

Г.В. Жунтова

## ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ ОРГАНОВ ПИЩЕВАРЕНИЯ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики ФМБА России, Озерск

Контактное лицо: Галина Вадимовна Жунтова, e-mail: clinic@subi.su

### РЕФЕРАТ

В настоящем обзоре рассмотрены результаты эпидемиологических исследований, направленных на оценку канцерогенных эффектов профессионального облучения, включая злокачественные новообразования (ЗНО) органов пищеварения, у работников, занятых в различных сферах деятельности. Поиск источников литературы выполнен в системах eLIBRARY и PubMed и окончен в июле 2025 г. Приведена краткая характеристика профессиональных когорт, включенных в эпидемиологические исследования. Обсуждены вопросы, касающиеся оценки доз облучения, учета нерадиационных факторов, особенностей дизайна, указаны достоинства и ограничения исследований, которые могли повлиять на полученные результаты.

В исследованиях, включающих: работников предприятий ядерной индустрии зарубежных стран; шахтеров, занятых добычей урана; медицинский персонал, выполняющий диагностические и терапевтические процедуры с использованием источников ионизирующих излучений; экипажи воздушных судов, подвергающиеся действию космического излучения, – не получено убедительных доказательств причинно-следственной связи между профессиональным пролонгированным облучением в малых дозах и риском ЗНО органов пищеварения. В когорте работников первого отечественного предприятия атомной промышленности ПО «Маяк», нанятых в 1948–1982 гг., обнаружен повышенный риск заболеваемости и смертности от ЗНО пищевода и желудка, связанный с внешним гамма-облучением, а также увеличение риска ЗНО печени за счет ангиосаркомы и гепатоцеллюлярной карциномы, обусловленное внутренним альфа-облучением от инкорпорированного плутония. Дозы облучения работников ПО «Маяк», трудившихся на предприятии в первые годы его деятельности, были больше по сравнению с профессиональным облучением в других, перечисленных выше когортах.

К ограничениям, характерным для большинства исследований канцерогенных эффектов профессионального облучения, относятся возможные неточности в оценках доз, использование данных о причинах смерти, полученных на основе свидетельств о смерти, отсутствие доступной для анализа информации о заболеваемости ЗНО и нерадиационных факторах, обсуждается также «эффект здорового рабочего». Несмотря на то, что прямые доказательства вреда здоровью при облучении в малых дозах не получены, в разных странах продолжается эпидемиологическое наблюдение за работниками, подвергающимися воздействию ионизирующего излучения, при этом особое внимание уделяется также учету влияния нерадиационных факторов.

**Ключевые слова:** профессиональное облучение, злокачественные новообразования органов пищеварения, радиогенный риск

**Для цитирования:** Жунтова Г.В. Злокачественные новообразования органов пищеварения и профессиональное облучение // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 3. С. 88–97. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-88-97

G.V. Zhuntova

## Malignancies of Digestive Organs and Occupational Exposure

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the FMBA,  
Ozyorsk, Chelyabinsk region, Russia

Contact person: Galina Vadimovna Zhuntova, e-mail: clinic@subi.su

### ABSTRACT

Current review analyzes findings of epidemiological studies evaluating the carcinogenic risks associated with occupational radiation exposure, with a specific focus on malignant neoplasms (MN) of the digestive organs among workers in various sectors. A systematic literature search was conducted utilizing the eLIBRARY and PubMed databases and concluded in July 2025. The review provides a synopsis of the professional cohorts included in the analyses. It addresses the issues of exposure dose estimation, confounding by non-radiation factors, and study design, while also delineating the strengths and limitations inherent in these studies that may influence the interpretation of results.

Analyses of multiple cohorts—including nuclear industry workers from foreign countries, uranium miners, medical personnel involved in diagnostic and therapeutic radiology, and aircrews exposed to cosmic radiation—did not yield conclusive evidence for a causal relationship between prolonged, occupational low doses radiation exposure and an elevated risk of digestive organs cancers. In contrast, a cohort of workers from the Mayak Production Association (Mayak PA), the first Russian nuclear facility, employed between 1948 and 1982, demonstrated a significantly elevated risk of esophagus and stomach cancer incidence and mortality associated with external gamma-exposure. Furthermore, an increased risk of liver cancers, specifically angiosarcoma and hepatocellular carcinoma, was attributed to internal alpha-particle exposure from incorporated plutonium. Doses received by early Mayak PA workers were substantially higher than those documented in the other occupational cohorts reviewed.

Common limitations across these studies include potential inaccuracies in dose estimates, use of cause-of-death data from death certificates, lack of data on cancer incidence and confounding non-radiation risk factors, and the potential for bias from the “healthy worker effect”. Despite the absence of direct evidence for significant detrimental health effects of low-dose radiation exposure, ongoing epidemiological follow up of occupationally exposed populations continues internationally. Special attention is paid to the influence of non-radiation factors.

**Keywords:** occupational exposure, digestive organs malignancies, radiogenic risk

**For citation:** Zhuntova G.V. Malignancies of Digestive Organs and Occupational Exposure. Medical Radiology and Radiation Safety. 2026;71(3):88–97. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-88-97

## Введение

Злокачественные новообразования (ЗНО) органов пищеварения являются важной проблемой для системы здравоохранения. В структуре онкологической заболеваемости и смертности в России доля опухолей пищеварительной системы составляет около 23% и 18% соответственно [1]. Риск ЗНО органов пищеварения зависит от факторов, связанных с образом жизни (курение, злоупотребление алкоголем, несбалансированное питание, и др.) [2]. Инфицирование *Helicobacter pylori*, вирусами гепатита В и С, состояние кишечной микробиоты в значительной мере специфичны для ЗНО желудка, печени, кишечника [3].

Ионизирующее излучение находит все более широкое применение в различных сферах. Значительное число людей подвергается воздействию ионизирующей радиации не только от естественных источников, но также в процессе профессиональной деятельности, в результате диагностических обследований и лечения. Международным агентством по изучению рака ионизирующее излучение включено в группу канцерогенов для человека [4]. В когорте лиц, переживших атомные бомбардировки в Японии, для большинства локализаций ЗНО органов пищеварения обнаружено увеличение риска заболеваемости и смертности, зависящее от дозы острого гамма-нейтронного облучения [5–9].

