DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-6-101-108

Т.В. Азизова, М.В. Банникова, К.В. Брикс, Е.С. Григорьева

РИСК РАЗВИТИЯ НАРУШЕНИЙ СЕРДЕЧНОГО РИТМА И ПРОВОДИМОСТИ В КОГОРТЕ РАБОТНИКОВ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

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

Контактное лицо: Ксения Васильевна Брикс, e-mail: clinic@subi.su

РЕФЕРАТ

Цель: Оценка риска заболеваемости нарушениями ритма и проводимости (НРиП) (коды МКБ-10: I44, I45, I47, I48, I49) в когорте работников, подвергшихся профессиональном хроническому облучению с низкой мощностью дозы, с учётом нерадиационных факторов: пол, возраст, курение, употребление алкоголя, индекс максы тела (ИМТ), артериальная гипертензия (АГ), сахарный диабет (СД).

Материалы и методы: Изучаемая когорта включала работников ядерного предприятия ПО «Маяк» (22377 человек), впервые нанятых в 1948–1982 гг., и наблюдавшихся до конца 2018 г. Жизненный статус на конец периода наблюдения известен у 95% членов когорты; из них 67,2% умерли, а 32,8% живы. В настоящем исследовании использованы индивидуальные оценки доз внешнего и внутреннего облучения дозиметрической системы работников ПО «Маяк» − 2013 (ДСРМ-2013). Средняя суммарная поглощённая в печени доза внешнего гамма-излучения у мужчин составила 0,45 ± (0,65) Гр (среднее ± стандартное отклонение) и у женщин – 0,37 ± (0,56) Гр; средняя суммарная поглощённая в печени доза внутреннего альфа-излучения составила 0,23 ± (0,65) Гр и (0,44) ± 1,93 Гр, соответственно. Анализ включал расчет относительных рисков (ОР) и избыточного относительного риска на единицу дозы (ИОР/Гр) с помощью Пуассоновской регрессии с использованием модуля AMFIT программы EPICURE. ИОР, т. е. риск минус 1, описывался с помощью линейного тренда от дозы внешнего облучения с поправкой (с помощью стратификации) на нерадиационные факторы и дозу внутреннего облучения, а также от дозы внутреннего облучения с поправкой на нерадиационные факторы и дозу внешнего облучения. 95%-ные доверительные интервалы (ДИ) и статистическая значимость (значения *p*) были рассчитаны с помощью методов максимального правдоподобия. Все критерии статистической значимости были двусторонними. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты: Установлена статистически значимая линейная зависимость заболеваемости НРиП от суммарной поглощённой в печени дозы внешнего гамма-излучения с учётом поправок на нерадиационные факторы (пол, достигнутый возраст, календарный период, курение, употребление алкоголя) и дозу внутреннего альфа-облучения только у мужчин изучаемой когорты.

Заключение: Настоящее исследование – это первое исследование НРиП, в котором представлены достоверные доказательства связи заболеваемости НРиП с радиационным воздействием у работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению.

Ключевые слова: *профессиональное хроническое облучение, ПО «Маяк», нарушения сердечного ритма и проводимости, внешнее гамма-облучение, внутреннее альфа-облучение, риск, заболеваемость*

Для цитирования: Азизова Т.В., Банникова М.В., Брикс К.В., Григорьева Е.С. Риск развития нарушений сердечного ритма и проводимости в когорте работников атомной промышленности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 6. С. 101–108. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-6-101-108

DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-5-101-108

T.V. Azizova, M.V. Bannikova, K.V. Briks, E.S. Grigoryeva

Risk of Cardiac Rhythm and Conduction Disorders in a Cohort of Nuclear Workers

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

Contact person: K.V. Briks, e-mail: clinic@subi.su

ABSTRACT

Purpose: The study aimed to assess the incidence risk of cardiac rhythm and conduction disorders (CRCD; ICD-10 codes I44, I45, I47, I48, I49) in the cohort of nuclear workers chronically exposed to ionising radiation at low dose rate during their professional activities. To assess the risk, a variety of non-radiation factors were taken into account, such as sex, age, smoking, alcohol consumption, body mass index (BMI), arterial hypertension (AH), and diabetes mellitus (DM).

Materials and methods: The analysed cohort included 22,377 workers of the Russian nuclear facility Mayak PA. These workers were hired from 1948 to 1982, and their follow-up continued until 2018. At the end of the follow-up, vital status was available for 95% of the cohort; among them, 67.2% were deceased and 32.8% were alive. In this study, we utilised individual estimates of radiation doses from external and internal exposures provided by the Mayak Worker Dosimetry System 2013 (MWDS−2013). Mean accumulated liver-absorbed radiation doses from external exposure were 0.45 ± (0.65) Gy (mean ± standard deviation) in males and 0.37 ± (0.56) Gy in females; mean accumulated liver-absorbed radiation doses from internal exposure were 0.23 ± (0.65) Gy and (0.44) ± 1.93 Gy, respectively. To perform the risk analysis, we calculated relative risks (RRs) and excess relative risk per unit of radiation dose (ERR/Gy) based on Poisson's regression using the AMFIT module of the EPICURE software. The excess relative risk, i.e. risk minus 1, was examined using a linear trend related to the radiation dose from external exposure adjusted (via stratification) for non-radiation factors and dose from internal exposure, as well as a linear trend related to the radiation dose from internal exposure adjusted for non-radiation factors and dose from external exposure. We calculated 95% confidence intervals (CI) and statistical significance levels (*p* values) using maximum likelihood techniques. All statistical significance criteria were two-sided. Differences were reported as significant if the p-value was below 0.05 ($p < 0.05$).

Results: The analysis demonstrated a significant linear association of CRCD incidence with the accumulated liver-absorbed gamma-ray dose from external exposure adjusted for non-radiation factors (sex, attained age, calendar period, smoking, alcohol consumption) and alpha radiation dose from internal exposure, but only in male workers of the analysed cohort.

Conclusion: This study is the first to provide strong evidence linking the incidence of CRCD with radiation exposure in workers exposed to occupational chronic radiation.

Keywords: *chronic occupational radiation exposure, Mayak PA, cardiac rhythm and conduction disorders, external exposure to gamma radiation, internal exposure to alpha particles, risk, incidence*

For citation: Azizova TV, Bannikova MV, Briks KV, Grigoryeva ES. Risk of Cardiac Rhythm and Conduction Disorders in a Cohort of Nuclear Workers. Medical Radiology and Radiation Safety. 2026;71(6):101–108. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-6-101-108

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) на протяжении последних десятилетий занимают лидирующие позиции среди причин инвалидности и смертности в развитых странах. Известно, что в развитии ССЗ значимую роль играют различные нерадиационные факторы, такие как пол, возраст, курение, употребление алкоголя, артериальная гипертензия (АГ), повышенная масса тела и др. [1–6]. В последние годы идет целенаправленный поиск новых факторов риска, модификация которых способна снизить риск ССЗ. Появляется все больше и больше доказательств связи заболеваемости и смертности от ССЗ в целом, а также отдельных групп заболеваний, с воздействием ионизирующего излучения [7–16]. Однако информация о заболеваемости нарушениями ритма и проводимости (НРиП) весьма ограничена. Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о повышенных рисках развития НРиП при проведении лучевой терапии рака молочной железы, легких, пищевода, средостения, а также лимфомы Ходжкина [17–22]. При этом данные о рисках НРиП в когортах лиц, подвергшихся профессиональному хроническому облучению, отсутствуют.

