

<https://doi.org/10.47183/mes.2026-493>

УДК 613.648.4:616-006.04



КОГОРТА ПОТОМКОВ РАБОТНИКОВ ПО «МАЯК»: ХАРАКТЕРИСТИКА И АНАЛИЗ ОНКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ

Ю.В. Царева[✉], С.Ф. Соснина, П.В. Окатенко, Н.Р. Кабирова

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

Введение. Изучение эффектов преконцептивного (до зачатия) и внутриутробного радиационного воздействия, в том числе риска возникновения злокачественных новообразований (ЗНО) у потомков лиц, подвергшихся профессиональному облучению, является неоднозначной проблемой радиационной эпидемиологии.

Цель. Эпидемиологический анализ канцерогенных эффектов среди потомков, чьи родители подвергались на ПО «Маяк» производственному преконцептивному облучению и облучению во время беременности.

Материалы и методы. Проведен ретроспективный анализ исходов в виде онкопатологии среди 35,5 тысячи человек, из которых 14 593 являлись потомками работников производственного объединения (ПО) «Маяк» — первого в России предприятия атомной промышленности, функционирующего с 1948 г. В группу сравнения вошли 20 872 человека, чьи родители не подвергались радиационному воздействию на производстве и не были переселенцами с радиоактивно загрязненных территорий. Исследуемые выборки сформированы из людей, рожденных в 1948–1988 гг. в закрытом административно-территориальном образовании (ЗАТО) г. Озерск, расположенном вблизи атомного объекта. Период наблюдения составил 72 года (1949–2020 гг.). Источниками данных для проведения эпидемиологического анализа онкологической заболеваемости у потомков, родители которых были работниками ПО «Маяк», являются: медико-дозиметрический регистр персонала ПО «Маяк», Детский регистр (включает население, подвергавшееся в детском возрасте техногенному воздействию за счет деятельности ПО «Маяк»), Регистр здоровья детского населения, Канцер-регистр и Регистр причин смерти населения ЗАТО г. Озерск. Информация о накопленных поглощенных дозах внешнего гамма-облучения извлечена из «Дозиметрической системы работников ПО «Маяк» — 2013». Статистический анализ проведен с использованием методов непараметрической статистики: сравнение частот проведено с использованием критерия χ^2 (Pearson's chi-squared test).

Результаты. Сравнительный анализ структуры и частоты первичных ЗНО показал, что спектр заболеваемости различается по полу во всех исследуемых группах. Среди мужчин-потомков основной вклад вносили ЗНО пищеварительного тракта, среди потомков женского пола — ЗНО молочной железы и женских половых органов. Сравнительный анализ «грубых» показателей онкозаболеваемости показал статистически значимое превышение уровня заболеваемости у потомков облученных матерей над аналогичными показателями в группе потомков облученных отцов. Отмечено значимое превышение уровня заболеваемости ЗНО у потомков облученных родителей по сравнению с контрольной группой как в целом, так и по отдельным локализациям ЗНО. Наибольший удельный вес ЗНО наблюдался в группах работников ПО «Маяк» с «нулевыми» накопленными дозами внешнего гамма-облучения как среди потомков облученных отцов и матерей, так и среди внутриутробно облученных людей, что требует последующего детального анализа.

Выводы. Когорту потомков работников ПО «Маяк» можно рассматривать в качестве важного источника данных для эпидемиологического изучения канцерогенных эффектов. Принимая во внимание относительно молодой возраст когорты потомков работников ПО «Маяк» (47 лет в среднем для потомков облученных отцов, 51 год для потомков облученных матерей и 41 год для контрольной группы), необходим дальнейший эпидемиологический мониторинг.

Ключевые слова: потомки; злокачественные новообразования; облучение до зачатия; внутриутробное облучение; производственное объединение «Маяк»; онкологическая заболеваемость; преконцептивные дозы; дозы антенатального облучения

Для цитирования: Царева Ю.В., Соснина С.Ф., Окатенко П.В., Кабирова Н.Р. Когорта потомков работников ПО «Маяк»: характеристика и анализ онкологической заболеваемости. *Экстремальная биомедицина*. 2026. <https://doi.org/10.47183/mes.2026-493>

Финансирование: работа выполнена в рамках прикладной научно-исследовательской работы «Техногенное облучение и его отдаленные медицинские последствия» (шифр «Последствия-25») на основании Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 гг. и на период до 2035 г.».

Соответствие принципам этики: не требовалось одобрение биоэтического комитета, поскольку исследование выполнено на основе обезличенных архивных материалов.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Царева Юлия Вячеславовна ulichru2017@yandex.ru

Статья поступила: 26.03.2026 **После доработки:** 13.05.2026 **Принята к публикации:** 19.05.2026 **Online first:** 22.07.2026

CANCER INCIDENCE IN THE OFFSPRING OF MAYAK PRODUCTION ASSOCIATION WORKERS: CHARACTERISTICS AND ANALYSIS

Yulia V. Tsareva[✉], Svetlana F. Sosnina, Pavel V. Okatenko, Nailya R. Kabirova

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

Introduction. The study of the effects of preconceptive (before conception) and *in utero* radiation exposure, including the risk of malignant neoplasms (MNs) in the offspring of individuals exposed to occupational radiation, is a complex and ambiguous problem in radiation epidemiology.

Objective. Epidemiological analysis of carcinogenic effects among offspring whose parents were exposed to occupational preconceptive radiation and radiation during pregnancy at the Mayak Production Association.

Materials and methods. A retrospective analysis of outcomes in the form of oncopathology was conducted among 35,500 individuals, of whom 14,593 were offspring of workers at the Mayak Production Association (PA) — the first nuclear industry enterprise in Russia, operating since 1948. The comparison group included 20,872 individuals whose parents were not exposed to radiation at work and were not resettlers from radioactively contaminated territories. The study samples were drawn from individuals born in 1948–1988 in the closed administrative-territorial unit (CATU) of Ozersk, located near the nuclear facility. The follow-up period was 72 years (1949–2020). The data sources for the epidemiological analysis of cancer incidence among offspring whose parents were Mayak PA workers include: the Mayak PA personnel medical and dosimetric registry, the Children's Registry (includes the population exposed in childhood to technogenic impact due to Mayak PA activities), the Child Population Health Registry, the Cancer Registry, and the Cause of Death Registry of the CATU Ozersk population. Information on accumulated absorbed doses of external gamma radiation was extracted from the "Dosimetry System of Mayak PA Workers — 2013." Statistical analysis was performed using nonparametric statistics methods: frequency comparison was conducted using the χ^2 test (Pearson's chi-squared test).

Results. A comparative analysis of the structure and frequency of primary MNs showed that the incidence spectrum differs by sex across all study groups. Among male offspring, the main contribution came from MNs of the digestive tract; among female offspring — from MNs of the breast and female genital organs. A comparative analysis of "crude" cancer incidence rates showed a statistically significant excess of incidence rates in offspring of exposed mothers compared to similar rates in the offspring of exposed fathers. A significant excess of MN incidence rates was observed in offspring of exposed parents compared to the control group, both overall and for specific MN localizations. The highest proportion of MNs was observed in groups of Mayak PA workers with "zero" accumulated doses of external gamma radiation, both among offspring of exposed fathers and mothers and among individuals exposed *in utero*, which requires further detailed analysis.

Conclusions. The cohort of offspring of Mayak PA workers can be considered an important source of data for the epidemiological study of carcinogenic effects. Given the relatively young age of the cohort of Mayak PA offspring (47 years on average for offspring of exposed fathers, 51 years for offspring of exposed mothers, and 41 years for the control group), further epidemiological monitoring is necessary.

