

С.Ф. Соснина, Ю.В. Царева

ИСТОРИЯ И ИТОГИ МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ ПОТОМКОВ РАБОТНИКОВ РАДИАЦИОННО ОПАСНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики
(Россия, Челябинская обл., г. Озерск, Озерское шоссе, д. 19)

Актуальность. Эффекты радиационного воздействия у последующих поколений тревожат научное сообщество в течение многих десятилетий. Однако до сих пор нет единого мнения относительно наблюдаемых эффектов среди потомков облученных родителей. Между тем, развитие атомной энергетики и расширение применения источников ионизирующих излучений в медицинских целях требуют конкретных оценок генетического вреда для безопасности персонала радиационно опасных предприятий. В этой связи актуальным направлением является эпидемиологическое наблюдение когорты потомков работников производственного объединения (ПО) «Маяк» – первого в стране предприятия атомной отрасли, работающего с 1948 г.

Цель – анализ публикаций, описывающих результаты исследований у потомков работников ПО «Маяк».

Методология. Осуществлен сбор и анализ сведений из научных работ, опубликованных в открытой печати. Исторический экскурс по теме изучения последствий производственного облучения на ПО «Маяк» проведен по двум направлениям: эффекты преконцептивного (до зачатия ребенка) и внутриутробного радиационного воздействия во время работы матерей на ПО «Маяк». Представлены результаты исследований на заре становления атомной промышленности, описаны этапы совершенствования эпидемиологического мониторинга здоровья потомков облученных людей, подытожены современные представления об отдаленных эффектах.

Результаты и их анализ. Ранние исследования у потомков работников ПО «Маяк», выполненные проспективно и, как правило, на небольших выборках, продемонстрировали дисгармоничность физического развития потомков и функциональные нарушения определенных органов и систем среди антенатально облученных. Более поздние эпидемиологические исследования базировались на анкетировании и результатах медицинских осмотров детского населения, отличались проспективным характером и ограничивались 15-летним возрастом потомков (1974–1988 гг. рождения). При этом установлено, что структура и распространенность отклонений в первых двух поколениях потомков работников ПО «Маяк» значительно не различались с контролем и данными национальной статистики. Впоследствии создание медицинских архивов способствовало накоплению знаний о показателях здоровья потомков и расширению периода наблюдения за ними. Многолетняя работа с архивными данными, разработка и внедрение эпидемиологических регистров, оцифровывание медицинских сведений из различных источников позволили проводить ретроспективные исследования на репрезентативных выборках потомков без ограничения возраста наблюдения. Современный анализ в когорте потомков работников ПО «Маяк» основан на индивидуальной измеренной дозиметрической информации и детальных сведениях о профессиональном маршруте родителей; верифицированных медицинских заключениях, закодированных в соответствии с МКБ-10 (Международной статистической классификацией болезней); длительном периоде наблюдения когорты; актуальных статистических методах.

Заключение. Итоги мониторинга здоровья потомков работников ПО «Маяк» на сегодняшний день показали, что, несмотря на значимые отклонения в опухолевой и неопухолевой заболеваемости, смертности в перинатальный период, физическом развитии потомков 1949–1973 гг. рождения, прямая связь неблагоприятных исходов с производственным облучением родителей не доказана. Результаты исследований в когорте потомков работников ПО «Маяк» свидетельствуют о необходимости дальнейшего мониторинга здоровья потомков облученных лиц для радиационной безопасности персонала и определения объема профилактических мероприятий.

Ключевые слова: радиационное воздействие, чрезвычайная ситуация, ликвидаторы последствий аварии, наследственность, потомки, производственное объединение «Маяк», преконцептивное облучение, антенатальное облучение.

✉ Соснина Светлана Фаридовна – д-р мед. наук, вед. науч. сотр., Юж.-Урал. федер. науч.-клинич. центр мед. биофизики (Россия, 456783, Челябинская обл., г. Озерск, Озерское шоссе, д. 19), ORCID: 0000-0003-1553-0963, e-mail: sosnina@subi.ru;

Царева Юлия Вячеславовна – канд. мед. наук, ст. науч. сотр., Юж.-Урал. федер. науч.-клинич. центр мед. биофизики (Россия, 456783, г. Озерск, ш. Озерское, д. 19), ORCID: 0000-0001-5559-4457, e-mail: tsareva@subi.ru

Введение

Воздействие радиационного фактора в преемпревативный (до зачатия) и антенатальный период на развитие эмбриона и плода до сих пор вызывает интерес научного сообщества. Большинство исследований эффектов облучения среди последующих поколений посвящены разовому облучению в результате радиационных инцидентов, диагностического и терапевтического облучения, радиационных аварий.

Вместе с тем, аварии на атомных станциях (г. Чернобыль и г. Фукусима) [13, 32] вызвали увеличение тревожных настроений по поводу безопасного проживания вблизи действующих предприятий атомной энергетики [3], на радиоактивно загрязненных территориях [5, 8, 28] и в отношении последствий пролонгированного производственного контакта родителей с источниками ионизирующих излучений. Однако на сегодняшний день в мире существует мало возможностей для подобных эпидемиологических исследований, позволяющих полноценно изучить радиационный риск, обусловленный длительным техногенным воздействием. Одной из уникальных когорт для данного анализа может считаться когорта работников производственного объединения (ПО) «Маяк» – первого в России предприятия атомной энергетики, работающего с 1948 г.

В Южно-Уральском институте биофизики (ныне Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики) практически с самого начала функционирования ПО «Маяк» проводились исследования по оценке отдаленных эффектов радиационного воздействия в результате профессиональной деятельности.

Цель – анализ публикаций, описывающих результаты исследований среди потомков работников ПО «Маяк».

Материал и методы

Сбор и анализ сведений получены из научных работ, опубликованных в открытой печати. Представлены исторические аспекты становления радиационной эпидемиологии и процесса мониторинга здоровья потомков работников ПО «Маяк». Анализ последствий производственного облучения на ПО «Маяк» проведен по двум главным направлениям: эффектам преемпревативного облучения и внутриутробного радиационного воздействия во время работы матерей на ПО «Маяк».

Результаты и их анализ

Этапы создания и характеристика когорты потомков работников. ПО «Маяк» является первым предприятием ядерного оружейного комплекса СССР, первоначально включавшим реакторное, радиохимическое и химико-металлургическое производства, с момента создания перед которыми «ставились беспрецедентно сложные научно-технические и производственные задачи»: за 2–3 года на базе ПО «Маяк» была создана не имеющая технических аналогов отрасль промышленности [1]. С точки зрения радиационных эффектов, особенно неблагоприятным оказался период становления технологии – первые 10 лет деятельности предприятия (1948–1958 гг.), отличающийся предельно высокими темпами развития технологического оборудования, отсутствием опыта работы с источниками ионизирующих излучений и несовершенством средств защиты, когда параметры радиационного воздействия существенно превышали не только современные, но и принятые в 1960-е годы нормативы радиационной безопасности [7, 12].

Обобщая информацию по когорте работников ПО «Маяк», важно отметить, что на современном этапе к исключительным особенностям данной когорты среди других когорт профессионалов атомной промышленности в мире относятся: продолжительный период наблюдения, сопоставимый с данными японского Фонда исследований радиационных эффектов (RERF) у жертв атомных бомбардировок и их потомков, но отличающийся пролонгированным радиационным воздействием как внешнего, так и внутреннего облучения; измеренные индивидуальные дозы у персонала и точные сведения о профмаршруте работников; высокий удельный вес женщин-работниц (25 %), подвергшихся радиационному воздействию на производстве в репродуктивном возрасте; единое медицинское обеспечение для работников атомного предприятия и населения закрытого административно-территориального образования (ЗАТО) г. Озерска, градообразующим предприятием которого является ПО «Маяк».

Первые исследования среди потомков работников ПО «Маяк» начинались с малых по численности выборок, как правило, состоящих из детей работников определенного производства (реакторного, радиохимического), в которых информация о медицинских исходах была получена благодаря проспективному анализу здоровья потомков [6, 18].