Поэтому целью настоящего исследования была оценка риска заболеваемости НРиП (коды МКБ-10: I44, I45, I47, I48, I49) в когорте работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению с низкой мощностью дозы, с учетом нерадиационных факторов: пол, возраст, курение, употребление алкоголя, индекс массы тела (ИМТ), АГ, СД.

Таблица 1

Характеристика изучаемой когорты
Characteristics of the study cohort

Характеристика изучаемой когорты	Мужчины	Женщины	Оба пола
Количество работников, включенных в когорту	16688	5689	22377
Жизненный статус известен на 31.12.2018	15887	5450	21337
Умерли	11017	3345	14362
Причина смерти известна	10989	3339	14328
Средний возраст найма, лет (СтОткл)	24,11 (7,13)	27,32 (7,97)	24,93 (7,48)
Средняя продолжительность работы, лет (СтОткл)	18,35 (14,83)	17,36 (12,79)	18,10 (14,34)
Средний возраст на момент смерти, лет (СтОткл)	62,30 (13,75)	72,06 (12,61)	64,57 (14,11)
Средняя суммарная поглощенная в печени доза внешнего гамма-излучения, Гр (СтОткл)	0,45 (0,65)	0,37 (0,56)	0,43 (0,63)
Количество работников с измеренной альфа-активностью в моче	5574	2432	8006
Средняя суммарная поглощенная в печени доза внутреннего альфа-облучения, Гр (СтОткл)	0,18 (0,65)	0,40 (1,92)	0, 25 (1,19)

Материал и методы

В настоящем ретроспективном исследовании, как и в предыдущих [10, 23, 24] изучаемая когорта включала всех работников, впервые нанятых на один из основных заводов (реакторы, радиохимический и плутониевый заводы) предприятия атомной промышленности – производственного объединения (ПО) «Маяк» – в период 1948–1982 гг., независимо от пола, возраста, национальности, образования, профессии, продолжительности работы и др. (22377 человек, из них 25% женщин).

Кратко характеристика изучаемой когорты представлена в табл. 1.

Информация о перенесенных заболеваниях за весь период наблюдения была собрана на 97,3% работников изучаемой когорты. Источниками информации являлись архивные и текущие медицинские карты, истории болезни, и были подробно описаны ранее [25]. Данное исследование посвящено изучению заболеваемости нарушениями сердечного ритма и проводимости при хронических болезнях сердца (коды МКБ-10: I44, I45, I47, I48, I49) в изучаемой когорте работников.

Работники ПО «Маяк» подвергались профессиональному пролонгированному облучению: работники реакторов – только внешнему облучению, а работники радиохимического и плутониевого заводов – сочетанному облучению (внешнее гамма- и внутреннее альфа-облучение от инкорпорированного плутония). С первых дней деятельности ПО «Маяк» дозы внешнего гамма-излучения измерялись индивидуальными дозиметрами, а дозы внутреннего альфа-излучения рассчитывались по результатам измерения альфа-активности излучающих радионуклидов в биосубстратах (в основном, в моче) на основе биокинетических и дозиметрических моделей, начиная с 1970-х годов. Уточнение индивидуальных доз внешнего и внутреннего облучения для когорты работников ПО «Маяк» проводилось в рамках российско-американского сотрудничества в течение более 20 лет [26]. В настоящем анализе использованы индивидуальные дозы дозиметрической системы работников ПО «Маяк» – ДСРМ-2013 [27].

Преобладающее большинство работников изучаемой когорты (76,1%) подвергались сочетанному облучению (внешнее гамма- и внутреннее альфа-облучение). Как и в предыдущих исследованиях [10, 23, 24], в настоящем исследовании использованы поглощенные в печени дозы внешнего гамма-излучения и внутреннего альфа-излучения, так как в ДСРМ-2013 не представлены поглощенные в сосудах или сердце дозы. В ДСРМ-2013 дозы внешнего гамма-излучения имеются для всех членов изучаемой когорты. Средняя суммарная поглощенная в печени доза внешнего гамма-излучения составила 0,45 ± (0,65) Гр у мужчин и 0,37 ± (0,56) Гр у женщин.

Согласно ДСРМ-2013, альфа-активность в моче измерена лишь у 35,7% работников (33,2% мужчин и 42,7% женщин) или у 44,8% работников радиохимического и плутониевого заводов, которые потенциально могли подвергаться воздействию аэрозолей плутония. Средняя суммарная поглощенная в печени доза внутрен-

него альфа-излучения составила 0,18 ± (0,65) Гр у мужчин и 0,40 ± (1,92) Гр у женщин.

Настоящий анализ был ограничен периодом проживания в г. Озерске, т.к. информация о заболеваниях и нерадиационных факторах для мигрантов была недоступной. Сравнение проводилось внутри изучаемой когорты работников ПО «Маяк».

Из исследования были исключены 43 работника, подвергшихся внешнему облучению высокой мощности, приведшему к развитию острой лучевой болезни, и 615 работников, у которых отсутствовала медицинская информация в связи с потерей медицинских карт. Также из исследования были исключены 86 работников, имевших НРиП до найма.

Анализ зависимости НРиП от дозы внутреннего облучения был ограничен работниками, для которых проводился мониторинг внутреннего альфа-облучения.

Помимо категориального анализа, были изучены тренды заболеваемости НРиП в зависимости от дозы облучения; оценен ИОР/Гр в различных диапазонах суммарных доз внешнего гамма-облучения и внутреннего альфа-облучения. Также были проведены анализы чувствительности.

Все основные анализы были проведены с использованием линейной модели и дозы с 10-летним лагом для мужчин и женщин отдельно. При этом для анализов с заданными периодами лаггирования, в которых человеко-годы считались от начала работы, первые x лет после начала работы были отнесены к категории «нулевой дозы».

Основной анализ радиогенного риска включал расчет относительных рисков (ОР) для отдельных категорий суммарной поглощенной в печени дозы внешнего гамма-излучения (< 0,10; 0,10–0,20; 0,20–0,50; 0,50–0,75; 0,75–1,00; 1,00–1,50; 1,50–2,00; 2,00–3,00; ≥ 3,00 Гр) и суммарной поглощенной в печени дозы внутреннего альфа-излучения (< 0,025; 0,025–0,05; 0,05–0,10; 0,10–0,15; 0,15–0,25; 0,25–0,50; 0,50–1,00; ≥ 1,00 Гр) относительно референс-категорий (< 0,10 Гр и < 0,025 Гр соответственно).

