

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-58-69

УДК: 616.12-008.1:614.876(470.55)

## Сравнительный анализ радиогенного риска заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца и цереброваскулярных заболеваний в когорте работников, подвергшихся хроническому облучению

Мосеева М.Б., Азизова Т.В.

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

*Болезни системы кровообращения – ведущая причина смерти во всем мире. Даже небольшая величина радиогенного риска приведет к значительному увеличению числа случаев и смертей, так как число людей, подвергающихся облучению в разных целях, постоянно возрастает. Цель работы – сравнительный анализ радиогенного риска заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца и цереброваскулярных заболеваний в когорте работников Производственного Объединения «Маяк» с использованием нескольких дозиметрических систем. Первый анализ радиогенного риска изучаемых заболеваний/ причин смерти проведен с использованием дозиметрической системы «Дозы-2005», включавшей данные о профессиональном маршруте и дозах внешнего и внутреннего облучения для работников, нанятых на одно из основных производств в период 1948–1972 гг. Следующие дозиметрические системы, «DCRM-2008» и «DCRM-2013», дополнительно включали данные о работниках, нанятых в более поздние годы (1973–1982 гг.). Необходимость уточнения оценок доз внешнего облучения обусловлена тем, что за время мониторинга неоднократно менялись типы используемых дозиметров, не учитывались индивидуальные особенности облучения отдельных работников и так далее, а внутреннего облучения – расхождениями в содержании плутония в отдельных органах/тканях с результатами посмертного анализа аутопсийных образцов. Заключение: Изменения в дозиметрической системе внутреннего облучения от инкорпорированного плутония оказали наиболее значимое влияние на оценку избыточного относительного риска при анализе заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца.*

**Ключевые слова:** ишемическая болезнь сердца, цереброваскулярные заболевания, радиогенный риск, дозиметрическая система, когорта работников ПО «Маяк».

### Введение

В настоящее время изучению влияния ионизирующего излучения на развитие болезней системы кровообращения (БСК) уделяется большое внимание во всем мире. Поскольку БСК – ведущая причина смерти и все большее число людей подвергается облучению в профессиональных, медицинских или иных целях, то даже небольшая величина радиационного риска приведет к значительному увеличению числа случаев и смертей. Известно, что облучение при радиотерапии в высоких дозах может повреждать структуры сердца, однако риск развития БСК после облучения в меньших дозах при медицинских процедурах или при работе с источниками ионизирующего излучения до сих пор неизвестен [1, 2]. Мета-анализ 93 исследований выявил статистически значимо повышенный избыточный относительный риск на 1 Грэй (ИОР/Гр) для всех БСК, равный 0,11 (95 % доверительный интервал (ДИ) 0,08 – 0,14), и, в частности, для ишемической болезни сердца (ИОР/Гр = 0,07; 95 % ДИ 0,05 – 0,10) и цереброваскулярных заболеваний (ИОР = 0,19; 95 % ДИ 0,09 – 0,28), при этом выявлена статистически значимая ( $p < 0,05$ ) гетерогенность между отдельными исследованиями, которая уменьшалась если рассматривались

исследования высокого качества или исследования в области средних или малых доз/мощностей доз [2]. Одной из когорт с высоким качеством данных являлась когорта работников Производственного Объединения (ПО) «Маяк».

Когорта работников ПО «Маяк» – один из важнейших источников информации о радиогенных рисках заболеваний, в том числе БСК. Проведено несколько исследований радиогенного риска заболеваемости и смертности от БСК, прежде всего ишемической болезни сердца (ИБС, 410 – 414 коды МКБ-9) и цереброваскулярных заболеваний (ЦВЗ, 430 – 438 коды МКБ-9), в этой когорте с использованием различных дозиметрических систем. Впервые радиогенный риск заболеваемости и смертности от болезней системы кровообращения был изучен в когорте работников ПО «Маяк», впервые нанятых на работу на один из основных заводов (реакторный, радиохимический или плутониевое производство) в 1948 – 1958 гг. – в период становления предприятия, характеризовавшийся наиболее неблагоприятной радиационной обстановкой на всех заводах. Далее происходило поэтапное расширение изучаемой когорты путем включения работников, нанятых в более поздние годы и подвергшихся облучению в гораздо меньших дозах с расширением периода наблюдения и улучшением индивидуальных оценок доз профессионального облучения.

**Мосеева Мария Борисовна**

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: clinic@subi.su

**Цель исследования** – сравнительный анализ риска заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ в когорте работников ПО «Маяк», подвергшихся хроническому облучению, с использованием нескольких дозиметрических систем.

### Дозиметрические системы для когорты работников ПО «Маяк»

Известно, что дозиметрический контроль внешнего облучения у работников ПО «Маяк» осуществлялся с начала производства, в то время как регулярный контроль внутреннего облучения – лишь с конца 1960-х годов [3]. Результаты данного мониторинга послужили основой для создания дозиметрической системы для работников ПО «Маяк» в рамках совместного российско-американского проекта, одобренного «Объединенным координационным комитетом по изучению последствий радиационных воздействий» [4]. На основе данных профессионального маршрута были идентифицированы работники производств, уточнены условия труда и истории облучения, а также проведена работа по ревизии и реконструкции доз внешнего и внутреннего облучения. Первый анализ риска БСК в когорте работников

ПО «Маяк» был проведен с использованием дозиметрической системы «Дозы-2005» [5–7], включавшей данные о профессиональном маршруте и дозах облучения для работников, нанятых на одно из основных производств (реакторное, радиохимическое и химико-металлургическое) в период 1948–1972 гг. Последующие дозиметрические системы для работников ПО «Маяк» – «ДСРМ-2008» [7–9] и «ДСРМ-2013» [7, 10] – включали также работников основных производств, нанятых в более поздние годы (1973–1982 гг.), и работников вспомогательных производств (ремонтно-механический завод, завод водоподготовки и т.д.), нанятых в период 1948–1982 гг. Во всех дозиметрических системах женщины составляли более 25 % работников. Сравнение дозиметрических систем, использованных при анализе радиогенного риска БСК, представлено в таблице 1.

Следует отметить, что к настоящему времени доступны дозиметрические системы «ДСРМ-2016» и «ДСРМ-2019» [7], но эти системы не были использованы при анализе радиогенного риска БСК в когорте работников ПО «Маяк», поэтому в настоящей работе не рассматриваются.