Впоследствии для проведения более масштабных эпидемиологических исследований был создан так называемый «Детский регистр» [21], включающий всех детей, которые родились или приехали в ЗАТО г. Озерска в возрасте от 0 до 14 лет и прожили в нем не менее 1 года. Данный регистр содержал сведения о дате и месте рождения ребенка, адресе и сроках проживания в городе, смене фамилии; о родителях ребенка с указанием их дат рождения, года въезда в город, места работы на момент рождения ребенка и величин доз прекоцептивного и внутриутробного внешнего гамма-облучения.

Так, в свое время для изучения воздействия внутриутробного облучения из «Детского регистра» была выбрана группа детей 1949–1988 годов рождения, матери которых начали работать на ПО «Маяк» до рождения ребенка. Всего в группу были включены 6244 ребенка, при этом в группу облученных *in utero* детей вошли 3587 человек (57,4%), которые подвергались внешнему гамма-излучению во время внутриутробного развития. В контрольную группу были включены дети, матери которых работали на ПО «Маяк», но не облучались во время беременности, – 2657 человек (42,6%) [34].

Индивидуальный дозиметрический контроль за работниками предприятия осуществлялся с первых дней пуска предприятия, что позволило получить данные о дозовых нагрузках внешнего гамма-облучения за весь период беременности (табл. 1). Суррогатными дозами на плод служили дозы матерей на матку от внешнего гамма-излучения во время беременности. Годовые дозы на матку были доступны для всех матерей и являлись частью «Дозиметрической системы работников «Маяка»» [33, 37].

Из-за недостатка медицинских данных получить полные сведения о течении беременности у каждой работающей женщины не было возможности, поэтому изначально предполагалось, что средняя продолжительность нормально протекающей беременности составляла 280 дней. При наличии информации с пленочных дозиметров ежемесяч-

ные измерения дозы суммировали за время всей беременности, при отсутствии данной информации был разработан алгоритм распределения годовых доз на каждый месяц беременности. По медицинским документам устанавливали сроки дородового и послеродового декретного отпуска, которые составили для женщин, родивших до 1960 г., – 60 дней до родов и 115 дней после родов; для женщин, родивших после 1960 г., – 115 и 150 дней соответственно. Впоследствии ежемесячные дозы в год рождения ребенка суммировали за время его внутриутробного развития с учетом полученных сроков декретных отпусков его матери.

Анализ прекоцептивного радиационного воздействия у потомков работников ПО «Маяк» вначале проводился проспективным методом по результатам анкетирования и медицинских осмотров педиатрического контингента ЗАТО г. Озерска с оценкой общей заболеваемости детей определенного возраста, сопоставления параметров физического развития потомков работников ПО «Маяк» с контрольной группой потомков необлученных родителей, возрастной динамики морфофункциональных показателей, инструментальным изучением состояния определенных органов и систем (электрокардиографическое исследование, функция внешнего дыхания, гемограмма) [19].

Ключевым моментом, определившим дальнейшее развитие эпидемиологического мониторинга населения ЗАТО г. Озерска, стало создание в отделе радиационной эпидемиологии архива первичной медицинской документации, включающего: амбулаторные карты детского и взрослого населения (формы № 112/у и № 025/у), в том числе, заводские карты персонала ПО «Маяк»; истории родов (форма № 096/у); статистические талоны для регистрации уточненных диагнозов (формы № 025-2/у, № 25 в); контрольные карты диспансерного наблюдения больных со злокачественными новообразованиями (форма № 030-6/у); протоколы-карты патологоанатомического исследования (форма № 013-у); медицинские свидетельства о смерти (форма № 106/у-08).

Таблица 1

Распределение внутриутробно облученных лиц по дозовым интервалам

Пол	Дозовые интервалы внешнего гамма-облучения (мГр)					Всего
	0,01–3,6	3,7–11,2	11,3–31,9	32,0–94,9	95 и более	
Мужчины, n (средняя доза)	382 (1,7)	404 (7,0)	366 (20,1)	377 (56,8)	371 (204,0)	1900 (56,8)
Женщины, n (средняя доза)	337 (1,8)	316 (6,9)	358 (20,2)	345 (59,3)	331 (206,5)	1687 (58,6)
Оба пола, n (средняя доза)	719 (1,8)	720 (7,0)	724 (20,2)	722 (58,0)	702 (205,1)	3587 (58,6)

По мере сбора и накопления медицинской информации разрабатывали и внедряли регистры, служившие фундаментом для последующих ретроспективных исследований [11, 14]. Так, для исследования эффектов преконцептивного облучения в период 2011–2024 гг. проведены целенаправленный сбор и систематизация материала, специально создана и внедрена электронная база данных «Регистр здоровья детского населения г. Озерска», внесены оцифрованные медико-социальные сведения о каждом потомке обследуемой когорты. Данный регистр на 11.02.2026 г. содержит информацию о 28,7 тыс. жителях, родившихся и проживавших в ЗАТО г. Озерска, и продолжает пополняться; общее число введенных в регистр диагнозов на указанную дату составляет 1201,1 тыс. единиц информации, из них 518 тыс. – с впервые установленной патологией, для кодирования которой использована Международная статистическая классификация болезней 10-го пересмотра (МКБ-10).

На современном этапе ретроспективное эпидемиологическое исследование эффектов преконцептивного облучения охватывает 25-летний период рождения детей в ЗАТО г. Озерска (1949–1973 гг. рождения), в том числе, первого поколения потомков работников ПО «Маяк» [24]. Формирование обследуемых групп проводилось по следующим принципам: когорты персонала ПО «Маяк», нанятого в 1948–1982 гг. на основные (реакторное, радиохимическое, плутониевое производства) и вспомогательные (водоподготовки, ремонтно-механический) заводы, составляет 25,8 тыс. человек, из них мужчин – 19,4 тыс. (75,3 %), женщин – 6362 (24,7 %). В основную группу включены дети работников ПО «Маяк», рожденные в ЗАТО г. Озерска в 1949–1973 гг. Число потомков, рожденных после трудоустройства родителей на ПО «Маяк», насчитывает 14,6 тыс. человек: 7543 (51,7 %) – мужского пола, 7037 (48,3 %) – женского; из них живорожденных – 14,4 тыс. человек:

7457 (51,7 %) – мужского пола, 6978 (48,3 %) – женского.

Группа сравнения сформирована из «Детского регистра», содержащего информацию о 43,7 тыс. детей 1949–1973 гг. рождения, из них 35,2 тыс. родились в ЗАТО г. Озерска. После включения 14,6 тыс. потомков работников ПО «Маяк» в основную группу проведена проверка у оставшихся 20,6 тыс. детей на предмет облучения родителей в преконцептивный период (профессиональное облучение, в том числе, среди строителей, военнослужащих, ликвидаторов последствий радиационных аварий, переселенцев с радиоактивно загрязненных территорий). Группа сравнения состояла в итоге из 10,4 тыс. детей необлученных родителей, рожденных в ЗАТО г. Озерска в 1949–1973 гг.: 5301 (50,8 %) – мужского пола; 5126 (49,2 %) – женского пола, из них живорожденных потомков – 10,4 тыс. человек: 5260 (50,8 %) – мужского пола, 5085 (49,2 %) – женского. Сведения о показателях здоровья потомков обследуемых групп получены из «Регистра здоровья детского населения г. Озерска».

Исходные характеристики когорты потомков первого поколения представлены в табл. 2. Сопоставимость групп достигнута фактом рождения детей в ЗАТО г. Озерска, пропорциональным соотношением полов, единым периодом рождения и наблюдения потомков. Родившиеся вне города и приехавшие в него в детском возрасте исключены из исследования, чтобы наблюдаемые группы характеризовались одинаковыми климатогеографическими условиями проживания, единым уровнем и качеством медицинского обслуживания и возможным техногенным облучением за счет проживания вблизи ПО «Маяк». В общей сложности выборка потомков, родившихся в ЗАТО г. Озерска в 1949–1973 гг., составила 25 тыс. человек.