Оценки ОР и ИОР/Гр рассчитывались с помощью пуассоновской регрессии с использованием модуля AMFIT программы EPICURE [28]. 95%-доверительные интервалы и *p*-значения для проверки статистической значимости были рассчитаны с помощью методов правдоподобия, используя модуль AMFIT. Все критерии статистической значимости были двусторонними. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Как в анализах ОР, так и ИОР, поправка с помощью стратификации была сделана на следующие нерадиационные факторы: пол, достигнутый возраст (< 20, 20–25, …, 80–85, > 85), календарный период (1948–1950, 1951–1955, 1956–1960, …, 2011–2015, 2016–2018), статус курения (никогда не курил, когда-либо курил, курит, неизвестно), статус употребления алкоголя (редко, умеренно, злоупотребление, неизвестно) и дозу внутреннего альфа-облучения при анализе зависимости изучаемого эффекта от гамма-облучения и наоборот.

Т.е. используемые модели Пуассоновской регрессии имели следующий вид для гамма- и смешанного облучения соответственно:

$$\lambda = \lambda_0(s, aa, ct, smok, alc, d_\lambda)\times(1+\beta\times D_\gamma) \text{ и}$$
$$\lambda = \lambda_0(s, aa, ct, smok, alc, d_\gamma)\times(1+\beta\times D_\alpha), \quad (1)$$

где λ – показатель заболеваемости НРиП; λ_0 – фоновый показатель заболеваемости НРиП; s – пол; aa – достигнутый возраст; ct – календарный период; smok – статус курения; alc – употребление алкоголя; d_α – категориальная переменная суммарной поглощенной в печени дозы внутреннего альфа-излучения (Гр); d_γ – категориальная переменная суммарной поглощенной в печени дозы внешнего гамма-излучения (Гр). β – ИОР/Гр; D_γ – суммарная поглощенная в печени доза внешнего гамма-излучения (Гр); D_α – суммарная поглощенная в печени доза внутреннего альфа-излучения (Гр).

При поправке на дозу внутреннего облучения работники, для которых мониторинг внутреннего альфа-облучения не проводился, не исключались из анализа, а относились к отдельной категории «неизвестно».

Отклонения от линейной модели зависимости доза–эффект проверялись описанием данных с помощью альтернативных моделей: квадратичной (Q, $1 + \beta D_2$), линейно-квадратичной (LQ, $1 + \beta_1 D + \beta_2 D_2$) и линейно-экспоненциальной (LE, $1 + \beta_1 D + \exp \beta_2 D$). Для сравнения вложенных моделей использовался показатель различия максимальных правдоподобий, а для невложенных – информационный критерий Акаике [29].

Для оценки влияния дополнительных нерадиационных факторов их по очереди включали в стратификационную модель базовой функции λ_0 как категориальные переменные.

При оценке ИОР/Гр были проведены анализы чувствительности:
- оба пола вместе;
- использование различных периодов лагирования (0, 5, 20, и 30 лет) для дозы внешнего и внутреннего облучения;
- исключение поправок на статус курения и употребление алкоголя;
- включение поправок (с помощью стратификации) на дополнительные факторы: ИМТ (неизвестно, ниже нормы, норма, выше нормы, ожирение); наличие подтвержденного диагноза: (гипертензия, сахарный диабет); индекс курения (неизвестно, 0, 0–10, 10–20, > 20 пачка х лет) вместо статуса курения; продолжительность работы (< 1, 1–10, 10–20, ≥ 20 лет); период найма (1948–1958, 1959–1972, 1973–1982); возраст найма (≤ 20, 20–30, ≥ 30);
- ограничение анализа работниками с продолжительностью работы больше 1 года;
- исключение поправок (с помощью стратификации) на дозу внутреннего облучения при анализе дозы внешнего облучения и наоборот.

Также НРиП в зависимости от достигнутого возраста, возраста найма, продолжительности работы и календарного периода (с оценкой гетерогенности и лог-линейного тренда ИОР/Гр с: достигнутым возрастом, центрированным к 50 годам; возрастом найма, центрированным к 25 годам; продолжительностью работы, центрированной к 15 годам).

Сведения об отношении работников к курению учитывались за весь период наблюдения и оценивались с помощью качественного и количественного показателей. Качественный показатель принимал значения: неизвестно, никогда не курил, когда-либо курил, курит. Никогда не курившим считали работника, если на протяжении нескольких медицинских обследований он/она говорил, что никогда не курил. Важно отметить, что на 79,2% лиц с известным статусом курения была собрана количественная информация о курении. Она включала в себя данные о возрасте на момент начала курения, число и тип выкуриваемых сигарет, возраст на момент окончания курения (или возобновления в тех случаях, когда были обнаружены перерывы в курении). В качестве

количественного показателя был использован индекс курения (ИК), который рассчитывался как произведение среднего числа выкуриваемых пачек сигарет в день на число лет курения. Индекс курения измерялся в единицах пачка×лет и приравнивался к нулю у никогда не куривших работников.

Сведения об отношении работников к употреблению алкоголя учитывались также за весь период наблюдения и оценивались только с помощью качественного показателя, который принимал значения: редко, умеренно, злоупотребление, неизвестно. Редко пьющим считали работника, если на протяжении нескольких медицинских обследований он/она говорил, что никогда не пил или употреблял их редко и в небольших количествах.

В настоящем исследовании информация об ИМТ была учтена на момент предварительного медицинского осмотра для того, чтобы избежать ошибок смещения, т.к. в некоторых исследованиях было показано, что уровни липидов зависят от суммарной дозы облучения. И напротив, статус курения и употребления алкоголя фиксировали на момент последней информации. ИМТ рассчитывался как отношение массы тела в килограммах к квадрату роста в метрах. Нормальным индексом массы тела считался индекс равный 18,5–24,99 кг/м^2. В исследование ИМТ включали как качественный показатель, который принимал значения: неизвестно, ниже нормы, норма, выше нормы, ожирение.

В настоящем исследовании принимались во внимание только те случаи гипертензии и сахарного диабета, которые были установлены до даты диагноза НРиП. Артериальной гипертензией считали состояние, при котором систолическое АД было более 140 мм.рт.ст. и/или диастолическое АД более 90 мм.рт.ст. В исследование АГ включали как качественный показатель, который принимал значения: без АГ, с АГ. Диагноз СД устанавливался эндокринологом согласно общепринятым диагностическим критериям, в исследование был включен качественный показатель, который принимал значения: без СД, с СД.