Таблица 1

**Дозиметрические системы, использованные в анализе риска БСК в когорте работников ПО «Маяк» в хронологическом порядке, и их основные характеристики**

[Table 1]

**Dosimetry systems used in the analyses of circulatory diseases radiation risks in the cohort of Mayak PA workers chronologically and their main characteristics]**

Характеристика дозиметрической системы [Characteristic of the dosimetry systems]	«Дозы-2005» [5–7, 9] [«Doses-2005» [5–7, 9]]	«ДСРМ-2008» [7–9] [«MWDS-2008» [7–9]]	«ДСРМ-2013» [7, 10] [«MWDS-2013» [7, 10]]
Число работников, включенных в дозиметрическую систему [Number of workers included into dosimetry system]	18831	25940	25757
Период найма работников [Period of workers' hire]	1948–1972	1948–1982	
Работники основных производств [Workers at main plants]	100 %	86 %	87 %
Женщины [Females]	25,3 %	25,4 %	
Внешнее облучение [External exposure]			
Число сценариев облучения [Number of exposure scenarios]	19	115	
Ученные факторы [Factors taken into account]	характеристики спектров излучений [characteristics of radiation spectrums] энергетическая и угловая зависимость ответов дозиметров [energy and angular dependencies of dosimeter response] положение работника относительно источника ионизирующего излучения [a worker's position relatively ionizing radiation source] конфигурация (геометрия) и энергия радиационного поля [configuration (geometry) and energy of radiation field] штатное/нештатное облучение [routine/non-routine exposure]		

Окончание таблицы 1

Характеристика дозиметрической системы [Characteristic of the dosimetry systems]	«Дозы-2005» [5–7, 9] [«Doses-2005» [5–7, 9]]	«DCRM-2008» [7–9] [«MWDS-2008» [7–9]]	«DCRM-2013» [7, 10] [«MWDS-2013» [7, 10]]
Работники без архивных записей показаний дозиметров, для которых была реконструирована доза облучения [Workers without archival records of dosimeter measurements, for whom radiation dose was reconstructed]		16 %	20 %
Работники с оценкой дозы от нейтронного излучения [Workers with neutron dose estimates]	–		18 %
Работники с оценками доз медицинского диагностического облучения [Workers with medical diagnostic exposure dose estimates]	–	85 % работников основных производств [85 % of workers at main plants]	
Неопределенность доз облучения [Exposure dose uncertainty]	минимум – максимум [minimum – maximum]	95 % ДИ [95 % CI]	подход множественных дозовых реализаций [multiple dose realizations approach]
Внутреннее облучение [Internal exposure]			
Число или доля обследованных работников [Number or portion of monitored workers]	7217	32 % работников основных производств [32 % workers at main plants]	8043
Модель дыхательного тракта [Respiratory tract model]	модифицированная МКРЗ-66 (учет влияния курения и дисперсности) [Adapted ICRP-66 (smoking and dispersion taken into account)]	модифицированная МКРЗ-66 (учет перехода плутония из паренхиматозной ткани легких в лимфатические узлы, обновленный подход к учету влияния курения на задержку соединений плутония в легких) [Adapted ICRP-66 (plutonium transfer from lung parenchymatous tissue into lymph nodes, updated approach to taking smoking effect on plutonium compounds' retention in lungs into account)]	модифицированная МКРЗ-66 (Байесовский подход) [Adapted ICRP-66 (Bayes approach)]
Биокинетическая модель плутония [Biokinetic plutonium model]	Системная модель [Systemic model]	Модифицированная МКРЗ-67 [Adapted ICRP-67]	Модель Леггетта [Leggett's model]
Модель желудочно-кишечного тракта [Gastro-intestinal tract model]	4-камерная модель МКРЗ-30 (резорбция зависит от транспортабельности) [Four-compartment ICRP-30 (absorption depends on transportability)]	МКРЗ-30 [ICRP-30]	
Режим ингаляционного поступления [Inhalation intake]	индивидуальный, изменяющийся во времени с учетом профессионального маршрута [individual, changing with time accounting for occupational history]	хроническое, экспоненциально снижающееся со временем [chronic, exponentially decreasing with time]	трехступенчатая функция [three-step function]
Взвешивающие тканевые коэффициенты [Weighting tissue coefficients]	МКРЗ-74 [ICRP-74]	МКРЗ-103 [ICRP-103]	
Оценки неопределенности доз [Dose uncertainty estimates]	–	95 % ДИ [95 % CI]	подход множественных дозовых реализаций [multiple dose realization approach]

**Дозиметрия внешнего облучения**

Несмотря на то, что дозы внешнего облучения работников ПО «Маяк» измерялись с помощью индивидуальных дозиметров с начала производства, результаты измерений характеризовали дозу с большой неопределенностью [3]. Причины заключались в том, что за время мониторинга неоднократно менялись типы дозиметров, стандарты и единицы измерения доз облучения, принципы нормирования облучения, не учитывались индивидуальные особенности облучения отдельных работников, в первые годы работы предприятия не оценивались дозы от некоторых радиационных факторов, например, нейтронного облучения. В связи с этим, работа по уточнению оценок индивидуальных доз внешнего облучения, измеренных с помощью плёночных дозиметров, включала: определение сценариев облучения для больших групп работников, работавших в одинаковых условиях труда; описание спектров излучений на рабочих местах, которые представляют собой смесь гамма-, бета- и нейтронного излучений; изучение и расчет поправок на энергетическую и угловую зависимости ответов дозиметров, использованных в разные годы деятельности предприятия; учет положения тела работника относительно источника ионизирующего излучения при выполнении рабочих операций; конфигурацию (геометрию) и энергию радиационного поля; разделение штатного (рутинного) и нештатного облучения; разработка алгоритмов реконструкции индивидуальной дозы облучения при отсутствии измерений.

Окончательные оценки доз внешнего облучения, представленные в рамках дозиметрической системы «Дозы-2005» на 18 органов, представляли собой точечную оценку и диапазон (минимум и максимум) для каждого работника за каждый год найма. Для 16 % работников, у которых отсутствовали индивидуальные измерения, дозы внешнего облучения были реконструированы.

В системе «DCRM-2008» было увеличено число сценариев облучения (до 115), а также доля работников без архивных записей показаний дозиметров, для которых была реконструирована доза облучения. Для 18 % работников предоставлены дозы от воздействия нейтронного излучения, а для 85 % работников основных производств – дозы медицинского диагностического облучения. Окончательные оценки доз внешнего облучения, предоставленные в рамках дозиметрической системы «Дозы-2008» также на 18 органов, представляли собой точечную оценку и 95 % ДИ для каждого работника за каждый год найма. При сравнении доз внешнего гамма-излучения, оцененных для работников с помощью дозиметрических систем «Дозы-2005» и «DCRM-2008», установлено, что улучшения привели к тому, что возросла доля работников, подвергшихся облучению в малых дозах (до 0,5 Гр) [11].

Поскольку с 2010 года работа по оценке доз внешнего облучения проходила без участия представителей ПО «Маяк» преимущественно методом обратного инжиниринга [7, 12], то в рамках разработки дозиметрии внешнего облучения «DCRM-2013» была только разработана гипермодель для оценки неопределенностей доз внешнего облучения методом множественных реализаций.

**Дозиметрия внутреннего облучения**

Следует отметить, что проблема внутреннего облучения персонала ПО «Маяк» фактически сводилась к реше-

нию задач дозиметрии инкорпорированного плутония, поскольку согласно анализу аутопсийных образцов дозы облучения от радиоактивных продуктов деления урана были на несколько порядков ниже [6, 13]. Внутреннему облучению от инкорпорированного плутония подвергались работники радиохимического и плутониевого заводов. К сожалению, только часть этих работников прошла биофизическое обследование на измерение активности плутония в биологических субстратах (моче) и для еще меньшего числа работников доступны прямые измерения концентрации плутония в органах и тканях, полученных при аутопсии. Следует отметить, что в течение своей профессиональной деятельности работники ПО «Маяк» подвергались преимущественно ингаляционному воздействию аэрозолей плутония различного типа и состава.