Календарный период рождения детей 1949–1973 гг. был выбран по нескольким причинам: ПО «Маяк» функционирует с 1948 г.,

Таблица 2

Характеристика когорты потомков 1949–1973 гг. рождения

Параметр	Основная группа	Группа сравнения	Всего
Общее число потомков:	14580 (100,0)	10427 (100,0)	25007 (100,0)
мужского пола	7543 (51,7)	5301 (50,8)	12844 (51,4)
женского пола	7037 (48,3)	5126 (49,2)	12163 (48,6)
Живорожденные:	14435 (99,0)	10345 (99,2)	24780 (99,1)
мужского пола	7457 (51,7)	5260 (50,8)	12717 (51,3)
женского пола	6978 (48,3)	5085 (49,2)	12063 (48,7)
Жизненный статус известен, %	96,1	95,6	95,8
Число человеко-лет наблюдения, тыс.	768,7	460,1	1228,7

поэтому вопросы преконцептивного облучения рассматривались не ранее 1949 г.; длительный период рождения потомков выбран для достаточной статистической мощности анализа; в «Регистре здоровья детского населения г. Озерска» дополнительно верифицирована информация за период 1949–1973 гг.; в первые годы работы ПО «Маяк» из-за становления технологии, несовершенства средств индивидуальной защиты, а также существовавших на тот момент нормативов техногенного облучения в контролируемых условиях персонал мог подвергаться радиационному воздействию в значительных дозах. В последующем дозиметрические нагрузки производственного облучения не были столь показательными.

Общий период наблюдения за когортой потомков составил 72 года (01.01.1949 г. – 31.12.2020 г.). Началом наблюдения считалась дата рождения, окончанием – дата события, произошедшего первым: дата установления диагноза, выезда из города, последнего известия, смерти, конца наблюдения за когортой. Жизненный статус по состоянию на 31.12.2020 г. известен для 95,8 % когорты. Суммарное число человеко-лет наблюдения достигло 1 228 741.

Распределение потомков основной группы с учетом преконцептивного внешнего гамма-облучения родителей – работников ПО «Маяк» представлено в табл. 3. Только мать подвергалась преконцептивному действию ионизирующего излучения на ПО «Маяк» среди 14,4 % живорождений и 22,8 % мертворождений в основной группе. Большая часть основной группы приходилась на потомков преконцептивно облученных отцов: 66,6 % – живорождений и 59,3 % – мертворождений. Почти каждый 5-й потомок в основной группе родился в семье, где оба родителя подвергались производственному облучению в преконцептивный период: 19 % живорождений и 17,9 % мертворождений.

Родители–работники ПО «Маяк» подвергались преконцептивному действию гамма-излучения на производстве в широком диа-

пазоне доз: до 4075,6 мГр – среди матерей, до 5653,1 мГр – среди отцов. Например, доза облучения яичников ($Me [Q_1; Q_3]$) была 74,4 [0,4; 367,4], семенников – 126,9 [16,1; 461,8]. Величины средних характеристик преконцептивного облучения, как правило, были выше среди отцов–работников ПО «Маяк».

Эффекты преконцептивного радиационного воздействия. Обращаясь к истокам развития радиационной эпидемиологии эффектов преконцептивного облучения среди потомков работников ПО «Маяк», важно отметить, что ученые-первопроходцы, работая с непознанным ранее материалом, старались изучить все возможные отклонения в развитии потомков. На относительно небольших выборках путем непосредственного клинического наблюдения анализировали параметры физического развития, частоту врожденных пороков развития, функциональные нарушения определенных органов и систем.

Так, в исследовании 1964–1969 гг. в семьях работников радиохимического производства, подвергшихся радиационному воздействию в предельно допустимых дозах, была отмечена дисгармоничность антропометрических данных потомков ($n = 606$), однако, уровень частоты врожденных пороков развития, диагностированных на 1-м году жизни, не превышал показатели в контроле (13,3 и 18,6 % соответственно) [6, 18]. При последующем анализе отклонений в физическом развитии и частоты врожденных аномалий не установлено значимых различий между группой потомков работников ПО «Маяк» и потомками необлученных на производстве родителей; изучение показателей нарушения мозговой гемодинамики (по данным реоэнцефалографии) не выявило значимых различий с контролем [19, 29].

В дальнейшем, наряду с экспериментальными исследованиями радиационно-индуцированных мутаций в половых клетках [32], активно изучали хромосомные аберрации в лимфоцитах у внуков лиц, подвергшихся профессиональному радиационному воздействию на ПО «Маяк» [4], изменения эффекторного и регуляторного звеньев им-

Таблица 3

Распределение потомков основной группы по факту производственного преконцептивного облучения родителей

Параметр	Преко́нцептивное облучение			Общее число потомков
	матери	отца	обоих родителей	
Мертворождение, n (%)	33 (22,8)	86 (59,3)	26 (17,9)	145 (100,0)
Живорождение, n (%)	2079 (14,4)	9614 (66,6)	2742 (19,0)	14 435 (100,0)
Всего, n (%)	2112 (14,5)	9700 (66,5)	2768 (19,0)	14 580 (100,0)

мунитета у потомков [10], трансгенерационные молекулярно-генетические эффекты [2] и нестабильность генома в семьях работников ПО «Маяк» [16, 23].

Результаты многолетних эпидемиологических исследований впервые нашли отражение в диссертационном исследовании Н.П. Петрушкиной [19], показавшей в проспективном обследовании когорты потомков работников ПО «Маяк» отсутствие значимых отклонений в состоянии здоровья до 15-летнего возраста среди детей 1974–1988 гг. рождения.

Учитывая многочисленность группы потомков облученных отцов-работников ПО «Маяк», тема изучения эффектов преконцептивного радиационного воздействия среди них была выделена как отдельное направление. На современном этапе изучение показателей относительного риска заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО) среди потомков мужского пола показало значимое увеличение ЗНО органов пищеварения и брюшины при ОР = 1,61 (95 % ДИ: 1,20–2,13), обусловленное превышением в дозовых интервалах 55–150 и 150–450 мЗв, и ЗНО лимфатической и кроветворной тканей при ОР = 1,25; (95 % ДИ: 1,03–2,28).

В то же время, среди потомков женского пола было найдено значимое превышение показателей опухолей органов дыхания и грудной клетки в группе с дозой на гонады 17,4–55,0 мЗв; зафиксировано достоверное превышение ЗНО мочеполовых органов в дозовом интервале менее 17,4 мЗв и опухолей головного мозга при дозах преконцептивного облучения отцов 55–150 мЗв. Однако значимых доказательств связи риска возникновения ЗНО у потомков работников ПО «Маяк» с накопленной преконцептивной дозой внешнего гамма-облучения на семенники не выявлено: при расчете избыточного относительного риска онкозаболеваемости у потомков как мужского, так и женского пола для всех ЗНО по сумме наблюдений и солидных раков по дозовым интервалам достоверного превышения не установлено [9].

Согласно результатам недавнего комплексного изучения медицинских последствий преконцептивного производственного облучения среди потомков, родившихся в семьях работников ПО «Маяк» в первые годы работы предприятия (1949–1973 гг.) [24], отмечено значимое превышение весоростовых показателей у новорожденных детей работников ПО «Маяк» в сравнении с потомками необлученных лиц. Риск врожденных пороков развития

среди потомков облученных родителей был значимо выше в период 1949–1953 гг., в категориях возраста родителей при рождении детей 31–35 лет и отцов 36 лет и старше; риск хромосомных аномалий и врожденных пороков сердечных камер и соединений был ниже среди потомков облученных родителей. Среди детей работников ПО «Маяк» отмечена более высокая частота неопухолевой патологии по многим классам болезней. Канцерогенный риск некоторых злокачественных новообразований (ЗНО губы, полости рта и глотки, ободочной кишки, центральной нервной системы среди потомков работниц ПО «Маяк») среди потомков облученных родителей был значимо выше, чем в контроле, хотя прямая связь ЗНО с преконцептивным облучением родителей не доказана. Значимо превышали национальный стандарт онкозаболеваемости и отличались более ранним возрастом дебюта (46,6 года) среди потомков облученных матерей ЗНО щитовидной железы у женщин при ОР = 2,33 (95 % ДИ: 1,01–4,51) и головного мозга у мужчин при ОР = 4,13 (95 % ДИ: 1,64–8,37), среди женщин при ОР = 3,58 (95 % ДИ: 1,11–8,32); превышение регионального стандарта получено для ЗНО головного мозга у мужчин при ОР = 3,51 (95 % ДИ: 1,39–7,10). Относительный риск перинатальной смертности и мертворождаемости у потомков работников ПО «Маяк» был значимо выше в период становления предприятия (1949–1953 гг.). Фетоинфантильные потери, мертворождаемость и младенческая смертность у потомков работниц ПО «Маяк» значимо превышали контроль, включая период 1949–1953 гг. Последующие категории смертности отличались более низким уровнем у потомков работников ПО «Маяк» по сравнению с контролем [24].