Результаты и обсуждение

К концу периода наблюдения в изучаемой когорте работников были верифицированы 3689 случаев НРиП (2511 случаев у мужчин и 1178 случаев у женщин) в течение 534776 человеко-лет наблюдения. Преоблада-

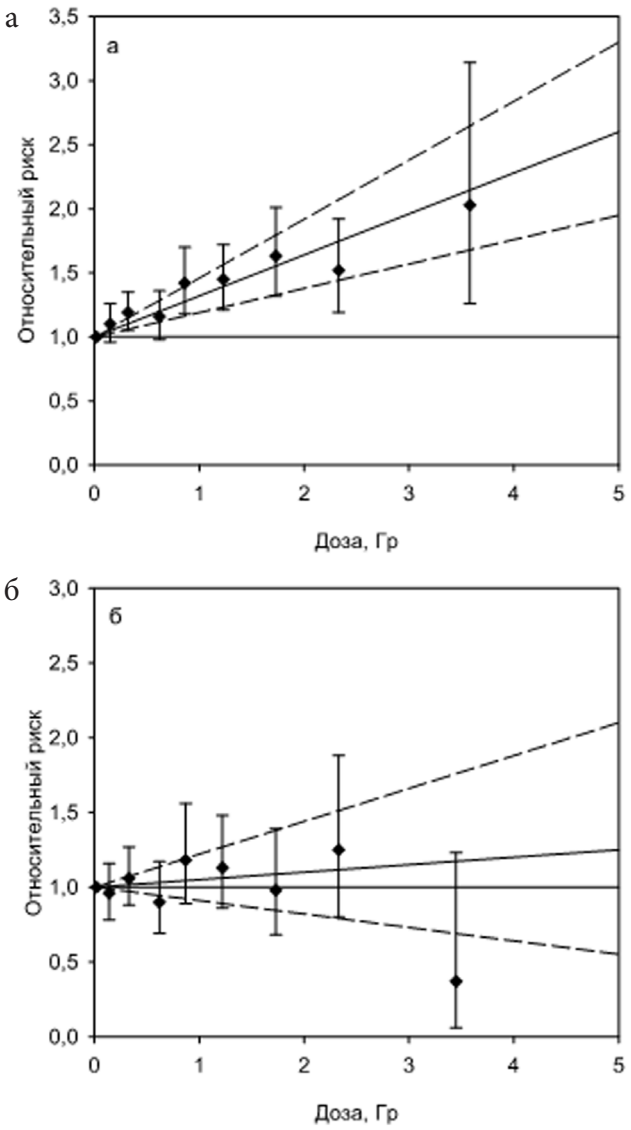


Рис. 1. Зависимость заболеваемости НРиП от суммарной дозы внешнего гамма-облучения, лаг-период 10 лет. а – мужчины, б – женщины

Fig. 1. CACD incidence association with cumulative gamma-ray dose of external exposure with 10-year lag. Panel a – males. Panel b – females

Таблица 2

Относительный риск заболеваемости НРиП в изучаемой когорте работников для разных диапазонов суммарной поглощённой в печени дозы внешнего гамма-излучения, 10-летний лаг-период

Relative incidence risks of CACD in the cohort by groups of cumulative liver absorbed external gamma-ray doses, 10-year lag

	ОР (95% ДИ)								
	0–0,1 Гр	0,1–0,2 Гр	0,2–0,5 Гр	0,5–0,75 Гр	0,75–1,0 Гр	1,0–1,5 Гр	1,5–2,0 Гр	2,0–3,0 Гр	> 3,0 Гр
Мужчины	1	1,10 (0,96; 1,26)	1,19 (1,05; 1,35)	1,16 (0,98; 1,36)	1,42 (1,18; 1,70)	1,45 (1,21; 1,72)	1,63 (1,32; 2,01)	1,52 (1,19; 1,92)	2,03 (1,26; 3,14)
Женщины	1	0,96 (0,78; 1,16)	1,06 (0,88; 1,27)	0,90 (0,69; 1,17)	1,18 (0,89; 1,56)	1,13 (0,86; 1,48)	0,98 (0,68; 1,39)	1,25 (0,80; 1,88)	0,37 (0,06; 1,23)

Таблица 3

Избыточный относительный риск заболеваемости НРиП в изучаемой когорте работников для разных диапазонов суммарных поглощённых в печени доз внутреннего альфа-излучения, 10-летний лаг-период

Relative risks of CACD in the study cohort by groups of cumulative liver absorbed alpha dose of internal exposure, 10-year lag

	ИОР/Гр (95% ДИ)							
	0–0,025 Гр	0,025–0,05 Гр	0,05–0,1 Гр	0,1–0,15 Гр	0,15–0,25 Гр	0,25–0,5 Гр	0,5–1,0 Гр	> 1,0 Гр
Мужчины	1	0,98 (0,83; 1,15)	1,09 (0,91; 1,30)	1,31 (1,03; 1,64)	0,84 (0,64; 1,08)	1,22 (0,93; 1,58)	0,86 (0,57; 1,25)	0,88 (0,53; 1,38)
Женщины	1	0,89 (0,69; 1,15)	1,23 (0,95; 1,59)	0,95 (0,68; 1,33)	1,18 (0,86; 1,59)	1,01 (0,69; 1,46)	1,20 (0,75; 1,86)	1,40 (0,85; 2,19)

Таблица 4

Оценки избыточного относительного риска заболеваемости НРиП в изучаемой когорте работников в зависимости от суммарной поглощённой в печени дозы внешнего гамма-излучения, 10-летний лаг-период

Excess relative risks of CACD in the cohort in relation to cumulative liver absorbed external gamma-ray dose, 10-year lag