В недавно опубликованном отчете НКДАР ООН [10] рассмотрены исследования, посвященные оценке рисков возникновения вторых первичных ЗНО после лучевой терапии первого рака. Анализ результатов этих исследований показал, что примерно у 1% пациентов, перенесших радиотерапию, в течение последующих тридцати лет развивается второе первичное ЗНО органов пищеварения. Повышенный риск вторых первичных ЗНО органов пищеварения, среди которых опухоли желудка, кишечника, поджелудочной железы, связан с предшествующим терапевтическим облучением по поводу рака яичек и предстательной железы, лимфомы Ходжкина, а также обнаружен после радиотерапии в детском возрасте. В результате мета-анализа рассмотренных исследований была получена оценка избыточного относительного риска (ИОР) на единицу дозы терапевтического облучения и определен доверительный интервал (ДИ) – ИОР/Гр = 0,04 (95% ДИ: 0,01; 0,07) [10].

Особый интерес представляют возможные канцерогенные эффекты, связанные с пролонгированным воздействием ионизирующего излучения в малых дозах, но, несмотря на большое число исследований по данной проблеме, окончательные выводы еще не сделаны [11]. В настоящем обзоре рассмотрены наиболее крупные эпидемиологические исследования, в которых изучалось влияние пролонгированного профессионального облучения на заболеваемость и смертность от ЗНО органов пищеварения. Приоритетное внимание уделено результатам анализов радиогенного риска ЗНО органов пищеварения, для сравнения представлены соответствующие оценки риска в когорте лиц, переживших атомные бомбардировки в Японии (Life Span Study – LSS).

При подготовке обзора использованы полнотекстовые источники литературы по указанной выше проблеме на русском и английском языках, представленные в поисковых системах eLIBRARY и PubMed. Поиск литературы был окончен в июле 2025 г.

## Исследование Life Span Study (LSS)

Оценки риска, обусловленного воздействием ионизирующего излучения с низкой линейной передачей энергии, полученные в исследовании LSS, стали основой для определения стандартов радиационной безопасности и общепризнанным эталоном [5–9, 11].

Ozasa K. et al [5] выполнен анализ смертности 86611 членов когорты LSS в период 1950–2003 гг. Оценки радиогенного риска вычислены на основе линейной зависимости с учетом города, пола, возраста на момент облучения и достигнутого возраста. Вследствии Keil et al. [6] для анализа этих данных по смертности был использован метод причинно-следственных связей. Исследования заболеваемости ЗНО органов пищеварения, опубликованные в последние годы, включали 105444 членов когорты LSS и охватывали период 1958–2009 гг. [7–9]. При расчете радиогенного риска была учтена информация о нерадиационных факторах, включая курение, алкоголь, частоту употребления мяса, рост и вес (рассчитывался индекс массы тела), полученная во время периодических опросов для 47–67% участников (в зависимости от анализируемого фактора).

Согласно перечисленным выше исследованиям [5–9], в когорте LSS обнаружена положительная статистически значимая зависимость риска смертности и заболеваемости ЗНО пищевода, желудка, ободочной кишки и печени от дозы острого гамма-нейтронного облучения, для ЗНО прямой кишки связи с облучением не выявлено (табл. 1). В анализах заболеваемости получены также статистически значимые оценки ИОР/Гр для ЗНО разных отделов желудка [7], ободочной кишки [8], гепатоцеллюлярной карциномы (ГЦК) и холангиокарциномы (ХК) печени [9]. Связь между дозой облучения во время атомной бомбардировки и риском ЗНО желчного пузыря установлена только в анализе смертности, а для ЗНО поджелудочной железы – только в анализе заболеваемости [5–6, 9] (табл. 1).

## Профессиональное пролонгированное облучение

### *Работники предприятий ядерной индустрии зарубежных стран*

Выполнены крупные исследования, включавшие работников ядерной индустрии стран Европы, Австралии, Канады, США и Японии, направленные на оценку рисков смертности от разных причин в результате длительного воздействия низких доз ионизирующего излучения с низкой мощностью дозы [12–13]. Для участников этих исследований были доступны измеренные с помощью индивидуальных дозиметров дозы внешнего гамма- и рентгеновского облучения. Оценки радиогенного риска получены с поправками на пол, достигнутый возраст, год рождения, страну (предприятие), социально-экономический статус. В этих исследованиях обнаружена положительная статистически значимая зависимость риска солидных ЗНО, месте взятых, от дозы облучения, однако данные в отношении ЗНО отдельных локализаций, включая опухоли органов пищеварения неоднозначны.

В исследовании Cardis et al [12], включавшем более 400 тыс. работников ядерной промышленности из 15 стран, оценки ИОР/Зв для отдельных локализаций ЗНО органов пищеварения были положительны (кроме ЗНО пищевода и ЗНО желчного пузыря), но статистически незначимы (табл. 1). Среди участников этого исследо-

вания средние дозы облучения были самыми низкими у работников СЕА-COGEMA во Франции (3,5 мЗв) и самыми высокими у работников в Швейцарии (62,3 мЗв), доля работников, подвергшихся облучению в дозах более 500 мЗв не превысила 0,4% [12].

Еще одно крупное международное исследование проведено в объединенной когорте работников ядерных предприятий Франции, Великобритании и США (International Nuclear Workers Study – INWORKS) численностью свыше 308 тыс. человек [13]. Средний возраст участников к окончанию наблюдения составил 58 лет, средняя суммарная поглощенная в стенке ободочной кишки доза – 20,9 мЗв. В исследовании INWORKS учитывался факт нейтронного облучения и возможного поступления в организм радионуклидов (плутоний, тритий и др.). Оценки ИОР/Гр и доверительные интервалы были вычислены двумя способами: на основе регрессии Пуассона с использованием метода максимального правдоподобия и с помощью иерархической регрессии с использованием метода Монте-Карло с цепями Маркова.

