

<https://doi.org/10.47183/mes.2025-290>

УДК 613.648.4:614.876



## КОГОРТА РАБОТНИКОВ ПО «МАЯК»: ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И.С. Кузнецова<sup>✉</sup>, М.Э. Сокольников, Н.Р. Кабирова, Ю.В. Царева, Е.В. Денисова, П.В. Окатенко

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

**Введение.** Регистр персонала ПО «Маяк» создан для исследования отдаленных стохастических медицинских последствий профессионального радиационного облучения работников первого в СССР предприятия ядерной промышленности.

**Цель.** Оценка радиогенного риска при пролонгированном профессиональном облучении в когорте работников ПО «Маяк», в том числе в когорте лиц, работавших в условиях штатной радиационной обстановки.

**Материалы и методы.** Выполненная работа является одним из этапов пожизненного ретроспективного эпидемиологического исследования показателей здоровья, в том числе заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований (ЗНО), проводимого на базе медико-дозиметрического регистра работников ПО «Маяк». Доступная для исследования когорта ограничена работниками трех основных производств и двух вспомогательных заводов, а также периодом найма на работу 1948–1982 гг. В исследуемой когорте, основываясь на фактических данных об уровнях облучения и полученных оценках медицинских последствий, выделены две субкогорты: 1948–1958 гг. — субкогорта найма в период освоения технологии и высоких уровней профессионального облучения и 1959–1982 гг. — субкогорта найма в период штатной эксплуатации производства и сопоставимых с современными пределами доз. На современном этапе достигнутый возраст работников, включенных во вторую субкогорту, и объем накопленных данных позволил провести анализ для лиц, работавших в штатных условиях, исключив влияние высоких доз и мощностей доз, и расширить область полученных статистически значимых прямых оценок радиогенного риска ЗНО. Все исследования радиогенного риска в когорте работников ПО «Маяк» проведены с использованием пакета для статистической обработки данных EpiSurv.

**Результаты.** Когорта состоит из 25 755 работников. Жизненный статус в период до 31.12.2018 известен для 94%. В субкогорте 1948–1958 гг. найма средняя накопленная доза гамма-облучения составила 748 мГр, 1959–1982 гг. — 130 мГр. В целом область малых доз гамма-излучения включала 10 304 (40,1% членов когорты) человека. Средняя накопленная доза в легких за счет альфа-облучения инкорпорированным <sup>239</sup>Pu составляла 179,4 мГр, для субкогорт 1948–1958 и 1959–1982 гг. — 329,2 и 41,0 мГр соответственно. Оценка избыточного относительного радиационного риска на 1 Гр дозы альфа-излучения в легких составила 3,5–8,0 на 1 Гр для мужчин в возрасте 60 лет. Не найдено отклонений от линейности. Радиогенный риск снижался с увеличением возраста. Выявлена нелинейная зависимость риска ЗНО печени. Основным отдаленным эффектом внешнего гамма-облучения являлось развитие лейкоза, для которого нелинейная зависимость с модификацией радиационного риска по временным характеристикам, связанным с возрастом на момент облучения, временем, прошедшим с момента облучения, и достигнутым возрастом является лучшей аппроксимацией, чем линейная. Для солидных ЗНО коэффициент риска от внешнего гамма-излучения составил 0,1–0,4 на 1 Гр. Среди лиц, работавших в условиях штатной радиационной обстановки (1959–1982 гг. найма), оценка атрибутивного риска ЗНО, за исключением опухолей органов основного депонирования плутония, позволяет отнести 1–5% случаев к радиационно-индуцированным, причем только вследствие влияния внешнего гамма-излучения.

**Выводы.** Когорта работников ПО «Маяк», обеспеченная высококачественными медико-дозиметрическими данными, является важным источником прямых эпидемиологических оценок радиогенного риска при профессиональном пролонгированном радиационном воздействии. Выделение периода штатной эксплуатации производства, с одной стороны, подтверждает величину канцерогенного риска, с другой — указывает на необходимость расширения периода наблюдения и самой когорты лиц, работавших в условиях, сопоставимых с современными.

**Ключевые слова:** персонал; облучение; радиогенный риск; злокачественные новообразования; неопухолевые заболевания; нормирование; радиационная безопасность

**Для цитирования:** Кузнецова И.С., Сокольников М.Э., Кабирова Н.Р., Царева Ю.В., Денисова Е.В., Окатенко П.В. Когорта работников ПО «Маяк»: характеристика и основные результаты эпидемиологических исследований. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2025;27(4):505–515. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-290>

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания № 11.001.25.800 по теме НИР «Обеспечение индивидуального дозиметрического контроля персонала «Горно-химического комбината», № 11.002.22.800 «Прогноз радиогенного риска заболеваемости и смертности среди персонала предприятия атомной индустрии ПО «Маяк» на период до 2035 г. при сохранении штатной радиационной обстановки».

**Благодарности:** авторы выражают глубокую признательность Нине Александровне Кошурниковой (24.12.1926–13.02.2025), профессору, доктору медицинских наук, организовавшей лабораторию радиационной эпидемиологии, создавшей регистр персонала ПО «Маяк» и до последнего дня работавшей над получением новых знаний в области радиационной безопасности, оставаясь образцом преданности науке.

**Соответствие принципам этики:** одобрение биоэтического комитета не требовалось, поскольку исследование выполнено на основе архивной информации.

**Потенциальный конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Кузнецова Ирина Сергеевна [kuznetsova@subi.su](mailto:kuznetsova@subi.su)

**Статья поступила:** 17.03.2025 **После доработки:** 17.06.2025 **Принята к публикации:** 29.08.2025 **Online first:** 03.10.2025

## MAYAK WORKER COHORT: CHARACTERISTICS AND KEY RESULTS OF EPIDEMIOLOGICAL STUDIES

Irina S. Kuznetsova<sup>✉</sup>, Mikhail E. Sokolnikov, Nailya R. Kabirova, Yulia V. Tsareva, Elena V. Denisova, Pavel V. Okatenko

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

**Introduction.** The medical registry of workers at the Mayak Production Association (PA) was initially established with the purpose of studying the long-term stochastic health effects of occupational radiation exposure at the first nuclear industry enterprise in the USSR.

**Objective.** Assessment of radiogenic risk from prolonged occupational exposure among the Mayak PA worker cohort, including the subcohort of workers exposed to normal radiation conditions.

**Materials and methods.** This study represents one phase of a lifelong retrospective epidemiological investigation of health indicators, including the incidence and mortality from malignant neoplasms (MN), conducted within the framework of the medical-dosimetric registry of Mayak PA workers. The available study cohort is limited to employees of three main production facilities and two auxiliary plants, hired between 1948 and 1982. Within the study cohort, two subcohorts are distinguished based on factual data on radiation exposure levels and assessed medical outcomes. These include the subcohort of 1948–1958, personnel hired during the technology development phase and characterized by high occupational radiation exposure levels and that of 1959–1982, hired during routine operational periods with radiation doses comparable to modern limits. At the current stage, the attained age of workers in the second subcohort and the volume of accumulated data have enabled an analysis focused on individuals having worked under standard conditions, excluding the effects of high doses and dose rates. This has expanded the scope of statistically significant direct estimates of radiogenic MN risk. All studies of radiogenic risk in the cohort of Mayak PA workers were conducted using the Epicure statistical software package.