Дозиметрическая система внутреннего облучения «Дозы-2005» представляла собой комбинацию адаптированной модели дыхательного тракта Публикации № 66 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ-66), учитывающей влияние курения и дисперсности промышленных соединений плутония на легочный клиренс, и модифицированной модели системного обмена соединений плутония Публикации № 67 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ-67) с дополнительными камерами в печени и крови [5–7, 9]. Также был учтен ряд факторов, которые влияли на оценку дозы внутреннего облучения: история облучения (ритм ингаляционного поступления, учет нештатных/аварийных ситуаций), частота и методы биофизических обследований, растворимость/транспортабельность соединений, состояние здоровья работника, проведение хелатотерапии и другие. Следует отметить, что в число 7217 индивидуумов, обеспеченных биофизическими анализами, не включены 501 человек, подвергшихся воздействию в нештатных ситуациях, либо с плохо документированной историей ингаляционного облучения, либо с раневым поступлением [13].

Однако при сравнении оценки содержания плутония, рассчитанного по дозиметрической системе «Дозы-2005» на основе измерений альфа-активности в биологических субстратах (моче), с содержанием плутония, определенным по аутопсийным образцам, у одного и того же работника наблюдались большие расхождения в содержании в легочных лимфатических узлах независимо от показателя транспортабельности соединений плутония и содержания во всем организме для нерастворимых форм плутония [5, 7, 9]. Поэтому дозиметрическая система «Дозы-2005» нуждалась в доработке.

Новая биокинетическая модель «DCRM-2008» состояла из системной модели и модели желудочно-кишечного тракта аналогично «Дозы-2005», а также улучшенной модели дыхательного тракта, учитывающей переход плутония из паренхиматозной ткани в лимфатические узлы и обновленный подход к учету влияния курения на задержку соединений плутония в легких [7, 9, 14]. Последнее связано с тем фактом, что у работников без заболеваний легких, плутоний равномерно распределялся между паренхиматозной тканью и лимфатическими узлами легких. Нерастворимые соединения плутония задерживались в тканях легких, а не в системных тканях, независимо от факта курения или заболевания легких. Однако у курильщиков без заболеваний легких менее растворимые соединения плутония в большей степени задерживались в легочной ткани. У работников с забо-

леваниями легких курение не влияло на задержку соединений плутония любой растворимости.

Измерения биологических субстратов, выполненные в течение 12 месяцев до даты смерти, как правило, не учитывались при расчетах доз внутреннего облучения «DCRM-2008», так как на экскрецию плутония с мочой могло повлиять состояние здоровья работника, тем не менее некоторые из таких измерений были использованы с пометкой «терминальные» поскольку отсутствовали другие надёжные измерения. Также было выявлено 653 работника (383 из них работники основных заводов), подвергшихся нештатному облучению, для таких работников дозы внутреннего облучения не рассчитывались.

Следует отметить, что при расчете доз от внутреннего альфа-излучения в «DCRM-2008» тем измерениям активности плутония в суточной порции мочи, которые были ниже порога принятия решения, рассчитанного в соответствии со стандартом [15], присваивалось значение, равное половине порога принятия решения на момент проведения биофизического исследования. Таким образом, в конечном итоге, доза внутреннего облучения могла быть занижена или завышена. В связи с этим, в «DCRM-2008» для каждого члена когорты, для которого оценивалась доза внутреннего облучения, было введено понятие «валидности», которое представляло собой отношение числа измерений выше порога принятия решения к общему числу измерений и варьировало от 0 до 1.

При сравнении доз внутреннего облучения, оцененных для работников с помощью дозиметрических систем «Дозы-2005» и «DCRM-2008», было установлено, что улучшение привело к тому, что у некоторых работников оценки дозы снизились, а у некоторых наоборот возросли [11], что было связано не только с изменениями в дозиметрической системе, но уточнениями в профессиональном маршруте работников.

Следующая дозиметрическая система «DCRM-2013» для оценки доз внутреннего облучения от инкорпорированного плутония при его ингаляционном поступлении, названная PANDORA, подробно представлена в специальном выпуске журнала Radiation Protection Dosimetry [10]. В PANDORA использован Байесовский подход к определению поступления плутония на основе исследования образцов мочи, учитывающий как неопределенности индивидуальных измерений, так и неопределенности моделей и их параметров. Большое внимание уделено поведению частиц плутония в легких, в частности переходу в химически связанные фракции в легких, поскольку наличие связанного плутония в течение длительного времени увеличивает дозу на легкие, особенно если это происходит в области бронхов и бронхиол. Доза облучения легких также обуславливается клиренсом частиц, который происходит посредством двух конкурирующих процессов, – физический перенос частиц в желудочно-кишечный тракт/лимфоузлы и переход в системные ткани при растворении частиц в легочной жидкости и переходом в кровь (абсорбция). В результате изучения результатов отбора проб воздуха, персональных биофизических обследований и данных аутопсии была разработана трехсту-

пенчатая функция, описывающая условия облучения в течение времени на ПО «Маяк», которая сопоставлялась с профессиональным маршрутом для определения актуального «сценария» для данного работника. Для описания системного обмена плутония доктором Р. Леггеттом была разработана модель, в которой были учтены основные слабые стороны модели МКРЗ, такие как недооценка содержания плутония в печени в ранние и промежуточные сроки после поступления, связанные с недооценкой поступления в кровоток и скорости экскреции с калом, а также включение нереалистичного пути перемещения плутония в мочевой пузырь и слишком упрощенного представления о перемещении плутония в печени вскоре после депонирования [16, 17]. Также были внесены еще ряд изменений, но авторы «DCRM-2013» по внутренней дозиметрии отмечают, что главное отличие системы состояло в учете в явном виде неопределенностей параметров моделей (вероятностные распределения), тогда как в предыдущих исследованиях параметры моделей были дискретными, поэтому на выходе получаются распределения доз облучения, а не одно значение.

В отличие от «DCRM-2008», в которой тем измерениям активности плутония в суточной порции мочи, которые были ниже порога принятия решения, присваивалось значение, равное половине порога принятия решения на момент проведения биофизического исследования (точечная оценка), в «DCRM-2013» учитывалась неопределенность, связанная с измерениями. Предполагалось, что каждое измерение активности плутония в суточной порции распределено логнормально около истинного значения и имеет классическую неопределенность. Если измеренная величина оказывалась ниже ожидаемой, тогда этому измерению присваивалось значение порога принятия решения на момент проведения биофизического исследования.

При сравнении оценок доз внутреннего облучения, рассчитанных согласно «DCRM-2008» и «DCRM-2013», в целом отмечается, что медианное значение суммарной дозы, поглощённой в легких, возросло в 1,8 раз, тогда как в системных органах уменьшилось в 1,3 – 1,4 раза [18]. При сравнении случаев с идентичными исходными данными медианное значение суммарной дозы, поглощённой в легких, возросло в 2,1 раза, тогда как в системных органах уменьшилось на 8 – 13%, однако, если вместе с этим учтены только те измерения активности плутония в биосубстратах (моче), которые выше порога принятия решения, то медианная суммарная доза на легкое увеличилась в 2,7 раз, а соответствующая доза на системные органы увеличилась на 6 – 12%.

