

А.М. Корело, М.А. Максютлов, С.Ю. Чекин, К.А. Туманов,
Н.В. Щукина, Е.В. Кочергина, О.Е. Лашкова, Н.С. Зеленская, В.К. Иванов

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОБЛУЧЕНИЯ НА РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННУЮ ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ РОССИЙСКИХ УЧАСТНИКОВ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба Минздрава России, Обнинск

Контактное лицо: Александр Михайлович Корело, e-mail: korelo@nrer.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Оценка влияния длительности облучения на радиационно-индуцированную заболеваемость.

Материал и методы: Ретроспективное когортное исследование влияния длительности облучения на радиационно-индуцированную заболеваемость участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС по данным Национального радиационно-эпидемиологического регистра. Когорта «СЗНО» состояла из 67616 лиц, не имевших диагнозов «солидные злокачественные новообразования, кроме немеланомного рака кожи» до 1 января 1992 г. Когорта «БСС» состояла из 69456 лиц, не имевших до 1 января 1988 г. заболеваний сердечно-сосудистой системы: ишемическая болезнь сердца, сердечная недостаточность, нарушение проводимости и сердечного ритма, болезни и поражения сердечных клапанов. Окончание наблюдения – 2023 г. Наблюдаемая в когортах заболеваемость моделировалась в предположении, что число случаев заболеваний имеет распределение Пуассона. Тестировали модели нерадиационного риска, линейного относительного радиационного риска, скорректированного на время облучения линейного относительного радиационного риска. Заболеваемость без радиационного фактора моделировалась в виде экспоненциальной зависимости от трёх переменных: регион проживания, возраст на момент начала облучения, календарный год наблюдения. Корректировка на время облучения моделировалась в виде экспоненциальной функции. Оценки коэффициентов моделей заболеваемости получали методом максимального правдоподобия с использованием языка программирования для статистических вычислений R и пакетов для R `gnm` и `data.table`.

Результаты: Модель линейного относительно радиационного риска предпочтительнее, чем модель нерадиационного риска и для когорты «СЗНО» ($p < 0,001$) и для когорты «БСС» ($p < 0,001$). Величина избыточного относительного риска на 1 Гр составила 0,67 (95 % доверительный интервал (ДИ): 0,37; 1,00) для когорты «СЗНО» и 0,66 (95 % ДИ: 0,51; 0,81) для когорты «БСС». Корректировка на время облучения статистически не значима для когорты «СЗНО» ($-0,10$; 95 % ДИ: $-0,46$; $0,26$; $p = 0,38$), но статистически значимо меньше 0 для когорты «БСС» ($-1,19$; 95 % ДИ: $-1,63$; $-0,76$; $p < 0,001$) – чем больше длительность облучения, тем меньше величина избыточного относительного риска на 1 Гр.

Заключение: В исследованной когорте российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС для заболеваемости болезнями сердечно-сосудистой системы (ишемическая болезнь сердца, сердечная недостаточность, нарушение проводимости и сердечного ритма, болезни и поражения сердечных клапанов) выявлено шестикратное уменьшение коэффициента относительного радиационного риска на единицу дозы с увеличением длительности облучения от 1 до 100 сут. Для заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями (исключая немеланомный рак кожи) статистически значимой зависимости коэффициента относительного радиационного риска от длительности облучения не выявлено. Полученные результаты свидетельствуют о существенных различиях в радиационно-эпидемиологических особенностях развития злокачественных новообразований и тканевых реакций (болезней сердца).