В исследовании INWORKS [13] оценки ИОР/Гр были положительными для ЗНО пищевода, желудка, толстой и прямой кишки, поджелудочной железы, но являлись статистически значимыми только для ЗНО желудка (метод Монте-Карло) и для ЗНО прямой кишки (метод максимального правдоподобия) (табл. 1). Связи между дозой облучения и риском ЗНО печени и желчного пузыря не выявлено, точечная оценка ИОР/Гр была положительной либо отрицательной при разных подходах к анализу [13].

Оценки риска смертности на единицу дозы облучения для солидных опухолей в INWORKS были выше, чем в исследовании LSS, но с учетом неопределенностей (границы доверительных интервалов), авторы указывают на их сопоставимость с результатами анализа смертности лиц, переживших атомные бомбардировки [5, 13]. Высказано предположение, что более высокие оценки канцерогенного риска у работников ядерной отрасли по сравнению когортой LSS могут быть обусловлены разной эффективностью энергетических спектров фотонов, воздействовавших на участников данных исследований (100–3000 кэВ – работники ядерных предприятий и 2000–5000 кэВ – выжившие после атомной бомбардировки) [13]. Ниже представлены результаты анализа радиогенного риска ЗНО органов пищеварения у работников ядерной промышленности из разных стран, являвшихся участниками исследования в 15 странах и INWORKS.

Национальный регистр работников ядерной промышленности Соединенного Королевства (National Registry for Radiation Workers UK – NRRW) включает около 170 тыс. человек, подвергавшихся преимущественно воздействию гамма- и рентгеновского излучения, в меньшей степени – нейтронов и бета-частиц [14–15]. Часть работников подвергалась также внутреннему облучению от инкорпорированных радионуклидов (уран, плутоний, тритий). Muirhead C.R. et al [14] выполнили анализ смертности и заболеваемости работников NRRW в период 1955–2001 гг. Средняя накопленная доза внешнего облучения участников этого исследования составила 24,9 мЗв (у 6% работников дозы превышали 100 мЗв), средний возраст на конец периода наблюдения – около 62 лет. Статистически значимой связи между дозой внешнего облучения и риском смертности и заболеваемости от ЗНО органов пищеварения не обнаружено за исключением ЗНО прямой кишки (табл. 1). Для ЗНО прямой кишки оценка ИОР/Гр, полученная в анализе заболеваемости, являлась статистически значи-

мой на уровне ( $p < 0,05$ ), в анализе смертности – только на уровне ( $p < 0,1$ ). Точечные оценки ИОР/Зв были положительными для ЗНО пищевода и желудка (заболеваемость и смертность), ЗНО печени (смертность), ЗНО поджелудочной железы (заболеваемость) [14].

Получены оценки риска заболеваемости и смертности 42431 работников компании по производству ядерной энергии и топлива в Великобритании (BNFL) в период 1946–2002 гг. [15]. Эти работники являются важной частью регистра NRRW [14–15], некоторые из них могли подвергаться также внутреннему облучению от инкорпорированного плутония, урана и трития. Обнаружена положительная статистически значимая зависимость риска смертности от ЗНО органов пищеварения (1017 случаев – все локализации вместе) от дозы внешнего облучения – ИОР/Зв = 0,60 (90% ДИ 0,10 1,21), но в отношении риска заболеваемости такой связи не установлено (1334 случая) – ИОР/Зв = 0,31 (90% ДИ –0,06; 1,21) [15]. Оценки ИОР/Гр для отдельных локализаций ЗНО органов пищеварения были положительными, но не являлись статистически значимыми (табл. 1).

Во Франции проводилось наблюдение работниками ядерной промышленности, занятыми в компаниях СЕА, Orano и EDF (когорта SuiVi Epidémiologique Longitudinal des Travailleurs de l'Industrie Nucléaire française – SELTINE), у которых контроль внешнего облучения осуществлялся с помощью индивидуальных дозиметров [16]. Средняя накопленная доза внешнего облучения членов когорты – 15,7 мЗв, численность – более 80 тыс. человек, доля мужчин – 86,5%. В когорте SELTINE обнаружено снижение смертности от всех причин в период 1968–2014 гг. по сравнению с населением Франции. Анализ радиогенного риска смертности от ЗНО органов пищеварения был выполнен только для мужчин. Оценки ИОР/Гр для ЗНО пищевода, желудка, ободочной и прямой кишки были положительными, для ЗНО поджелудочной железы – отрицательными, но статистически не значимыми (табл. 1).

Был выполнен анализ смертности 26328 работников Национальной лаборатории Лос-Аламоса (США), нанятых в 1943–1980 гг., прослеженных по 2017 г. [17]. Мониторинг профессионального облучения проводился у 66,8% работников, которые могли подвергаться воздействию различных видов излучения: фотоны, нейтроны, тритий, плутоний (мониторинг поступления плутония выполнен у 6499 человек). Средние поглощенные дозы в печени и стенке ободочной кишки с учетом весовых коэффициентов для различных видов излучения составили соответственно 29,2 мГр и 13,6 мГр, максимальные дозы – 9413 мГр и 909 мГр. Обнаружено статистически значимое увеличение риска смертности от ЗНО пищевода с увеличением дозы облучения. Для других локализаций опухолей органов пищеварения, включая ЗНО печени, оценки ИОР/100 мГр были отрицательными и статистически незначимыми (табл. 1). В числе ограничений исследования авторы указывают отсутствие информации о воздействии химических факторов, сложности с определением индивидуальных доз облучения и их неопределенностей [17].