В результате проведенной работы в рамках разработки дозиметрических систем внутреннего облучения кроме активности в органах/тканях доступны оценки доз внутреннего облучения от инкорпорированного плутония (на 13 органов/тканей в системе «Дозы-2005» и «DCRM-2008» и 17 органов/тканей в «DCRM-2013»).

### **Сравнение оценок радиогенного риска ИБС и ЦВЗ в когорте работников ПО «Маяк»**

В таблице 2 представлена характеристика когорт работников основных производств ПО «Маяк», в которых был оценен риск заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ.

**Характеристика когорт работников основных производств ПО «Маяк»,  
в которых был оценен риск заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ**

Table 2

**Characteristics of the worker cohorts of the main Mayak PA facilities  
for which incidence and mortality risks for ischemic heart disease and cerebrovascular diseases were estimated]**

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Ссылка [Reference]	Период найма [Period of hire]	Число работников [Number of workers]	Средняя суммарная поглощенная доза, Гр [Mean total absorbed dose, Gy]			
				внешнего гамма-излучения* [external gamma-rays*]		внутреннего альфа-излучения (печень) [internal alpha-particle radia- tion (liver)]	
				M [M] **	Ж [F] **	M [M] **	Ж [F] **
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19, 20]	1948 – 1958	12210	0,91	0,65	0,40	0,81
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21, 22]	1948 – 1972	18763	0,66	0,52	0,26	0,56
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11, 23, 24]	1948 – 1972	18856	0,62	0,51	0,27	0,53
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[25, 26]	1948 – 1982	22377	0,54	0,44	0,23	0,44
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[27–29]	1948 – 1982	22377	0,45	0,37	0,18	0,40

\*В печени в исследованиях [27–29] [In liver in studies [27–29]].

\*\* М – мужчины, Ж – женщины [“M” stands for males, “F” stands for females].

**Оценки риска в зависимости от дозы  
внешнего облучения**

В таблице 3 представлены оценки ИОР на единицу поглощенной дозы от внешнего гамма-излучения для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ в когорте работников ПО «Маяк». Первое исследование риска заболеваемости и смертности от БСК проведено на основе дозиметрической системы «Дозы-2005» в когорте работников, нанятых на одно из основных производств ПО «Маяк» в период 1948–1958 гг. и наблюдавшихся с момента найма по 2000 г. [19, 20]. Статистически значимый возрастающий линейный тренд с дозой от внешнего гамма-излучения был установлен только для заболеваемости ИБС и ЦВЗ. Расширение когорты путем включения работников, нанятых в период 1959–1972 гг., и периода наблюдения по 2005 г. не оказало существенного влияния на полученные оценки ИОР/Гр при использовании той же дозиметрической системы «Дозы-2005» [21, 22].

При переходе на дозиметрическую систему «DCPM-2008» в когорте работников, нанятых в период 1948–1972 гг. и наблюдавшихся до конца 2005 г., наблюдалось увеличение оценок ИОР/Гр от 33 % до 78 % для заболеваемости ИБС и ЦВЗ и смертности от ЦВЗ и уменьшение на 38 % для смертности от ИБС, но при этом наблюдалось увеличение их неопределенностей по сравнению с соответствующими оценками, полученным при использовании системы «Дозы-2005» [11]. В исследовании [23, 24] этой же когорты работников ПО «Маяк» с тем же периодом наблюдения до конца 2005 г. человеко-годы наблюдения до 1960 г. были исключены из анализа риска заболеваемости ИБС и ЦВЗ. Обусловлено это было тем предположением, что, возможно, наблюдавшийся рост заболеваемости до 1960 г.

был связан с улучшением диагностики этих заболеваний в 1950-е годы и выявлялись не диагностированные ранее случаи. Было установлено, что у мужчин риск заболеваемости и смертности от ИБС статистически значимо возрастал с дозой внешнего облучения независимо от периода лагирования, тогда как у женщин риск заболеваемости становился статистически значимым только при периоде лагирования 30 лет, а риск смертности от ИБС был статистически незначим [23]. Несмотря на то, что полученные оценки ИОР/Гр для заболеваемости и смертности от ЦВЗ [24] были ниже, чем в предыдущем исследовании [11], их ДИ перекрывались.

На следующем этапе исследований когорта работников ПО «Маяк» была расширена и дополнительно включала работников, нанятых в период 1973–1982 гг., а также расширен период наблюдения до конца 2008 г. [25, 26]. Это привело лишь к небольшому увеличению оценки ИОР/Гр для заболеваемости ИБС и ЦВЗ, в целом оценки согласовывались с полученными ранее результатами.

Во всех исследованиях, рассмотренных выше, при изучении влияния внешнего облучения на оценки риска была использована доза на весь организм. Лишь в исследованиях [27–29], результаты которых были опубликованы в 2022 и 2023 гг., была использована доза от внешнего гамма-излучения, поглощенная в печени (аналогично исследованию влияния внутреннего облучения на риск БСК), рассчитанная по дозиметрической системе «DCPM-2013». В этих исследованиях также был расширен период наблюдения на 10 лет, что позволило увеличить число изучаемых случаев и смертей. В целом, можно констатировать, что оценки риска для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ и их неопределенности существенно не изменились.

Таблица 3

**Сравнение оценок ИОР на 1 Гр внешнего облучения для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ в когорте работников основных производств ПО «Маяк», полученных с помощью нескольких дозиметрических систем**

[Table 3]

**Comparison of excess relative risk per 1 Gy of external exposure estimated for incidence of and mortality from ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the worker cohort of the Mayak PA main facilities based on several dosimetry systems]**