Ключевые слова: участники ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, Национальный радиационно-эпидемиологический регистр, заболеваемость, доза, мощность дозы, внешнее гамма-облучение, длительность облучения, когортное исследование, радиационный риск

Для цитирования: Корело А.М., Максютлов М.А., Чекин С.Ю., Туманов К.А., Щукина Н.В., Кочергина Е.В., Лашкова О.Е., Зеленская Н.С., Иванов В.К. Влияние длительности облучения на радиационно-индуцированную заболеваемость российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 5. С. 70–74. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-5-70-74

A.M. Korelo, M.A. Maksjutov, S.Yu. Chekin, K.A. Tumanov,
N.V. Shchukina, E.V. Kochergina, O.E. Lashkova, N.S. Zelenskaya, V.K. Ivanov

Influence of Exposure Duration on Radiation-Induced Morbidity Among Liquidators of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant

A.F. Tsyb Medical Radiological Research Centre, Obninsk, Kaluga region, Russia

Contact person: A.M. Korelo, e-mail: korelo@nrer.ru

ABSTRACT

Purpose: To assess the effect of exposure duration on radiation-induced morbidity.

Material and methods: Retrospective cohort study of the influence of the duration of exposure on radiation-induced morbidity of the participants of the liquidation of the Chernobyl accident consequences according to the data of the National Radiation Epidemiologic Register. The SOLID cohort consisted of 67616 persons who had no diagnoses of “solid malignant neoplasms other than skin cancer” before January 1, 1992. The HEART cohort consisted of 69456 persons who had no cardiovascular diseases before January 1, 1988: ischemic heart disease, heart failure, conduction and heart rhythm disorders, heart valve disease and lesions. The end of follow-up is 2023. Observed cohort morbi-

dity was modeled by assuming that the number of disease cases had a Poisson distribution. Three models were tested: non-radiation risk, linear relative radiation risk, and exposure time-adjusted linear relative radiation risk. Non-radiation incidence was modeled as an exponential dependence on the region of residence, age at the time of exposure, and calendar year of observation. Adjustment for the time of radiation exposure was modeled as an exponential function. Estimates of coefficients of morbidity models were obtained by the maximum likelihood method using the programming language for statistical calculations R and the packages for R gnm and data.table.

Results: The linear relative radiation risk model was preferred over the non-radiation risk model for both the SOLID cohort ($p < 0.001$) and the HEART cohort ($p < 0.001$). The excess relative radiation risk per 1 Gy was 0,67 (95 % confident interval (CI): 0.37; 1.00) for the SOLID cohort and 0,66 (95 % CI: 0.51; 0.81) for the HEART cohort. Adjustment for exposure time was not statistically significant for the SOLID cohort (-0.10 ; 95 % ДИ: -0.46 ; 0.26 ; $p = 0.38$) but statistically significantly less than 0 for the HEART cohort (-1.19 ; 95 % ДИ: -1.63 ; -0.76 ; $p < 0.001$) – the longer the duration of exposure, the smaller the excess relative radiation risk per 1 Gy.

Conclusion: In the studied cohort of Russian participants of the Chernobyl accident consequences liquidation, a sixfold decrease of the relative radiation risk coefficient per unit dose with increasing duration of exposure from 1 to 100 days was revealed for the incidence of cardiovascular diseases (ischemic heart disease, heart failure, conduction and heart rhythm disorders, heart valve diseases and lesions). For the incidence of solid malignant neoplasms (excluding non-melanoma skin cancer) no statistically significant dependence of the relative radiation risk coefficient on the duration of exposure was revealed. The obtained results indicate significant differences in radiation-epidemiologic peculiarities of malignant neoplasms and tissue reactions (heart diseases).

Keywords: Chernobyl accident liquidators, National Radiation Epidemiological Register, morbidity, dose, dose rate, external gamma radiation, exposure duration, cohort study, radiation risk

For citation: Korelo AM, Maksoutov MA, Chekin SYu, Tumanov KA, Shchukina NV, Kochergina EV, Lashkova OE, Zelenskaya NS, Ivanov VK. Influence of Exposure Duration on Radiation-Induced Morbidity Among Liquidators of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(5):70–74. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-5-70-74