**Results.** The cohort comprised 25,755 workers. The vital status during the period of up to 31.12.2018 was known for 94% of subjects. In the 1948–1958 subcohort, the mean cumulative gamma radiation dose was 748 mGy, compared to 130 mGy in the 1959–1982 subcohort. Overall, 10,304 individuals (40.1% of the cohort) received low doses of gamma radiation. The mean cumulative lung dose from alpha radiation due to incorporated <sup>239</sup>Pu was 179.4 mGy, with 329.2 mGy and 41.0 mGy for the 1948–1958 and 1959–1982 subcohorts, respectively. The estimated excess relative risk per 1 Gy of alpha radiation lung dose was 3.5–8 for 60-year-old males. No deviations from linearity were found. Radiogenic risk decreased with an increase in age. A nonlinear dose-response relationship was identified for liver MN. The primary long-term effect of external gamma radiation was leukemia development, where a nonlinear model incorporating effect modification by age at exposure, time since exposure, and attained age provided better approximation than a linear model. For solid MN, the risk coefficient from external gamma radiation ranged 0.1–0.4 per 1 Gy. Among workers employed under normal radiation conditions (1959–1982 hiring period), the attributable risk assessment suggests that 1–5% of MN (excluding tumors in plutonium primary deposition organs) were radiation-induced, solely due to external gamma exposure.

**Conclusions.** The Mayak PA worker cohort, with its high-quality medical and dosimetric data, serves as a crucial source for direct epidemiological assessments of radiogenic risks from prolonged occupational radiation exposure. The identification of the routine production operation period not only validates the magnitude of carcinogenic risk but also highlights the need to extend both the follow-up period and the cohort itself to include more workers exposed to conditions comparable to modern standards.

**Keywords:** personnel; exposure; radiogenic risk; malignant neoplasms; non-tumor diseases; regulation; radiation safety

**For citation:** Kuznetsova I.S., Sokolnikov M.E., Kabirova N.R., Tsareva Yu.V., Denisova E.V., Okatenko P.V. Mayak worker cohort: Characteristics and key results of epidemiological studies. *Extreme Medicine*. 2025;27(4):505–515. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-290>

**Funding:** the study was carried out within the state assignment No. 11.001.25.800 on the research topic “Provision of individual dosimetric monitoring for personnel of the Mining and Chemical Combine”, and No. 11.002.22.800 “Forecast of radiogenic risk of morbidity and mortality among personnel of the nuclear industry enterprise Mayak Production Association until 2035 under maintained normal radiation conditions”.

**Acknowledgments:** the authors express their profound gratitude to Nina A. Koshurnikova (24.12.1926–13.02.2025), Professor and Doctor of Medical Sciences, who established the Radiation Epidemiology Laboratory, created the Mayak Production Association personnel registry, and worked tirelessly until her final days to advance knowledge in radiation safety — remaining throughout an exemplar of devotion to science.

**Compliance with ethical principles:** no bioethics committee approval was required as the study was based on archival data.

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

✉ Irina S. Kuznetsova [kuznetsova@subi.su](mailto:kuznetsova@subi.su)

**Received:** 17 Mar. 2025 **Revised:** 17 June 2025 **Accepted:** 29 Aug. 2025 **Online first:** 3 Oct. 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Гигиеническое нормирование ионизирующих излучений базируется на представлениях о медицинских последствиях их действия. Именно поэтому, начиная с первых лет практического использования ионизирующих излучений, допустимые уровни воздействия изменились более чем на порядок: от 500 мЗв в год в 1930-х годах до 20 мЗв в год в настоящее время<sup>1</sup>. Основная причина постепенного уменьшения

пределов доз заключалась в том, что главными неблагоприятными последствиями действия ионизирующих излучений являются стохастические (канцерогенные) эффекты, проявляющиеся, как правило, в отдаленные сроки. Для того чтобы получить представление об опасностях, связанных с их действием, необходим был длительный, до конца не исчерпанный период наблюдения за популяциями облученных лиц, составляющий к настоящему времени максимум 70–75 лет. За это время были не только разработаны методы

<sup>1</sup> Романович ИК, Балонов МИ, Барковский АН, Брук ГЯ, Вишнякова НМ, Голиков ВЮ и др. Комментарии к Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Под ред. академика РАМН Г.Г. Онищенко. СПб.: Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева; 2012. EDN: [YKYHSP](https://doi.org/10.47183/mes.2025-290)

радиационно-эпидемиологических исследований, но и получены (в эпидемиологических и радиобиологических исследованиях) оценки радиогенного риска<sup>2</sup>.

Отбор, оценка качества и значимости результатов научных исследований проводится Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН). По результатам анализа постоянно обновляемых данных о связи показателей заболеваемости, смертности от онкологических заболеваний и доз ионизирующих излучений периодически публикуется научный доклад об уровнях и последствиях воздействия радиации на здоровье человека и окружающую среду. Доклады НКДАР ООН признаются международным сообществом в качестве достоверного и всеобъемлющего источника информации и широко используются для оценки рисков и принятия мер по защите от воздействия радиоактивного излучения. Формулирование рекомендаций в области радиационной безопасности проводит Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ). В СССР и затем в РФ предел дозы облучения персонала радиационных объектов всегда повторял рекомендации МКРЗ [1].

Пожизненное исследование (Life Span Study — LSS) когорты лиц, выживших после взрывов атомных бомб в городах Хиросима и Нагасаки (Япония), остается основным источником количественных оценок радиогенного риска, поскольку имеет большой объем (более 100 тыс. членов когорты) и широкий диапазон уровней радиационного облучения (до 4 Гр) [2]. Когорта представлена как мужчинами, так и женщинами различных возрастов на момент облучения, от детей до стариков, что позволило проводить адекватную оценку популяционных рисков<sup>3</sup>. В последней Публикации 103 МКРЗ, содержащей рекомендации по обеспечению радиационной защиты профессионалов и населения от воздействия источников ионизирующего излучения, указано, что «моделирование риска осуществлялось по данным когорты пожизненного исследования выживших при атомных бомбардировках Японии (LSS), но при этом была изучена литература по эпидемиологии в плане сопоставимости других исследований с оценками, полученными из LSS»<sup>4</sup>. Поэтому с точки зрения обеспечения радиационной безопасности персонала научному сообществу требуется подтверждение результатов, полученных для когорты LSS, на основе данных о последствиях профессионального облучения работников радиационно опасных производств.

Производственное объединение «Маяк» (ПО «Маяк») является первым в СССР предприятием ядерной промышленности. Регистр персонала ПО «Маяк» был создан на базе отдела эпидемиологии для исследования отдаленных стохастических эффектов ионизирующих излучений профессионального радиационного воздействия. Сбор данных был начат в середине 1980-х гг. и продолжается по настоящее время [3]. Выделенная из регистра когорта отличается от других аналогичных когорт [4–6], поскольку является единственной в мире, в которой выявляются достоверные эффекты

как альфа-облучения инкорпорированным плутонием<sup>5</sup>, так и внешнего гамма-облучения.