Kelly-Reif K. et al [18] проанализирована смертность 101363 работников, занятых на пяти ядерных объектах США (комплекс в Хэнфорде, Национальные лаборатории в Айдахо и Ок-Ридже, Саванна-Ривер, военно-морская верфь в Портсмуте) в период с 1944 по 2016 гг. Средние дозы гамма- и нейтронного облучения составили соответственно 26,5 мЗв (максимум 1109 мЗв) и 5,1 мЗв. При расчете радиогенного риска, обусловленного внешним облучением, учитывался факт нейтронного

Таблица 1  
**Избыточный относительный риск злокачественных новообразований органов пищеварения при остром гамма-нейтронном и пролонгированном профессиональном облучении**  
**Excessive relative risk of malignant neoplasms of the digestive system in case of acute gamma-neutron and prolonged occupational exposure**

Автор, год публикации, ссылка	Когорта, страна, число участников (N), анализируемый период	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Острое гамма-нейтронное облучение, атомные бомбардировки в Японии</i>									
Ozasa, K., et al, 2012 [5]	LSS, N=86611, 1950–2003 гг.	Смертность в 70 лет при облучении в 30 лет, ИОР/Зв (95%ДИ)	0,51 (0,11; 1,06) n=339	0,28 (0,14; 0,42) n=3125	0,54 (0,23; 0,93) n=621	0,17 (-0,17; 0,64) n=427	0,36 (0,18; 0,58) n=1519	0,45 (0,10; 0,90) n=419	0,08 (-0,18; 0,44) n=513
Keil A.P., et al, 2018 [6]	Смертность, ИОР/Гр (95%ДИ), причинно-следственный анализ	0,42 (0,05; 0,91) n=339	0,38 (0,24; 0,54) n=3125	0,44 (0,16; 0,79) n=621	0,13 (-0,17; 0,54) n=427	0,51 (0,32; 0,73) n=1519	0,87 (0,42; 1,43) n=419	0,25 (-0,02; 0,62) n=513	
Sakata R., et al, 2019 [7]	Заболееваемость, ИОР/Гр (95%ДИ)	0,36 (0,01; 0,86) n=486	0,33 (0,20; 0,47) n=5661	–	–	–	–	–	–
Sugiyama H., et al., 2020 [8]	LSS, N=105444, 1950–2009 гг.	Заболееваемость, ИОР/Гр (95%ДИ)	–	–	0,63 (0,34; 0,98) n=1765	0,025 (-0,087; 0,14) n=1046	–	–	–
Sadakane A., et al., 2019 [9]	Заболееваемость, ИОР/Гр (95%ДИ)	–	–	–	–	–	0,58 (0,27; 0,95) n=2016	-0,02 (-0,25; 0,30) n=694	0,45 (0,07; 0,92) n=723
<i>Пролонгированное профессиональное внешнее облучение</i>									
Cardis E., et al, 2007 [12]	15-Country Study, N=407391, 1943–2000 гг.	Смертность, ИОР/Зв (90%ДИ)	< 0 n=144	0,49 (<0; 3,92) n=347	0,21 (<0; 3,07) n=410	1,27 (<0; 7,62) n=185	6,47 (<0; 27,0) n=62	< 0 n=43	2,10 (-0,59; 6,77) n=272
Richardson DB, et al, 2018 [13]	INWORKS, N=308297, 1944–2005 гг.	Смертность, ИОР/Гр (90%ДИ) метод максимального правдоподобия,	1,11 (-0,26; 3,04) n=92	1,31 (-0,07; 3,16) n=99	0,09 (-0,71; 1,17) n=172	1,87 (0,04; 4,52) n=61	0,87 (<-0,87; 1,06) n=132	0,22 (<-0,89; 1,77) n=139	
Muirhead C.R., et al, 2009 [14]	NRRW, Великобритания, N=174541, 1955–2001 гг.	иерархическая регрессия	0,83 (-0,06; 1,77)	0,88 (0,01; 1,82)	0,42 (-0,32; 1,13)	0,95 (-0,03; 2,00)	0,37 (-0,69; 1,41)	0,50 (-0,37; 1,34)	
Gillies M. and Haylock R.G.E., 2014 [15]	BNFL, Великобритания, N=42431, 1946–2005 гг.	Смертность, заболееваемость, ИОР/Зв (95%ДИ)	0,146 (-0,84; 1,72) n=341	0,336 (-0,63; 1,88) n=518	-0,126 (-0,84; 0,98) n=588	1,687 (-0,02; 4,73) n=303	-1,500 (<-1,93; 8,56) n=40	<-1,929 (<-1,93; 7,6) n=29	-0,049 (-1,11; 2,07) n=330
Laurent O., et al, 2022 [20]	SELTEINE, Франция, N=69487 (мужчины), 1968–2014 гг.	Смертность, заболееваемость, ИОР/Зв (90%ДИ)	1,24 (-0,14; 3,58) n=140	0,28 (-0,39; 1,25) n=285	0,11 (-0,47; 0,94) n=383	0,53 (-0,35; 1,85) n=274	0,08 (<-1,05; 2,08) n=107	0,04 (-0,81; 1,53) n=122	0,25 (-0,71; 1,92) n=132
Voice J.D. Jr., et al, 2022 [22]	Национальная лаборатория, Лос-Аламос, США N= 26328, 1943–2017 гг.	Смертность, ИОР/100мГр (95%ДИ)	1,26 (nc; 7,97) n=206	2,82 (nc; 10,7) n=198	1,48 (-1,71; 6,03) n=383	4,31 (-1,24; 13,1) n=142	1,20 (nc; 7,17) n=286	– n=35	-0,13 (-0,57; 0,30) n=250