В результате данного исследования разработаны подходы по совершенствованию медико-эпидемиологического мониторинга состояния здоровья потомков облученных лиц; созданы и зарегистрированы компьютерная база данных и программа для ЭВМ «Регистр здоровья детского населения г. Озерска», разработана Программа специальной диспансеризации потомков лиц, облученных на производстве.

Эффекты внутриутробного радиационного воздействия. Итоги анализа последствий внутриутробного облучения вследствие работы матерей на ПО «Маяк» неоднозначны. Так, в результате многолетнего наблюдения за состоянием здоровья первого поколения потомков матерей-работниц ПО «Маяк» было

отмечено некоторое ухудшение физического развития среди антенатально облученных детей по сравнению с группой детей, чьи матери не подвергались радиационному воздействию (28,0 % против 18,1 %) [20]. Комплексная оценка физического развития выявила большую частоту дисгармоничного развития у детей, облученных антенатально [18].

Среди детей работников радиохимического производства, подвергавшихся внутриутробному облучению, было выявлено статистически значимое увеличение уровня общей заболеваемости в возрасте до 12 лет, среди детей до 6 лет – повышенная частота инфекционных заболеваний и болезней органов дыхания, среди подростков 14–16 лет – признаки нарушения мозговой гемодинамики по данным реоэнцефалографии [19, 29]. Однако сравнение показателей периферической крови не указало на какие-либо значимые различия, полученные результаты соответствовали литературным данным о гемограммах у детей соответствующего возраста в городах России [17, 20].

В результате исследований влияния внешнего гамма-излучения во время внутриутробного развития было показано, что уровень младенческой смертности в группе детей 1948–1953 гг. рождения, чьи матери работали во время беременности на основном производстве, составил 75,5‰ живорожденных и был достоверно больше аналогичного показателя в контрольной группе детей, матери которых не имели контакта с источниками ионизирующей радиации (51,1‰). Зависимость уровня младенческой смертности от дозы *in utero* была найдена в диапазоне доз 0,09–240,3 мГр; значимое увеличение уровня младенческой смертности было отмечено, начиная с дозы *in utero* 25,0 мГр [25].

В структуре смертности внутриутробно облученных людей 1948–1953 гг. отмечена зависимость показателей младенческой смертности от экзогенных причин, таких как инфекционные и паразитарные заболевания, болезни органов дыхания и т.д. [22, 25]. Проведенный анализ показал, что радиационный фактор не являлся ведущим, приводящим к повышению уровня младенческой смертности в группе антенатально облученных людей, и большее значение имели факторы нерадиационной природы.

Впоследствии было установлено значимое превышение частоты мертворождений среди потомков мужского пола в группе, где родители подвергались пролонгированному профессиональному облучению на ПО «Маяк», над

аналогичным показателем в контроле. Данное превышение было обусловлено, в том числе, за счет внутриутробного облучения: отмечен высокий риск мертворождений среди мальчиков, чьи матери подвергались внешнему гамма-излучению во время беременности: $OR = 1,86$ (95 % ДИ: – 1,2–2,9). В дозовой категории 20,1–50 мГр риск мертворождений среди мальчиков основной группы почти в 3 раза превышал данные контрольной группы: $OR = 2,8$ (95 % ДИ: 1,3–6,2) [24].

Структура общей смертности среди внутриутробно облученных людей и контрольной группы не имела различий в целом и при рассмотрении по полу. Статистически значимая связь между радиационным воздействием во время беременности и последующей смертностью от всех причин в различные периоды жизни потомков не подтвердилась [27].

Отдельное внимание уделялось связи внутриутробного облучения с риском злокачественных новообразований у потомков работников ПО «Маяк». В связи с чем активно проводили исследования воздействия радиационного фактора на показатели заболеваемости и смертности от ЗНО среди внутриутробно облученных людей, однако, доказательств прямой связи ЗНО с антенатальным облучением не получили.

Так, среди потомков за период 1948–2009 гг. было выявлено 66 случаев первичных заболеваний солидными раками, за исключением немеланомных раков кожи, однако, статистически значимого повышения избыточного относительного риска (ИОР) заболеваемости от солидных опухолей в результате внутриутробного воздействия гамма-излучения выявлено не было: $ИОР/Гр = -1,0$ (верхний 95 % ДИ: 0,5) [36]. Было зафиксировано 28 случаев смерти от солидных раков и 6 – от лейкозов среди облученных *in utero*, но статистически значимая связь смертности от солидных раков при $OR = 0,94$ (95 % ДИ: 0,58–1,49), $ИОР/Гр = -0,1$ (95 % ДИ: –0,1–4,1) и лейкозов при $OR = 1,65$ (95 % ДИ: 0,52–5,27), $ИОР/Гр = -0,8$ (95 % ДИ: менее –0,8–46,9) от внутриутробного облучения не подтвердилась [34].

Установлено превышение заболеваемости и смертности от ЗНО пищеварительного тракта у потомков мужского пола от работников ПО «Маяк» по сравнению с контролем, в основном вследствие рака желудка. Значимое увеличение относительного риска смерти и ИОР смерти от ЗНО органов пищеварения среди внутриутробно облученных лиц отмечено только в дозовой группе выше 95,0 мГр [26].

В последующем была сформирована объединенная Уральская когорта, в которую вошли люди, подвергшиеся внутриутробному облучению в результате работы их матерей на ПО «Маяк» во время беременности, а также люди, чьи матери проживали во время беременности на радиационно загрязненных территориях реки Теча. Относительный риск развития солидных раков на 10 мГр дозы *in utero* составил 0,99 (95 % ДИ: 0,96–1,01) на основании данных о заболеваемости и 0,98 (95 % ДИ: 0,94–1,01) на основании данных о смертности. Таким образом, не обнаружено убедительных доказательств, что хроническое облучение *in utero* повышает риск развития солидных раков в детском и взрослом возрасте [30].

Риск заболеваемости гемолимфобластомами среди членов объединенной Уральской когорты был незначимо выше у людей, получивших дозу *in utero* ≥ 80 мГр: ИОР = 1,27 (95 % ДИ: –0,20–4,71). Риск заболеваемости последовательно увеличивался на каждые 100 мГр непрерывного внутриутробного облучения: ИОР = 0,77 (95 % ДИ: 0,02–2,56), но отсутствовала связь между риском гемолимфобластозов и постнатальным радиационным воздействием. При анализе смертности от гемолимфобластозов связь с облучением во время антенатального периода и постнатальным облучением не была найдена [35].

В итоге факты выявленных нарушений в состоянии здоровья детей, чьи матери подвергались профессиональному облучению во время беременности, требуют последующего эпидемиологического анализа и более детального рассмотрения. Что в большей степени оказывает влияние на здоровье детей – непосредственное воздействие гамма-облучения во время внутриутробного развития или другие нерадиационные факторы (возраст и здоровье матери на момент зачатия и беременности, состояние материального благополучия, стрессовые факторы, вредные привычки и другие факторы)? Разрешению данного вопроса могло бы помочь применение многофакторного анализа, однако, в 1960–1970 гг. авторы не располагали возможностями его применения, что не умаляет ценности полученных результатов многолетнего комплексного наблюдения за здоровьем потомков работников атомного предприятия.