Введение

Современная система радиологической защиты основана на положении, что радиационно-индуцированный риск зависит от дозы поглощённой энергии, усреднённой по массе облучённого органа или ткани [1]. Биологические эффекты облучения могут определяться не только поглощённой дозой, но и продолжительностью воздействия, т.е. мощностью дозы облучения. Чтобы экстраполировать радиационные риски при высоких дозах и мощностях доз, по которым имеется большое количество данных, на область низких доз и мощностей доз, по которым имеется гораздо меньше исследований, в 1990-х годах была предложена концепция единого коэффициента дозы и мощности дозы (DDREF, dose and dose rate effectiveness factor) [2]. Численное значение этого коэффициента, должен ли он быть единым или различным для дозы и для мощности дозы и другие вопросы, имеющие отношение к концепции DDREF, продолжают оставаться предметом обсуждения, о чём свидетельствует, в частности, деятельность рабочей группы 91 Международной комиссии по радиационной защите [3]. Исследований роли мощности дозы в биологических эффектах ионизирующей радиации, включая молекулярные и клеточные, исследований на животных много (перечень работ можно найти в обзоре [4]), в то время как эпидемиологические исследования, где изучается влияние мощности дозы на радиационно-индуцированные риски, немногочисленны [5–8].

Используя данные Национального радиационно-эпидемиологического регистра (НРЭР) [9] о состоянии здоровья участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, мы провели ретроспективное когортное исследование влияния длительности облучения на радиационно-индуцированную заболеваемость (в предположении равномерного по времени облучения длительность облучения обратно пропорциональна мощности дозы).

Материал и методы

Исследование выполнялось по данным о заболеваемости участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, наблюдаемых в НРЭР. Процедуры сбора и верификации данных о дозах облучения и о состоянии здоровья участников ликвидации последствий аварии приведены в работе [9].

Для анализа влияния длительности облучения на радиационно-индуцированный риск заболеваемости были выбраны болезни, объединённые в две группы: 1) солидные злокачественные новообразования за исключением немеланомного рака кожи (коды МКБ-10: C00–C80, кроме C44); 2) некоторые болезни сердечно-сосудистой системы (коды МКБ-10: I20–I25, I44.1–7, I45.2–9, I47–I50, I05–I08, I34–I37) [10].

На основе Единой федеральной базы данных НРЭР были сформированы две ретроспективные когорты мужчин с документально-подтверждёнными дозами внешнего гамма-облучения всего тела, въехавших в зону чернобыльских работ в период с 26.04.1986 г. по 31.12.1987 г. в возрасте от 18 до 70 лет и имевших сведения о дате выезда из зоны (далее по тексту под длительностью облучения мы будем понимать число суток, в течение которых участник когорты находился в зоне работ).

Когорта «СЗНО» формировалась из лиц, не имевших диагнозов из группы «солидные злокачественные новообразования» (СЗНО) до 1 января 1992 г. Когорта «БСС» формировалась из лиц, не имевших диагнозов из группы «некоторые болезни сердечно-сосудистой системы» (БСС) до 1 января 1988 г. Время нахождения каждого члена когорты под риском заболеть исследуемой болезнью определялось от даты начала наблюдения до наименьшей из следующих дат: даты регистрации случая заболевания из выбранной группы болезней или даты выбытия из-под наблюдения по причинам, не связанным с исследуемой группой болезней. Основные характеристики когорт приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики когорт
Main characteristics of cohorts

Основные характеристики когорт	Когорта «СЗНО»	Когорта «БСС»
Период наблюдения, годы	1992–2023	1988–2023
Число лиц	67616	69456
Средняя доза, Гр	0,13	0,13
Медиана длительности облучения, сут	65	65
Число случаев заболеваний	9030	37801
Число человеко-лет под наблюдением	1455437	1322367
Грубый показатель заболеваемости на 10000	62,0	285,9

Статистический анализ состоял в моделировании заболеваемости в предположении, что произошедшее за

фиксированное время число случаев заболеваний имеет распределение Пуассона (т.е. события происходят с некоторой средней интенсивностью и независимо друг от друга). Оценивались коэффициенты трёх моделей (табл. 2).