Keywords: offspring; malignant neoplasms; preconception exposure; *in utero* exposure; Mayak Production Association; cancer incidence; preconception doses; antenatal exposure doses

For citation: Tsareva Yu.V., Sosnina S.F., Okatenko P.V., Kabirova N.R. Cancer incidence in the offspring of Mayak Production Association workers: characteristics and analysis. *Extreme Medicine*. 2026. <https://doi.org/10.47183/mes.2026-493>

Funding: the work was carried out within the framework of applied scientific research "Technogenic exposure and its long-term medical consequences" (code "Consequences-25") based on the Federal Target Program "Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016–2020 and for the period up to 2035".

Compliance with ethical principles: approval of the bioethics committee was not required, as the study was conducted based on anonymized archival materials.

Potential conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

✉ Yulia V. Tsareva ulichru2017@yandex.ru

Received: 26.03.2026 **Revised:** 13.05.2026 **Accepted:** 19.05.2026 **Online first:** 22 July 2026

ВВЕДЕНИЕ

Оценка риска возникновения злокачественных новообразований (ЗНО) у потомков лиц, облученных в результате их профессиональной деятельности, является актуальной, но пока не решенной проблемой радиационной эпидемиологии. Изучение последствий родительского облучения (преконцептивного облучения отцов и матерей и облучения матерей во время беременности) в различных когортах не привело к единому пониманию эффектов у последующего поколения потомков [1].

Имеются обширные литературные данные, касающиеся результатов экспериментов на животных, где вклад радиационного фактора в неблагоприятные исходы не вызывает сомнений [2–5]. Однако следует заметить, что экстраполяция экспериментальных данных на человека должна быть выполнена с тщательным учетом особенностей сравниваемых биологических систем, параметры которых не всегда правомерны и допустимы [6].

Существует большое количество работ, в которых отражены результаты изучения последствий для здоровья потомков радиационного воздействия на родителей, проводимого с целью диагностического исследования или лечебных процедур [7, 8]. К таким данным следует относиться критически, поскольку в этих публикациях не всегда приводятся фактические дозы облучения, а чаще указывается количество проводимых рентгеновских процедур. Кроме того, диагностическое облучение обычно назначалось при наличии медицинских показаний (многоплодная беременность, подозрение на аномалии матери и плода и т.д.), которые изначально могли повлиять на неблагоприятные репродуктивные исходы.

Большой пласт работ посвящен изучению здоровья потомков подвергшихся прекоцептивному/внутриутробному облучению при атомных бомбардировках гг. Хиросимы и Нагасаки (Япония). Они выполнены на достаточной большой выборке, проводилось длительное

многоплановое наблюдение за изучаемым контингентом, использовались современные тесты [9, 10]. Однако в этих исследованиях существует ряд ограничений: имело место однократное острое облучение, дозы были получены расчетным путем, существовала проблема подбора адекватного контроля.

Одни из первых исследований, посвященных изучению профессионального воздействия радиационных факторов на людей, находившихся в репродуктивном возрасте, проводились в Южно-Уральском федеральном научно-клиническом центре медицинской биофизики (ЮУрФНКЦ МБ). Значимых доказательств возникновения злокачественных новообразований у потомков в зависимости от профессионального прекоцептивного облучения отцов и матерей, а также облучения матерей во время беременности получено не было. Скорее всего, это связано с малыми размерами выборок, которые не позволяли сделать окончательные выводы о наличии или отсутствии значимого эффекта. В связи с этим принято решение о расширении наблюдаемой когорты потомков работников производственного объединения ПО «Маяк» — первого в стране предприятия атомной отрасли — и проведении сравнительного анализа онкопатологии в расширенной выборке.

Цель исследования — эпидемиологический анализ канцерогенных эффектов в группе потомков, чьи родители подвергались производственному прекоцептивному облучению и облучению во время беременности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Источники информации

Источниками данных для проведения эпидемиологического анализа онкологической заболеваемости у потомков, родители которых были работниками ПО «Маяк», являются:

- Медико-дозиметрический регистр персонала ФГУП «Производственное объединение “Маяк”» (Регистр ПО «Маяк») [11];
- Регистр населения г. Озерска, подвергавшегося в детском возрасте техногенному воздействию за счет деятельности первого атомного предприятия России ПО «Маяк» (Детский регистр г. Озерска) [12];
- Регистр здоровья детского населения г. Озерска [13];
- Канцер-регистр населения г. Озерска [14];
- Регистр причин смерти населения закрытого административно-территориального образования (ЗАТО) г. Озерск [15];
- «Дозиметрическая система работников “Маяк” — 2013» [16].

Сведения о дате и месте рождения детей, жизненном статусе потомков получены из Детского регистра г. Озерска. Информация о случаях первичных ЗНО получена из Канцер-регистра населения г. Озерска. Регистр персонала ПО «Маяк» содержит данные о работниках, нанятых в период 1948–1982 гг. на основные (реакторное, радиохимическое, плутониевое) производства и вспомогательные (водоподготовки, ремонтно-механический) заводы. В регистр включены 25 757 человек (19 395 мужчин — 75,3%; 6362 женщины — 24,7%).

Информация о накопленных поглощенных дозах внешнего гамма-облучения извлечена из «Дозиметрической системы работников ПО “Маяк” — 2013». В исследовании использованы характеристики накопленных поглощенных доз внешнего гамма-облучения гонад; учтены прекоцептивные дозы родителей (датой зачатия считали 280-й день до рождения ребенка); дозы матерей на матку получены с учетом разработанного алгоритма распределения годовых доз на каждый период беременности. «Нулевая доза» радиационного воздействия на производстве означала, что работник входил в когорту работников ПО «Маяк», но в прекоцептивный период / во время беременности у матерей-работниц дозы производственного облучения не были зафиксированы индивидуальным дозиметром.

Формирование исследуемых групп

Исследование проводилось по трем основным направлениям: изучение эффектов среди потомков прекоцептивно облученных отцов и матерей, а также последствий внутриутробного радиационного воздействия.

Перечень критериев выбора потомков (для основных и контрольной групп) включает следующие условия:

- годы рождения потомков: 1949–1988 гг.;
- потомки рождены в г. Озерске — закрытом административно-территориальном образовании, градообразующим предприятием которого является ПО «Маяк»;
- один из родителей начал работать на ПО «Маяк» до зачатия ребенка;
- ребенок рожден живым;
- годы наблюдения: 1949–2020 гг.

Для анализа влияния прекоцептивного облучения отцов на заболеваемость ЗНО их потомков из Детского регистра г. Озерска была выбрана информация о детях, отцы которых могли подвергаться внешнему гамма-облучению во время работы на ПО «Маяк» в прекоцептивный период, при этом их матери не работали на ПО «Маяк», не были ликвидаторами последствий аварии 1957 г. на ПО «Маяк» и на Чернобыльской АЭС либо членами когорты УКАОН (Уральской когорты аварийно-облученного населения) [17] и не подвергались производственному прекоцептивному облучению (табл. 1).

Для анализа влияния прекоцептивного облучения матерей и облучения во время беременности на онкологическую заболеваемость их потомков из Детского регистра г. Озерска была выбрана информация о детях, матери которых могли подвергаться внешнему гамма-облучению во время работы на ПО «Маяк» в прекоцептивный период и за время беременности, при этом у детей имелась информация об отце; отцы не работали на ПО «Маяк», не были ликвидаторами последствий аварии 1957 г. на ПО «Маяк» и на Чернобыльской АЭС или членами когорты УКАОН, не подвергались производственному прекоцептивному облучению (табл. 1).