Цель исследования — оценка радиогенного риска при пролонгированном профессиональном облучении в когорте работников ПО «Маяк», в том числе в когорте лиц, работавших в условиях штатной радиационной обстановки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Критерии включения в исследуемую когорту и разделение на субкогорты

На базе медико-дозиметрического регистра работников ПО «Маяк» проведено многолетнее ретроспективное эпидемиологическое исследование заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований (ЗНО). Изначально регистр персонала ПО «Маяк» содержал информацию только о рабочих, нанятых на три основных производства (реакторы, радиохимическое и химико-металлургическое производства) в период 1948–1972 гг. [7]. Позднее регистр был расширен данными о рабочих следующего десятилетия найма [8], а также двух вспомогательных производств — завода по водоподготовке и ремонтно-механического завода. Расширение регистра продолжается постоянно как за счет увеличения числа лиц, зачисляемых в штат обозначенных производств (регистр содержит информацию о лицах, нанятых до 2016 г. включительно [3]), так и за счет сбора информации о рабочих других подразделений. В настоящий момент в медико-дозиметрический регистр персонала ПО «Маяк» включены работники, нанятые в период 1948–2016 гг. на основные заводы и другие подразделения предприятия.

Доступная в настоящий момент для проведения исследований когорта (MWC — Mayak Worker Cohort (когорта работников ПО «Маяк» — далее Когорта)) ограничена работниками трех основных и двух вспомогательных производств и периодом найма на работу 1948–1982 гг. Ограничения состава когорты связаны с тем, что персонал других подразделений ПО «Маяк» имел менее полный и качественный дозиметрический контроль, в том числе в отношении внутреннего облучения инкорпорированными в организм радионуклидами.

К моменту ввода в эксплуатацию ПО «Маяк» знания о последствиях воздействия радиации на организм человека были немногочисленны. Отдаленность медицинских последствий также внесла задержку в более существенное ограничение уровней радиационного воздействия. В СССР радиационная безопасность базировалась на рекомендациях МКРЗ. В [9] приведены детальные сведения об изменении предела дозы облучения персонала радиационных объектов от уровня 0,1 Р/день и 30 Р/год до годового лимита в 50 мЗв, рекомендованного МКРЗ<sup>6</sup> и введенного в действие Правилами № 333–60<sup>7</sup>.

<sup>2</sup> ICRP Publication 103. Recommendations of the ICRP. Annals of the ICRP; 2008. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>

<sup>3</sup> ICRP Publication 26. ICRP. Recommendations of the ICRP. Ann. ICRP; 1977.

<sup>4</sup> ICRP Publication 103. Recommendations of the ICRP. Ann. ICRP; 2008. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>

<sup>5</sup> ICRP Publication 150. Cancer risk from exposure to plutonium and uranium. Ann. ICRP; 2021. <https://doi.org/10.1177/01466453211028020>

<sup>6</sup> ICRP. Publication 1. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford; 1977.

<sup>7</sup> Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений № 333–60, утв. главным государственным санитарным врачом СССР, 25.06.1960.

В регистре персонала ПО «Маяк» было выделено 4 субкогорты по году найма на основные производства: 1948–1953, 1954–1958, 1959–1963, 1964–1972 гг. найма [10, 11]. Затем была добавлена 5-я субкогорта, 1973–1982 гг. приема на работу и два вспомогательных производства [8]. В настоящее время, основываясь на фактических данных об уровнях облучения и полученных оценках медицинских последствий, выделены две субкогорты: 1948–1958 гг. — субкогорта найма в период освоения технологии и высоких уровней профессионального облучения и 1959–1982 гг. — субкогорта найма в период штатной эксплуатации производства и сопоставимых с современными пределами доз [8, 12].

Все исследования радиогенного риска в когорте работников ПО «Маяк» проведены с использованием методов и программного обеспечения, в частности пакета для статистической обработки данных Epicure<sup>8</sup> [13], аналогичных тем, что применяются в научно-исследовательских работах как в когорте LSS, так и в когортах персонала радиационно опасных производств во всем мире. Табличные значения представлены в виде количественных характеристик, медианного ( $M_e$ ), минимального (min) и максимального (max) значений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Численность когорты, период наблюдения

В таблице 1 представлена численность когорты и субкогорт и распределение работников по полу, году рождения, возрасту на момент найма на предприятие и длительности работы. Когорта состояла из 25 755 работников, в том числе 25% женщин; имела широкий период по году рождения членов регистра (1886–1965 гг.) и по возрасту на момент начала работы на производстве (18–69 лет). Численность субкогорты 1948–1958 гг. найма составляла 13 790 (53,5%) человек, 1959–1982 гг. найма — 11 966 (46,5%). В связи с наличием достаточного количества специалистов-мужчин доля женщин во второй субкогорте составляла лишь 20,7%, в то время как в первые послевоенные годы вклад женщин был выше — 28,2%. Большая часть работников уже закончила свою трудовую деятельность на предприятии. Так, по имеющимся данным, к 2018 г. 98% работников были уволены, в том числе 100% человек из первой субкогорты.

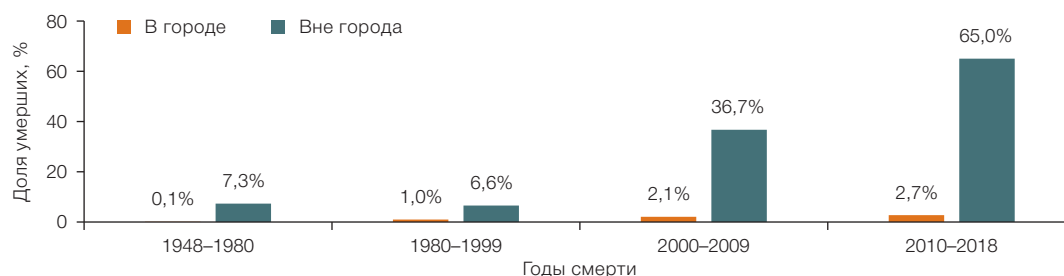


Рисунок составлен авторами по данным регистра персонала ПО «Маяк»

### Рис. Доля умерших с неизвестной причиной смерти

<sup>8</sup> Preston DL, Lubin J, Pierce DA, McConney ME, Shiinikova NS. Epicure Manuals. URL: <https://hirosoft.com/wp-content/uploads/nethelp/NetHelp/index.html#!Documents/userguide.htm> (дата обращения: 06.05.2025).

<sup>9</sup> Международная классификация болезней и проблем, связанных со здоровьем (International Classification of Diseases and Related Health Problems) МКБ-10 Версия:2019.

<sup>10</sup> Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных».

Информация о жизненном статусе членов когорты (а именно: год выезда из города, местонахождение, данные о смерти) собрана и подготовлена для использования в эпидемиологических исследованиях за период по 2018 год включительно (табл. 2). Жизненный статус известен для 24 146 лиц (93,8%). Среди лиц с известным жизненным статусом 17 810 человек (73,8%) умерли, в субкогорте лиц первого десятилетия найма умерли 89,0%, в субкогорте 1959–1982 гг. найма — 57,1%. Прирост количества умерших за последние годы (2009–2018 гг.) был существенен (23,3% от общего количества смертей за 70-летний период наблюдения). Расширение периода наблюдения до 31.12.2018 позволило получить более 1 млн человеко-лет наблюдения для анализа радиогенного риска по показателям смертности.