Таблица 2

Математические модели для описания наблюдаемой заболеваемости

Mathematical models to describe the observed morbidity rate

Описание модели (код модели)	Вид модели
Нерадиационный риск («М1»)	$\lambda_0(E, P, C)$
Линейный относительный радиационный риск («М2»)	$\lambda_0(E, P, C) \cdot (1 + \beta \cdot D)$
Скорректированный на время облучения линейный относительный радиационный риск («М3»)	$\lambda_0(E, P, C) \cdot (1 + \beta \cdot D \cdot \exp(\gamma \cdot T/65))$

Примечание: λ_0 – заболеваемость без радиационного фактора; E – возраст на момент въезда в зону чернобыльских работ; P – код группы регионов регистрации члена когорты в НРЭР; C – календарный год наблюдения; D – доза облучения; T – длительность облучения; β (избыточный относительный риск на единицу поглощённой дозы) и γ – оцениваемые коэффициенты

Набор предикторов для модели «М1» был сформирован в наших предыдущих исследованиях [11, 12], исходя из имеющейся об участниках когорты информации. Заболеваемость без радиационного фактора моделировалась в виде:

$$\lambda_0 = \exp(\varepsilon \cdot (E-35)/10 + \alpha_1 \cdot I_{p1} + \alpha_2 \cdot I_{p2} + \alpha_3 \cdot I_{p3} + \omega \cdot (C-2007)/10),$$

где $\varepsilon, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \omega$ – оцениваемые коэффициенты; I_{pk} – индикатор, меняющий значение с 0 на 1, если текущий код региона регистрации члена когорты в НРЭР равен РК (78 субъектов РФ были объединены в 3 страты с кодами «Р1», «Р2», «Р3»).

Коэффициенты моделей оценивались методом максимального правдоподобия. Как видно из табл. 2, анализируемые модели являются вложенными. Достаточность меньшей модели по сравнению с более сложной моделью определялась тестом отношения правдоподобий. Так как вложенные модели отличаются на один предиктор, этот тест позволяет оценить статистическую значимость оцениваемого коэффициента данного предиктора (его отличие от нулевого значения). Границы 95 % доверительных интервалов (ДИ) коэффициентов моделей рассчитывались по профилю функции правдоподобия, либо на основе статистики Вальда (для модели «М3»).

Также были получены оценки избыточного относительного риска на единицу дозы линейной модели относительного риска («М2») для пяти интервалов длительности облучения: менее 20 сут, 20–39 сут, 40–59 сут, 60–79 сут, более 80 сут.

Статистический анализ проводился с использованием языка программирования для статистических вычислений R [13] и пакетов для R gnm [14] и data.table [15].

Результаты и обсуждение

Заболеваемость в исследуемых когортах моделировалась в порядке возрастания сложности моделей – от «М1» до «М3». Оценки коэффициентов модели «М1» для обеих когорт приведены в табл. 3.

В модели линейного относительного радиационного риска «М2», как и в модели «М1», оценивались коэффициенты функции λ_0 (заболеваемость без радиационного фактора) и «отвечающий» за радиационный эффект коэффициент β – избыточный относительный риск (ИОР)

Таблица 3

Оценки коэффициентов модели нерадиационного риска «М1»
Estimates of the coefficients of the non-radiation risk model “M1”

Коэффициент модели	Когорта «СЗНО»	Когорта «БСС»
ε	0,86	0,79
α_1	-5,08	-3,22
α_2	-5,11	-3,17
α_3	-4,99	-3,24
ω	0,77	0,54

на 1 Гр. В модели «М3» – скорректированный на время облучения линейный относительный радиационный риск – к набору оцениваемых коэффициентов модели «М2» добавился коэффициент γ , характеризующий влияние длительности облучения на коэффициент избыточного относительного риска. Если оценки коэффициентов более сложной модели не отличались от оценок коэффициентов менее сложной модели, то такие оценки в тексте статьи не приводятся.