Описание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	
Kelly-Reif K, et al, 2023 [23].	Хэнфорд, Айдахо, Ок-Ридж, Саванна-Ривер, Портсмут, США N=101363, 1944–2016 гг.	Смертность, ИОР/Зв (95% ДИ)	0,04 (-1,33; 2,21) n=348	0,51 (-0,86; 2,90) n=333	0,08 (-0,81; 1,32) n=1141	-1,03 (-1,99; 1,40) n=224	-1,57 (-2,18; -0,23) n=348	-0,29 (-1,09; 0,98) n=784
Zablotska L.V, et al, 2014 [24]	АЕСL, Канада N=45316, 1956–1994 гг.	Смертность, ИОР/Зв (95% ДИ)	-1,45 (-1,47; 48,2) n=13	-	14,4 (-1,47; 70,9) n=37	6,99 (-1,47; 64,2) n=15	-	-1,46 (-1,47; 45,2) n=20
Akiba S, et al, 2012 [25]	Ядерные предприятия, Япония, N=200583 (мужчины), 1991–2002 гг.	Смертность, ИОР/Зв (95% ДИ)	13,42 (3,22; 28,88) n=143	2,67 (-0,97; 7,44) n=488	-0,99 (-4,93; 6,23) n=157	2,42 (-3,46; 12,18) n=131	-5,27 (-6,41; 1,06) n=97	1,37 (-4,03; 10,66) n=149
Сокольников И др., 2021 [26]	ПО «Маяк», Россия N=25755, 1948–2017 гг.	Заболеемость, ИОР/Гр (95% ДИ)	1,83 (0,55; 4,79) n=48	0,29 (0,09; 0,54) n=430	-0,5 (-0,20) n=272	0,18 (-0,09; 0,58) n=197	-	0,38 (-0,02; 1,01) n=129
Sokolnikov M, et al., 2015 [27]	ПО «Маяк», Россия N=25755, 1948–2017 гг.	Смертность, ИОР/Гр (95% ДИ)	1,26 (0,36; 3,27) n=66	0,12 (-0,03; 0,31) n=452	0,21 (-0,06; 0,62) n=156	0,18 (-0,09; 0,63) n=146	-	0,18 (-0,09; 0,64) n=128
Lin RT, et al, 2024 [41]	АЭС, 17 стран N=480623	Мета-анализ, ИОР/мЗв (95% ДИ)	NA	0,017 (-0,038; 0,073)	0,009 (-0,009; 0,028)	0,021 (-0,018; 0,059)	-	-0,010 (-0,049; 0,030)
Lee W.I., et al, 2021, [44]	Медицинские работники, Южная Корея, N=93920, 1996–2017 гг.	ИОР/100мЗв (95% ДИ)	-	-0,38 (-0,80; 0,04) n=366	0,38 (-0,67; 1,43) n=351	1,39 (-0,55; 3,33) n=194	-	-0,38 (-1,75; 1,00) N=61

Примечание: N – число участников исследования, n – число случаев смерти/заболевания, ИОР – избыточный относительный риск на единицу дозы

облучения, но не учитывалось внутреннее облучение от трития и других радионуклидов, которое было возможно не более чем у 2% работников.

Оценки ИОР/Зв в этом исследовании [18] были положительными для ЗНО пищевода, желудка, толстого кишечника и отрицательными – для ЗНО прямой кишки, поджелудочной железы, однако зависимость доза–ответ не являлась статистически значимой. Для ЗНО печени обнаружено статистически значимое снижение риска (табл. 1). В анализе, ограниченном работниками, нанятыми после 1960 г., когда повысилось качество измерения и учета доз облучения, оценка радиогенного риска для ЗНО толстой кишки стала статистически значимой: ИОР/Зв = 7,15 (95%ДИ 2,13; 14,54) [18].

В 2014 г. Zablotska L.V. et al. [19] были опубликованы результаты повторного анализа смертности в обновленной когорте, включавшей 45316 работников, нанятых на ядерные предприятия Канады в 1956–1980 гг., для которых были уточнены оценки доз профессионального облучения на основании данных, зафиксированных в Национальном дозовом регистре (National Dose Registry – NDR) и другая информация. Из исследования исключены работники, подвергшиеся облучению в высоких дозах, а для работников, мониторируемых на внутреннее облучение от различных радионуклидов и трития, были учтены дозы внутреннего облучения. Средняя доза облучения работников составила 21,64 мЗв, доза облучения от трития была равна 3,02 мЗв [19]. Положительные оценки ИОР/Зв получены для ЗНО толстой и прямой кишки, отрицательные – для ЗНО пищевода и поджелудочной железы, однако статистически значимой зависимости доза–ответ для ЗНО органов пищеварения не установлено.

Исследование Akiba S. et al [20] включало 119484 мужчин-работников ядерных предприятий Японии, за которыми осуществлялось проспективное наблюдение 1991–2002 гг., средняя накопленная доза составляла 12,2 мЗв (у 2,6% участников исследования накопленные дозы превышали 100 мЗв). В анализе смертности положительные оценки ИОР/Гр для ЗНО пищевода, желудка, прямой кишки, печени, поджелудочной железы, отрицательная – для ЗНО ободочной кишки и желчного пузыря, но только для ЗНО пищевода зависимость от дозы облучения была статистически значимой (табл. 1).

### Работники атомной промышленности в Российской Федерации

Канцерогенные эффекты профессионального облучения, в том числе со стороны органов пищеварения, обнаружены в когорте персонала первого отечественного предприятия атомной промышленности ФГУП «Производственное объединение «Маяк» (ПО «Маяк») [21–26]. В первые годы действия предприятия некоторые работники подверглись профессиональному облучению в высоких дозах. На протяжении ряда лет проводилась работа по совершенствованию дозиметрической системы работников ПО «Маяк» (ДСРМ) [27–28], улучшению индивидуальных оценок доз профессионального облучения и уточнению радиогенного риска.

М.Э. Сокольниковым с соавт. [21–22] опубликованы результаты анализов заболеваемости и смертности от ЗНО (за исключением опухолей органов основного депонирования плутония – легкие, печень, скелет) в когорте, включавшей 25755 работников основных (реакторы, радиохимический и плутониевый заводы) и вспомогательных производств ПО «Маяк», нанятых в 1948–1982 гг. Анализ заболеваемости охватывал период до конца 2017 гг. [21]. Используются дозы профессио-

нального облучения по ДСРМ-2019, а для работников, у которых не проводился мониторинг внутреннего альфа-облучения, для учета этого фактора были протестированы два подхода – с использованием суррогатных доз и доз, вычисленных методом матрицы воздействия на рабочем месте (job-exposure matrix – ЖЕМ). Обнаружена статистически значимая положительная зависимость риска заболеваемости ЗНО пищевода и желудка от дозы внешнего гамма-облучения с учетом поправки на курение (табл. 1). В анализе смертности по состоянию на 31.12.2008 г. (индивидуальные дозы ДСРМ-2008 и суррогатные дозы альфа-облучения для немониторированных работников) только для ЗНО пищевода оценка ИОР/Гр являлась статистически значимой (табл. 1) [22]. Свидетельств влияния альфа-облучения на риск заболеваемости и смертности от ЗНО пищевода, кишечника и поджелудочной железы не получено [21–22].