Перспективные эпидемиологические исследования. В качестве перспективных направлений в эпидемиологических исследованиях когорты потомков работников ПО «Маяк» можно рассматривать:

1) дальнейший мониторинг здоровья потомков, поскольку средний возраст наблюдаемой когорты относительно мал, и эффекты в виде онкопатологии могут проявиться позднее;

2) уточнение количественных оценок радиогенных рисков наследуемых эффектов с опорой на индивидуальные оценки доз;

3) оценку неблагоприятных исходов среди потомков облученных людей с позиции многообразия нерадиационных факторов риска;

4) определение вклада медицинского (диагностического и терапевтического) облучения потомков в канцерогенный риск [15];

5) анализ возможного вклада внутреннего облучения (в частности, инкорпорированным плутонием-239) в риск развития неблагоприятных репродуктивных исходов среди потомков;

6) определение роли темпов накопления прекоцептивных и внутриутробных доз в реализации эффектов производственного облучения.

Заключение

История изучения последствий радиационного воздействия на здоровье потомков производственного объединения «Маяк» многогранна. Анализ истоков становления радиационной эпидемиологии показал, что оценка роли радиационного фактора в генезе наследственных нарушений у потомков в исследованиях была сопряжена со многими трудностями, такими как малые объемы выборок, недостаточная длительность наблюдения, отсутствие детальных медико-дозиметрических сведений, использование методов анкетирования со сложностями верификации исходов по медицинской документации.

Количественные оценки рисков стохастических радиационных эффектов занимают приоритетную позицию в современной системе радиационной защиты. Новые научные данные о последствиях для потомков, родившихся от облученных родителей, а также разработка и внедрение баз данных отдела радиационной эпидемиологии Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики, содержащих дозиметрические и медико-социальные сведения о персонале производственного объединения «Маяк» и потомках работников, позволяют раздвинуть рамки предыдущих исследований и пересмотреть оценки риска, полученные ранее.

Создание системы мониторинга показателей здоровья потомков работников атом-

ной отрасли привело к возможности проведения качественно новых ретроспективных эпидемиологических работ, позволяющих детально анализировать отдаленные эффекты радиационного воздействия на родителей. Выявленные к настоящему времени особенности в когорте потомков работников про-

изводственного объединения «Маяк» свидетельствуют о необходимости продолжения эпидемиологического наблюдения, что важно для радиационной безопасности персонала предприятия и, при необходимости, разработки профилактических мероприятий для минимизации радиогенного риска.

Литература

1. Баторшин Г.Ш., Иванов И.А., Козлов П.В., Мокров Ю.Г. Основные стратегические решения по модернизации системы обращения с РАО на ФГУП «ПО «Маяк» // *Вопр. радиац. безопасности*. 2013. № 3 (71). С. 3–11.
2. Безлепкин В.Г., Кириллова Е.Н., Захарова М.Л. [и др.]. Отдаленные и трансгенерационные молекулярно-генетические эффекты пролонгированного воздействия ионизирующей радиации у работников предприятия ядерной промышленности // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2011. Т. 51, № 1. С. 20–32.
3. Бирюков А.П., Коровкина Э.П., Васильев Е.В. [и др.]. Онкоэпидемиологическая ситуация вблизи объектов атомной промышленности // *Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях*. 2022. № 1. С. 5–11. DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-1-05-11.
4. Бурак Л.Е., Окладникова Н.Д., Петрушкина Н.П., Мусаткова О.Б. Частота хромосомных аберраций в лимфоцитах внуков лиц, подвергшихся профессиональному радиационному воздействию // *Мед. радиология*. 1990. Т. 35, № 8. С. 19–21.
5. Буртова Е.Ю., Аклеев А.В., Барковская Л.П. [и др.]. Заболеваемость психическими расстройствами населения муниципальных районов Челябинской области, подвергшихся аварийному радиоактивному загрязнению в отдаленном периоде // *Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях*. 2021. № 1. С. 22–30. DOI: 10.25016/2541-7487-2021-0-1-22-30.
6. Воронин П.Ф., Воронина З.И., Третьяков Ф.Д. Об оценке частоты распространения уродств среди новорожденных детей, родители которых работали на предприятии атомной промышленности // *Бюл. рад. мед.* 1974. № 4. С. 116–117.
7. Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В. Тритий в моче профессиональных работников ПО «Маяк» в период с 2017 по 2019 г. // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 1. С. 102–110. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-102-110.
8. Евдокимов В.И. Развитие исследований по медико-биологическим и психологическим проблемам ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС (2005–2015 гг.). // *Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях*. 2016. № 1. С. 108–119. DOI: 10.25016/2541-7487-2016-0-1-108-119.
9. Кабирова Н.Р., Окatenко П.В. Последствия отцовского облучения: оценка канцерогенного риска в когорте потомков первого поколения // *Вопр. радиац. безопасности*. 2022. № 1 (105). С. 34–49.
10. Кириллова Е.Н., Лукьянова Т.В., Урядницкая Т.И., Тельнов В.И. Оценка состояния эффекторного и регуляторного звеньев иммунитета у жителей Челябинской области, подвергшихся облучению в связи с проживанием на загрязненной территории вследствие аварии на ПО «Маяк», и у их потомков // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2017. Т. 57, № 1. С. 42–52. DOI: 10.7868/S0869803117010076.
11. Кошурникова Н.А., Окatenко П.В., Сокольников М.Э., Царева Ю.В. Регистр причин смерти населения ЗАТО г. Озерск (Регистр причин смерти). Свидетельство о регистрации базы данных RU 2021621969, 15.09.2021. Заявка № 2021621638 от 05.08.2021.
12. Кузнецова И.С. Радиогенный риск смерти от злокачественных новообразований среди работников, нанятых в разные периоды деятельности ПО «Маяк» // *Вопр. радиац. безопасности*. 2023. № 4 (112). С. 82–89.
13. Легеза В.И., Ушаков И.Б., Попов В.И., Резник В.М. Предпосылки и причины Чернобыльской катастрофы: современный взгляд на проблему // *Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях*. 2025. № 2. С. 70–76. DOI: 10.25016/2541-7487-2025-0-2-70-76.
14. Окatenко П.В., Фомин Е.П., Денисова Е.В. [и др.]. Канцер-регистр населения г. Озерска: структура первичных злокачественных новообразований за период с 1948 по 2016 годы // *Мед. радиология и радиац. безопасность*. 2021. Т. 66, № 5. С. 85–90. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-85-90.
15. Осипов М.В., Дружинина П.С., Сокольников М.Э. Изучение отдаленных последствий воздействия диагностического излучения: возможности и перспективы // *Мед. радиология и радиац. безопасность*. 2025. Т. 70, № 5. С. 58–62. DOI: 10.33266/1024-6177-2025-70-5-58-62.
16. Ослина Д.С., Рыбкина В.Л., Азизова Т.В. Передача радиационно-индуцированной геномной нестабильности от облученных родителей потомкам // *Мед. радиология и радиац. безопасность*. 2022. Т. 67, № 4. С. 10–18. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-4-10-18.