Корректность использования в модели «М3» предиктора «длительность облучения» совместно с предиктором «доза облучения» подразумевает, что эти предикторы не коррелированы. Для обеих когорт соответствующий коэффициент корреляции равен -0,11.

Оценка коэффициента β , полученная в результате подгонки модели «М2» к данным наблюдения за когортой «СЗНО», составила 0,67 (95 % ДИ: 0,37; 1,00). Радиационный эффект статистически значим ($p < 0,001$) и модель «М2» предпочтительнее модели «М1». Оценка коэффициента γ модели «М3» отрицательная -0,10 (95 % ДИ: -0,46; 0,26), но статистически незначима ($p = 0,38$). Модель «М2» предпочтительнее, чем модель «М3» для когорты «СЗНО».

Отрицательное значение коэффициента γ модели «М3» означает, что при одной и той же накопленной дозе облучения избыточный относительный риск уменьшается с увеличением длительности облучения, или, в предположении равномерного по времени облучения, избыточный относительный риск увеличивается с увеличением мощности дозы. Для когорты «СЗНО» такая зависимость не выявлена (рис. 1), что подтверждают оценки избыточного относительного риска на единицу дозы линейной модели относительного радиационного риска «М2» для пяти последовательных интервалов длительности облучения (табл. 4).

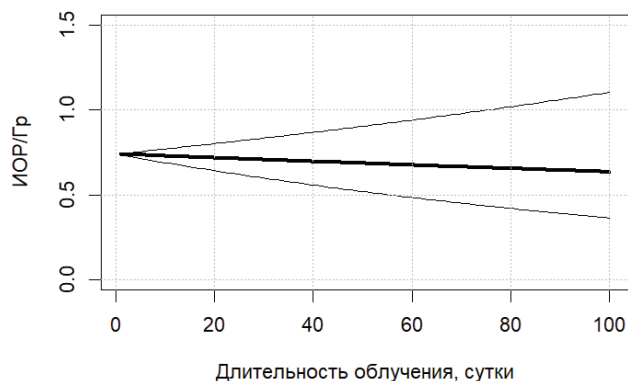


Рис. 1. Влияние длительности облучения на коэффициент избыточного относительного риска для когорты «СЗНО» (толстая линия – ИОР/Гр по модели «М3», тонкие линии – верхняя и нижняя границы 95 % ДИ)

Fig. 1. Effect of exposure duration on the excess relative risk ratio for the SOLID cohort (thick line – ERR/Gy according to the M3 model, thin lines – upper and lower limits of 95 % CI)

Таблица 4

Оценки избыточного относительного риска на единицу дозы в модели «М2» для последовательных интервалов длительности облучения. Когорта «СЗНО»

Estimates of excess relative risk per unit dose in the 'M2' model for successive intervals of exposure duration. SOLID cohort

Длительность облучения, сутки	Средняя доза, Гр	ИОР/Гр (95 % ДИ)	<i>p</i>
1–19	0,14	0,45 (–0,24; 1,37)	0,23
20–39	0,14	0,81 (0,07; 1,69)	0,03
40–59	0,14	0,91 (0,20; 1,78)	0,01
60–79	0,13	0,57 (–0,07; 1,34)	0,09
80+	0,11	0,77 (0,23; 1,38)	0,004

Избыточный относительный риск на 1 Гр, полученный в результате подгонки модели «М2» к данным наблюдения за когортой «БСС», составил 0,66 (95 % ДИ: 0,51; 0,81). Также как и для когорты «СЗНО» радиационный эффект для когорты «БСС» статистически значим ($p < 0,001$). Оценка коэффициента γ модели «М3» статистически значимо ($p < 0,001$) меньше нуля: –1,19 (95 % ДИ: –1,63; –0,76), т.е. более сложная модель «М3» предпочтительнее, чем «М2». Отметим, что в модели «М3» оценка избыточного относительного риска на 1 Гр больше, чем в модели «М2»: 1,34 (95 % ДИ: 1,05; 1,67).