В когорте персонала основных производств ПО «Маяк» (22377 работников, ДСРМ-2013) в анализах заболеваемости, выполненных с поправками на курение, употребление алкоголя, наличие хронических заболеваний органов пищеварения и индекса массы тела, внутреннее альфа-облучение от инкорпорированного плутония также была обнаружена статистически значимая зависимость риска ЗНО пищевода и желудка от дозы внешнего гамма-облучения [23–24]. Для ЗНО пищевода (47 случаев) риск, связанный с гамма-облучением, составил: все случаи – ИОР/Гр=1,28 (95 % ДИ 0,21; 4,11), плоскоклеточный рак – ИОР/Гр=1,01 (95 % ДИ 0,01; 3,95), аденокарцинома пищевода – риск не зависел от дозы облучения [23]. Для ЗНО желудка (343 случая) оценка ИОР/Гр внешнего гамма-облучения была равна 0,19 (95% ДИ 0,01; 0,44) [24].

Часть работников ПО «Маяк», трудившихся на плутониевом и радиохимическом заводах в период становления производства, подверглись значительному альфа-облучению от инкорпорированного плутония, поступившего в организм ингаляционным путем [27]. Печень является одним из органов основного депонирования плутония, обладающего длительными периодами полураспада и полувыведения. У работников основных производств ПО «Маяк» обнаружен высокий риск заболеваемости и смертности от ЗНО печени, связанный с альфа-облучением, и значительное увеличение доли ангиосаркомы (АС), редко встречающейся в общей популяции, среди опухолей других гистологических типов [24–26, 29].

В анализ заболеваемости ЗНО печени у работников ПО «Маяк» (период найма 1948–1982 гг., наблюдение до 31.12.2018 г., дозы ДСРМ-2013) были включены только морфологически верифицированные опухоли, в том числе: АС – 16 (25,8%) случаев, ГЦК – 32 (51,6%) случаев, ХК – 13 (21,0%) случаев и анапластический рак – 1 (1,6%) случай [26]. Оценки ИОР/Гр внутреннего альфа-облучения с поправками на курение, употребление алкоголя, вирусный гепатит в анамнезе, хронические заболевания печени и желчнокаменную болезнь составили: все случаи ЗНО печени – 7,44 (95%ДИ 2,93; 20,63); ГЦК – 3,85 (95% ДИ 0,95; 13,30). Для ХК и АС зависимость от дозы альфа-облучения не была определена, но 73% случаев АС выявлены у работников с поглощенной в печени дозой внутреннего альфа-излучения в диапазоне 6–21 Гр. Среди заболевших АС печени преобладали женщины (69%), которые подверглись значительному воздействию аэрозолей плутония при разработке технологий выделения этого нуклида в период становления производства на ПО «Маяк» [30].

В анализе смертности у работников основных производств ПО «Маяк» (1948–1972 гг. найма, наблюдение до

31.12.2003 г., дозы ДСРМ-2008), получены более высокие оценки радиогенного риска ЗНО печени у женщин (ИОР/Гр=29 (95%ДИ 9,8; 95), 12 случаев ЗНО) по сравнению с мужчинами (ИОР/Гр = 2,6 (95%ДИ 0,07; 6,9), 14 случаев ЗНО) [25]. Различия в величине риска были обусловлены преобладанием АС в структуре ЗНО печени у женщин. Влияния внешнего гамма-облучения на заболеваемость и смертность от ЗНО печени не установлено [21–22], риск заболеваемости ЗНО желчного пузыря не был связан с гамма- и альфа-облучением работников ПО «Маяк» [26].

У персонала плутониевых производств за рубежом не выявлено увеличения риска ЗНО печени, но дозы альфа-облучения у этих работников были ниже, чем у работников ПО «Маяк» в первые годы деятельности предприятия [11]. Значительное увеличение риска ЗНО печени (преимущественно ХК и АС), а также повышенный риск ЗНО желчного пузыря обнаружены у пациентов, которым вводили препарат Торотраст, содержащий альфа-активный торий [31–32]. Различия гистологических типов ЗНО печени у работников ПО «Маяк» и пациентов, получавших Торотраст, связывают с особенностями микрораспределения плутония и тория в печени [32–33]. Почти пропорциональное увеличение риска основных гистологических типов ЗНО печени – ГЦК и ХК в когорте LSS объясняют одинаковым воздействием ионизирующего излучения с высокой линейной передачей энергии на различные структуры этого органа [32].

#### **Работники атомных электростанций**

Мета-анализ результатов 13 исследований, включавший в общей сложности 480623 работников атомных электростанций из 17 стран, обнаружил статистически значимое снижение риска всех ЗНО в целом по сравнению с популяционными данными [34]. Мета-регрессионный анализ не выявил зависимости между средними дозами облучения участников этих исследований и риском ЗНО органов пищеварения. Оценки ИОР/Гр были положительными для ЗНО желудка, ободочной и прямой кишки, печени и отрицательными для ЗНО поджелудочной железы (табл. 1).

#### **Шахтеры урановых рудников, работники предприятий ядерного топливного цикла**

Воздействию урана и продуктов его распада, включая радиоактивный газ радон, подвергаются шахтеры урановых рудников, работники, занятые измельчением и очисткой урановой руды, а также персонал предприятий ядерно-топливного цикла. Распад урана сопровождается гамма-, бета- и альфа-излучением, серьезной проблемой является корректная оценка доз облучения от этих источников [35].

Исследование PUMA (Pooled Uranium Miners Analysis) выполнено в объединенной когорте шахтеров (118329 мужчин), занятых добычей урана в Канаде, Чешской Республике, Франции, Германии и США (начало работы 1942–1996 гг.) [36]. В период 1946–2013 гг. обнаружено увеличение смертности шахтеров от всех ЗНО вместе взятых, а также от ЗНО желудка, печени и желчного пузыря по сравнению с населением этих стран (табл. 2), которое было обусловлено повышенной смертностью шахтеров, нанятых в 1950–1960-е гг. и трудившихся не менее 10 лет. Оценки стандартизованного отношения (СО) смертности от перечисленных выше ЗНО органов пищеварения являлись статистически значимыми.