17. Патрушева Н.В., Воронин П.Ф., Воронина З.И. [и др.]. Заболеваемость детей, подвергавшихся пренатальному воздействию гамма-лучей // *Радиация и риск*. 2002. № 13. С. 24–28.
18. Патрушева Н.В., Дощенко В.Н. Характеристика основных показателей физического развития детей, родители которых работали на радиохимическом производстве // *Бюл. рад. мед.* 1971. № 1. С. 107–115.
19. Петрушкина Н.П. Здоровье потомков работников предприятия атомной промышленности – производственного объединения «Маяк». М.: РАДЭКОН, 1998. 184 с.
20. Петрушкина Н.П. Оценка радиационного риска для населения, проживающего вблизи предприятия атомной промышленности. Сообщение 2. Состояние здоровья потомков работников ПО «Маяк» // *Вопр. радиац. безопасности*. 1996. № 3. С. 50–67.
21. Петрушкина Н.П., Кошурникова Н.А., Кабирова Н.Р. [и др.]. Оценка радиационного риска для населения, проживающего вблизи предприятия атомной промышленности. Сообщение 1. Методические подходы к оценкам радиационного риска. Состав Детского регистра // *Вопр. радиац. безопасности*. 1996. № 2. С. 46–50.
22. Петрушкина Н.П., Окатенко П.В., Кабирова Н.Р. [и др.]. Показатели младенческой смертности в когорте детей, подвергшихся внутриутробному облучению при работе их матерей на ПО «Маяк» // *Мед. радиология и радиац. безопасность*. 2007. Т. 52, № 1. С. 23–35.
23. Русинова Г.Г., Глазкова И.В., Азизова Т.В. [и др.]. Изучение нестабильности генома потомков в семьях работников ПО «Маяк»: минисателлит СЕВ1 // *Генетика*. 2014. Т. 50, № 11. С. 1354. DOI: 10.7868/S0016675814110125.
24. Соснина С.Ф. Комплексная оценка медицинских последствий у потомков работников, подвергавшихся пролонгированному профессиональному действию ионизирующего излучения (на примере производственного объединения «Маяк»): автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М., 2025. 48 с.
25. Царева Ю.В., Кабирова Н.Р., Окатенко П.В. Уровень и структура младенческой смертности среди детей, подвергшихся воздействию ионизирующей радиации в период внутриутробного развития // *Вопр. радиац. безопасности*. 1999. № 2. С. 45–51.
26. Царева Ю.В., Окатенко П.В. Оценка канцерогенного риска злокачественных опухолей пищеварительной системы в когорте внутриутробно облученных детей // *Вопр. радиац. безопасности*. 2021. № 4. С. 73–82.
27. Царева Ю.В., Окатенко П.В. Последствия антенатального облучения: общая смертность // *Вопр. радиац. безопасности*. 2019. № 4. С. 64–72.
28. Шалагинов С.А., Аклеев А.В. Недифференцированная олигофрения у потомков внутриутробно облученных жителей прибрежных сел реки Течи // *Радиац. гигиена*. 2022. Т. 15, № 2. С. 52–62. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-52-62.
29. Юрков Н.Н. Изменения нервной системы у детей работников радиохимического производства // *Бюл. рад. мед.* 1961. №1а. С. 123.
30. Akleyev A., Deltour I., Krestinina L. [et al.]. Incidence and mortality of solid cancer in people exposed in utero to ionizing radiation: pooled analyses of two cohorts from the Southern Urals, Russia // *PLoS One*. 2016. Vol. 11, N 8. P. e0160372. DOI: 10.1371/journal.pone.0160372.
31. Balonov M.I., Muksinova K.N., Mushkacheva G.S. Tritium radiobiological effects in mammals: review of experiments of the last decade in Russia // *Health Phys.* 1993. Vol. 65, N 6. P. 713–726. DOI: 10.1097/00004032-199312000-00009.
32. Hirota S., Nakayama C., Yoshinaga S. [et al.]. Relationship between radiation knowledge and radiation effect anxiety on the next generation: An analysis of a questionnaire survey disseminated to residents in Fukushima Prefecture // *Nihon Koshu Eisei Zasshi*. 2023. Vol. 70, N 7. P. 415–424. DOI: 10.11236/jph.22-053. (In Japanese).
33. Koshurnikova N.A., Gilbert E.S., Shilnikova N.S. [et al.]. Studies on the Mayak nuclear workers: health effects // *Radiat. Environ. Biophys.* 2002. Vol. 41. N 1. P. 29–31. DOI: 10.1007/s00411-001-0130-7.
34. Schonfeld S.J., Tsareva Y.V., Preston D.L. [et al.]. Cancer mortality following in utero exposure to occupation radiation among offspring of female Mayak Worker Cohort members // *Radiat. Res.* 2012. Vol. 178. P. 160–165. DOI: 10.1667/rr2848.1.
35. Schüz J., Deltour I., Krestinina L. [et al.]. In utero exposure to radiation and haematological malignancies: pooled analysis of Southern Urals cohorts // *Br. J. Cancer*. 2016. Vol. 116, N 1. P. 1–8. DOI: 10.1038/bjc.2016.373.
36. Tsareva Y., Deltour I., Sokolnikov M. [et al.]. Risk of solid cancer in the offspring of female workers of the Mayak nuclear facility in the Southern Urals, Russian Federation // *Radiat. Environ. Biophys.* 2016. Vol. 55, N 3. P. 291–297. DOI: 10.1007/s00411-016-0650-9.
37. Vasilenko E., Khokhryakov V., Miller S. [et al.]. Mayak worker dosimetry study: an overview // *Health Phys.* 2007. Vol. 93, N 3. P. 190–206. DOI: 10.1097/01.HP.0000266071.43137.0e.

Поступила 08.04.2026 г.

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи.

Участие авторов: С.Ф. Соснина – концепция и дизайн исследования, написание статьи, редактирование окончательного варианта статьи; Ю.В. Царева – написание раздела статьи по эффектам внутриутробного облучения, подготовка списка литературы.

Для цитирования. Соснина С.Ф., Царева Ю.В. История и итоги мониторинга здоровья потомков работников радиационно опасного предприятия // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2026. № 2. С. 46–58. DOI: 10.25016/2541-7487-2026-0-2-46-58.

History and outcomes of health monitoring of the offspring of the radiation-hazardous production facility personnel

Sosnina S.F., Tsareva Y.V.

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics
(19, Ozerskoye highway, Ozyorsk, Chelyabinsk region, 456783, Russia)

✉ Svetlana Faridovna Sosnina – Dr. Med. Sci., Leading Researcher Research Laboratory, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics (19, Ozerskoye highway, Ozersk, Chelyabinsk region, 456783, Russia), ORCID: 0000-0003-1553-0963, e-mail: sosnina@subi.ru;

Yuliya Vyacheslavovna Tsareva – PhD Med. Sci., Senior Researcher Research Laboratory, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical (19, Ozerskoye highway, Ozersk, Chelyabinsk region, 456783, Russia), ORCID: 0000-0001-5559-4457, e-mail: tsareva@subi.su

Abstract

Relevance. In the scientific community radiation exposure effects in next generations have been an issue of concern for decades. However, there is still no consensus regarding hereditary effects in the offspring of exposed parents. Meanwhile, the development of nuclear power industry and the expanded usage of ionizing radiation sources in medicine require specific assessment of genetic damage for the safety of personnel at radiation-hazardous production facilities. In this context, epidemiological follow up of the cohort of the offspring born to the workers of Mayak Production Association (PA) – the first nuclear production facility in Russia that has been operating since 1948 – is a topical area of research.

Objective – analysis of published sources describing the results of the studies among the offspring of Mayak PA workers.

Methodology. Information from the studies published in open access was collected and analyzed. A historical overview of the study of occupational exposure effects at Mayak PA was performed along two main directions: the effects of preconception (before conception of a child) exposure and the effects of in utero exposure during mothers' employment at Mayak PA. The results of the studies performed in the early years of nuclear industry development are presented along with the description of the stages of development of epidemiological follow up of the exposed parents' offspring and a summary of present day understanding of late effects of radiation exposure.

Results and Discussion. Early studies among the offspring of Mayak PA workers performed prospectively and based as a rule on small sample sizes, demonstrated disharmony in physical development and functional disorders in certain organs and systems of the offspring (among in utero exposed individuals). Later epidemiological studies were based on questionnaires and medical examinations of child population; these works were also prospective and were limited to the age of 15, involving offspring born in 1974–1988. It was found that the structure and incidence of disorders in the first two generations of Mayak PA workers' offspring did not differ significantly from the control group and from the national statistics data. Later on, the development of medical archives contributed to accumulation of medical knowledge about health indicators in the offspring and to the extension of the follow-up period. Many years of work with archival data, development and implementation of epidemiological registries, and digitalization of medical records from various sources allowed for retrospective studies based on representative samples of offspring with no age restrictions. Present day studies within the cohort of Mayak PA workers' offspring are based on individually measured dosimetry and detailed records of parental occupational history, on verified medical diagnosis according to ICD-10 (International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems), long follow-up period of the cohort, and relevant statistical methods.

