedures. *Phys Med*. 2020;79:80-86. Doi: 10.1016/j.ejmp.2020.10.017
47. Hauptmann M., Daniels R.D., Cardis E., et al. Epidemiological Studies of Low-Dose Ionizing Radiation and Cancer: Summary Bias Assessment and Meta-Analysis. *J Natl Cancer Inst Monogr*. 2020;2020:56:188-200. Doi: 10.1093/jncimonographs/lgaa010.
48. Ставицкий Р.В., Блинов Н.Н., Рабкин И.Х., Лебедев Л.А. Радиационная защита в медицинской рентгенологии. М.: Кабур, 1994. 272 с. [Stavitskiy R.V., Blinov N.N., Rabkin I.KH., Lebedev L.A. *Radiatsionnaya Zashchita v Meditsinskoj Rentgenologii* = Radiation Protection in Medical Radiology. Moscow, Kabur Publ., 1994. 272 p. (In Russ.)].
49. Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Чулуца Л.А., Шацкий И.Г. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении медицинских исследований в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14. № 3. С. 56-68 [Golikov V.Yu., Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Shatskiy I.G. Assessment of Radiation Risk in Patients during Medical Research in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gigiyena* = Radiation Hygiene 2021;14:3:56-68 (In Russ.)] Doi: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-56-68.
50. Berrington de Gonzalez A., Sawyer I., Veiga H.S. Comparison of Radiation-Related Cancer Risks from the Atomic Bomb Survivors with Studies of Pediatric Medical Radiation Exposure. *Carcinogenesis*. 2025;46:1-8. Doi: 10.1093/carcin/bgaf058.
51. Rühm W., Harrison R.M. High CT Doses Return to the Agenda. *Radiat Environ Biophys*. 2020;59:1:3-7. Doi: 10.1007/s00411-019-00827-9.
52. Mathews J.D., Forsythe A.V., Brady Z., 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:f2360. Doi: 10.1136/bmj.f2360.
53. Meulepas J.M., Ronckers C.M., Smets A.M.J.B., et al. Radiation Exposure from Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands. *J. National Cancer Institute*. 2019;111:3:256-263. Doi: 10.1093/jnci/djy104.
54. Huang R., Xiaodan L., Zhou P. Radiation Exposure Associated with Computed Tomography in Childhood and the Subsequent Risk of Cancer: A Meta-Analysis of Cohort Studies. *Dose-Response*. 2020;18:2:1-8. Doi: 155932582092382.
55. 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. *International Journal of Radiation Oncology and Biological Physics*. 2005;63:2:317-319.
56. 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 a Comparison with Lung Cancer Mortality in the Atomic Bomb Survivors Study. *Radiation Research*. 1995;142:3:295-30.
57. Осипов М.В., Дружинина П.С., Сокольников М.Э. Изучение отдаленных последствий воздействия диагностического излучения: возможности и перспективы // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. №5. С. 58-62 [Osipov M.V., Druzhinina P.S., Sokol'nikov M.E. Study of Remote Consequences of Exposure to Diagnostic Radiation: Possibilities and Prospects. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70:5:58-62 (In Russ.)]. Doi: 10.33266/1024-6177-2025-70-5-58-62.
58. Сокольников М.Э., Кабирова Н.Р., Окатенко П.В. и др. Медико-дозиметрический регистр персонала производственного объединения «Маяк»: Состояние и перспективы // Вопросы радиационной безопасности. 2023. Т.111. №3. С. 42-55. [Sokol'nikov M.E., Kabirova N.R., Okatenko P.V., et al. Medical and Dosimetric Register of Personnel of the Mayak Production Association: Status and Prospects. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Radiation Safety Issues. 2023;111:3:42-55. (In Russ.)]
59. VanderWeele T.J. The Interaction Continuum. *Epidemiology*. 2019;30:5:648-658. Doi: 10.1097/EDE.0000000000001054.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование проведено на средства Федерального бюджета РФ в рамках выполнения прикладной НИР по теме: «Совершенствование системы медицинского и дозиметрического обеспечения работников радиационно-опасного предприятия и населения зоны наблюдения» (шифр: «Здоровье и дозы 26-28»).

**Участие авторов.** Осипов М.В. – дизайн исследования, анализ литературы, написание статьи.

**Поступила:** 20.01.2026. Принята к публикации: 25.02.2026.

**Conflict of interest.** The author declare no conflict of interest.

**Financing.** The study was conducted using funds from the Federal Budget of the Russian Federation within the framework “Improving the System of Medical and Dosimetric Support for Workers at a Radiation-Hazardous Enterprise and the Population in the Observation Zone” (code: “Health and Doses 26-28”).

**Contribution.** Osipov M.V. – design of the study, literature overview, manuscript preparing.

**Article received:** 20.01.2026. Accepted for publication: 25.02.2026.