Тип анализа	ИОР/Гр (95% ДИ)	
	Мужчины	Женщины
Основной анализ, лаг-период 10 лет	0,32 (0,19; 0,46)	0,05 (–0,09; 0,22)
Анализ чувствительности – периоды лагирования:		
лаг-период 0 лет	0,31 (0,19; 0,45)	0,05 (–0,09; 0,22)
лаг-период 5 лет	0,32 (0,20; 0,47)	0,04 (–0,09; 0,22)
лаг-период 20 лет	0,32 (0,18; 0,48)	0,005 (–0,12; 0,17)
лаг-период 30 лет	0,35 (0,18; 0,55)	0,23 (0,04; 0,48)
Анализ чувствительности; лаг-период 10 лет – исключение из стратификации поправки на:		
Дозу внутреннего альфа-облучения	0,36 (0,25; 0,49)	0,14 (0,01; 0,29)
Оба пола		
Основной анализ; лаг-период 10 лет	0,23 (0,14; 0,34)	
Анализ чувствительности; лаг-период 10 лет – исключение поправки на:		
Курение и употребление алкоголя	0,29 (0,17; 0,43)	–0,01 (–0,12; 0,14)
Анализ чувствительности; лаг-период 10 лет – включение поправки на:		
Индекс массы тела	0,37 (0,22; 0,54)	–0,001 (–0,13; 0,18)
Артериальную гипертензию	0,28 (0,16; 0,43)	0,02 (–0,11; 0,19)
Сахарный диабет	0,32 (0,19; 0,47)	0,04 (–0,09; 0,22)
Индекс курения	0,31 (0,18; 0,46)	0,04 (–0,09; 0,21)
Продолжительность работы	0,30 (0,17; 0,46)	0,03 (–0,11; 0,21)
Период найма	0,29 (0,16; 0,45)	0,03 (–0,10; 0,21)
Возраст найма	0,32 (0,18; 0,50)	0,03 (–0,11; 0,23)
Анализ чувствительности; лаг-период 10 лет – ограничен работниками:		
Проработавшими дольше года	0,36 (0,22; 0,54)	0,03 (–0,11; 0,22)
Анализ чувствительности; лаг-период 10 лет – ограничен работниками достигнутого возраста (лет):		
<50	0,45 (0,16; 0,85)	0,06 (–0,45; 1,19)
50–59	0,26 (0,09; 0,50)	–0,12 (–0,28; 0,11)
60–69	0,42 (0,18; 0,75)	0,35 (0,04; 0,82)
70–79	0,07 (–0,17; 0,48)	–0,09 (–0,32; 0,25)
≥80	–0,05 (–0,57; 1,53)	0,58 (–0,51; 2,95)
p^a	0,44	0,11
p^b	0,43	>0,5
Анализ чувствительности; лаг-период 10 лет – ограничен работниками; нанятыми в возрасте (лет):		
<20	0,56 (0,18; 1,14)	0,36 (–0,03; 1,13)
20–24	0,21 (0,04; 0,45)	–0,05 (–0,24; 0,25)
25–29	0,27 (–0,003; 0,72)	0,18 (–0,2; 0,94)
≥30	0,48 (0,12; 1,01)	–0,32 (n/a; 0,18)
p^e	0,43	0,10
p^d	>0,5	0,13
Анализ чувствительности; лаг-период 10 лет – ограничен работниками; проработавшими в течение (лет):		
<1	1,51 (–2,13; 11,52)	2,24 (–3,46; 17,33)
1–9	0,47 (n/a; 1,01)	0,37 (0,01; 1,01)
10–19	0,07 (–0,12; 0,37)	–0,22 (n/a; –0,1)
≥20	0,34 (0,17; 0,56)	0,15 (–0,1; 0,53)
P^e	0,29	0,01
p^f	0,03	>0,5
Анализ чувствительности; лаг-период 10 лет – ограничен работниками с установленным диагнозом до и после 1960 г.:		
≤1960	–0,18 (n/a; 1,09)	–0,17 (n/a; 8,35)
>1960	0,32 (0,20; 0,48)	0,05 (–0,09; 0,22)
p^g	0,33	n/a

Примечания:

Основной анализ – стратифицировано по полу; достигнутому возрасту; календарному периоду; статусу курения; употреблению алкоголя; дозе внутреннего альфа-облучения

Стратифицировано по полу; достигнутому возрасту; календарному периоду; статусу курения; употреблению алкоголя; дозе внутреннего альфа-облучения,

[a]Тест на гетерогенность между группами работников различного достигнутого возраста на основе критерия отношения правдоподобия,

[b]Тест на лог-линейный тренд ИОР/Гр в зависимости от достигнутого возраста на основе критерия отношения правдоподобия,

[c]Тест на гетерогенность между группами работников различного возраста найма на основе критерия отношения правдоподобия,

[d]Тест на лог-линейный тренд ИОР/Гр в зависимости от возраста найма на основе критерия отношения правдоподобия,

[e]Тест на гетерогенность между группами работников с различной продолжительностью работы на основе критерия отношения правдоподобия,

[f]Тест на лог-линейный тренд ИОР/Гр в зависимости от продолжительности работы на основе критерия отношения правдоподобия,

[g]Тест на гетерогенность между группами работников с диагнозами до и после 1960 года

Таблица 5

Избыточный относительный риск заболеваемости НРиП на единицу дозы в изучаемой когорте работников в различных диапазонах суммарных поглощённых в печени доз внешнего гамма-излучения, 10-летний лаг-период

Excess relative risks of CACD in the cohort by ranges of cumulative liver absorbed external gamma-ray doses, 10-year lag

	ИОР/Гр (95% ДИ)								
	<0,1 Гр	<0,2 Гр	<0,5 Гр	<0,75 Гр	<1,0 Гр	<1,5 Гр	<2,0 Гр	<3,0 Гр	Весь диапазон
Мужчина	2,26 (–0,61; 5,88)	1,11 (–0,16; 2,65)	0,73 (0,24; 1,32)	0,42 (0,11; 0,79)	0,44 (0,19; 0,74)	0,41 (0,22; 0,62)	0,38 (0,23; 0,57)	0,32 (0,19; 0,47)	0,32 (0,19; 0,46)
Женщина	–1,89 (–4,26; 1,13)	–0,79 (–1,98; 0,71)	0,22 (–0,36; 0,93)	–0,05 (–0,41; 0,40)	0,13 (–0,16; 0,50)	0,15 (–0,07; 0,42)	0,08 (–0,09; 0,29)	0,10 (–0,05; 0,29)	0,05 (–0,09; 0,22)

ющее большинство случаев НРиП зарегистрировано у работников в возрасте старше 50 лет, как у мужчин (78,4%), так и у женщин (95,1%). Следует отметить, что в 18,6% НРиП зарегистрированы у работников, подвергшихся внешнему гамма-облучению в суммарной дозе более 1,0 Гр.

Результаты анализа ОР и ИОР заболеваемости НРиП у мужчин и женщин изучаемой когорты в различных дозовых категориях представлены в табл. 2 и 3.

Обнаружен повышенный статистически значимый риск заболеваемости НРиП у мужчин, подвергшихся внешнему гамма-облучению во всех категориях суммарных поглощенных в печени доз > 0,2 Гр (за исключением 0,5–0,75 Гр) при сравнении с работниками, подвергшимися облучению в дозе 0–0,1 Гр. В то же время лишь в одной категории суммарной поглощенной в печени дозы внутреннего альфа-облучения (0,1–0,15 Гр) был обнаружен статистически значимый повышенный риск заболеваемости НРиП у мужчин изучаемой когорты по сравнению с работниками, которые подверглись внутреннему альфа-облучению в дозе 0–0,025 Гр.

У женщин изучаемой когорты не выявлено статистически значимого повышенного риска заболеваемости НРиП ни в одной из категорий суммарной поглощенной в печени дозы внешнего гамма- и внутреннего альфа-излучения (табл. 2 и 3).

Результаты основного анализа зависимости риска заболеваемости НРиП от суммарной поглощенной в печени дозы внешнего гамма-излучения с использованием линейной модели с учетом поправок на нерадиационные факторы (пол, достигнутый возраст, календарный период, курение, употребление алкоголя) и дозу внутреннего альфа-облучения представлены в табл. 4.