Вид зависимости избыточного относительного риска на единицу дозы от длительности облучения для когорты «БСС» показан на рис. 2. При изменении длительности облучения от 1 до 100 сут. ИОР/Гр уменьшается в 6,3 раза (от 1,32 до 0,21).

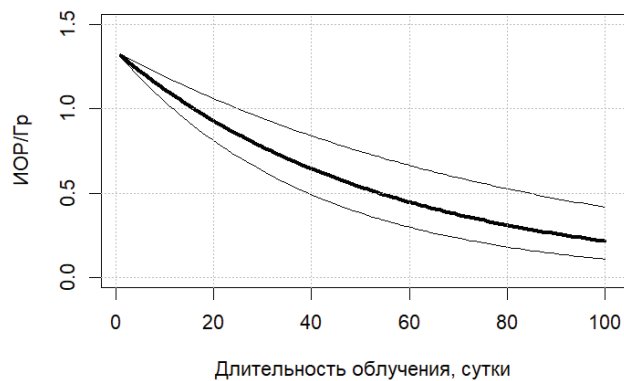


Рис. 2. Влияние длительности облучения на коэффициент избыточного относительного риска для когорты «БСС» (толстая линия — ИОР/Гр по модели «М3», тонкие линии — верхняя и нижняя границы 95 % ДИ)

Fig. 2. Effect of exposure duration on the excess relative risk ratio for the HEART cohort (thick line — ERR/Gy according to the M3 model, thin lines — upper and lower limits of 95 % CI)

Тенденцию влияния длительности облучения на коэффициент избыточного относительного риска для когорты «БСС», показанную на рис. 2, подтверждают данные табл. 5, где приведены оценки избыточного относительного риска на единицу дозы в модели «М2» для последовательных интервалов длительности облучения.

Документами, регламентирующими деятельность НРЭР, не предусмотрено хранение информации о суточных дозах (мощностях доз) облучения для зарегистрированных в регистре лиц. Это предмет специальных дозиметрических расследований. Используя имеющиеся данные и предполагая равномерное по времени облучение, мы определили мощность дозы DR как среднесуточную дозу, $DR = D/T$, и оценили характеристики эмпирической функции распределения мощности дозы в исследуемых когортах (медиана — 0,0017 Гр/сут, 5 %

Таблица 5

Оценки избыточного относительного риска на единицу дозы в модели «М2» для последовательных интервалов длительности облучения. Когорта «БСС»

Estimates of excess relative risk per unit dose in the 'M2' model for successive intervals of exposure duration. HEART cohort

Длительность облучения, сутки	Средняя доза, Гр	ИОР/Гр (95 % ДИ)	<i>p</i>
1–19	0,14	1,03 (0,62; 1,50)	<0,001
20–39	0,15	0,81 (0,44; 1,22)	<0,001
40–59	0,14	0,66 (0,31; 1,04)	<0,001
60–79	0,13	0,58 (0,24; 0,94)	<0,001
80+	0,12	0,37 (0,13; 0,63)	0,003

перцентиль — 0,00011 Гр/сут, 95 % перцентиль — 0,013 Гр/сут), что позволило качественно сравнить результаты нашего исследования с опубликованными результатами эпидемиологических исследований влияние мощности дозы на радиационно-индуцированные риски.

Оценка максимальной мощности дозы в когорте работников Производственного объединения (ПО) «Маяк» [16] сопоставима с величиной медианной мощности дозы в нашем исследовании. Это означает, что у половины участников когорты «СЗНО» и «БСС» мощности доз больше, чем у любого участника когорты ПО «Маяк». В целом, как констатировали авторы обзора [4], за исключением астронавтов, ситуации облучения человека характеризуются мощностями доз либо меньше 0,001 Гр/ч (техногенное облучение, природное облучение, облучение от источников, образовавшихся в результате прошлой деятельности), либо больше 1 Гр/ч (некоторые виды медицинского облучения, подвергшиеся атомной бомбардировке жители японских городов).