Conclusion. Present day results of health monitoring of Mayak PA workers' offspring demonstrate that despite significant deviations in cancer and non-cancer incidence and mortality in the perinatal period, and in physical development of the offspring born in 1949–1973, no direct interrelation between unfavorable outcomes and occupational radiation exposure of the parents has been proved. The results of the studies in the cohort of Mayak PA workers' offspring indicate a need for further health monitoring among the offspring of exposed parents for the purposes of radiation safety of personnel and for defining the scope of preventive measures.

Keywords: radiation exposure, emergency, accident liquidators, heredity, descendants, Mayak Production Association, preconception irradiation, antenatal irradiation.

References

1. Batorshin G.Sh., Ivanov I.A., Kozlov P.V., Mokrov Yu.G. Osnovnye strategicheskie resheniya po modernizatsii sistemy obrashcheniya s RAO na FGUP «PO «Mayak» [Principal policy of radwaste handling system updating at FSUE Mayak PA]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety problems]. 2013; (3):3–11. (In Russ.)
2. Bezlepkin V.G., Kirillova E.N., Zaharova M.L. [et al.]. Otdalennye i transgeneracionnye molekulyarno-geneticheskie efekty prolongirovannogo vozdejstviya ioniziruyushchej radiatsii u rabotnikov predpriyatiya yadernoj promyshlennosti [Delayed

and Transgenerational Molecular and Genetic Effects of Prolonged Influence of Ionizing Radiation in Nuclear Plant Workers]. *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology]. 2011; 51(1):20–32. (In Russ.)

3. Biryukov A.P., Korovkina E.P., Vasil'ev E.V. [et al.]. Onkoepidemiologicheskaya situatsiya vblizi ob"ektov atomnoj promyshlennosti [Cancer epidemiological situation near nuclear facilities]. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh Situatsiyakh* [Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations]. 2022; (1):5–11. DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-1-05-11. (In Russ.)

4. Burak L.E., Okladnikova N.D., Petrushkina N.P., Musatkova O.B. Chastota hromosomnykh aberratsiy v limfocitakh vnukov lic, podvergshih'sya professional'nomu radiacionnomu vozdeystviyu [Frequency of chromosomal aberrations in lymphocytes of grandchildren of individuals exposed to occupational radiation]. *Medicinskaya radiologiya* [Medical radiology and radiation safety]. 1990; 35(8):19–21. (In Russ.)

5. Burtovaya E.Yu., Akleev A.V., Barkovskaya L.P., Kantina T.E., Litvinchuk E.A. Zabolevaemost' psichicheskimi rasstrojstvami naseleniya municipal'nykh rayonov Chelyabinskoy oblasti, podvergshih'sya avarijnomu radioaktivnomu zagryazneniyu v otdalennom periode [Incidence of mental disorders in the population of municipal areas of the Chelyabinsk region in the remote period after accidental radioactive contamination]. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh Situatsiyakh* [Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations]. 2021; (1):22–30. DOI: 10.25016/2541-7487-2021-0-1-22-30. (In Russ.)

6. Voronin P.F., Voronina Z.I., Tret'yakov F.D. Ob ocenke chastoty rasprostraneniya urodstv sredi novorozhdennykh detej, roditeli kotorykh rabotali na predpriyatii atomnoj promyshlennosti [On assessing the incidence of malformations among newborn children whose parents worked at a nuclear industry enterprise]. *Byulleten' radiacionnoj mediciny* [Radiation medicine bulletin]. 1974; (4):116–117. (In Russ.)

7. Vostrotin V.V., Yanov A.Yu., Finashov L.V. Tritij v moche professional'nykh ra botnikov PO «Mayak» v period s 2017 po 2019 g. [Tritium in the urine of the Mayak PA workers in the period from 2017 to 2019]. *Radiacionnaya gigiena* [Radiation Hygiene]. 2021; 14(1):102–110. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-102-110. (In Russ.)

8. Evdokimov V.I. Razvitiye issledovanij po mediko-biologicheskim i psihologicheskim problemam likvidatorov posledstvij avarii na Chernobyl'skoj AES (2005–2015 gg.) [Development of research on medical, biological and psychological problems in liquidators of aftermath of the Chernobyl nuclear power plant accident (2005–2015)]. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh Situatsiyakh* [Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations]. 2016; (1):108–119. DOI: 10.25016/2541-7487-2016-0-1-108-122. (In Russ.)

9. Kabirowa N.R., Okatenko P.V. Posledstviya otcovskogo oblucheniya: ocenka kancerogenno go riska v kogorte potomkov pervogo pokoleniya [Effects of paternal exposure: carcinogenic risk assessment in the cohort of first-generation offspring]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety problems]. 2022; (1):34–49. (In Russ.)

10. Kirillova E.N., Luk'yanova T.V., Uryadnickaya T.I., Tel'nov V.I. Ocenka sostoyaniya effektivnogo i reguljatornogo zven'ev immuniteta u zhitel'ej Chelyabinskoy oblasti, podvergshih'sya oblucheniyu v svyazi s prozhivaniem na zagryaznennoj territorii vsledstvie avarii na PO «Mayak», i u ih potomkov [Assessment of the Status of Effector and Regulatory Components of Immune System in Chelyabinsk Region Residents Exposed to Radiation Due to Residence in the Area Contaminated as a Result of the Radiation Accident at Mayak PA and in Their Offspring]. *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology]. 2017; 57(1):42–52. DOI: 10.7868/S0869803117010076. (In Russ.)

11. Koshurnikova N.A., Okatenko P.V., Sokol'nikov M.E., Careva Yu.V. Registr prichin smerti naseleniya ZATO g. Ozersk (kratkoe naimenovanie: Registr prichin smerti) [Causes of Death Register of the Ozersk Closed Administrative-Territorial Entity (ZATO) (short name: Causes of Death Register)]. Database Registration Certificate RU 2021621969, 15.09.2021. (In Russ.)

12. Kuznecova I.S. Radiogennyj risk smerti ot zlokachestvennykh novoobrazovanij sredi rabotnikov, nanyatyh v raznye periody deyatel'nosti PO «Mayak» [Radiogenic risk of mortality from malignant neoplasms among Mayak workers employed in different periods of the plant operation]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety problems]. 2023; (4):82–89. (In Russ.)

13. Legeza V.I., Ushakov I.B., Popov V.I., Reznik V.M. Predposylki i prichiny Chernobyl'skoj katastrofy: sovremennyj vzglyad na problem [Preconditions and causes of the Chernobyl disaster: a contemporary insight]. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh Situatsiyakh* [Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations]. 2025; (2):70–76. DOI: 10.25016/2541-7487-2025-0-2-70-76. (In Russ.)

14. Okatenko P.V., Fomin E.P., Denisova E.V. [et al.]. Kancer-registr naseleniya g. Ozerska: struktura pervichnykh zlokachestvennykh novoobrazovanij za period s 1948 po 2016 gody [Cancer Registry of population in the city Ozyorsk: structure of malignant neoplasms first diagnosed in period from 1948 to 2016]. *Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost'* [Medical radiology and radiation safety]. 2021; 66(5):85–90. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-85-90. (In Russ.)

15. Osipov M.V., Druzhinina P.S., Sokol'nikov M.E. Izuchenie otdalennykh posledstvij vozdeystviya diagnosticheskogo izlucheniya: vozmozhnosti i perspektivy [Evaluating the long-term health effects of diagnostic radiation exposure: opportunities and future directions]. *Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost'* [Medical radiology and radiation safety]. 2025; 70(5):58–62. DOI: 10.33266/1024-6177-2025-70-5-58-62. (In Russ.)

16. Oslina D.S., Rybkina V.L., Azizova T.V. Peredacha radiacionno-inducirovannoj genomnoj nestabil'nosti ot obluchennykh roditel'ej potomkam [Transmission of radiation-induced genome instability from irradiated parents to their offspring]. *Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost'* [Medical radiology and radiation safety]. 2022; 67(4):10–18. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-4-10-18. (In Russ.)