В контрольную группу вошли дети, чьи родители не работали на ПО «Маяк» до зачатия ребенка, не являлись ликвидаторами последствий аварии

Таблица 1. Количество потомков, включенных в основную и контрольную группы

Параметры выборки	Основная группа	Контрольная группа
Всего потомков 1949–1988 г. р. из «Детского регистра»	24 434	32 900
Нет информации о втором родителе	297	2854
Второй родитель работал на ПО «Маяк»	8862	4476
Второй родитель является ликвидатором, переселенцем или членом когорты ВУРС	277	2956
Второй родитель облучался, не числясь в штате ПО «Маяк»	405	1742
Количество потомков, включенных в исследование	14 593	20 872

Таблица составлена авторами

Примечание: ВУРС — Восточно-Уральский радиоактивный след.

Таблица 2. Распределение лиц и человеко-лет наблюдения в группе потомков, родившихся от отцов, которые могли подвергаться профессиональному облучению на ПО «Маяк»

Параметры	Мужчины		Женщины		Всего	
	абс. ч	%	абс. ч	%	абс. ч	%
Количество потомков	6694	51,4*	6342	48,6	13 036	100,0*
Число человеко-лет наблюдения	252 882		241 243		494 125	
Число заболевших злокачественными новообразованиями	209	3,1*	235	3,7*	444	3,4*
		47,1**		52,9**		100,0**
Число потомков от отцов с «ненулевой» прекоцептивной дозой	5657	84,5*	5355	84,4*	11 012	84,5*
Число потомков от отцов с «нулевой» прекоцептивной дозой	1037	15,5*	987	15,6*	2024	15,5*

Таблица составлена авторами

Примечание: * — % от общего числа потомков данного пола; ** — % от общего числа заболевших злокачественными новообразованиями.

1957 г. на ПО «Маяк» и на Чернобыльской АЭС, не входили в когорту УКАОН и не могли получить профессиональное облучение, не числясь в штате ПО «Маяк» (табл. 1).

Общий период наблюдения за когортой потомков составил 72 года (01.01.1949–31.12.2020). Началом наблюдения считали дату рождения, окончанием — дату события, произошедшего первым: дату установления диагноза ЗНО, дату выезда из города, дату последнего известия, дату смерти, дату конца наблюдения за когортой. Жизненный статус по состоянию на 31.12.2020 известен для 95,8% когорты.

Создание табулированных данных начиналось с подготовки текстового файла, содержащего необходимую для исследования информацию о каждом члене изучаемой когорты. После этого полученный текстовый файл обрабатывался модулем Datab пакета программ EpiSure [18] для получения файла с табулированными данными для дальнейшего анализа.

Статистический анализ проведен с использованием методов непараметрической статистики: сравнение частот проведено с использованием критерия χ^2 (Pearson's chi-squared test) [19]. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Группа потомков, отцы которых входят в состав регистра работников ПО «Маяк» и могли подвергаться профессиональному облучению, составляла 13 036 человек (табл. 2). При этом число детей, родившихся от отцов с «ненулевой» дозой облучения гонад к моменту зачатия ребенка, составило 11 012 человек (84,5% от общего числа потомков). По полу различий в этой группе не было. Всего в группе было выявлено 444 случая первичных злокачественных новообразований, что составило 3,4% от общего числа включенных в группу потомков.

Численность группы потомков, чьи матери работали на ПО «Маяк» и могли подвергаться прекоцептивному облучению, представлена в таблице 3. Всего в данную группу вошли 1557 потомков, 70,3% матерей накопили к моменту зачатия «ненулевые» дозы ионизирующего излучения. Всего в этой группе было диагностировано 83 случая ЗНО, что составило 5,3% от общего числа потомков.

Численность группы лиц, которые могли подвергаться облучению *in utero*, совпадает с численностью группы потомков матерей, входивших в когорту

Таблица 3. Распределение лиц и человеко-лет наблюдения в группе потомков, родившихся от матерей, которые могли подвергаться профессиональному облучению на ПО «Маяк»

Параметры	Мужчины		Женщины		Всего	
	абс. ч	%	абс. ч	%	абс. ч	%
Количество потомков	806	51,8*	751	48,2*	1557	100,0*
Число человеко-лет наблюдения	25 464		26 498		51 962	
Число заболевших злокачественными новообразованиями	38	4,7*	45	6,0*	83	5,3*
		45,8**		54,2**		100,0**
Число потомков от матерей с «ненулевой» преконцептивной дозой	564	70,0*	530	70,6*	1094	70,3*
Число потомков от матерей с «нулевой» преконцептивной дозой	242	30,0*	221	29,4*	463	29,7*

Таблица составлена авторами

Примечание: * — % от общего числа потомков данного пола; ** — % от общего числа заболевших злокачественными новообразованиями.

работников ПО «Маяк» (1557 человек). Но в этой группе количество людей, подвергшихся гамма-излучению во время внутриутробного развития (59,8% потомков с «ненулевой» внутриутробной дозой), меньше по сравнению с группой, где матери работали на ПО «Маяк» и могли подвергаться преконцептивному облучению (70,3% потомков от матерей с «ненулевой» преконцептивной дозой).

Численность контрольной группы составила 20 872 человека с пропорциональным соотношением полов (50,9% — мужского пола, 49,1% — женского, $p > 0,05$). Всего в группе было диагностировано 559 первичных случаев ЗНО, что составило 2,7% от общего числа потомков, включенных в эту группу.

Распределение потомков с учетом дозовых характеристик облучения родителей

В таблицах 4–6 представлено распределение потомков в зависимости от накопленной преконцептивной/внутриутробной дозы внешнего гамма-облучения и наличия диагноза «Злокачественное новообразование». Распределение потомков по дозовым интервалам накопленных преконцептивных доз внешнего гамма-облучения отцов-работников ПО «Маяк» (табл. 4) было сравнительно равномерным: 11,2–19% в каждой дозовой категории. К «нулевым» дозам преконцептивного радиационного воздействия относились 15,5% группы. Между тем наибольший удельный вес потомков с ЗНО регистрировался как в категории «нулевых» преконцептивных доз, так и в категории максимальных накопленных доз свыше 500 мГр — 18,9 и 20% соответственно. Практически равный удельный вес (по 9,0–9,9%) наблюдался в дозовых категориях 20–200 мГр.

Распределение потомков матерей-работниц ПО «Маяк» (табл. 5) показало, что треть группы потомков родились от матерей, накопленные преконцептивные дозы которых характеризовались «нулевым» уровнем, означавшим, что работница входила в когорту работников ПО «Маяк», но в период до зачатия ребенка у нее не были зафиксированы индивидуальным дозиметром дозы производственного облучения.

К дозовому диапазону свыше 500 мГр относились 16,6% данной группы потомков. Среди потомков с ЗНО наблюдалась та же тенденция: среди 30,1% потомков матери имели «нулевую» дозу облучения, у каждого десятого потомка с ЗНО (9,6%) мать подверглась преконцептивному внешнему гамма-облучению в дозе свыше 500 мГр.