### Информация о причинах смерти и онкологических заболеваниях

Причина смерти закодирована в соответствии с двумя Международными статистическими классификациями болезней<sup>9</sup> и проблем, связанных со здоровьем, 9 и 10 пересмотров (МКБ-9, МКБ-10). Для каждого работника указаны оба кода.

Для всех лиц, умерших в городе, информация о причине смерти получена из медицинских источников или записей актов гражданского состояния. В связи с доступностью медицинской информации среди лиц, умерших в городе, доля неизвестной причины смерти составляет 1,6% за весь период наблюдения и 2,7% за 2010–2018 гг.

Для лиц, выехавших из города, получить информацию о причине смерти из официальных источников в настоящий момент практически невозможно. Однако и до принятия Федерального закона «О персональных данных»<sup>10</sup> это являлось трудной задачей. Как следствие, среди выехавших и умерших до 2000-х гг. количество лиц с неизвестной причиной смерти составляло ≈7%, позднее — в среднем около 50% (рис.). Основным источником данных о причине смерти на протяжении последних 20 лет остаются контакты с родственниками.

Структура причин смерти незначительно отличалась в зависимости от периода найма на производстве: в среднем 47,8% смертей обусловлены сердечно-сосудистыми заболеваниями, 24,3% — злокачественными

Таблица 1. Количественный состав когорты работников ПО «Маяк»

Количественная характеристика	Годы найма		
	1948–1958	1959–1982	1948–1982
Количество работников, чел.	13 790	11 965	25 755
мужчин	9907	9486	19 393
женщин	3883 (28,2%)	2479 (20,1%)	6362
По году рождения			
ранее 1930	8080	1004	9084
1930–1950	5710	6867	12 577
1950–1965	–	4094	4094
диапазон г.р. $M_e$ (min–max)	1928 (1886–1942)	1944 (1893–1965)	1935 (1886–1965)
По возрасту найма на ПО «Маяк», годы			
<20	4369	5462	9831
20–30	7163	4372	11 535
30–55	2243	2107	4350
55>	15	24	39
диапазон возрастов $M_e$ (min–max)	22,4 (14–65)	20,8 (14–69)	21,8 (14–69)
По длительности работы на ПО «Маяк», годы			
<5	3624	2730	6354
5–20	5121	3571	8692
20–40	4001	4144	8145
40<	1044	1520	2564
длительность работы ( $M_e$ )	11	18	14
Трудовой статус			
уволены	13 790	11 511	25 301
продолжают работать по состоянию на 2018 г.	0	454	454

Таблица составлена авторами по данным регистра персонала ПО «Маяк»

новообразованиями (ЗНО), 13,1% — внешними причинами (табл. 3). В отличие от данных о смерти, которые получены для всех членов исследуемой когорты независимо от их места жительства, на текущий момент информация о заболеваниях доступна только в период проживания человека в городе Озерске. Все случаи закодированы согласно МКБ-9 и МКБ-10. Кроме того, данные включали морфологический диагноз ЗНО в соответствии с Международной классификацией болезней — онкология (МКБ-О)<sup>11</sup>. Всего за период 1948–2018 гг. диагностировано 4285 заболеваний злокачественными новообразованиями у 3805 работников. За последние 19 лет наблюдения

(2000–2018 гг.) количество случаев заболеваний ЗНО составило 49,2% (2107 случаев) — практически столько же, сколько за предыдущие 52 года наблюдения 1948–1999 гг. (2178 случаев).

#### Дозиметрические данные

Дозиметрическая информация — один из основных блоков данных для эпидемиологических исследований радиогенного риска. Поэтому наряду с идентификацией членов когорты, постоянным обновлением индивидуальных данных о жизненном статусе и сведений о диагностированных заболеваниях в 1990-е гг. была

<sup>11</sup> Международная классификация болезней — онкология (МКБ-О), 3-е изд., 1-й пересмотр. СПб.: «Вопросы онкологии», 2017.

Таблица 2. Жизненный статус в когорте работников ПО «Маяк» (период наблюдения до 31.12.2018)

Количественная характеристика	Годы найма						
	1948–1958		1959–1982		1948–1982		
	в городе	вне города	в городе	вне города	в городе	вне города	всего
Количество работников, чел.	6478	7311	8530	3436	15 008	10 747	25 755
с известным жизненным статусом:	6478	6148	8530	2990	15 008	9138	24 146
живы	693	696	3915	1032	4608	1728	6336
умерли	5785	5452	4615	1958	10 400	7410	17 810
потеряны из-под наблюдения (выбыли за пределы РФ)	0	1163 (131)	0	446 (146)	0	1609 (277)	1609
$M_e$ возраста дожития, годы	72,0	69,7	65,0	64,1	67,5	67,6	67,6
$M_e$ длительности наблюдения, годы	45,8	44,8	40,9	41,5	42,3	43,4	42,5
Количество человеко-лет наблюдения	285 621	298 546	338 662	134 088	624 283	432 634	1 056 917
Количество человеко-лет наблюдения при проживании в городе	348 938		369 600		718 538		

Таблица составлена авторами по данным регистра персонала ПО «Маяк»

начата работа по ревизии и реконструкции поглощенных в отдельных органах доз (далее — дозы) внешнего и внутреннего облучения. В результате было последовательно разработано пять поколений дозиметрических систем с оценками доз внешнего облучения («Дозы-1999», «Дозы-2000», «Дозы-2005», «Дозы-2008» и «Дозы-2013»), а также семь поколений с оценками содержания в организме  $^{239}\text{Pu}$  и соответствующих доз внутреннего облучения («Дозы-1999», «Дозы-2000», «Дозы-2005», «Дозы-2008», «Дозы-2013», «Дозы-2016», «Дозы-2019») [14–21].

С момента пуска на ПО «Маяк» первого промышленного реактора (1948 г.) персонал предприятия был обеспечен индивидуальными дозиметрами для измерения дозы от внешнего гамма-излучения [14–16]. С 1984 г. началось плановое измерение нейтронной составляющей дозы. Из числа лиц исследуемой когорты все 25 755 работников (100%) обеспечены дозиметрической информацией о внешнем облучении, в том числе 80% оценок годовых доз основаны на показаниях индивидуальных дозиметров, а для 29% членов когорты есть, по крайней мере, одна годовая доза, оцененная с использованием только косвенных данных. Для 2063 работников (8,0%) анализ данных о профессиональном маршруте позволил убедиться в отсутствии профессионального внешнего облучения.

Наборы значений годовых доз внешнего облучения в различных поколениях дозиметрических систем отличаются в основном расширением перечня органов, для которых оценены дозы, и численностью когорты. В 1949–1958 гг. значения средних годовых доз гамма-облучения персонала («Дозы-2013», индивидуальный эквивалент дозы —  $\gamma\text{Hr}_{10}$ ) превышали 50 мЗв, снижаясь до уровня 5–10 мЗв в 1968–1989 гг. Начиная с 1990 г. средняя доза не достигала 5 мЗв в год.

В целом в область малых доз входило 10 304 человека (40,1% членов когорты). За весь период работы в субкогорте 1948–1958 гг. найма средняя накопленная доза гамма-облучения составила 748 мГр, в субкогорте 1959–1982 гг. — 130 мГр.