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Ссылка [Reference]	Орган [Organ]	Период наблюдения [Follow-up period]	Число случаев/смертей [Number of cases/deaths]*	ИОР/Гр (95 % ДИ), период лагирования 10 лет [ERR/Gy (95 % CI), lag period of 10 years]*
Заболеваемость ИБС [IHD incidence]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19]	организм [organism]	1948 – 2000	3716	0,119 (0,051 – 0,186)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[22]	организм [organism]	1948 – 2005	6085	0,114 (0,053 – 0,175)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	организм [organism]	1948 – 2005	6187	0,160 (0,089 – 0,230)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[23]	организм [organism]	1961 – 2005	M[M]: 3888 Ж[F]: 1721	M[M]: 0,11 (0,05 – 0,19) Ж[F]: 0,05 (-0,04 – 0,15)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[26]	организм [organism]	1948 – 2008	7186	0,14 (0,08 – 0,21)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[27]	печень [liver]	1948 – 2018	7722	0,19 (0,12 – 0,26)
Заболеваемость ЦВЗ [CVD incidence]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[20]	организм [organism]	1948 – 2000	4391	0,449 (0,338 – 0,559)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21]	организм [organism]	1948 – 2005	7266	0,397 (0,303 – 0,491)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	организм [organism]	1948 – 2005	7403	0,529 (0,415 – 0,642)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[24]	организм [organism]	1961 – 2008	7174	0,39 (0,31 – 0,46)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[25]	организм [organism]	1948 – 2008	7931	0,49 (0,39 – 0,60)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[28]	печень [liver]	1948 – 2018	9469	0,39 (0,31 – 0,48)
Смертность от ИБС [IHD mortality]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19]	организм [organism]	1948 – 2000	1493	0,066 (-0,018 – 0,149)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[22]	организм [organism]	1948 – 2005	2628	0,061 (-0,011 – 0,133)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	организм [organism]	1948 – 2005	2557	0,038 (-0,033 – 0,109)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[23]	организм [organism]	1948 – 2005	M[M]: 2083 Ж[F]: 469	M[M]: 0,09 (0,02 – 0,16) Ж[F]: 0,00 (-0,12 – 0,15)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[26]	организм [organism]	1948-2008	2848	0,05 (-0,01 – 0,13)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[29]	печень [liver]	1948-2018	3481	0,04 (-0,02 – 0,11)
Смертность от ЦВЗ [CVD mortality]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[20]	организм [organism]	1948 – 2000	752	-0,018 (-0,115 – 0,079)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21]	организм [organism]	1948 – 2005	1494	0,036 (-0,057 – 0,130)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	организм [organism]	1948 – 2005	1382	0,064 (-0,042 – 0,170)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[24]	организм [organism]	1948 – 2008	1551	0,03 (-0,04 – 0,10)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[25]	организм [organism]	1948 – 2008	1567	0,05 (-0,03 – 0,16)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[29]	печень [liver]	1948 – 2018	1808	0,03 (-0,05 – 0,13)

\* М – мужчины, Ж – женщины [“M” stands for males, “F” stands for females].

### Оценки риска в зависимости от дозы внутреннего облучения

Поскольку в настоящее время неизвестно, дозу на какой орган использовать при анализе влияния внутреннего облучения на риск развития БСК, при анализе данных на когорту работников ПО «Маяк» была использована доза от внутреннего альфа-излучения, поглощенная в печени. Доза на печень была выбрана в качестве суррогата дозы на мышцы, которая в свою очередь, вероятно, будет соответствовать дозе на кровеносные сосуды и камеры сердца. Несмотря на то, что дозы на печень и мышцы различаются, они сильно коррелируют друг с другом, поэтому доза на печень может быть использована для анализа зависимости доза-ответ при исследовании риска развития БСК от дозы внутреннего облучения от инкорпорированного плутония.

В таблице 4 представлены результаты анализа ИОР для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ на 1 Гр дозы от внутреннего альфа-излучения, поглощенной в печени, в когорте работников ПО «Маяк» с использованием нескольких дозиметрических систем. Как видно из таблицы 4, достаточно убедительные доказательства получены в отношении влияния внутреннего облучения на заболеваемость от ЦВЗ [11, 20, 21, 25, 28]. Независимо от используемой дозиметрической системы, оценка ИОР/Гр была статистически значимо выше нуля, а при использовании «ДСРМ-2008» и «ДМРС-2013» была близка к величине соответствующей оценки, полученной при анализе влияния внешнего облучения. Не выявлено статистически значимого влияния внутреннего, также как и внешнего, облучения на смертность от ЦВЗ [11, 20, 21, 25, 28].

**Сравнение оценок ИОР на 1 Гр внутреннего альфа-излучения для заболеваемости и смертности от ИБС и ЦВЗ в когорте работников основных производств ПО «Маяк», полученных с помощью нескольких дозиметрических систем**

Таблица 4

[Table 4]

**Comparison of excess relative risk per 1 Gy of internal exposure estimated for incidence of and mortality from ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the worker cohort of the Mayak PA main facilities based on several dosimetry systems]**

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Ссылка [Reference]	Орган [Organ]	Период наблюдения [Follow-up period]	Число случаев/смертей [Number of cases/deaths]*	ИОР/Гр (95 % ДИ), период лагирования 10 лет [ERR/Gy (95 % CI), lag period of 10 years]*
Заболеваемость ИБС [IHD incidence]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19]	печень [liver]	1948 – 2000	2318	0,062 (0,026 – 0,099)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[22]	печень [liver]	1948 – 2005	3740	0,035 (-0,020 – 0,091)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	печень [liver]	1948 – 2005	3513	0,043 (-0,039 – 0,124)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[23]	печень [liver]	1961 – 2005	3089	-0,02 (-0,07 – 0,09)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[26]	печень [liver]	1948 – 2008	3998	0,10 (0,01 – 0,22)
«ДСРМ-2013» [«MWDS-2013»]	[27]	печень [liver]	1948 – 2018	4868	0,14 (0,04 – 0,28)
Заболеваемость ЦВЗ[CVD incidence]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[20]	печень [liver]	1948 – 2000	2847	0,330 (0,174 – 0,487)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21]	печень [liver]	1948 – 2005	4605	0,228 (0,104 – 0,351)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	печень [liver]	1948 – 2005	4466	0,495 (0,293 – 0,698)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[25]	печень [liver]	1948 – 2008	4842	0,46 (0,27 – 0,70)
«ДСРМ-2013» [«MWDS-2013»]	[28]	печень [liver]	1948 – 2018	6093	0,32 (0,16 – 0,51)
Смертность от ИБС [IHD mortality]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[19]	печень [liver]	1948 – 2000	510	0,382 (0,072 – 0,691)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[22]	печень [liver]	1948 – 2005	946	0,348 (0,085 – 0,610)
«ДСРМ-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	печень [liver]	1948 – 2005	778	0,400 (0,081 – 0,718)

Окончание таблицы 4

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Ссылка [Reference]	Орган [Organ]	Период наблюдения [Follow-up period]	Число случаев/смертей [Number of cases/deaths]*	ИОР/Гр (95 % ДИ), период лагирования 10 лет [ERR/Gy (95 % CI), lag period of 10 years]*
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[23]	печень [liver]	1948 – 2005	1353	0,08 (-0,03 – 0,26)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[26]	печень [liver]	1948 – 2008	937	0,38 (0,12 – 0,75)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[29]	печень [liver]	1948 – 2018	1441	0,20 (-0,01 – 0,47)
Смертность от ЦВЗ [CVD mortality]					
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[20]	печень [liver]	1948 – 2000	215	0,191 (-0,153 – 0,535)
«Дозы-2005» [«Doses-2005»]	[21]	печень [liver]	1948 – 2005	513	0,231 (-0,084 – 0,546)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[11]	печень [liver]	1948 – 2005	418	0,137 (-0,190 – 0,464)
«DCPM-2008» [«MWDS-2008»]	[25]	печень [liver]	1948 – 2008	520	0,17 (н/о / н/а – 0,56)
«DCPM-2013» [«MWDS-2013»]	[29]	печень [liver]	1948 – 2018	723	-0,03 (н/о / н/а – 0,26)

\* Н/о – «не определен» [“n/a” stands for “not available”].