Распределение потомков в зависимости от категорий накопленных антенатальных доз внешнего гамма-облучения (табл. 6) в результате производственной деятельности матерей на ПО «Маяк» показало, что более 40% данной группы относились к «нулевым» дозам внутриутробного облучения: во время беременности мать являлась работницей ПО «Маяк», но в период беременности дозы производственного облучения не были зарегистрированы индивидуальным дозиметром. Число потомков, подвергшихся действию ионизирующего излучения *in utero* в дозах, превышающих 100 мГр, составило 243 человека (15,6% от числа потомков с «ненулевыми» дозами облучения *in utero*).

Анализ удельного веса потомков в зависимости от категорий антенатальных доз показал обратную пропорциональность: по мере увеличения дозовых характеристик удельный вес потомков уменьшался с 40,2 до 0,6%.

Среди потомков с ЗНО распределение было аналогичным: самый высокий вклад (39,8%) отмечался среди «нулевых» антенатальных доз с последующим прогрессивным снижением по мере увеличения накопленных доз внешнего гамма-облучения.

Структура первичных злокачественных новообразований

В структуре заболеваемости ЗНО среди людей, отцы которых могли подвергаться профессиональному облучению, на первом месте регистрировали ЗНО органов пищеварения (22,1%), в основном обусловленные раком ободочной кишки; второе место занимали опухоли молочной железы (17,8%) за счет 78 случаев — 33,2% всех ЗНО среди потомков женского пола; на третьем месте — новообразования лимфоидной

Таблица 4. Распределение потомков, родившихся от отцов, которые могли подвергаться профессиональному облучению на ПО «Маяк», по полу, дозе облучения отца и наличию заболевания злокачественными новообразованиями

Доза*, мГр	Число потомков, абс. ч (%)			Число потомков с ЗНО, абс. ч (%)		
	муж.	жен.	всего	муж.	жен.	всего
=0	1037 (15,5)	987 (15,6)	2024 (15,5)	39 (18,7)	45 (19,1)	84 (18,9)
<20	1239 (18,5)	1232 (19,4)	2471 (19,0)	28 (13,4)	38 (16,2)	66 (14,9)
<50	947 (14,1)	873 (13,8)	1820 (14,0)	22 (10,5)	18 (7,7)	40 (9,0)
<100	827 (12,4)	784 (12,4)	1611 (12,4)	19 (9,1)	25 (10,6)	44 (9,9)
<200	776 (11,6)	679 (10,7)	1455 (11,2)	24 (11,5)	20 (8,5)	44 (9,9)
<500	888 (13,3)	877 (13,8)	1765 (13,5)	37 (17,7)	40 (17,0)	77 (17,3)
500+	980 (14,6)	910 (14,3)	1890 (14,5)	40 (19,1)	49 (20,9)	89 (20,0)
Всего	6694	6342	13 036	209	235	444

Таблица составлена авторами

Примечание: * — доза внешнего гамма-облучения на гонады отца, накопленная до зачатия ребенка; ЗНО — злокачественные новообразования.

Таблица 5. Распределение потомков, родившихся от матерей, которые могли подвергаться профессиональному облучению на ПО «Маяк», по полу, дозе облучения матери и наличию заболевания злокачественными новообразованиями

Доза*, мГр	Число потомков, абс. ч (%)			Число потомков с ЗНО, абс. ч (%)		
	муж.	жен.	всего	муж.	жен.	всего
=0	242 (30,0)	221 (29,4)	463 (29,7)	8 (21,1)	17 (37,8)	25 (30,1)
<20	106 (13,2)	119 (15,8)	225 (14,5)	4 (10,5)	8 (17,8)	12 (14,5)
<50	79 (9,8)	55 (7,3)	134 (8,6)	5 (13,2)	3 (6,7)	8 (9,6)
<100	69 (8,6)	59 (7,9)	128 (8,2)	5 (13,2)	2 (4,4)	7 (8,4)
<200	56 (6,9)	73 (9,7)	129 (8,3)	3 (7,9)	6 (13,3)	9 (10,8)
<500	122 (15,1)	98 (13,0)	220 (14,1)	7 (18,4)	7 (15,6)	14 (16,9)
500+	132 (16,4)	126 (16,8)	258 (16,6)	6 (15,8)	2 (4,4)	8 (9,6)
Всего	806	751	1557	38	45	83

Таблица составлена авторами

Примечание: * — доза внешнего гамма-облучения на гонады матери, накопленная до зачатия ребенка; ЗНО — злокачественные новообразования.

и кроветворной тканей (10,6%), 42,6% из которых были представлены лимфомами Ходжкина, 34,0% — относились к лейкомиям, половина из которых уточнена как лимфоидные лейкозы. Только среди потомков мужского пола диагностирован единичный случай моноклонального лейкоза.

Структура ЗНО в зависимости от пола потомков существенно различалась: если среди потомков-мужчин основную долю в структуре онкозаболеваемости занимали ЗНО органов пищеварения (29,2%), второе место — лейкозы и гемолимфобласты (17,2%), третье место — ЗНО органов дыхания (12,0%), то среди

потомков женского пола лидирующее место занимали опухоли молочной железы (33,2%), второе — опухоли женских половых органов (23,4%), к ЗНО органов пищеварения относились лишь 15,7%.

Спектр онкозаболеваемости потомков, чьи матери могли облучаться во время работы на ПО «Маяк» как прекоцептивно, так и во время беременности, представлен на рисунке.

Основную долю во всей группе составили злокачественные опухоли пищеварительной системы (33,7%), на втором месте — ЗНО молочной железы, на третьем — онкозаболевания женских половых

Таблица 6. Распределение лиц в группе потомков, которые могли подвергаться облучению *in utero*, по полу, дозе облучения матери и наличию заболевания злокачественными новообразованиями

Доза*, мГр	Число потомков, абс. ч (%)			Число потомков с ЗНО, абс. ч (%)		
	муж.	жен.	всего	муж.	жен.	всего
=0	317 (39,3)	309 (41,1)	626 (40,2)	14 (36,8)	19 (42,2)	33 (39,8)
<20	196 (24,3)	172 (22,9)	368 (23,6)	11 (28,9)	10 (22,2)	21 (25,3)
<50	87 (10,8)	80 (10,7)	167 (10,7)	5 (13,2)	8 (17,8)	13 (15,7)
<100	83 (10,3)	70 (9,3)	153 (9,8)	2 (5,3)	2 (4,4)	4 (4,8)
<200	63 (7,8)	69 (9,2)	132 (8,5)	2 (5,3)	2 (4,4)	4 (4,8)
<500	53 (6,6)	48 (6,4)	101 (6,5)	4 (10,5)	4 (8,9)	8 (9,6)
500+	7 (0,9)	3 (0,4)	10 (0,6)	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)
Всего	806	751	1557	38	45	83

Таблица составлена авторами

Примечание: * — доза внешнего гамма-облучения *in utero*; ЗНО — злокачественные новообразования.

органов (12,0%). Среди потомков мужского и женского пола на первом месте в структуре, как и во всей группе, стояли ЗНО органов пищеварения (44,7 и 24,4% соответственно). Но если среди потомков-женщин структура онкозаболеваемости не отличалась от таковой в общей группе, то среди мужчин второе место разделили опухоли органов дыхания и мочевых путей (по 10,5% каждый).