Ежегодные дозы гамма-излучения оценены по 2007 г. включительно. В связи с прекращением участия специалистов ПО «Маяк» в совместных исследованиях доступ к данным о дозах внешнего облучения с 2008 г. и позднее ограничен.

Анализ аутопсийного материала работников исследуемой когорты показал, что проблема внутреннего облучения персонала ПО «Маяк», включенного в исследуемую когорту, фактически сводилась к решению задач дозиметрии инкорпорированного ингаляционным путем  $^{239}\text{Pu}$ , поскольку дозы облучения от радиоактивных продуктов деления урана были на несколько порядков ниже [17, 18].

Оценки содержания нуклида и доз в органах и тканях работников основаны на интерпретации результатов измерений активности  $^{239}\text{Pu}$  в моче [19–21]. Последняя дозиметрическая система «Доза-2019» включает оценки доз в 17 органах и тканях, в функциональных отделах легких для 8395 работников. Накопленные дозы в органах как основного депонирования плутония, так и органах системного пула существенно различаются, достигая максимальных значений в костной поверхности и минимальных — в желудке, кишечнике и мышцах.

Средняя накопленная доза в легких среди обследованных исследуемой когорты составила 179,4 мГр, для субкогорт 1948–1958 и 1959–1982 гг. — на уровне 329,2 и 41,0 мГр соответственно. В первой субкогорте накопленная доза более 100 мГр отмечена у 1394 (34,6%) работников, во второй — только у 9,2% человек. В то же время суммарная доза менее 5 мГр

**Таблица 3. Структура причин смерти и заболеваний злокачественными новообразованиями работников ПО «Маяк» (период наблюдения до 31.12.2018)**

Причина смерти / заболевания	Смертность, чел. — %	Заболеваемость ЗНО*, чел. — %
Причина смерти известна	15 767 — 100	—
Злокачественные новообразования*	3837 — 24,3	4285 — 100
солидные ЗНО*	3615 — 94,2	4056 — 94,7
рак желудка <sup>†</sup>	563 — 15,6	455 — 11,2
рак ободочной кишки, ректосигмоидного соединения и прямой кишки	425 — 11,8	529 — 13,0
рак печени и внутрипеченочных желчных протоков <sup>‡</sup>	114 — 3,2	76 — 1,9
рак поджелудочной железы <sup>‡</sup>	179 — 5,0	148 — 3,6
рак легких <sup>‡</sup>	1021 — 28,2	720 — 17,8
немеланомный рак кожи <sup>‡</sup>	18 — 0,5	571 — 14,1
рак молочной железы <sup>□</sup>	130 — 15,0	180 — 15,3
рак женских половых органов <sup>□</sup>	101 — 11,7	157 — 13,4
рак предстательной железы <sup>■</sup>	147 — 4,9	266 — 8,6
рак мочевого пузыря <sup>‡</sup>	83 — 2,3	268 — 6,6
рак почек, других и неуточненных мочевых органов <sup>‡</sup>	105 — 2,9	161 — 4
локализация ЗНО неизвестна <sup>‡</sup>	151 — 4,2	40 — 1
гемобластозы*	222 — 5,8	229 — 5,3
лейкозы <sup>‡</sup>	129 — 58,1	114 — 49,8
Болезни крови и кроветворных органов*	20 — 0,1	—
Болезни системы кровообращения*	7538 — 47,8	—
ишемическая болезнь сердца <sup>#</sup>	4067 — 54,0	—
цереброваскулярные заболевания <sup>#</sup>	2510 — 33,3	—
Внешние причины*	2061 — 13,1	—
Остальные причины*	2311 — 14,7	—

Таблица составлена авторами по данным регистра персонала ПО «Маяк»

**Примечание:** \* — % от известных причин смерти; † — % от злокачественных новообразований; ‡ — % от солидных злокачественных новообразований; # — % от болезней системы кровообращения; □ — % от злокачественных новообразований среди женщин; ■ — % от злокачественных новообразований среди мужчин; ♦ — учтены только заболевания, диагностированные при проживании в городе Озерске; «—» — данные о заболеваниях неопухолевой природы в регистре не учитываются.

в легких получена у 264 (6,5%) обследованных работников первого десятилетия найма и у 1734 (39,7%) работников, нанятых после 1958 г. Дозы в системном пуле органов на два порядка ниже: средняя доза в желудке составляла 1,2 мГр, дозы накопления более 5 мГр были выявлены у 4,7% обследованных работников, причем во второй субкогорте — только у 13 человек.

Доля обследованных работников исследуемой когорты составляла лишь 32,6%. Даже

по состоянию на 2018 г. количество лиц, доступных для проведения измерений, т.е. лиц, проживающих в городе, составило около 2000 человек, в том числе менее 200 человек первых 10 лет работы ПО «Маяк». Для оценки доз у лиц, оставшихся необследованными на содержание плутония в организме, был использован метод на основе данных о рабочем месте (Job Exposure Matrix — JEM). Применение методологии JEM позволило оценить

дозы внутреннего облучения почти для всех членов когорты — 25 423 (98,7%) человека.

Когорта работников ПО «Маяк» является главным в мире источником знаний о медицинских последствиях профессионального облучения инкорпорированным плутонием. К основным стохастическим последствиям инкорпорации через дыхательные пути различных соединений плутония относится рак легких. Многочисленные исследования, проведенные в когорте работников ПО «Маяк», основанные на различных дозиметрических системах, периодах наблюдения, включающие нерадиационные факторы, позволили получить модели зависимости частоты рака легких от дозы альфа-излучения в легких и статистически значимые оценки параметров [22–24].

Оценка избыточного относительного радиационного риска на 1 Гр дозы (ИОР/Гр) в легких составила 3,5–8,0 на 1 Гр для мужчин в возрасте 60 лет. Не было найдено отклонений от линейности дозовой зависимости. Значения радиогенного риска в большей степени зависели от статуса курильщика, нежели от пола, хотя в когорте работников ПО «Маяк» эти факторы имели среднюю степень корреляции ( $r = 0,61$ ). Кроме того, избыточный риск статистически значимо снижался с возрастом. Результаты исследований в когорте работников ПО «Маяк» также показали зависимость риска ЗНО других органов основного депонирования плутония (печень, кости) от дозы альфа-излучения. Для ЗНО печени была выявлена нелинейная зависимость, хотя она обусловлена только высокими дозами.

Для остальных солидных опухолей, а также для ЗНО лимфатической и кроветворной тканей как по показателям заболеваемости, так и по смертности не было доказано влияние уровня воздействия инкорпорированным нуклидом на частоту исходов.

Помимо изучения последствий облучения плутонием, в когорте работников ПО «Маяк» получены оценки радиационного риска злокачественных новообразований в зависимости от уровня внешнего гамма-облучения. Основным отдаленным эффектом внешнего гамма-облучения в когорте работников ПО «Маяк» являлось развитие лейкоза. Радиационный риск заболеваемости лейкозом, за исключением хронического лимфоидного лейкоза, составил  $\approx 3$  на 1 Гр дозы в красном костном мозге при использовании линейной зависимости [25–27]. Однако статистически значимо лучше данные описывала нелинейная (чисто квадратичная или линейно-квадратичная) зависимость с модификацией радиационного риска по временным характеристикам, связанным с возрастом на момент облучения, временем, прошедшим с момента облучения, и достигнутым возрастом [26, 27].