В изучаемой когорте работников обнаружена статистически значимая линейная зависимость заболеваемости НРиП от суммарной поглощенной в печени дозы внешнего гамма-излучения с учетом поправок на нерадиационные факторы (пол, достигнутый возраст, календарный период, курение, употребление алкоголя) и дозу внутреннего альфа-облучения только у мужчин, но не у женщин (ИОР/Гр = 0,32 (95% ДИ 0,19; 0,46) и ИОР/Гр = 0,05 (95% ДИ – 0,09; 0,22) соответственно) – табл. 4 и рис. 1.

У мужчин, но не у женщин, эта зависимость сохранялась статистически значимой и при ограничении изучаемой когорты работниками, подвергшимися внешнему гамма-облучению в суммарной дозе < 3,0 Гр, < 2,0 Гр, < 1,5 Гр, < 1,0 Гр, < 0,75 Гр и < 0,5 Гр (табл. 5).

Анализ чувствительности показал, что величина риска заболеваемости НРиП практически не изменялась при использовании 0, 5 и 20-летнего лаг-периода и увеличивалась при 30-летнем лаг-периоде как у мужчин, так и у женщин изучаемой когорты. Следует также отметить, что при использовании 30-летнего лаг-периода у женщин риск становился статистически значимым (ИОР/Гр = 0,23 (95% ДИ 0,04; 0,48)) – табл. 4.

Исключение поправки на дозу внутреннего альфа-облучения увеличивало оценку риска заболеваемости НРиП у мужчин, в то время как у женщин риск не только увеличивался, но и становился статистически значимым (ИОР/Гр = 0,36 (95% ДИ 0,25; 0,49) и ИОР/Гр = 0,14 (95% ДИ 0,01; 0,29) соответственно).

Риск заболеваемости НРиП снижался при исключении из модели поправки на курение и употребление алкоголя как у мужчин, так и у женщин изучаемой когорты.

ИОР/Гр внешнего гамма-облучения для заболеваемости НРиП у мужчин увеличивался при включении поправки на ИМТ и уменьшался при включении поправок на АГ, продолжительность работы и период найма. Включение поправок на СД, ИК и возраст найма не изменяло оценку риска у мужчин. Для женщин включение поправок на дополнительные нерадиационные факторы (ИМТ, АГ, СД, ИК, продолжительность работы, период найма и возраст найма) практически не влияло на величину риска заболеваемости НРиП (табл. 4).

Ограничение анализа работниками, проработавшими больше года, увеличивало оценку риска заболеваемости НРиП у мужчин, но не у женщин изучаемой когорты (ИОР/Гр = 0,36 (95% ДИ 0,22; 0,54) и ИОР/Гр = 0,03 (95% ДИ –0,11; 0,22) соответственно).

Статистически значимое повышение риска заболеваемости НРиП обнаружено у мужчин в возрасте до 50 лет и 60–69 лет, и у женщин в возрасте 60–69 лет. Следует отметить, что оценка риска заболеваемости НРиП у мужчин уменьшалась с увеличением достигнутого возраста, но эта зависимость была статистически незначимой (p = 0,43).

Статистически значимый повышенный риск заболеваемости НРиП выявлен у мужчин, нанятых на предприятие в возрасте до 20 лет, 20–24 года и старше 30 лет. Следует отметить тренд к снижению риска заболеваемости НРиП у мужчин и у женщин изучаемой когорты с увеличением возраста найма на предприятие; однако, тренд был статистически незначимым (табл. 4).

Не выявлено влияния продолжительности работы на предприятии и календарного периода установления диагноза на оценку риска заболеваемости НРиП как у мужчин, так и у женщин изучаемой когорты (табл. 4).

Обсуждение

Результаты настоящего исследования свидетельствуют о статистически значимой линейной зависимости заболеваемости НРиП от суммарной поглощенной в печени дозы внешнего гамма-облучения с учетом поправок на нерадиационные факторы (пол, достигнутый возраст, календарный период, курение, употребление алкоголя) и дозу внутреннего альфа-облучения у мужчин, причем, зависимость сохранялась статистически значимой и при ограничении изучаемой когорты работниками, подвергшимися внешнему гамма-облучению в суммарных дозах < 3,0 Гр, < 2,0 Гр, < 1,5 Гр, < 1,0 Гр, < 0,75 Гр и < 0,5 Гр.

У женщин в основном анализе не выявлено зависимости НРиП от дозы внешнего гамма-облучения, что, по-видимому, связано с небольшой статистической мощностью в связи с небольшой долей женщин в изучаемой когорте и небольшим количеством случаев НРиП.

Следует отметить, что исключение поправки на дозу внутреннего альфа-облучения существенно увеличивало оценку риска заболеваемости НРиП как у мужчин, так и у женщин, что свидетельствует о необходимости обязательного учета другой дозы при анализе радиогенного риска в когортах лиц, подвергшихся сочетанному облучению.

Полученные результаты согласованы с результатами исследований нарушений ритма в когортах пациентов с раком молочной железы, легких, пищевода, средостения, а также с лимфомой Ходжкина, подвергшихся лучевой терапии [17–22].

Так, в когорте лиц с установленным онкологическим заболеванием, проходивших радиотерапию (14600 чел.), частота выявления фибрилляции предсердий (ФП) была выше, чем у больных, которым радиотерапия не проводилась (5,1% против 3,6 %) [20]. В исследовании пациентов, прошедших радиотерапию по поводу рака пищевода (238 человек), был обнаружен повышенный риск развития ФП: ОШ=1,54; p=0,03 [22]. Повышенный риск заболеваемости ФП был также обнаружен в группе 539 больных, подвергшихся облучению легочных вен в высокой дозе (ОШ=1,22; p<0,001) [21].

Сравнение полученных результатов с таковыми, полученными в других работах, невозможно в связи с тем, что исследования зависимости доза–эффект для заболеваемости НРиП в когортах лиц, подвергшихся хроническому облучению, отсутствуют.

Как сообщалось ранее [10, 24, 25, 28], исследования когорты работников ядерного предприятия ПО «Маяк» имеет ряд преимуществ: большая численность (более 22 тыс. чел.); длительный период наблюдения (1948–2018 гг.); гетерогенность когорты по полу и возрасту; индивидуальные измеренные годовые дозы внешнего гамма-облучения; широкий диапазон доз пролонгированного облучения с низкой мощностью дозы; известные жизненный статус (96%) и причины смерти (99%); полные и качественные данные обо всех заболеваниях за весь период наблюдения (97%); достаточная статистическая мощность исследования; наличие биологических образцов на 30% членов когорты.

Одним из главных преимуществ изучаемой когорты является то, что все работники, независимо от образования, места работы, профессии, дозы облучения помимо предварительного медицинского обследования (до найма на предприятие) проходили обязательные ежегодные медицинские обследования по единой стандартной программе. Эти обследования включали осмотры врачей разных специальностей (терапевт, гематолог, невролог, эндокринолог, дерматолог, окулист, хирург и др.), инструментальные, функциональные и лабораторные исследования. Кроме этого, во время медицинских осмотров измеряли рост и вес тела, артериальное давление, а также проводили опрос по стандартной анкете о нерадиационных факторах, в первую очередь о курении и употреблении алкоголя, семейном анамнезе. Все первичные данные с результатами всех проведенных за весь период наблюдения медицинских обследованиях хранятся на бумажных носителях, и часть из них введена в медико-дозиметрическую электронную базу данных «Клиника» [25].