Авторы работы [5] сообщают о наличии связи между мощностью дозы радиации в диапазоне 0,005–0,050 Гр/год и коэффициентом избыточного радиационного риска смертности от ишемической болезни сердца у работников, подвергшихся хроническому профессиональному облучению на ПО «Маяк». В то же время, в работах [7, 8] отмечается, что «не было обнаружено статистически значимой разницы в мощности дозы среди избыточных относительных рисков при различных условиях расчета» при исследовании смертности от рака и смертности от болезней системы кровообращения среди работников Хенфордского ядерного комплекса, а авторы исследования онкологической смертности среди атомных работников Японии [6] сделали вывод о том, что «кумулятивная доза, полученная при крайне низкой мощности дозы, предполагает иной дозовый ответ, чем при более высокой мощности дозы».

Заключение

В исследованной когорте российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС для заболеваемости болезнями сердечно-сосудистой системы (ишемическая болезнь сердца, сердечная недостаточность, нарушение проводимости и сердечного ритма, болезни и поражения сердечных клапанов) выявлено шестикратное уменьшение коэффициента относительного радиационного риска на единицу дозы с увеличением длительности облучения от 1 до 100 сут.

Для заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями (исключая немеланомный рак кожи) статистически значимой зависимости коэффициента относительного радиационного риска от длительности облучения не выявлено.