В структуре заболеваемости ЗНО в группе сравнения на первом месте, как и среди потомков работников ПО «Маяк», находились злокачественные опухоли органов пищеварения (21,3%), на втором месте — опухоли женских половых органов (14,0%), на третьем — ЗНО молочной железы (12,0%). Структура онкозаболеваемости среди потомков-мужчин группы сравнения отличалась от таковой среди потомков-мужчин от облученных родителей. Так, среди потомков-мужчин ведущие позиции занимали злокачественные новообразования пищеварительной системы (26,9%), на втором месте находились опухоли дыхательной системы (16,7%), на третьем — ЗНО лимфоидной, кроветворной

и родственных им тканей (12,7%). Структура заболеваемости ЗНО среди потомков женского пола в группе сравнения отличалась от структуры заболеваемости потомков-женщин от облученных матерей по процентному вкладу ЗНО: на первом месте — опухоли женских половых органов (24,8%), на втором месте — ЗНО молочной железы (21,0%), на третьем — заболевания органов пищеварения (16,9%).

Сравнительный анализ онкологической заболеваемости в группах

В данном исследовании рассмотрены «грубые» показатели онкозаболеваемости среди потомков облученных на производстве родителей в сравнении с контролем.

В группе потомков, чьи отцы могли подвергаться профессиональному облучению на ПО «Маяк», показатели онкозаболеваемости составили $89,9 \times 10^5$ человеко-лет в целом, среди потомков-мужчин — $82,6 \times 10^5$, среди женщин — $97,4 \times 10^5$ (табл. 7). Уровень

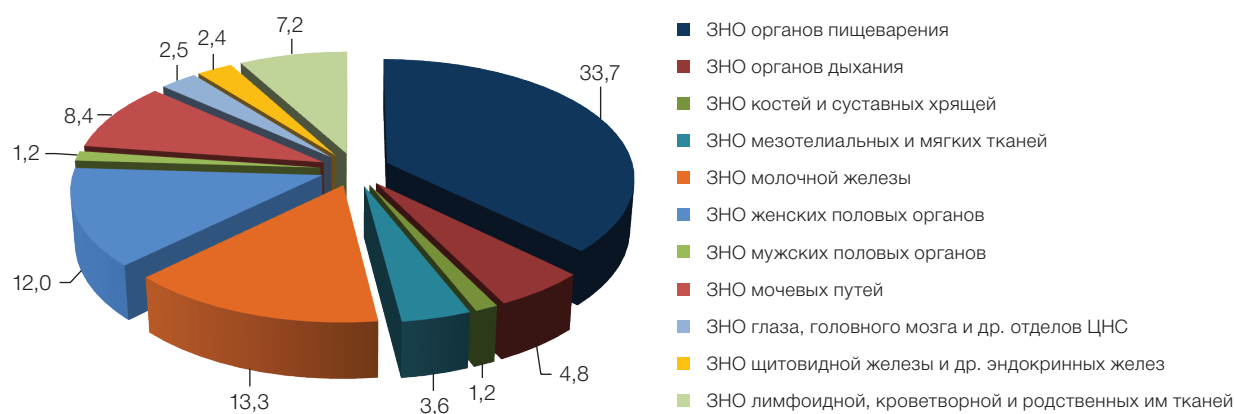


Рисунок подготовлен авторами

Рис. Структура онкозаболеваемости среди потомков, матери которых могли подвергаться профессиональному облучению на ПО «Маяк» (%): ЗНО — злокачественные новообразования

Таблица 7. Уровень онкозаболеваемости среди потомков, отцы которых могли подвергаться профессиональному облучению на ПО «Маяк»

Локализации ЗНО	Показатель онкозаболеваемости					
	муж., абс. ч	×10 ⁵	жен., абс. ч	×10 ⁵	всего, абс. ч	×10 ⁵
ЗНО губы, полости рта и глотки (C00–C14)	14	5,5 ^{1,2}	3	1,2 ²	17	3,4 ²
ЗНО органов пищеварения (C15–C26)	61	24,1 ^{1,2,3}	37	15,3 ²	98	19,8 ^{2,3}
ЗНО органов дыхания и грудной клетки (C30–C39)	25	9,9 ¹	8	3,3	33	6,7
ЗНО костей и суставных хрящей (C40–C41)	1	0,4	2	0,8	3	0,6
Меланома и др. ЗНО кожи (C43–C44)	11	4,3	10	4,1	21	4,2
ЗНО мезотелиальных и мягких тканей (C45–C49)	3	1,2	9	3,7	12	2,4
ЗНО молочной железы (C50)	1	0,4	78	32,3 ^{1,3}	79	16,0 ³
ЗНО женских половых органов (C51–C58)	0	0,0	55	22,8	55	11,1
ЗНО мужских половых органов (C60–C63)	20	7,9	0	0,0	20	4,0
ЗНО мочевых путей (C64–C68)	21	8,3 ¹	4	1,7 ²	25	5,1 ²
ЗНО глаза, головного мозга и др. отделов ЦНС (C69–C72)	6	2,4	8	3,3	14	2,8
ЗНО щитовидной железы и др. эндокринных желез (C73–C75)	6	2,4	9	3,7	15	3,0
ЗНО вторичных, неточно обозначенных и неуточненных локализаций (C76–C80)	4	1,6	1	0,4	5	1,0
ЗНО лимфоидной, кроветворной и родственных им тканей (C81–C96)	36	14,2 ^{1,3}	11	4,6 ³	47	9,5
Всего	209	82,6 ^{2,3}	235	97,4 ^{2,3}	444	89,9 ^{2,3}

Таблица составлена авторами

Примечание: ЗНО — злокачественные новообразования; ¹ — статистически значимые различия между мужчинами и женщинами в группе; ² — статистически значимые различия между группой облученных отцов и группой облученных матерей; ³ — статистически значимые различия по сравнению с контрольной группой.

заболеваемости по различным классам злокачественных новообразований различался по полу.

Среди женщин на первом месте были опухоли молочной железы (32,3×10⁵). Уровень заболеваемости ЗНО пищеварительной системы у женщин более чем в 1,5 раза ниже по сравнению с мужчинами (15,3×10⁵ против 24,1×10⁵), и эти различия были статистически значимыми ($\chi^2 = 4,69$; $p = 0,03$). В то же время показатели заболеваемости у мужчин были значимо выше, чем у женщин, по таким классам заболеваний, как ЗНО губы, полости рта и глотки ($\chi^2 = 6,55$; $p = 0,01$), ЗНО органов дыхания ($\chi^2 = 7,89$; $p = 0,005$), ЗНО мочевых путей ($\chi^2 = 10,69$; $p = 0,001$) и ЗНО лимфоидной, кроветворной и родственных им тканей ($\chi^2 = 12,03$; $p = 0,001$).

Уровень заболеваемости онкологическими новообразованиями среди потомков облученных матерей составлял 159,7×10⁵ в целом в группе, показатели онкозаболеваемости у потомков женского пола были несколько выше, чем у потомков-мужчин (169,8×10⁵ и 149,2×10⁵ соответственно), но это превышение не было статистически значимым ($\chi^2 = 1,26$; $p > 0,05$).

Основной вклад в уровень онкозаболеваемости как среди мужчин, так и среди женщин вносили опухоли органов пищеварения (66,8×10⁵ и 41,5×10⁵

соответственно) без значимых различий ($\chi^2 = 0,91$; $p > 0,05$). Существенная роль среди потомков мужского пола была отведена ЗНО органов дыхания и мочеполовых органов (по 15,7×10⁵); среди потомков-женщин — опухолям молочной железы и женских половых органов (41,5×10⁵ и 37,7×10⁵). По отдельным классам заболеваний статистически значимых различий не найдено, в том числе для ЗНО органов дыхания, где уровень заболеваемости среди мужчин был выше по сравнению с женщинами: $\chi^2 = 3,74$; $p > 0,05$. Исключение составили ЗНО половых органов, значительно чаще диагностируемые среди потомков женского пола (37,7×10⁵) по сравнению с мужчинами (3,9×10⁵; $\chi^2 = 8,08$; $p = 0,004$).