Основным недостатком настоящего исследования является ограничение анализа заболеваемости периодом проживания в г. Озерске (город, расположенный в непосредственной близости ПО «Маяк»), так как недоступна полная информация о заболеваниях и нерадиационных факторах для работников, выехавших на другое постоянное место жительство (мигрантов). Кроме этого, к слабым сторонам исследования следует отнести качество оценок доз внутреннего альфа-облучения, обусловленное погрешностями измерений альфа-активности в биосубстратах, а также с некоторыми неопределенностями биокинетических и дозиметрических моделей. Об этом мы неоднократно указывали ранее [10,23, 24, 30, 31]. В то же время, следует отметить, что в настоящем исследовании мы использовали улучшенные оценки доз внутреннего альфа-облучения на основе новой дозиметрической системы работников ПО «Маяк» – ДСРМ-2013 [27].

Заключение

Настоящее исследование – это первое исследование НРиП, в котором представлены доказательства связи заболеваемости НРиП с радиационным воздействием у работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению.

Установлена статистически значимая линейная зависимость заболеваемости НРиП от суммарной поглощённой в печени дозы внешнего гамма-излучения с учётом поправок на нерадиационные факторы (пол, достигнутый возраст, календарный период, курение, употребление алкоголя) и дозу внутреннего альфа-облучения только у мужчин изучаемой когорты.

Полученные результаты хорошо согласованы с результатами исследований нарушений ритма у лиц с раком молочной железы, легких, пищевода, средостения, а также с лимфомой Ходжкина, прошедших лучевую терапию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Di Cesare M., Perel P., Taylor S., Kabudula C., Bixby H., Gaziano T.A., McGhie D.V., Mwangi J., Pervan B., Narula J., Pineiro, D., Pinto F.J. The Heart of the World. Glob Heart. 2024;19;1:11. Doi: 10.5334/gh.1288.
2. Gaidai O., Cao Y., Loginov S. Global Cardiovascular Diseases Death Rate Prediction. Current Problems in Cardiology. 2023;48;5:1016–1022. Doi: 10.1016/j.cpcardiol.2023.101622.
3. Amini M., Zayeri F., Salehi M. Trend Analysis of Cardiovascular Disease Mortality, Incidence, and Mortality-to-Incidence Ratio: Results from Global Burden of Disease Study 2017. BMC Public Health. 2021;21:1–12. Doi: 10.1186/s12889-021-10429-0.
4. Min Choon Tan, Yong Hao Yeo, Boon Jian San, Addi Suleiman, Justin Z. Lee, Arka Chatterjee, Kristen A. Sell-Dottin, John P. Sweeney, F. David Fortuin, and Kwan S. Lee. Trends and Disparities in Valvular Heart Disease Mortality in the United States from 1999 to 2020. Journal of the American Heart Association. 2024;13;8:030895. Doi: 10.1161/JAHA.123.03089.
5. Hammond-Haley M., Hartley A., Essa M., DeLago A. J., Marshall D.C., Salciccioli J.D., Shalhoub J. Trends in Ischemic Heart Disease and Cerebrovascular Disease Mortality in Europe: an Observational Study 1990–2017. Journal of the American College of Cardiology. 2021;77;13:1697–1698. Doi: 10.1016/j.jacc.2021.02.013.
6. Бойцов С.А., Шальнова С.А., Деев А.Д. Смертность от сердечно-сосудистых заболеваний в Российской Федерации и возможные механизмы ее изменения // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2018. Т.118. №8. С. 98–103 [Boytsov S.A., Shal'nova S.A., Deyev A.D. Mortality from Cardiovascular Diseases in the Russian Federation and Possible