В когорте, включавшей 16434 шахтеров, занимавшихся добычей урана в Чешской Республике в 1946–1976 гг., прослеженных до конца 1992 г., обнаружено статистиче-

Таблица 2

Стандартизованное отношение смертности / заболеваемости злокачественными новообразованиями органов пищеварения при пролонгированном профессиональном внешнем облучении в сравнении с популяционными данными

Standardized mortality/morbidity ratio for malignant neoplasms of the digestive system in prolonged occupational external radiation exposure compared to population data

Автор, год публикации, ссылка	Когорта, страна, число участников (N), анализируемый период	Показатель	Пищевод	Желудок	Ободочная кишка	Прямая кишка	Печень	Желчный пузырь	Поджелудочная железа
Richardson D.B., et al, 2021 [36]	PUMA, шахтеры из 5 стран, N=118329, 1946–2013 гг.	Смертность, CO (95%ДИ)	0,92 (0,83; 1,03) n=351	<b>1,08</b> <b>(1,02; 1,15)</b> n=1058	0,89 (0,83; 0,95) n=919	0,96 (0,89; 1,05) n=554	<b>1,15</b> <b>(1,06; 1,25)</b> n=549		0,96 (0,89; 1,04) n=641
Kelly-Reif K., et al, 2018 [37]	Шахтеры урановых рудников, Чешская Республика, N=16434, 1946–1992 гг.	Смертность,	1,53 (0,90; 2,16) n=23	<b>1,27</b> <b>(1,02; 1,51)</b> n=102	0,90 (0,66; 1,15) n=54	<b>1,33</b> <b>(1,04; 1,62)</b> n=80	<b>1,63</b> <b>(1,17; 2,10)</b> n=48	0,88 (0,40; 1,37) n=13	1,19 (0,87; 1,51) n=53
		заболеваемость, CO (95%ДИ)	1,36 (0,74; 1,97) n=19	<b>1,37</b> <b>(1,11; 1,63)</b> n=108	1,06 (0,82; 1,29) n=80	<b>1,41</b> <b>(1,16; 1,66)</b> n=119	<b>1,70</b> <b>(1,16; 2,25)</b> n=38	0,61 (0,21; 1,00) n=9	1,31 (0,96; 1,66) n=54
Bouet S., et al., 2018 [40]	TRACY, производство ядерного топлива, Франция, N=4541, 1968–2013 гг.	Смертность CO (95%ДИ)	<b>0,47</b> <b>(0,23; 0,86)</b> n=10	0,84 (0,45; 1,43) n=13	1,08 (0,71; 1,55) n=28	0,75 (0,32; 1,47) n=8	<b>0,40</b> <b>(0,19; 0,74)</b> n=10		0,97 (0,58; 1,51) n=13
Voice J.D. Jr., et al, 2023 [43]	Медицинские работники, США, N=109019, 1965–2016 гг.	Смертность CO (95%ДИ)	<b>0,55</b> <b>(0,44; 0,67)</b> n=91	<b>0,80</b> <b>(0,64; 0,99)</b> n=86	<b>0,68</b> <b>(0,60; 0,77)</b> n=261	<b>0,46</b> <b>(0,32; 0,63)</b> n=37	<b>0,52</b> <b>(0,43; 0,63)</b> n=111		<b>0,81</b> <b>(0,72; 0,91)</b> n=271
Lopes J., et al, 2023 [44]	Медицинские работники, Франция, N=164015, 1968–2008 гг.	Смертность CO (95%ДИ)	<b>0,17</b> <b>(0,09; 0,32)</b> n=9	<b>0,35</b> <b>(0,21; 0,59)</b> n=15	<b>0,48</b> <b>(0,37; 0,63)</b> n=53		<b>0,30</b> <b>(0,19; 0,46)</b> n=21	–	<b>0,68</b> <b>(0,52; 0,90)</b> n=50
Hammer G.P., et al, 2014 [55]	Летные экипажи из 10 стран Европы и США N=93771	Смертность CO (95%ДИ), пилоты	<b>0,50</b> <b>(0,31; 0,77)</b> n=28	<b>0,57</b> <b>(0,39; 0,80)</b> n=45	0,92 (0,70; 1,18) n=85	0,83 (0,55; 1,19) n=39	0,96 (0,65; 1,36) n=41	0,84 (0,60; 1,14) n=57	
Park S., et al, 2023 [56]	Работники авиатранспорта, Южная Корея, N=37011, 2002–2021 гг.	Заболеваемость CO (95%ДИ)	0,80 (0,37; 1,52) N=9	0,89 (0,75; 1,06) N=138	0,90 (0,72; 1,10) N=94	0,91 (0,67; 1,21) N=48	<b>0,70</b> <b>(0,60; 0,82)</b> N=162	1,12 (0,72; 1,67) N=24	0,78 (0,59; 1,02) N=55

**Примечание:** N – число участников исследования, n – число случаев смерти/заболевания, CO – стандартизованное отношение смертности / заболеваемости

ски значимое увеличение CO заболеваемости и смертности от ЗНО желудка, прямой кишки и печени (табл. 2) [37]. Помимо облучения от урана, радона и продуктов их распада, работники подвергались воздействию пыли, содержащей тяжелые металлы и кремний. Средняя накопленная доза облучения от радона составила 53 WLM.

В объединенной когорте работников из Порт-Хоуп в Канаде (1950–1999 гг.) и членов Висмутовой когорты в Германии (1946–2008 гг.), занятых измельчением, очисткой и переработкой урановой руды, было зарегистрировано 16 случаев ЗНО печени и желчевыводящих путей, но оценить зависимость доза–эффект ввиду малого числа опухолей не удалось, информация о других локализациях ЗНО органов пищеварения не представлена [38]. Общая численность когорты более 7 тыс. человек, облучение за счет продуктов распада радона составило 10 WLM, средняя доза внешнего гамма-облучения – 61,5 мЗв.