Преобладающими по показателям заболеваемости злокачественными новообразованиями в группе потомков необлученных родителей стали опухоли пищеварительного тракта (18,8×10⁵), в основном за счет вклада заболеваемости потомков-мужчин (20,8×10⁵; $\chi^2 = 0,99$; $p > 0,05$). За ними следуют опухоли половых органов (12,3×10⁵) за счет вклада показателей потомков женского пола (24,6×10⁵), значимо превышающих частоту ЗНО половых органов среди мужчин (8,8×10⁵; $\chi^2 = 25,6$; $p < 0,0001$). Третье место у ЗНО лимфоидной,

кроветворной и родственных им тканей ($10,4 \times 10^5$), при этом показатели заболеваемости среди мужчин и женщин этой группы были практически одинаковыми ($9,8 \times 10^5$ и $11,1 \times 10^5$ соответственно; $\chi^2 = 0,41$; $p = 0,50$).

Важно отметить, что в группе потомков необлученных родителей показатель общей заболеваемости ЗНО среди потомков-женщин значимо выше, чем среди мужчин ($99,2 \times 10^5$ против $77,3 \times 10^5$; $\chi^2 = 11,6$; $p = 0,001$). По отдельным классам заболеваемости значимое превышение среди потомков мужского пола зафиксировано только для ЗНО органов дыхания ($\chi^2 = 24,86$; $p < 0,0001$). Среди женщин достоверное превышение над аналогичными показателями мужчин, кроме вышеуказанных ЗНО половых органов, обнаружено в классе ЗНО кожи ($\chi^2 = 3,87$; $p = 0,049$), опухолей щитовидной железы и других эндокринных желез ($\chi^2 = 14,1$; $p < 0,001$).

При сравнении уровней заболеваемости злокачественными новообразованиями между группами потомков облученных родителей отмечено существенное (более чем в 1,5 раза) превышение показателей онкозаболеваемости в группе потомков облученных матерей ($159,7 \times 10^5$) над аналогичным показателем в группе людей, где облучался лишь отец ($89,9 \times 10^5$); и это превышение было достоверным ($\chi^2 = 14,8$; $p < 0,0001$). В основном превышение заболеваемости ЗНО в группе потомков, чьи матери могли подвергаться профессиональному облучению, касалось опухолей пищеварительного тракта как в группе в целом ($\chi^2 = 17,8$; $p < 0,001$), так и среди мужчин ($\chi^2 = 10,3$; $p = 0,002$) и женщин ($\chi^2 = 7,8$; $p = 0,005$). Это также касалось опухолей губы, полости рта и глотки среди потомков облученных матерей в целом ($\chi^2 = 11,95$; $p = 0,001$), среди потомков-мужчин ($\chi^2 = 7,75$; $p = 0,005$) и потомков-женщин ($\chi^2 = 4,57$; $p = 0,032$). Кроме того, достоверное превышение показателей заболеваемости относилось к ЗНО мочевых путей ($\chi^2 = 4,22$; $p = 0,04$) в группе в целом, в основном за счет заболеваемости женщин ($\chi^2 = 7,71$; $p = 0,006$).

При сравнении уровней онкозаболеваемости между потомками, чьи отцы могли подвергаться профессиональному облучению, и группой сравнения отмечено статистически значимое превышение показателя заболеваемости ЗНО молочной железы среди потомков-женщин от облученных отцов над аналогичным показателем у потомков контрольной группы ($32,3 \times 10^5$ и $20,8 \times 10^5$ соответственно; $\chi^2 = 15,2$; $p < 0,0001$) и ЗНО органов пищеварения ($19,8 \times 10^5$ и $18,8 \times 10^5$ соответственно; $\chi^2 = 4,16$; $p = 0,041$) за счет вклада потомков-мужчин ($\chi^2 = 4,75$; $p = 0,029$). Кроме того, среди потомков от облученных отцов частота ЗНО лимфоидной, кроветворной и родственных им тканей значимо превышала показатели контроля как среди мужчин ($\chi^2 = 6,46$; $p = 0,011$), так и среди женщин ($\chi^2 = 4,01$; $p = 0,045$).

Уровень заболеваемости ЗНО в группе потомков облученных матерей значимо превышал аналогичный показатель в контрольной группе, и это превышение относилось как к показателям всей онкозаболеваемости в группе ($\chi^2 = 36,67$; $p < 0,0001$), так и к показателям потомков мужского ($\chi^2 = 18,02$; $p < 0,0001$) и женского пола ($\chi^2 = 18,98$; $p < 0,0001$). Что касается заболеваемости злокачественными новообразованиями

по отдельным классам, то среди потомков облученных матерей статистически значимое превышение уровня заболеваемости над контролем отмечалось по классам ЗНО органов пищеварения ($\chi^2 = 33,57$; $p < 0,0001$), ЗНО губы, полости рта и глотки ($\chi^2 = 18,09$; $p < 0,0001$), рака молочной железы ($\chi^2 = 6,21$; $p = 0,013$) и мочевых путей ($\chi^2 = 6,91$; $p = 0,009$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Вероятность возникновения онкологической патологии среди потомков лиц, подвергшихся облучению в результате профессиональной деятельности, остается предметом научного поиска, поскольку результаты, полученные в многочисленных исследованиях в разных когортах облученных людей, довольно противоречивы. Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что воздействие радиации может вызывать различные виды опухолей у следующего поколения [2, 5]. Однако вклад радиационного воздействия на родителей в канцерогенез у потомков облученных людей до сих пор остается открытой проблемой [1].

Рассматривая патофизиологические предпосылки в отношении риска возникновения отдаленных последствий, в том числе злокачественных новообразований, у облученных людей и их потомков, важно отметить, что в результате воздействия радиации наблюдаются повреждения, вызывающие генетические и эпигенетические сдвиги, которые приводят к изменению уровня экспрессии белков вследствие метилирования остатков цитозина в ДНК, модификации гистонов и регуляции экспрессии микро-РНК, что способствует онкогенезу [20].

В этой связи представляют интерес исследования показателей здоровья потомков работников ПО «Маяк» — лидера атомной промышленности в России, функционирующего с 1948 г. Исключительными особенностями когорты работников ПО «Маяк» в сравнении с другими когортами профессионалов ядерной энергетики в мире являются: длительный период наблюдения, сопоставимый с данными RERF (Radiation Effects Research Foundation — японского Фонда исследований радиационных эффектов) у жертв атомных бомбардировок и их потомков, но отличающийся пролонгированным радиационным воздействием как внешнего, так и внутреннего облучения (инкорпорированным Pu-239); измеренные индивидуальные дозы персонала и детальные сведения о профессиональном маршруте каждого работника; высокий удельный вес женщин-работниц (25%), контактировавших с источниками ионизирующих излучений на производстве в репродуктивном возрасте; единое медицинское обеспечение для работников ПО «Маяк» и населения ЗАТО г. Озерск, основным предприятием которого является ПО «Маяк».