Mechanisms of its Change. *Zhurnal Nevrologii i Psikhiatrii im. S.S. Korsakova* = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry. 2018;118;8:98–103 (In Russ.)]. Doi: 10.17116/jnevro201811808198.
7. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I. New York, United Nations, 2008. 392 p.
8. Moseeva M.B., Azizova T.V., Grigoryeva E.S., Haylock R.G. Risks of Circulatory Diseases among Mayak PA Workers with Radiation Doses Estimated using the Improved Mayak Worker Dosimetry System 2008. Radiat. Environ. Biophys. 2014;53;2:469–477. Doi: 10.1007/s00411-014-0517-x.
9. Azizova T.V., Haylock R.G.E., Moseeva M.B., Bannikova M.V., Grigoryeva E.S. Cerebrovascular Diseases Incidence and Mortality in an Extended Mayak Worker Cohort 1948-1982. Radiat. Res.2014;182;5: 529-544. Doi: 10.1667/RR13680.1
10. Azizova T.V., Grigoryeva E.S., Haylock R.G.E., Pikulina M.V., Moseeva M.B. Ischeamic Heart Disease Incidence and Mortality in an Extended Cohort of Mayak Workers First Employed in 1948-1982. Br. J. Radiol. 2015;88;1054:20150-20169. Doi: 10.1259/bjr.20150169.
11. Azizova T.V., Bannikova M.V., Grigorieva E.S., Bagaeva Y.P., Azizova E.V. Risk of Lower Extremity Arterial Disease in a Cohort of Workers Occupationally Exposed to Ionizing Radiation Over a Prolonged Period. Radiat. Environ. Biophys. 2016;55;2:147–159. Doi: 10.1007/s00411-016-0645-6
12. Takahashi I., Shimizu Y., Grant E.J., Cologne J., Ozasa K., Kodama K. Heart Disease Mortality in the Life Span Study, 1950–2008. Radiat. Res. 2017;187;3:319–332. Doi: 10.1667/RR14347.1.
13. Shimizu Y., Kodama K., Nishi N., Kasagi F., Suyama A., Soda M., Grant E. J., Sugiyama H., Sakata R., Moriwaki H., Hayashi M., Konda M., Shore R.E. Radiation Exposure and Circulatory Disease Risk: Hiroshima and Nagasaki Atomic Bomb Survivor Data, 1950–2003. BMJ. 2010;340:534–539. Doi: 10.1136/bmj.b5349.
14. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Максютов М.А., Кащеев В.В., Карпенко С.В., Туманов К.А., Корело А.М., Кочергина Е.В., Власов О.К., Щукина Н.В., Ловачев С.С. Радиационный риск заболеваемости гипертензиями среди российских участников ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2017. №62. С. 32–37 [Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Maksyutov M.A., Kashcheyev V.V., Karpenko S.V., Tumanov K.A., Korelo A.M., Kochergina Ye.V., Vlasov O.K., Shchukina N.V., Lovachev S.S. Radiation Risk of Hypertension among Russian Participants in the Liquidation of the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2017;62:32–37 (In Russ.)]. Doi: 10.12737/25050.
15. Gillies M., Richardson D. B., Cardis E., Daniels R.D., O'Hagan J. A., Haylock R., Laurier D., Leuraud K., Moissonnier M., Schubauer-Berigan M.K., Thierry-Chefh I., Kesminieneh A. Mortality from Circulatory Diseases and other Non-Cancer Outcomes among Nuclear Workers in France, the United Kingdom and the United States (INWORKS). Radiat. Res. 2017;188;3:276–290. Doi: 10.1667/RR14608.1.
16. Little M.P. Radiation and Circulatory Disease. Mutat. Res. 2016;770:299–318. Doi: 10.1016/j.mrrev.2016.07.008.
17. Errahmani M.Y., Locquet M., Spoor D., Jimenez G., Camilleri J., Bernier M.-O. Association between Cardiac Radiation Exposure and the Risk of Arrhythmia in Breast Cancer Patients Treated with Radiotherapy: a Case–Control Study. Frontiers in Oncology. 2022;12:892882. Doi:10.3389/fonc.2022.892882.
18. Bedi R., Ahmad A., Horbal P., Mar P.L. Radiation-Associated Arrhythmias: Putative Pathophysiological Mechanisms, Prevalence, Screening and Management Strategies. Arrhythmia & Electrophysiology Review. 2023;12:24. Doi: 10.15420/aer.2022.44.
19. Wang K., Pearlstein K.A., Patchett N.D., Deal A.M., Mavroidis P., Jensen B.C., Lipner M.B., Zagar T.M., Wang Y., Lee C.B., Eblan M.J., Rosenman J.G., Socinski M.A., Stinchcombe T.E., Marks L.B. Heart Dosimetric Analysis of Three Types of Cardiac Toxicity in Patients Treated on Dose-Escalation Trials for Stage III Non-Small-Cell Lung Cancer. Radiotherapy and Oncology. 2017;125;2:293–300. Doi: 10.1016/j.radonc.2017.10.001.
20. Apte N., Dherange P., Mustafa U., Ya'qoub L., Dawson D., Higginbotham K., Boerma M., Mori, D. P., Gupta D., McLarty J., Mansour R., Dominic P. Cancer Radiation Therapy may be Associated with Atrial Fibrillation. Frontiers in Cardiovascular Medicine. 2021;8:6109–6115. Doi: 10.3389/fcvm.2021.610915.
21. Butler S., No H., Guo F., Merchant G., Park N.J., Jackson S., Clark D. E., Vitzthum L., Chin A., Horst K., Hoppe R. T., Loo B. W., Diehn M., Binkley M.S. Predictors of Atrial Fibrillation after Thoracic Radiotherapy. Cardio Oncology. 2024;6;6:935–945. Doi: 10.1016/j.jaccao.2024.08.007.
22. Miller E.D., Wu T, McKinley G., Slivnick J., Guha A., Mo X., Prasad R., Yildiz V., Diaz D., Merritt R.E., Perry K.A., Jin N., Hodge D., Poliner M., Chen S., Gambril J., Stock J., Wilbur J., Pierre-Charles J., Ghazi S.M., Williams T.M., Bazan J.G., Addison D. Incident Atrial Fibrillation and Survival Outcomes in Esophageal Cancer Followingradiotherapy. International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics. 2024;118;1:124–136. Doi: 10.1016/j.ijrobp.2023.08.011.
23. Azizova T.V., Grigorieva E.S., Hunter N., Pikulina M.V., Moseeva M.B. Risk of Mortality from Circulatory Diseases in Mayak Workers Cohort Following Occupational Radiation Exposure. J Radiol Prot. 2015;35;3:517–538. Doi: 10.1088/0952-4746/35/3/517.
24. Azizova T.V., Briks K.V., Bannikova M.V., Grigoryeva E.S. Hypertension Incidence Risk in a Cohort of Russian Workers Exposed to Radiation at the Mayak Production Association Over Prolonged Periods. Hypertension. 2019;73;6:1174–1184. Doi: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.118.11719.
25. Azizova T.V., Day R.D., Wald N., Muirhead C.R., O'Hagan J.A., Sumina M.V., Belyaeva Z.D., Druzhinina M.B., Teplyakov I.I., Semenikhina N.G., Stetsenko L.A., Grigoryeva E.S., Krupenina L.N., Vlasenko E.V. The "Clinic" Medical-Dosimetric Database of Mayak Production Association Workers: Structure, Characteristics and Prospects of Utilization. Health Phys. 2008;94;5:449–458. Doi: 10.1097/01.HP.0000300757.00912.a2.
26. Fountos B.N. The Department of Energy's Russian Health Studies Program. Radiat Protect Dosim. 2017;176;1–2:3–5. Doi: 10.1093/rpd/ncw110.
27. Napier B.A. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): an Introduction to the Documentation. Radiat Prot Dosimetry. 2017;176;1–2:6–9. Doi: 10.1093/rpd/ncx020.
28. Preston D., Lubin J., Pierce D., McConney M. Epicure Users Guide. Seattle, Hirosoft, 1993. 186 p.
29. Azizova T.V., Hamada N., Grigoryeva E.S., Bragin E.V. Risk of Various Types of Cataracts in a Cohort of Mayak Workers Following Chronic Occupational Exposure to Ionizing Radiation. Eur J Epidemiol. 2018;33;12:1193–1204. Doi: 10.1007/s10654-018-0450-4.
30. Azizova T.V., Muirhead C.R., Druzhinina M.B., Grigoryeva E.S., Vlasenko E.V., Sumina M.V., O'Hagan J.A., Zhang W., Haylock R.G., Hunter N. Cardiovascular Diseases in the Cohort of Workers First Employed at Mayak PA in 1948–1958. Radiat Res. 2010;174;2:155–168. Doi: 10.1667/RR1789.1.
31. Azizova T.V., Muirhead C.R., Moseeva M.B., Grigoryeva E.S., Vlasenko E.V., Hunter N., Haylock R.G., O'Hagan J.A. Ischemic Heart Disease in Nuclear Workers First Employed at the Mayak PA in 1948–1972. Health Phys. 2012;103;1:3–14. Doi: 10.1097/HP.0b013e3182243a62.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Государственного контракта от 6 июня 2024 г. №11.313.24.2 с Федеральным медико-биологическим агентством «Оценка эффектов хронического облучения и изучение их патогенеза для совершенствования медицинского обеспечения персонала и населения, подвергшихся радиационному воздействию».

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.06.2026. Принята к публикации: 25.07.2026.

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

Financing. The study was carried out within the framework of the state contract as of 6 June 2024 №11.313.24.2 with Federal medical biological agency titled "Assessment of chronic radiation exposure effects and study of their pathogenesis for improvement of medical provision for personal and population exposed to radiation".

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

Article received: 20.06.2026. Accepted for publication: 25.07.2026.