Для солидных ЗНО коэффициент ИОР/Гр от внешнего гамма-излучения составлял в различных исследованиях 0,1–0,4 на 1 Гр [28–30]. При изучении влияния нерадиационных факторов воздействия (пола, курения, типа производства, достигнутого возраста, возраста на момент найма) как модифицирующих

факторов радиогенного риска не было получено статистически значимых различий.

Для разработки моделей с целью прогнозирования риска ЗНО у работников современных производств важно учитывать, что условия работы, в том числе дозовые нагрузки, на современных предприятиях отличаются от условий периода становления отрасли. Исследования радиогенного риска ЗНО профессионального облучения в области накопленных доз, сопоставимых с современными установленными пределами, проводятся во всех странах с развитой атомной промышленностью и ядерно-энергетическим комплексом. Значительные усилия прикладываются для создания обширных баз данных о работниках ядерной энергетики для использования в эпидемиологических исследованиях [31–40].

Проведенная оценка радиогенного риска заболеваемости солидных ЗНО, за исключением ЗНО органов основного депонирования плутония, в зависимости от уровня сочетанного профессионального гамма- и альфа-облучения в когорте лиц, работавших в условиях штатной радиационной обстановки (1959–1982 г. найма), показала, что имело место увеличение заболеваемости ЗНО при дозах 0,5–1,0 Гр внешнего облучения (относительный риск ОР = 0,15; 95% ДИ: -0,21–0,51) и в диапазоне доз до 0,005 Гр альфа-облучения (ОР = 0,30; 95% ДИ: 0,07–0,53). Линейный коэффициент радиационного риска заболеваемости ЗНО (ИОР/Гр) в зависимости от дозы гамма-излучения статистически значимо отличался от 0 только на 90% уровне (0,36; 95% ДИ: -0,02–0,85; 90% ДИ: 0,03–0,76) без учета дозы альфа-излучения [41]. Оценки линейного коэффициента ИОР/Гр для дозы альфа-излучения были отрицательными<sup>12</sup>.

При исследовании показателей онкосмертности с использованием линейной функции «доза-эффект» коэффициент избыточного риска был нулевым для дозы альфа-излучения и положительным, но статистически незначимым для дозы гамма-излучения (ИОР: 0,17/Гр; 95% ДИ: -0,24–0,68)<sup>13</sup>. При интервальной оценке положительной и статистически значимой оказывается только оценка избыточного риска в области высоких доз внешнего облучения более 0,5 Гр (ИОР: 0,33/Гр; 95% ДИ: 0–0,82). Включение в модель только дозовых интервалов альфа-дозы приводит к статистически значимой положительной оценке в дозовом интервале до 0,005 Гр, однако избыточный риск не подтверждается при использовании модели, учитывающей оба типа излучения [42].

Таким образом, среди лиц, работавших в условиях штатной радиационной обстановки (1959–1982 г. найма), оценка атрибутивного риска ЗНО, за исключением опухолей органов основного депонирования плутония, позволяет отнести 1–5% случаев к радиационно-индуцированным, причем только вследствие влияния внешнего гамма-излучения.

При анализе показателей смертности от неопухолевой патологии среди работников 1959–1982 г. найма<sup>14</sup> сравнение различных моделей избыточного

<sup>12</sup> Показатели и прогноз риска отдаленных медицинских последствий длительного действия ионизирующего излучения внешних и инкорпорированных источников у персонала предприятия атомной промышленности ПО «Маяк» в условиях нормальной эксплуатации и оценка медико-демографических показателей состояния здоровья населения, проживающего вблизи радиационно опасного предприятия. Отчет о НИР (промежуточный). ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики», рук. Сокольников МЭ. Озерск: 2023. № ГР НИР 122041300044-3. Деп. в ЦИТИС 07.02.2025, № ИКРБС И224120300119-7 / 225020709083-0.

<sup>13</sup> Там же.

<sup>14</sup> Там же.

относительного риска в зависимости от уровня внешнего облучения как без учета, так и с учетом уровня внутреннего облучения не показало увеличения смертности с ростом уровня радиационного воздействия, поскольку ни для одного класса болезней не было получено положительной оценки коэффициента ИОР/Гр при использовании линейной зависимости, а также монотонного статистически значимого увеличения относительного риска при использовании непараметрической зависимости от дозы.

Улучшение качества аппроксимации данных при использовании дозовых интервалов было статистически значимым на 90% уровне только для группы «инфекционные и паразитарные болезни», однако было обусловлено лишь положительной оценкой избыточного риска в интервале доз до 100 мГр (ИОР = 0,6; 90% ДИ: 0,04–1,58). Для наиболее представительного класса болезней системы кровообращения также отсутствовала зависимость «доза-эффект», а единственная положительная оценка

избыточного риска получена для доз, превышающих 0,5 Гр (ИОР = 0,05;  $p > 0,5$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регистр персонала ПО «Маяк» является важным источником эпидемиологических оценок радиогенного риска при профессиональном пролонгированном радиационном воздействии на радиационно опасных промышленных предприятиях. На основе когорты работников 1948–1982 гг. найма получены прямые оценки канцерогенного риска как в зависимости от дозы внешнего воздействия, так и от поступления  $^{239}\text{Pu}$ . Выделение лиц, начавших свою трудовую деятельность в 1959–1982 гг., с одной стороны, подтверждает величину канцерогенного риска в зависимости от накопленной дозы внешнего гамма-излучения, с другой стороны — указывает на необходимость расширения периода наблюдения и самой когорты лиц, работавших в условиях, сопоставимых с современными.