Ретроспективный анализ ЗНО, прослеженных за 72-летний период наблюдения, не только показал существенные различия в спектре и частоте ЗНО при сравнении с группой потомков необлученных родителей, но и отметил отличия между потомками облученных на производстве отцов и матерей. Так, при сравнении с контролем среди потомков облученных родителей наблюдали статистически значимое

превышение определенных классов ЗНО, в частности: пищеварительной системы, чаще всего представленных ЗНО ободочной кишки; ЗНО молочных желез; гемолимфобластозов (у потомков облученных отцов). Значимо более высокая частота всех первичных ЗНО (пищеварительной системы, губы, полости рта и глотки, а также мочевых путей) наблюдалась среди потомков облученных матерей в сравнении с группой от облученных отцов. В каждой исследуемой группе отмечены различия в спектре ЗНО в зависимости от пола потомков, что согласуется с отечественными [21, 22] и международными данными [23, 24].

Распределение потомков по категориям накопленных прекоцептивных и внутриутробных доз указало на существенный процент родителей-работников с так называемыми «нулевыми» дозами, когда на момент работы на ПО «Маяк» в прекоцептивный или антенатальный период не регистрировались дозы внешнего гамма-излучения по данным индивидуальных дозиметров. С одной стороны, это может свидетельствовать об охране труда работниц, своевременно переводимых на радиационно безопасные участки предприятия при установлении факта беременности. С другой стороны, этот факт требует особого внимания и изучения, поскольку относится к периоду становления производства и дозиметрической службы и указывает на важность дальнейшего анализа других видов производственного облучения и сочетанного действия различных производственных факторов.

Важно отметить, что сформированные группы потомков матерей-работниц ПО «Маяк», подвергшихся прекоцептивному производственному радиационному воздействию и облучению во время беременности, совпали по количественным характеристикам, в том числе ЗНО, что не позволило провести сравнительный анализ спектра и частоты онкопатологии между этими группами. С патогенетической точки зрения отделить эффекты прекоцептивного и внутриутробного облучения также невозможно, поскольку каждая женщина-работница до установления беременности могла подвергаться прекоцептивному производственному облучению. Однако планируемый в дальнейшем статистический анализ канцерогенного риска в зависимости от накопленных доз, отдельно для прекоцептивно облученных и подвергшихся внутриутробному облучению потомков, вполне возможен.

Другим ограничением исследования стало относительно малое число исходов в виде ЗНО некоторых локализаций, что уменьшило статистическую мощность анализа по нозологическим формам. Следует отметить, что, несмотря на продолжительный период наблюдения за когортой потомков (72 года), ее средний возраст достаточно мал (47 лет в среднем

для потомков облученных отцов, 51 год для потомков облученных матерей и 41 год для людей, включенных в контрольную группу) для реализации возможных эффектов в виде онкопатологии, поэтому требуется последующий эпидемиологический мониторинг. Аналогичные сведения приводят исследователи когорты потомков жертв атомных бомбардировок в Японии, отмечая отсутствие значимых оценок риска развития ЗНО и смерти от рака и указывая на «относительную молодость когорты потомков F1» [9, 25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате ретроспективного исследования онкологической заболеваемости в группе потомков работников, подвергшихся внешнему гамма-облучению во время работы на ПО «Маяк» ($n = 14\,593$), в сравнении с контрольной группой потомков, чьи родители не подвергались радиационному воздействию до зачатия ребенка ($n = 20\,872$), были подведены следующие итоги:

- главное место в структуре онкозаболеваемости во всех группах занимали ЗНО органов пищеварения;
- структура заболеваемости злокачественными новообразованиями в группах различается по полу: среди потомков-мужчин основной вклад в структуру заболеваемости вносят ЗНО органов пищеварения, у женщин — ЗНО молочной железы и половых органов;
- сравнительный анализ «грубых» показателей онкозаболеваемости показал статистически значимое превышение уровня заболеваемости потомков облученных матерей над аналогичными показателями в группе потомков облученных отцов;
- отмечено значимое превышение уровня заболеваемости ЗНО у потомков работников ПО «Маяк» по сравнению с группой потомков необлученных родителей по некоторым локализациям: ЗНО пищеварительного тракта, молочных желез (среди потомков облученных родителей); ЗНО губы, полости рта и глотки, женских половых органов и мочевых путей (среди потомков облученных матерей), гемолимфобластозов (среди потомков мужского пола облученных отцов).

Учитывая относительно молодой возраст наблюдаемой когорты (47 лет в среднем для потомков облученных отцов, 51 год для потомков облученных матерей и 41 год для людей, включенных в контрольную группу), необходимо продолжить эпидемиологический мониторинг с последующим анализом канцерогенного риска у потомков облученных родителей с учетом доз радиационного воздействия.

Литература / References

1. Preface, Executive Summary and Glossary. *Annals of ICRP*. 2007;37(2–4):9–34.
<https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
2. Dubrova YE, Sarapultseva EI. Radiation-induced transgenerational effects in animals. *International Journal of Radiation Biology*. 2022;98(6):1047–53.
<https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793027>
3. Yushkova E. Genetic mechanisms of formation of radiation-induced instability of the genome and its transgenerational effects in the descendants of chronically irradiated individuals of *Drosophila melanogaster*. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2020;59:221–36.
<https://doi.org/10.1007/s00411-020-00833-2>
4. Satoh Y, Asakawa JI, Nishimura M, Kuo T, Shinkai N,