Изменения, вносимые в дозиметрическую систему внутреннего облучения, наибольшее влияние оказали на величину оценки ИОР/Гр для заболеваемости и смертности от ИБС. При исследовании когорты работников, нанятых в период 1948–1958 гг. и наблюдавшихся до конца 2000 г., на основе дозиметрической системы «Дозы-2005» установлен ИОР/Гр статистически значимо выше нуля как для заболеваемости, так и для смертности от ИБС [19]. При расширении когорты и периода наблюдения, при использовании той же дозиметрической системы «Дозы-2005» величина оценки ИОР/Гр для заболеваемости ИБС снизилась в два раза и стала статистически незначимой, тогда как величина риска для смертности от ИБС практически не изменилась [22] и оставалась на том же уровне при использовании системы «DCPM-2008» [11, 26], за исключением исследования [23]. При использовании оценок доз внутреннего облучения «DCPM-2013» установлен ИОР/Гр для заболеваемости [27], но не смертности от ИБС [29], статистически значимо выше нуля, при этом величины оценок ИОР/Гр для заболеваемости ИБС были близки при анализе в зависимости от дозы внешнего и внутреннего облучения.

Исследование влияния валидности оценки дозы внутреннего облучения в «DCPM-2008» оказалось некоторое влияние на величину оценки ИОР/Гр заболеваемости ИБС и ЦВЗ (для смертности не проводилось в виду небольшого числа случаев), но исключение работников, у которых имелись измерения активности плутония в биосубстрате ниже порога принятия решения, приводило к значительному увеличению неопределенности полученных оценок риска. При анализе риска заболеваемости ИБС и ЦВЗ с использованием системы «DCPM-2013», оценки ИОР/Гр с учетом валидности не проводились.

### Заключение

Данные на когорту работников ПО «Маяк» – бесценный источник знаний о влиянии хронического профессионального облучения на развитие БСК. Регулярный мониторинг

уровней внешнего, а позднее и внутреннего облучения работников на ПО «Маяк» позволил накопить, а также регулярно обновлять и улучшать массив индивидуальных доз. Проведенный сравнительный анализ в когорте работников ПО «Маяк» выявил ИОР на 1 Гр внешнего гамма-излучения статистически значимо выше нуля для заболеваемости ИБС и ЦВЗ независимо от используемой дозиметрической системы. При анализе внутреннего облучения статистически значимый ИОР/Гр получен также только для заболеваемости ЦВЗ, но не для смертности от ЦВЗ. Однако при анализе влияния внутреннего облучения на заболеваемость и смертность от ИБС отмечено влияние на оценку ИОР/Гр используемой дозиметрической системы, а также расширение когорты и периода наблюдения. Следует отметить, что величины соответствующих оценок ИОР для заболеваемости ИБС и ЦВЗ на 1 Гр внешнего и внутреннего облучения, полученные при использовании «DCPM-2008» и «DCPM-2013», были близки.

### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Мосеева М.Б. – написание текста статьи, анализ и интерпретация литературных данных.

Азизова Т.В. – разработка концепции, осуществление общего научного руководства исследованием, утверждение окончательного варианта рукописи.

### Благодарности

Авторы признательны Банниковой М.В., научному сотруднику Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики ФМБА России, за консультации.

**Информация о конфликте интересов**

Авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов.

**Сведения об источнике финансирования**

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

**Литература**

1. Стюарт Ф.А., Аклеев А.В., Хауэр-Дженсен М. и др. Отчет МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдаленным эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы для тканевых реакций в контексте радиационной защиты. Челябинск: Книга, 2012. 384 с.
2. Little M.P., Azizova T.V., Richardson D.B. et al. Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis // British Medical Journal. 2023. Vol. 380. DOI:10.1136/bmj-2022-072924
3. Василенко Е.К. Дозиметрия внешнего облучения работников ПО «Маяк»: приборы, методы, результаты контроля. Озерск: б.и., 2009. С. 51–100.
4. Koshurnikova N.A., Shilnikova N.S., Okatenko P.V. et al. Characteristics of the cohort of workers at the Mayak nuclear complex // Radiation Research. 1999. Vol. 152, № 4. P. 352–363.
5. Vasilenko E.K., Khokhryakov V.F., Miller S.C. et al. Mayak worker dosimetry study: an overview // Health Physics. 2007. Vol. 93, № 3. P. 190–206. DOI: 10.1097/HP.0000266071.43137.0e.
6. Efimov A. Mayak Worker Dosimetry System: History and Perspectives. URL: [https://icrp.org/admin/2024-05\\_ViennaWor kshop-5.4\\_A-Efimov.pdf](https://icrp.org/admin/2024-05_ViennaWor kshop-5.4_A-Efimov.pdf). (Дата обращения: 31.01.2025).
7. Fountos B.N., Rabovsky J.L. The Department of Energy's Russian Health Studies Program // Health Physics. 2007. Vol. 93, № 3. P. 187–189. DOI: 10.1097/01.HP.0000265218.12646.63.
8. Vasilenko E.K., Scherpelz R.I., Gorelov M.V. et al. External Dosimetry Reconstruction for Mayak Workers. AAHP Special Session Health Physics Society Annual Meeting. 2010. URL: [http://www.hps1.org/aahp/public/AAHP\\_Special\\_Sessions/20 10\\_Salt\\_Lake\\_City/pm-1.pdf](http://www.hps1.org/aahp/public/AAHP_Special_Sessions/20 10_Salt_Lake_City/pm-1.pdf). (Дата обращения: 17.06.2013).
9. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G. et al. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): assessment of internal dose from measurement results of plutonium activity in urine // Health Physics. 2013. Vol. 104, № 4. P. 366–378. DOI: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60.
10. Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 176, № 1–2.
11. Moseeva M.B., Azizova T.V., Grigoryeva E.S., Haylock R. Risks of circulatory diseases among Mayak PA workers with radiation doses estimated using the improved Mayak Worker Dosimetry System 2008 // Radiation Environmental Biophysics. 2014. Vol. 53, № 2. P. 469–477. DOI: 10.1007/s00411-014-0517-x.
12. Napier B.A. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2013): an introduction to the documentation // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 176, № 1–2. P. 6–9. DOI: 10.1093/rpd/ncx2020.
13. Хохряков В.Ф., Хохряков В.В., Суслова К.Г. и др. Достижения в области разработок дозиметрии плутония на ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2006. № 1. С. 36–57.
14. Suslova K.G., Sokolova A.B., Krahenbuhl M.P., Miller S.C. The effects of smoking and lung health on the organ retention of different plutonium compounds in the Mayak PA workers // Radiation Research. 2009. Vol. 171, № 3. P. 302–309. DOI: 10.1667/0033-7587-171.3.302.
15. Health Physics Society. An American National Standard. Performance criteria for radiobioassay. New York: American National Standards Institute; HPS N13.30-1996; 1996.
16. Leggett R.W., Eckerman K.F., Khokhryakov V.F. et al. Mayak worker study: an improved biokinetic model for reconstructing doses from internally deposited plutonium // Radiation Research. 2005. Vol. 164, № 4. P. 111–122. DOI: 10.1667/rr3371.
17. Birchall A., Vostrotin V., Puncher M. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013) for internally deposited plutonium: an overview // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 176, № 1–2. P. 10–31 DOI: 10.1093/rpd/ncx195.
18. Vostrotin V., Birchall A., Zhdanov A. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): internal dosimetry results // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 176, № 1–2. P. 190–201. DOI: 10.1093/rpd/ncw268.
19. Azizova T.V., Muirhead C.R., Druzhinina M.B. et al. Cardiovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948–1958 // Radiation Research. 2010. Vol. 174, № 2. P. 155–168. DOI: 10.1667/RR1789.1.
20. Azizova T.V., Muirhead C.R., Druzhinina M.B. et al. Cerebrovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948–1958 // Radiation Research. 2010. Vol. 174, № 6. P. 851–864. DOI: 10.1667/RR1928.1.
21. Azizova T.V., Muirhead C.R., Moseeva M.B. et al. Cerebrovascular diseases in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948–1972 // Radiation Environmental Biophysics. 2011. Vol. 50, № 4. P. 539–552. DOI: 10.1007/s00411-011-0377-6.
22. Azizova T.V., Muirhead C.R., Moseeva M.B. et al. Ischemic heart disease in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948–1972 // Health Physics. 2012. Vol. 103, № 1. P. 3–14. DOI: 10.1097/HP.0b013e3182243a62.
23. Simonetto C., Azizova T.V., Grigoryeva E.S. et al. Ischemic heart disease in workers at Mayak PA: latency of incidence risk after radiation exposure // PLoS One. 2014. Vol. 9, № 5. P. e96309. DOI: 10.1371/journal.pone.0096309.
24. Simonetto C., Schöllnberger H., Azizova T.V. et al. Cerebrovascular diseases in workers at Mayak PA: the difference in radiation risk between incidence and mortality // PLoS One. 2015. Vol. 10, No 5. P. e0125904. DOI: 10.1371/journal.pone.0125904.
25. Azizova T.V., Haylock R.G.E., Moseeva M.B. et al. Cerebrovascular diseases incidence and mortality in an extended Mayak worker cohort 1948–1982 // Radiation Research. 2014. Vol. 182, № 5. P. 529–544. DOI: 10.1667/RR13680.1.
26. Azizova T.V., Grigoryeva E.S., Haylock R.G.E. et al. Ischaemic heart disease incidence and mortality in an extended cohort of Mayak workers first employed in 1948–1982 // British Journal of Radiology. 2015. Vol. 88, № 1054. P. 20150169. DOI: 10.1259/bjr.20150169.
27. Azizova T.V., Bannikova M.V., Briks K.V. et al. Incidence risks for subtypes of heart diseases in a Russian cohort of Mayak Production Association nuclear workers // Radiation Environmental Biophysics. 2023. Vol. 62, № 1. P. 51–71. DOI: 10.1007/s00411-022-01005-0.
28. Azizova T.V., Moseeva M.B., Grigoryeva E.S., Hamada N. Incidence risks for cerebrovascular diseases and types of stroke in a cohort of Mayak PA workers // Radiation Environmental Biophysics. 2022. Vol. 61, № 1. P. 5–16. DOI: 10.1007/s00411-022-00966-6.
29. Azizova T.V., Bannikova M.V., Grigoryeva E.S., Briks K.V. Mortality from various diseases of the circulatory system in the Russian Mayak nuclear worker cohort: 1948–2018 // Journal of Radiological Protection. 2022. Vol. 42, № 2. DOI: 10.1088/1361-6498/ac4ae3.