Полученные результаты свидетельствуют о существенных различиях в радиационно-эпидемиологических особенностях развития злокачественных новообразований и тканевых реакций (болезней сердца).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP. 2007;37;2-4:1-332.
2. ICRP, 1991. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP. 1991;21;1-3:1-201.
3. ICRP, 2025. Task Group 91. Radiation Risk Inference at Low-Dose and Low-Dose Rate Exposure for Radiological Protection Purposes. URL: http://www.icrp.org/icrp_group.asp?id=83 (Date of Access: 05.05.2025).
4. Lowe D., Roy L., Tabocchini M.A., Rühm W., Wakeford R., Woloschak G.E., Laurier D. Radiation Dose Rate Effects: what is New and What is Needed? Radiat. Environ. Biophys. 2022;61;4:507-543. doi: 10.1007/s00411-022-00996-0.
5. Azizova T.V., Grigoryeva E.S., Hamada N. Dose Rate Effect on Mortality from Ischemic Heart Disease in the Cohort of Russian Mayak Production Association Workers. Sci. Rep. 2023;13;1:1926. doi: 10.1038/s41598-023-28954-w.
6. Furuta H., Kudo S., Ishida J., Yoshimoto K., Kasagi F. Dose-Rate Effects on Cancer Mortality Risk Estimates for Japanese Nuclear Workers. Proceedings of the 2nd European Radiological Protection Research Week. Paris, 2017. URL: <https://www.rea.or.jp/ire/pdf/20171010Furuta.pdf> (Date of Access: 05.05.2025).
7. Sasaki M., Kudo S., Furuta H. Effect of Radiation Dose Rate on Cancer Mortality among Nuclear Workers: Reanalysis of Hanford Data. Health Phys. 2019;117;1:13-19. doi: 10.1097/HP.0000000000001039.
8. Sasaki M., Kudo S., Furuta H. Effect of Radiation Dose Rate on Circulatory Disease Mortality among Nuclear Workers: Reanalysis of Hanford Data. Health Phys. 2020;119;3:280-288. doi: 10.1097/HP.0000000000001230.
9. Иванов В.К., Максюттов М.А., Туманов К.А., Кочергина Е.В., Власов О.К., Чекин С.Ю., Горский А.И., Корело А.М., Щукина Н.В., Зеленская Н.С., Лашкова О.Е., Иванов С.А., Каприн А.Д. 35-летний опыт функционирования НРЭР как государственной информационной системы мониторинга радиологических последствий Чернобыльской катастрофы // Радиация и риск. 2021. Т. 30. №1. С. 7-39 [Ivanov V.K., Maksyutov M.A., Tumanov K.A., Kochergina Ye.V., Vlasov O.K., Chekin S.Yu., Gorskiy A.I., Korelo A.M., Shchukina N.V., Zelenskaya N.S., Lashkova O.Ye., Ivanov S.A., Kaprin A.D. 35-Year Experience in the Functioning of the National Radiation and Epidemiological Registry as a State Information System for Monitoring the Radiological Consequences of the Chernobyl Accident. *Radiatsiya i Risk = Radiation & Risk*. 2021;30;1:7-39 (In Russ.)]. doi: 10.21870/0131-3878-2021-30-1-7-39.
10. Международная статистическая классификация болезней и проблем, связанных со здоровьем, 10-й пересмотр (МКБ-10). Т. 1 (часть 1). Женева, ВОЗ, 1995. 698 с. [*Mezhdunarodnaya Statisticheskaya Klassifikatsiya Bolezney i Problem, Svyazannykh so Zdorov'yet, 10-y Peresmotr (МКБ-10) = International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems, 10th Revision (ICD-10)*]. Vol. 1 (Part 1). Geneva, WHO Publ., 1995. 698 p. (In Russ.)].
11. Кащеев В.В., Чекин С.Ю., Карпенко С.В., Максюттов М.А., Туманов К.А., Кочергина Е.В., Глебова С.Е., Иванов С.А., Каприн А.Д. Оценка радиационных рисков злокачественных новообразований среди российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2021. Т. 30. № 1. С. 58-77 [Kashcheyev V.V., Chekin S.Yu., Karpenko S.V., Maksyutov M.A., Tumanov K.A., Kochergina Ye.V., Glebova S.Ye., Ivanov S.A., Kaprin A.D. Assessment of Radiation Risks of Malignant Neoplasms among Russian Participants in the Liquidation of the Consequences of the Chernobyl Accident. *Radiatsiya i Risk = Radiation & Risk*. 2021;30;1:58-77 (In Russ.)].
12. Чекин С.Ю., Максюттов М.А., Кащеев В.В., Карпенко С.В., Туманов К.А., Кочергина Е.В., Зеленская Н.С., Лашкова О.Е. Оценка радиационных рисков неонкологических заболеваний среди российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2021. Т. 30. № 1. С. 78-93 [Chekin S.Yu., Maksyutov M.A., Kashcheyev V.V., Karpenko S.V., Tumanov K.A., Kochergina Ye.V., Zelenskaya N.S., Lashkova O.Ye. Assessment of Radiation Risks of Non-Oncological Diseases among Russian Participants in the Liquidation of the Consequences of the Chernobyl Accident. *Radiatsiya i Risk = Radiation & Risk*. 2021;30;1:78-79 (In Russ.)].
13. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/> (Date of Access: 05.05.2025).
14. Turner H., Firth D. Generalized Nonlinear Models in R: an Overview of the GNM Package (R Package Version 1.1-5). URL: <https://CRAN.R-project.org/package=gnm> (Date of Access: 05.05.2025).
15. Barrett T., Dowle M., Srinivasan A., Gorecki J., Chirico M., Hocking T., Schwendinger B., Krylov I. 2025 Data. Table: Extension of 'Data.Frame' (R Package Version 1.17.99). URL: <https://r-datatable.com> (Date of Access: 05.05.2025).
16. Sokolnikov M., Preston D., Gilbert E., Schonfeld S., Koshurnikova N. 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.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.05.2025. Принята к публикации: 25.06.2025.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 20.05.2025. Accepted for publication: 25.06.2025.