- Cullings HM, et al. Characteristics of induced mutations in offspring derived from irradiated mouse spermatogonia and mature oocytes. *Scientific Reports*. 2020;10:37. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56881-2>
5. Панченко АВ, Пигарев СЕ, Федорос ЕИ, Драчев ИС, Юрова МН, Тындык МЛ и др. Трансгенерационный канцерогенез, индуцированный уретаном, у потомков мышей-самцов BALB/C, подвергнутых общему равномерному гамма-облучению. *Вопросы онкологии*. 2023;69(2):246–52. Panchenko AV, Pigarev SE, Fedoros EI, Drachev IS, Yurova MN, Tindyk ML, et al. Transgenerational urethane-induced carcinogenesis in the offspring of male BALB/C mice subjected to general uniform gamma irradiation. *Problems in Oncology*. 2023;69(2):246–52 (In Russ.). <https://doi.org/10.3746/0507-3758-2023-69-2-246-252>
 6. Даренская НГ, Ушаков ИБ, Иванов ИВ, Иванченко АВ, Насонова ТА. От эксперимента на животных — к человеку: поиски и решения. Воронеж: «Научная книга»; 2010. Darenskaya NG, Ushakov IB, Ivanov IV, Ivanchenko AV, Nasonova TA. *From experiment on animals — to person: searches and decisions*. Voronezh: “Nauchnaya Kniga” Publ.; 2010 (In Russ.). EDN: AIFUDG
 7. Meistrich ML. Risks of genetic damage in offspring conceived using spermatozoa produced during chemotherapy or radiotherapy. *Andrology*. 2020;8(3):545–58. <https://doi.org/10.1111/andr.12740>
 8. Qin N, Wang Z, Liu Q, Song N, Wilson CL, Ehrhardt MJ, et al. Pathogenic germline mutations in DNA repair genes in combination with cancer treatment exposures and risk of subsequent neoplasms among long-term survivors of childhood cancer. *Journal of Clinical Oncology*. 2020;38(24):2728–40. <https://doi.org/10.1200/JCO.19.02760>
 9. Ozasa K, Grant EJ, Kodama K. Japanese legacy cohorts: the life span study atomic bomb survivor cohort and survivors’ offspring. *Journal of Epidemiology*. 2018;28(4):162–9. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20170321>
 10. Jordan B. Hiroshima/Nagasaki survivors and their offspring: results of longterm epidemiological studies. *Médecine/Sciences (Paris)*. 2018;34:171–8. <https://doi.org/10.1051/medsci/20183402016>
 11. Кошурникова НА, Сокольников МЭ, Окатенко ПВ, Груздева ЕА, Кабиров НР, Царева ЮВ. Медико-дозиметрический регистр персонала ФГУП «Производственное объединение «Маяк» (краткое наименование: Регистр персонала ПО «Маяк»). Свидетельство о регистрации базы данных RU 2020620210; 2020. Koshurnikova NA, Sokolnikov ME, Okatenko PV, Gruzdeva EA, Kabirova NR, Tsareva YuV. *Medical and dosimetric register of the personnel of the federal state unitary enterprise production association Mayak (short name: Mayak Personnel Register)*. Database Registration Certificate RU 2020620210; 2020 (In Russ.). EDN: CIXUF
 12. Кабиров НР, Окатенко ПВ, Кошурникова НА, Сокольников МЭ, Груздева ЕА, Царева ЮВ. Регистр населения ЗАТО Озерск, подвергавшегося в детском возрасте техногенному воздействию за счет деятельности первого атомного предприятия России ПО «Маяк» (краткое наименование: Детский регистр г. Озерска). Свидетельство о регистрации базы данных RU 2021621486; 2021. Kabirova NR, Okatenko PV, Koshurnikova NA, Sokolnikov ME, Gruzdeva EA, Tsareva YuV. *Register of the population of ZATO Ozersk, exposed to technogenic impact at an early age due to the activities of Russia's first nuclear enterprise PO “Mayak” (short name: Children's Register of Ozersk)*. Database registration certificate RU 2021621486; 2021 (In Russ.). EDN: JQZCNN
 13. Соснина СФ, Кабиров НР, Окатенко ПВ, Груздева ЕА, Сокольников МЭ, Рогачева СА и др. База данных «Регистр здоровья детского населения г. Озерска». Свидетельство о регистрации базы данных RU 2018620834; 2018. Sosnina SF, Kabirova NR, Okatenko PV, Gruzdeva EA, Sokolnikov ME, Rogacheva SA, et al. *Database “Register of Children's Health in Ozersk”*. Certificate of registration of the database RU 2018620834; 2018 (In Russ.). EDN: NQAVKA
 14. Кошурникова НА, Окатенко ПВ, Фомин ЕП, Сокольников МЭ. База данных «Канцер-регистр населения закрытого административно-территориального образования (ЗАТО) г. Озерск Челябинская область». Свидетельство о регистрации базы данных RU 2019621208; 2019. Koshurnikova NA, Okatenko PV, Fomin EP, Sokolnikov ME. *Database “Cancer Register of the Population of the Closed Administrative-Territorial Formation (ZATO) of Ozersk, Chelyabinsk Region”*. Certificate of Registration of the Database RU 2019621208; 2019 (In Russ.). EDN: RUJSZZ
 15. Кошурникова НА, Окатенко ПВ, Сокольников МЭ, Царева ЮВ. Регистр причин смерти ЗАТО г. Озерска (краткое наименование: Регистр причин смерти). Свидетельство о регистрации базы данных RU 2021621969; 2021. Koshurnikova NA, Okatenko PV, Sokolnikov ME, Tsareva SW. *Cause of Death Registry of the Closed Administrative-Territorial Formation of the city of Ozersk (short name: Cause of Death Registry)*. Certificate of registration of the database RU 2021621969; 2021 (In Russ.). EDN: ERKEJM
 16. Napier BA. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2013): an introduction to the documentation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176(1–2):6–9. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx020>
 17. Крестинина ЛЮ, Силкин СС, Микрюкова ЛД, Епифанова СБ, Аклев АБ. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956–2017. *Радиационная гигиена*. 2020;13(3):6–17. Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956–2017. *Radiation Hygiene*. 2020;13(3):6–17 (In Russ.). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17>
 18. Preston DL, Lubin JH, Pierce DA. *EPICURE user's guide*. Seattle: Hirosoft International Corp.; 1993.
 19. Glantz SA. *Primer of biostatistics*. 4th Edition. New York: McGraw-Hill, Health Professions Division; 1997.
 20. Изтлеутов ЕМ, Изтлеутов МЛ, Елубаев АЕ, Туляева АБ, Абенова НА. Канцерогенность ионизирующего излучения: обзор литературы. *Онкология и радиология Казахстана*. 2023;70(4):39–45. Iztleutov EM, Iztleutov ML, Yelubaev AE, Tulyayeva AB, Abenova NA. Carcinogenicity of ionizing radiation: A review of the literature. *Oncology and Radiology of Kazakhstan*. 2023;70(4):39–45 (In Russ.). <https://doi.org/10.52532/2521-6414-2023-4-70-39-45>
 21. Мерабишвили ВМ, Румянцев ПО, Юркова ЮП, Артемьева АС, Беляев АМ. Состояние онкологической помощи в России: эпидемиология и выживаемость больных наиболее распространенными и жизнеугрожающими солидными злокачественными новообразованиями. Часть 2 (популяционное исследование на уровне Федерального округа). *Российский онкологический*

- журнал. 2024;29(2):104–15.
Merabishvili VM, Rummyantsev PO, Yurkova YuP, Artemyeva AS, Belyaev AM. The state of cancer care in Russia: epidemiology and survival of patients with the most common and life-threatening solid malignant neoplasms. Part 2 (population study at the Federal District level). *Russian Journal of Oncology*. 2024;29(2):104–15 (In Russ.).
<https://doi.org/10.17816/onco626386>
22. Аксенова ИА, Попова НВ, Старинский ВВ, Ходакова ОВ, Сохибов СУ, Шахзадова АО и др. Анализ эпидемиологии злокачественных новообразований среди детского населения в Российской Федерации. *Вопросы онкологии*. 2025;71(1):54–71.
Aksenova IA, Popova NV, Starinsky VV, Khodakova OV, Sokhibov SU, Shakhzadova AO, et al. Analysis of the epidemiology of malignant neoplasms among the child population in the Russian Federation. *Problems in Oncology*. 2025;71(1):54–71 (In Russ.).
<https://doi.org/10.37469/0507-3758-2025-71-1-OF-2169>
 23. Zhu Y, Shao X, Wang X, Liu L, Liang H. Sex disparities in cancer. *Cancer Letters*. 2019;466:35–8.
<https://doi.org/10.1016/j.canlet.2019.08.017>
 24. Nierengarten MB. Global cancer statistics 2022: The report offers a view on disparities in the incidence and mortality of cancer by sex and region worldwide and on the areas needing attention. *Cancer*. 2024;130:2568.
<https://doi.org/10.1002/cncr.35444>
 25. Grant EJ, Furukawa K, Sakata R, Sugiyama H, Sadakane A, Takahashi I, et al. Risk of death among children of atomic bomb survivors after 62 years of follow-up: a cohort study. *The Lancet Oncology*. 2015;16:1316–23.
[https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(15\)00209-0](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(15)00209-0)

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Вклад распределен следующим образом: Ю.В. Царева — концептуализация, формальный анализ, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и ее редактирование; С.Ф. Соснина — анализ, интерпретация результатов, редактирование текста, визуализация; П.В. Окатенко — программное обеспечение, статистическая обработка данных, визуализация; Н.Р. Кабирова — анализ, интерпретация результатов, редактирование текста.

Об авторах:

Царева Юлия Вячеславовна, канд. мед. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5559-4457>

Соснина Светлана Фаридовна, д-р мед. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1553-0963>

Окатенко Павел Викторович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8260-1808>

Кабирова Наиля Равильевна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7724-6103>