Поступила: 25.05.2025

**Мосеева Мария Борисовна** – научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: clinic@subi.su

ORCID: 0000-0003-3741-6600

**Азизова Тамара Васильевна** – заведующая клиническим отделом, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

ORCID: 0000-0001-6954-2674

**Для цитирования: Мосеева М.Б., Азизова Т.В. Сравнительный анализ радиогенного риска заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца и cerebrovasculärных заболеваний в когорте работников, подвергшихся хроническому облучению // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 3. С. 58-69. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-58-69**

## Comparative analysis of radiogenic risk of ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the cohort of workers chronically exposed to radiation

Maria B. Moseeva , Tamara V. Azizova

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical-Biological Agency, Ozyorsk, Russia

*Circulatory diseases are the leading cause of death all around the world. Even a small increase in radiogenic risk would lead to a significant increase in incident cases and deaths as the number of individuals exposed to radiation for different purposes increases constantly. The aim of the study was a comparative analysis of radiogenic risk of incidence and mortality from ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the cohort of Mayak Production Association workers based on several dosimetry systems. The first analysis of studied incident cases and death causes was performed using dosimetry system "Doses-2005" which included data on occupational histories as well as external and internal radiation exposure doses for workers employed at one of the main facilities during 1948–1972. The subsequent dosimetry systems, "MWDS-2008" and "MWDS-2013", additionally included data for workers employed in the later years (1973–1982). The necessity to improve the external dose estimates was conditioned by a number of factors, i.e. using different types of dosimeters during all monitoring period, lack of accounting for individual radiation exposure specificities for separate workers etc.; whereas discrepancies between plutonium activities in some organs/tissues estimated by the systems and the ones measured in autopsy samples made for improvements in internal dosimetry system. Conclusion: The excess relative risk estimate for ischemic heart disease incidence and mortality was the most significantly affected by the improvements in dosimetry system for the internal exposure due to incorporated plutonium.*

**Key words:** ischemic heart disease, cerebrovascular diseases, radiogenic risk, dosimetry system, Mayak workers cohort.

### Authors' personal contribution

Thereby, all authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research, and preparation of the article, as well as read and approved the final version before its publication).

Maria B. Moseeva was responsible for analyzing and interpreting literature data, writing the main part of the text.

Tamara V. Azizova was responsible for developing the concept, providing general scientific management, making final edits.

### Acknowledgments

The authors are grateful to Bannikova M.V., researcher of the Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, for consultations.

### Conflict of interests

The authors state that there is no potential conflict of interest.

### Sources of funding

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

### References

1. Stuart FA, Akleev AV, Hauer-Dzhensen M. ICRP report on tissue reactions, early and late effects in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in the context of radiation protection. Chelyabinsk: Kniga; 2012. 384 p. (In Russian).