## Литература / References

1. Панфилов АП. Эволюция системы обеспечения радиационной безопасности атомной отрасли страны и ее современное состояние. *Радиация и Риск*. 2016;25(1):47–64. Panfilov AP. Evolution of the system supporting radiation safety in nuclear industry of Russia and its current status. *Radiation and Risk*. 2016;25(1):47–64 (In Russ.). EDN: [VZDXED](https://doi.org/10.2307/3580220)
2. Grant EJ, Brenner A, Sugiyama H, Sakata R, Sadakane A, Utada M, et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009. *Radiation Research*. 2017;187(5):513–37. <https://doi.org/10.1667/RR14492.1>
3. Сокольников МЭ, Кабирова НР, Окатенко ПВ, Кошурникова НА, Царева ЮВ, Мартиненко ИА и др. Медико-дозиметрический регистр персонала производственного объединения «Маяк»: состояние и перспективы. *Вопросы Радиационной Безопасности*. 2023;3(111):42–55. Sokolnikov ME, Kabirova NR, Okatenko PV, Koshurnikova NA, Tsareva YuV, Martinenko IA, et al. Medical-dosimetry registry of the personnel of “Mayak production association”: status and perspectives. *Journal of Radiation Safety Issues*. 2023;3(111):42–55 (In Russ.). EDN: [WWGSJD](https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1589015)
4. Boice JD, Cohen SS, Mumma MT, Ellis ED. The Million Person Study, whence it came and why. *International Journal of Radiation Biology*. 2022;98(4):537–50. <https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1589015>
5. Hunter N, Haylock RGE, Gillies M, Zhang W. Extended analysis of solid cancer incidence among the Nuclear Industry Workers in the UK: 1955–2011. *Radiation Research*. 2022;198(1):1–17. <https://doi.org/10.1667/RADE-20-00269.1>
6. Richardson DB, Leuraud K, Laurier D, Gillies M, Haylock R, Kelly-Reif K, et al. Cancer mortality after low dose exposure to ionising radiation in workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS): cohort study. *BMJ*. 2023;16(382):e074520. <https://doi.org/10.1136/bmj-2022-074520>
7. 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):352–63. <https://doi.org/10.2307/3580220>
8. Koshurnikova NA, Shilnikova NS, Sokolnikov ME, Bolotnikova MG, Okatenko PV, Vasilenko EK, et al. Medical-dosimetry registry of workers at the “Mayak” production association. *International Journal of Low Radiation*. 2006;2(3/4):236. <https://doi.org/10.1504/IJLR.2006.009516>
9. Онищенко ГГ, Романович ИК, Историк ОА, Водоватов АВ, Библин АМ, Кормановская ТА и др. К 125-летию открытия радиоактивности: история становления и текущее состояние нормативного обеспечения радиационной безопасности населения. *Радиационная Гигиена*. 2021;14(4):6–16. Onischenko GG, Romanovich IK, Istorik OA, Vodovатов AV, Biblin AM, Kormanovskaya TA, et al. On the 125th anniversary of the discovery of radioactivity: history of development and current state of regulation of the provision of the radiation safety of the public. *Radiation Hygiene*. 2021;14(4):6–16 (In Russ.). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-6-16>
10. Кошурникова НА, Шильникова НС, Окатенко ПВ, Креслов ВВ, Болотникова МГ, Сокольников МЭ и др. Характеристика когорты рабочих атомного предприятия ПО «Маяк» (Часть I). *Вопросы Радиационной Безопасности*. 1998;2:46–55. Koshurnikova NA, Shilnikova NS, Okatenko PV, Kreslov VV, Bolotnikova MG, Sokolnikov ME, et al. Characteristics of the cohort of workers of the nuclear enterprise “Mayak PA” (Part I). *Radiation Safety Problems*. 1998;2:46–55 (In Russ.). EDN: [WBJZRP](https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-6-16)
11. Кошурникова НА, Шильникова НС, Окатенко ПВ, Креслов ВВ, Болотникова МГ, Сокольников МЭ и др. Характеристика когорты рабочих атомного предприятия ПО «Маяк» (Часть II). *Вопросы Радиационной Безопасности*. 1998;3:48–58. Koshurnikova NA, Shilnikova NS, Okatenko PV, Kreslov VV, Bolotnikova MG, Sokolnikov ME, et al. Characteristics of the cohort of workers of the nuclear enterprise “Mayak PA” (Part II). *Radiation Safety Problems*. 1998;3:48–58 (In Russ.). EDN: [WBJZRP](https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-6-16)
12. Кошурникова НА, Окатенко ПВ, Шильникова НС, Кузнецова ИС, Сокольников МЭ. Медицинские по-

- следствия профессионального облучения (уровни онкосмертности среди персонала основных производств ПО «Маяк»). *Медицина Экстремальных Ситуаций*. 2006;2(16):5–14.
- Koshurnikova NA, Okatenko PV, Shilnikova NS, Kuznetsova IS, Sokolnikov ME. Health effects of occupational radiation exposure (cancer mortality among employees of the main plants of the Mayak production association). *Extreme Medicine*. 2006;2(16):5–14 (In Russ.).  
EDN: [WLKKQZ](#)
13. Никипелов БВ, Лызлов АФ, Кошурникова НА. Опыт первого предприятия атомной промышленности (уровни облучения и здоровье персонала). *Природа*. 1990;2:30–8. Nikipelov BV, Lyzlov AF, Koshurnikova NA. Experience of the first nuclear industry enterprise (levels of radiation and health of personnel). *Priroda*. 1990;2:30–8 (In Russ.).  
EDN: [WBJMEB](#)
  14. Василенко ЕК. Дозиметрия внешнего облучения работников ПО «Маяк»: приборы, методы, результаты контроля. В кн.: Киселев МФ, Романов СА, ред. *Источники и эффекты облучения работников ПО «Маяк» и населения, проживающего в зоне влияния предприятия*. Озерск; 2009:66–135. Vasilenko EK. Dosimetry of external irradiation of manufacturers of PA Mayak: devices, methods, and monitoring results. In: Kiselev MF, Romanov SA, ed. *Sources and effects of irradiation of manufacturers of PA "Mayak" and the population located on the territory of the industrial enterprise*. Ozyorsk; 2009:66–135 (In Russ.).  
EDN: [ZBOYBT](#)
  15. Napier BA. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2013): an introduction to the documentation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176(1–2):6–9.  
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncx020>
  16. Хохряков ВФ, Хохряков ВВ, Суслова КГ, Востротин ВВ, Щадилев АЕ, Соколова АБ и др. Достижения в области разработки дозиметрии плутония на ПО «Маяк». *Вопросы Радиационной Безопасности*. 2006;41(1):59–80. Hohryakov VF, Hohryakov VV, Suslova KG, Vostrotriv VV, Shhadilov AE, Sokolova AB, et al. Progress in plutonium dosimetry development at Mayak PA. *Radiation Safety Problems*. 2006;41(1):59–80 (In Russ.).  
EDN: [JUURIP](#)
  17. Ефимов АВ, Соколова АБ. История и программа биофизических обследований в эпидемиологической когорте работников ФГУП «ПО «Маяк». *Радиация и Риск*. 2024;33(4):131–43. Efimov AV, Sokolova AB. History and program of biophysical examinations in the epidemiological cohort of employees of the PA "Mayak". *Radiation and Risk*. 2024;33(4):131–43 (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21870/0131-3878-2024-33-4-131-143>
  18. Khokhryakov VV, Khokhryakov VF, Suslova KG, Vostrotriv 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.  
<https://doi.org/10.1097/HP.0b013e31827dbf60>
  19. Birchall A, Vostrotriv VV, Puncher M, Efimov AV, Dorrian M-D, Soolova AB, et al. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2013) for internally deposited plutonium: an overview. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176(1–2):10–31.  
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncx014>
  20. Vostrotriv VV, Napier BA, Zhdanov AV, Miller S, Sokolova AB, Bull RK, et al. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2016): internal dosimetry results and comparison with MWDS-2013. *Radiation Protection Dosimetry*. 2019;184(2):201–10.  
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncy200>
  21. Sokolnikov ME, Gilbert ES, Preston DL, Ron E, Shilnikova NS, Koshurnikova NA, et al. Lung, liver and bone cancer mortality in Mayak workers. *International Journal of Cancer*. 2008;123(4):905–11.  
<https://doi.org/10.1002/ijc.23581>
  22. Gilbert ES, Sokolnikov ME, Preston DL, Schonfeld SJ, Schadilov AE, Vasilenko EK, et al. Lung Cancer Risks from Plutonium: An Updated Analysis of Data from the Mayak Worker Cohort. *Radiation Research*. 2013;179(3):332–42.  
<https://doi.org/10.1667/RR3054.1>
  23. Labutina EV, Kuznetsova IS, Hunter N, Harrison J, Koshurnikova NA. Radiation Risk of Malignant Neoplasms in Organs of Main Deposition for Plutonium in the Cohort of Mayak Workers with Regard to Histological Types. *Health Physics*. 2013;105(2):165–76.  
<https://doi.org/10.1097/HP.0b013e31828f57df>
  24. Shilnikova NS, Preston DL, Ron E, Gilbert ES, Vassilenko EK, Koshurnikova NA, et al. Cancer Mortality Risk among Workers at the Mayak Nuclear Complex. *Radiation Research*. 2003;159(6):787–98.  
[https://doi.org/10.1667/0033-7587\(2003\)159](https://doi.org/10.1667/0033-7587(2003)159)
  25. Kuznetsova IS, Labutina EV, Hunter N. Radiation Risks of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma Incidence in the Mayak Cohort: 1948–2004. *PLoS ONE*. 2016;11(9):e0162710.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162710>
  26. Сокольников МЭ, Престон ДЛ, Стрэм Д, Мартиненко ИА, Кошурникова НА. Хроническое действие ионизирующего излучения и лейкомогенный риск. *Хроническое радиационное воздействие: отдаленные медико-биологические эффекты*: Материалы VII научной конференции. Челябинск; 2022. Sokolnikov ME, Preston DL, Stram D, Martinenko IA, Koshurnikova NA. Chronic effect of ionizing radiation and leukomogenic risk. *Chronic radiation exposure: late medical and biological effects*. Proceedings of the 7<sup>th</sup> scientific conference. Chelyabinsk; 2022 (In Russ.).
  27. Sokolnikov M, Preston D, Stram DO. Mortality from solid cancers other than lung, liver, and bone in relation to external dose among plutonium and non-plutonium workers in the Mayak Worker Cohort. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2017;56(1):121–5.  
<https://doi.org/10.1007/s00411-016-0670-5>
  28. Sokolnikov ME, Preston DL, Gilbert E, Schonfeld S, Koshurnikova NA. Radiation Effects on Mortality from Solid Cancers Other than Lung, Liver, and Bone Cancer in the Mayak Worker Cohort: 1948–2008. *PLoS ONE*. 2015;10(2):e0117784.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117784>
  29. Hunter N, Kuznetsova IS, Labutina EV, Harrison JD. Solid cancer incidence other than lung, liver and bone in Mayak workers: 1948–2004. *British Journal of Cancer*. 2013;109(7):1989–96.  
<https://doi.org/10.1038/bjc.2013.543>
  30. Wakeford R. What about the workers? *Journal of Radiology Protection*. 2024;44(2):011504.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6498/ad4eea>
  31. Laurent O, Samson E, Caer-Lorho S, Fournier L, Laurier D, Leuraud K. Updated mortality analysis of SELTINE, the French cohort of nuclear workers, 1968–2014. *Cancers*. 2022;15(1):79.  
<https://doi.org/10.3390/cancers15010079>
  32. Haylock RGE, Gillies M, Hunter N, Zhang W, Phillipson M. Cancer mortality and incidence following external occupational radiation exposure: an update of the 3rd analysis of the UK National Registry for Radiation Workers. *British Journal of Cancer*. 2018;119(5):631–7.  
<https://doi.org/10.1038/s41416-018-0184-9>