17. Patrusheva N.V., Voronin P.F., Voronina Z.I. [et al.]. Zabolevaemost' detej, podvergavshih'sya prenatal'nomu vozdeystviyu gamma-luchej [Incidence in children exposed to prenatal exposure of gamma-rays]. *Radiatsiya i risk* [Radiation and risk]. 2002; (13):24–28. (In Russ.)

18. Patrusheva N.V., Doshchenko V.N. Harakteristika osnovnykh pokazatelej fizicheskogo razvitiya detej, roditeli kotorykh rabotali na radiohimicheskom proizvodstve [Characteristics of the main indicators of physical development of children whose parents worked in radiochemical production]. *Byulleten' radiacionnoj mediciny* [Radiation medicine bulletin]. 1971; (1):107–115. (In Russ.)

19. Petrushkina N.P. Zdorov'e potomkov rabotnikov predpriyatiya atomnoj promyshlennosti – proizvodstvennogo Ob'edineniya «Mayak» [The health of the descendants of workers of the nuclear industry enterprise – the Mayak Production Association]. Moscow. 1998. 184 p. (In Russ.)
20. Petrushkina N.P. Ocenka radiacionnogo riska dlya naseleniya, prozhivayushchego vblizi predpriyatiya atomnoj promyshlennosti. Soobshchenie 2. Sostoyanie zdorov'ya potomkov rabotnikov PO «Mayak» [Assessment of Radiation Risk for Populations Living Near a Nuclear Industrial Facility. Report 2. Health Status of Descendants of Mayak Production Association Workers]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety problems]. 1996; (3):50–67. (In Russ.)
21. Petrushkina N.P., Koshurnikova N.A., Kabirova N.R. [et al.]. Ocenka radiacionnogo riska dlya naseleniya, prozhivayushchego vblizi predpriyatiya atomnoj promyshlennosti. Soobshchenie 1. Metodicheskie podhody k ocenkam radiacionnogo riska. Sostav Detskogo registra [Assessment of Radiation Risk for Populations Living Near Nuclear Industrial Facilities. Report 1. Methodological Approaches to Radiation Risk Assessment. Composition of the Children's Registry]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety problems]. 1996; (2):46–50. (In Russ.)
22. Petrushkina N.P., Okatenko P.V., Kabirova N.R. [et al.]. Pokazateli mladencheskoj smernosti v kogorte detej, podvergnutyyh vnutritrobnomu oblucheniyu pri rabote ih materej na PO «Mayak» [Infant mortality in the cohort of individuals exposed in utero as a result of their mothers' work at "Mayak" PA]. *Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost'* [Medical radiology and radiation safety]. 2007; 52(1):23–34. (In Russ.)
23. Rusinova G.G., Glazkova I.V., Azizova T.V. [et al.]. Izuchenie nestabil'nosti genoma potomkov v sem'yah rabotnikov PO «Mayak»: minisatellit CEB1 [Analysis of genome instability in offspring of Mayak workers' families: minisatellite CEB1]. *Genetika* [Russian Journal of Genetics]. 2014; 50(11):1354. DOI: 10.7868/S0016675814110125. (In Russ.)
24. Sosnina S.F. Kompleksnaya ocenka medicinskih posledstvij u potomkov rabotnikov, podvergnutyyh prolonoirovannomu professional'nomu dejstviyu ioniziruyushchego izlucheniya (na primere proizvodstvennogo ob'edineniya «Mayak») [A comprehensive assessment of the medical consequences in the descendants of workers exposed to prolonged occupational exposure to ionizing radiation (using the Mayak production association as an example) : Abstract dissertation Dr. Med. Sci.]. Moscow. 2025. 48 p. (In Russ.)
25. Tsareva Yu.V., Kabirova N.R., Okatenko P.V. Uroven' i struktura mladencheskoj smernosti sredi detej, podvergnutyyh vozdejstviyu ioniziruyushchej radiacii v period vnutritrobnogo razvitiya [The level and structure of infant mortality among children exposed to ionizing radiation during prenatal development]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety problems]. 1999; (2):45–51. (In Russ.)
26. Tsareva Yu.V., Okatenko P.V. Ocenka kancerogennogo riska zlokachestvennyh opuholej pishchevaritel'noj sistemy v kogorte vnutritrobnno obluchennyh detej [Assessment of the carcinogenic risk of malignant tumors of the digestive system in a cohort of children exposed to intrauterine radiation]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety problems]. 2021; (4):73–82. (In Russ.)
27. Tsareva Yu.V., Okatenko P.V. Posledstviya antenatal'nogo oblucheniya: obshchaya smernost' [Consequences of antenatal irradiation: overall mortality]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety problems]. 2019; (4):64–72. (In Russ.)
28. Shalaginov S.A., Akleev A.V. Nedifferencirovannaya oligofreniya u potomkov vnutritrobnno obluchennyh zhitel'ej pribrezhnyh sel reki Techy [Undifferentiated oligophrenia in the offspring of the in-utero exposed Techa riverside residents]. *Radiacionnaya gigiena* [Radiation Hygiene]. 2022; 15(2):52–62. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-52-62. (In Russ.)
29. Yurkov N.N. Izmeneniya nervnoj sistemy u detej rabotnic radiohimicheskogo proizvodstva [Changes in the nervous system in children of female workers in radiochemical production]. *Byulleten' radiacionnoj mediciny* [Radiation medicine bulletin]. 1961; (1a):123. (In Russ.)
30. Akleyev A., Deltour I., Krestinina L. [et al.]. Incidence and mortality of solid cancer in people exposed in utero to ionizing radiation: pooled analyses of two cohorts from the Southern Urals, Russia. *PLoS One*. 2016; 11(8):e0160372. DOI: 10.1371/journal.pone.0160372.
31. Balonov M.I., Muksinova K.N., Mushkacheva G.S. Tritium radiobiological effects in mammals: review of experiments of the last decade in Russia. *Health Phys*. 1993; 65(6):713–726. DOI: 10.1097/00004032-199312000-00009.
32. Hirota S., Nakayama C., Yoshinaga S., Moriyama N., Yasumura S. Relationship between radiation knowledge and radiation effect anxiety on the next generation: An analysis of a questionnaire survey disseminated to residents in Fukushima Prefecture. *Nihon Koshu Eisei Zasshi*. 2023; 70(7):415–424. DOI: 10.11236/jph.22-053. (In Japanese).
33. Koshurnikova N.A., Gilbert E.S., Shilnikova N.S. [et al.]. Studies on the Mayak nuclear workers: health effects. *Radiat. Environ. Biophys*. 2002; 41(1):29–31. DOI: 10.1007/s00411-001-0130-7.
34. Schonfeld S.J., Tsareva Y.V., Preston D.I. [et al.]. Cancer mortality following in utero exposure to occupation radiation among offspring of female Mayak Worker Cohort members. *Radiat. Res*. 2012; 178:160–165. DOI: 10.1667/rr2848.1.
35. Schüz J., Deltour I., Krestinina L. [et al.]. In utero exposure to radiation and haematological malignancies: pooled analysis of Southern Urals cohorts. *Br. J. cancer*. 2016; 116(1):1–8. DOI: 10.1038/bjc.2016.373.
36. Tsareva Y., Deltour I., Sokolnikov M. [et al.]. Risk of solid cancer in the offspring of female workers of the Mayak nuclear facility in the Southern Urals, Russian Federation. *Radiat. Environ. Biophys*. 2016; 55(3):291–297. DOI: 10.1007/s00411-016-0650-9.
37. Vasilenko E., Khokhryakov V., Miller S. [et al.]. Mayak worker dosimetry study: an overview. *Health Phys*. 2007; 93(3):190–206. DOI: 10.1097/01.HP.0000266071.43137.0e

Received 08.04.2026

For citing: Sosnina S.F., Tsareva Y.V. Istoriya i itogi monitoringa zdorov'ya potomkov rabotnikov radiatsionno opasnogo predpriyatiya. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh*. 2026; (2):46–58. (In Russ.)

Sosnina S.F., Tsareva Y.V. History and outcomes of health monitoring of the offspring of the radiation-hazardous production facility personnel. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2026; (2):46–58. DOI: 10.25016/2541-7487-2026-0-2-46-58