### Maria B. Moseeva

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

**Address for correspondence:** 19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: clinic@subi.su

2. Little MP, Azizova TV, Richardson DB, Tapio S, Bernier M, Kreuzer M, et al. Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis. *British Medical Journal*. 2023; 380. DOI: 10.1136/bmj-2022-072924.
3. Vasilenko EK. External radiation dosimetry for Mayak PA workers: equipment, methods, monitoring data. Ozersk: b.i.; 2009. P. 51-100. (In Russian).
4. Koshurnikova NA, Shilnikova NS, Okatenko PV, Kreslov VV, Bolotnikova MG, Sokolnikov ME et al. Characteristics of the cohort of workers at the Mayak nuclear complex. *Radiation Research*. 1999;152(4): 352-363.
5. Vasilenko EK, Khokhryakov VF, Miller SC, Fix JJ, Eckerman K, Choe DO, et al. Mayak worker dosimetry study: an overview. *Health Physics*. 2007;93(3): 190-206. DOI: 10.1097/01.HP.0000266071.43137.0e.
6. Efimov A. Mayak Worker Dosimetry System: History and Perspectives. Available from: [https://icrp.org/admin/2024-05\\_ViennaWorkshop-5.4\\_A-Efimov.pdf](https://icrp.org/admin/2024-05_ViennaWorkshop-5.4_A-Efimov.pdf) [Accessed 31 January 2025].
7. Fountos BN, Rabovsky JL. The Department of Energy's Russian Health Studies Program. *Health Physics*. 2007;93(3): 187-189. DOI: 10.1097/01.HP.0000265218.12646.63.
8. Vasilenko EK, Scherpelz RI, Gorelov MV, Strom DJ, Smetanin MYu. External Dosimetry Reconstruction for Mayak Workers. AAHP Special Session Health Physics Society Annual Meeting. 2010. Available from: [http://www.hps1.org/aahp/public/AAHP\\_Special\\_Sessions/2010\\_Salt\\_Lake\\_City/pm-1.pdf](http://www.hps1.org/aahp/public/AAHP_Special_Sessions/2010_Salt_Lake_City/pm-1.pdf). [Accessed 17 June 2013].
9. Khokhryakov VV, Khokhryakov VF, Suslova KG, Vostrotin VV, Vvedensky VE, Sokolova AB, et al. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): assessment of internal dose from measurement results of plutonium activity in urine. *Health Physics*. 2013;104(4): 366-78. DOI: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60.
10. Radiation Protection Dosimetry. 2017; 176(1-2).
11. Moseeva MB, Azizova TV, Grigoryeva ES, Haylock R. Risks of circulatory diseases among Mayak PA workers with radiation doses estimated using the improved Mayak Worker Dosimetry System 2008. *Radiation Environmental Biophysics*. 2014;53(2): 469-77. DOI: 10.1007/s00411-014-0517-x.
12. Napier BA. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2013): an introduction to the documentation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176(1-2): 6-9. DOI: 10.1093/rpd/ncx020.
13. Khokhryakov VF, Khokhryakov VV, Suslova KG, Vostrotin VV, Tchadilov AE, Sokolova AB, et al. Achievements in plutonium dosimetry developments at Mayak PA. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Questions of radiation safety*. 2006;1: 36-57. (In Russian).
14. Suslova KG, Sokolova AB, Krahenbuhl MP, Miller SC. The effects of smoking and lung health on the organ retention of different plutonium compounds in the Mayak PA workers. *Radiation Research*. 2009;171(3): 302-309. DOI: 10.1667/0033-7587-171.3.302.
15. Health Physics Society. An American National Standard. Performance criteria for radiobioassay. New York: American National Standards Institute; HPS N13.30-1996; 1996.
16. Leggett RW, Eckerman KF, Khokhryakov VF, Suslova KG, Krahenbuhl MP, Miller SC. Mayak worker study: an improved biokinetic model for reconstructing doses from internally deposited plutonium. *Radiation Research*. 2005;164(2): 111-22. DOI: 10.1667/rr3371.
17. Birchall A, Vostrotin V, Puncher M, Efimov A, Dorrian M-D, Sokolova A, et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013) for internally deposited plutonium: an overview. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176(1-2): 202. DOI: 10.1093/rpd/ncx195.
18. Vostrotin V, Birchall A, Zhdanov A, Puncher M, Efimov A, Napier B, et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): internal dosimetry results. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176(1-2): 190-201. DOI: 10.1093/rpd/ncw268.
19. Azizova TV, Muirhead CR, Druzhinina MB, Grigoryeva ES, Vlasenko EV, Sumina MV, et al. Cardiovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948-1958. *Radiation Research*. 2010;174(2): 155-68. DOI: 10.1667/RR1789.1.
20. Azizova TV, Muirhead CR, Druzhinina MB, Grigoryeva ES, Vlasenko EV, Sumina MV, et al. Cerebrovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948-1958. *Radiation Research*. 2010;174(6): 851-64. DOI: 10.1667/RR1928.1.
21. Azizova TV, Muirhead CR, Moseeva MB, Grigoryeva ES, Sumina MV, O'Hagan J, et al. Cerebrovascular diseases in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948-1972. *Radiation Environmental Biophysics*. 2011;50(4): 539-52. DOI: 10.1007/s00411-011-0377-6.
22. Azizova TV, Muirhead CR, Moseeva M., Grigoryeva ES, Vlasenko EV, Hunter N, et al. Ischemic heart disease in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948-1972. *Health Physics*. 2012;103(1): 3-14. DOI: 10.1097/HP.0b013e3182243a62.
23. Simonetto C, Azizova TV, Grigoryeva ES, Kaiser JC, Schöllnberger H, Eidemüller M. Ischemic heart disease in workers at Mayak PA: latency of incidence risk after radiation exposure. *PLoS One*. 2014;9(5): e96309. DOI: 10.1371/journal.pone.0096309.
24. Simonetto C, Schöllnberger H, Azizova TV, Grigoryeva ES, Pikulina MV, Eidemüller M. Cerebrovascular diseases in workers at Mayak PA: the difference in radiation risk between incidence and mortality. *PLoS One*. 2015;10(5): e0125904. DOI: 10.1371/journal.pone.0125904.
25. Azizova TV, Haylock RGE, Moseeva MB, Bannikova MV, Grigoryeva ES. Cerebrovascular diseases incidence and mortality in an extended Mayak worker cohort 1948-1982. *Radiation Research*. 2014;182(5): 529-544. DOI: 10.1667/RR13680.1.
26. Azizova TV, Grigoryeva ES, Haylock RGE, Pikulina MV, Moseeva MB. Ischaemic heart disease incidence and mortality in an extended cohort of Mayak workers first employed in 1948-1982. *British Journal of Radiology*. 2015;88(1054): 20150169. DOI: 10.1259/bjr.20150169.
27. Azizova TV, Bannikova MV, Briks KV, Grigoryeva ES, Hamada N. Incidence risks for subtypes of heart diseases in a Russian cohort of Mayak Production Association nuclear workers. *Radiation Environmental Biophysics*. 2023;62(1): 51-71. DOI: 10.1007/s00411-022-01005-0.
28. Azizova TV, Moseeva MB, Grigoryeva ES, Hamada N. Incidence risks for cerebrovascular diseases and types of stroke in a cohort of Mayak PA workers. *Radiation Environmental Biophysics*. 2022;61(1): 5-16. DOI: 10.1007/s00411-022-00966-6.
29. Azizova TV, Bannikova MV, Grigoryeva ES, Briks KV. Mortality from various diseases of the circulatory system in the Russian Mayak nuclear worker cohort: 1948-2018. *Journal of Radiological Protection*. 2022;42(2). DOI: 10.1088/1361-6498/ac4ae3.

Received: May 25, 2025

**For correspondence:** Maria B. Moseeva – Researcher, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency (19 Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: clinic@subi.su)

ORCID: 0000-0003-3741-6600

**Tamara V. Azizova** – Head of the Research Department of Radiation Epidemiology, Senior Researcher, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0001-6954-2674

**For citation:** Moseeva M.B., Azizova T.V. Comparative analysis of radiogenic risk of ischemic heart disease and cerebrovascular diseases in the cohort of workers chronically exposed to radiation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 3. P. 58-69. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-58-69