33. Hunter N, Haylock R. Extended analysis of solid cancer incidence among nuclear industry workers in the UK 1955–2011: comparison of workers first hired in earlier and later periods. *Journal of Radiology Protection*. 2024;44(2):021515. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ad4c72>
34. Kelly-Reif K, Bertke SJ, Daniels RD, Richardson DB, Schubauer-Berigan MK. Ionizing radiation and solid cancer mortality among US nuclear facility workers. *International Journal of Epidemiology*. 2023;52(4):1015–24. <https://doi.org/10.1093/ije/dyad075>
35. Richardson DB, Daniels RD, Hamra GB, Leuraud K, Thierry-Chef I. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ*. 2015;351:h535. <https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>
36. Wakeford R. Overview of epidemiological studies of nuclear workers: opportunities, expectations, and limitations. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(4):1075. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac0df4>
37. Cardis E, Vrijheid M, Blettner M, Gilbert E, Hakama M, Hill G, et al. The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: estimates of radiation-related cancer risks. *Radiation Research*. 2007;167(4):396–416. <https://doi.org/10.1667/RR0553.1>
38. Wakeford R. Solid cancer mortality among US radiation workers. *International Journal of Epidemiology*. 2023;52(6):1992–4. <https://doi.org/10.1093/ije/dyad131>
39. Schubauer-Berigan MK, Daniels RD, Bertke SJ, Tseng C-Y, Richardson DB. Cancer mortality through 2005 among a pooled cohort of U.S. nuclear workers exposed to external ionizing radiation. *Radiation Research*. 2015;183(6):620–31. <https://doi.org/10.1667/RR13988.1>
40. Кузнецова ИС. Сравнительный анализ радиогенного риска заболеваемости злокачественными новообразованиями среди работников разных периодов деятельности ПО «Маяк». *Медицинская Радиология и Радиационная Безопасность*. 2021;66(6):50–6. Kuznetsova IS. Comparison of Radiation Risk of Cancer Incidence among PA Mayak Workers Hired at Different Calendar Periods. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;66(6):50–6 (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-6-50-56>
41. Кузнецова ИС. Радиогенный риск смерти от злокачественных новообразований среди работников, нанятых в разные периоды деятельности ПО «Маяк». *Вопросы Радиационной Безопасности*. 2023;4(112):82–9. Kuznetsova IS. Radiation risk of mortality from malignant neoplasms among workers hired at different periods of Mayak PA activity. *Radiation Safety Problems*. 2023;4(112):82–9 (In Russ.). EDN: [ZMZQJW](https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-6-50-56)

**Вклад авторов.** Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: И.С. Кузнецова — концептуализация, формальный анализ, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и ее редактирование, визуализация; М.Э. Сокольников — методология, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования; Н.Р. Кабирова — администрирование данных; Ю.В. Царева — проведение исследования; Е.В. Денисова — верификация данных; П.В. Окатенко — программное обеспечение.

## ОБ АВТОРАХ

**Кузнецова Ирина Сергеевна**, канд. биол. наук  
<https://orcid.org/0000-0002-1214-295X>  
[kuznetsova@subi.su](mailto:kuznetsova@subi.su)

**Сокольников Михаил Эдуардович**, д-р мед. наук  
<https://orcid.org/0000-0001-9492-4316>  
[sokolnikov@subi.su](mailto:sokolnikov@subi.su)

**Кабирова Наиля Равильевна**  
<https://orcid.org/0000-0001-7724-6103>  
[kabirova@subi.su](mailto:kabirova@subi.su)

**Царева Юлия Вячеславовна**, канд. мед. наук  
<https://orcid.org/0000-0001-5559-4457>  
[tsareva@subi.su](mailto:tsareva@subi.su)

**Денисова Елена Владимировна**  
<https://orcid.org/0000-0002-6262-0067>  
[denisova@subi.su](mailto:denisova@subi.su)

**Окатенко Павел Викторович**  
<https://orcid.org/0000-0002-8260-1808>  
[okatenko@subi.su](mailto:okatenko@subi.su)