В когорте TRACY (TRAvailleurs du CYcle), включавшей 12649 работников (88% – мужчины), занятых в 1958–2006 гг. в компаниях по производству ядерного топлива во Франции, обнаружено статистически значимое снижение онкологической смертности в 1968–2008 гг. по сравнению популяционными данными, в том числе от ЗНО пищевода, желудка и прямой кишки [39]. Средний возраст членов когорты на дату окончания наблюдения составил 60 лет. Дозы облучения не анализиро-

вались. Когорта TRACY является составной частью когорты урановых шахтеров Франции, включающей также шахтеров, непосредственно занятых добычей и измельчением урановой руды, и работников атомных электростанций.

В исследовании Bouet S. et al [40] проанализирована смертность около 4,5 тыс. работников пяти предприятий цикла ядерного топлива во Франции в 1968–2013 гг., у которых проводилось измерение содержания урана в биологических субстратах. Средняя накопленная доза внешнего облучения участников исследования составила 11,12 мГр. Накопленные поглощенные в печени дозы внутреннего облучения были получены расчетным путем и, в зависимости от способа моделирования, варьировали от 0,005 до 0,09 мГр. Обнаружено статистически значимое снижение смертности участников исследования от ЗНО пищевода и ЗНО гепатобилиарной системы. Число опухолей пищеварительной системы было невелико, и только для ЗНО толстой кишки выполнен анализ зависимости риска от дозы внутреннего облучения: ИОР/100 мГр = – 0,35 (95%ДИ NE; 24,60).

#### Медицинские работники

Berrington A. et al, 2001 г. опубликовали результаты 100-летнего наблюдения за британскими радиологами [41]. Исследование включало 2698 мужчин-радиологов, нанятых в 1897–1979 гг., и трудившихся по этой специ-

альности не менее 5 лет. По состоянию на 1 января 1997 г. было обнаружено увеличение смертности участников исследования, начавших работу до 1954 г., от ЗНО (все локализации вместе) по сравнению с мужским населением Великобритании. Среди опухолей органов пищеварения статистически значимым являлось увеличение СО смертности от ЗНО поджелудочной железы ( $CO=3,88$ ;  $p < 0,05$ ) у радиологов, нанятых до 1920 г., но эта оценка была основана на 5 случаях. Следует отметить, что в период до 1939 г. среднегодовые дозы профессионального облучения медицинских работников составляли около 70 мЗв, в конце 1970-х годов снизились до 2 мЗв и в настоящее время не превышают 1 мЗв в год [42].

Voice J.D. Jr. et al [43] проанализирована смертность до 2016 г. среди 109019 медицинских работников в США, у которых мониторинг профессионального облучения был начат с 1965 г. Обнаружено статистически значимое снижение СО смертности от всех ЗНО вместе взятых, а также от ЗНО пищевода, желудка, толстой, прямой кишки, печени и желчевыводящих путей, поджелудочной железы отношению к смертности населения США (табл. 2).

Проанализирована заболеваемость ЗНО у 93920 медицинских работников из Южной Кореи, подвергавшихся облучению при выполнении диагностических процедур (средняя накопленная доза 7,20 мЗв). Для работников, нанятых в 1996–2011 гг., использованы дозы облучения, измеренные с помощью индивидуальных дозиметров, а для тех, кто начал трудиться ранее дозы восстановлены ретроспективно [44]. Не обнаружено влияния профессионального облучения на риск заболеваемости ЗНО, включая опухоли органов пищеварения. Оценки ИОР/Гр были положительными для ЗНО ободочной и прямой кишки, а также для ЗНО печени, отрицательны – для ЗНО желудка и ЗНО поджелудочной железы, но статистически незначимы (табл. 1). Авторы отмечают, что необходима осторожная интерпретация результатов из-за ограничений в виде короткого периода наблюдения, неточностей в оценках доз, связанных в том числе с использованием защитных свинцовых фартуков.

Во Франции осуществляется эпидемиологическое наблюдение за когортой медицинского персонала, подвергающегося воздействию ионизирующего излучения, для изучения профессионального радиационно-индуцированного рака (Occupational Radiation Induced Cancer in Medical staff – ORICAMs), в которую включены 164 015 работников (60% женщины) в возрасте от 18 до 70 лет, зарегистрированные в системе учета дозиметрических измерений [45]. Обнаружено статистически значимое снижение смертности от всех причин в сравнении с национальной статистикой, в том числе от ЗНО органов пищеварения (табл. 2). Авторы отмечают, относительно короткий период наблюдения (в среднем 8 лет), молодой возраст участников и небольшое число смертей, включенных в анализ.

### **Экипажи воздушных судов**

Экипажи воздушных судов подвергаются воздействию космического излучения (преимущественно гамма-излучение и нейтроны), годовые эффективные дозы облучения составляют в среднем 2–5 мЗв и имеют тенденцию к увеличению с течением времени в связи с ростом дальности и продолжительности полетов. Однако убедительных доказательств причинно-следственной связи между воздействием ионизирующего излучения и ЗНО у экипажей воздушных судов сих пор не установлено [46].

В объединенной когорте, включавшей 93771 члена летных экипажей коммерческих авиалиний из 10 стран Европы и США, был выполнен анализ смертности [47]. Средний период наблюдения за когортой составлял около 22 лет. У пилотов обнаружено снижение смертности от ЗНО органов пищеварения по отношению к смертности населения в соответствующих странах, оценки СО смертности от ЗНО пищевода и ЗНО желудка являлись статистически значимыми (табл. 2).

Проведено сравнение показателей заболеваемости ЗНО в 2002–2021 гг. в выборке из 37011 работников, занятых авиаперевозками (36,7% женщины), созданной на основе базы данных Национальной службы медицинского страхования Южной Кореи (NHIS), с данными национальной статистики [48]. Стаж работы у 61,5% участников исследования не превышал 5 лет, период наблюдения составлял в среднем 8,6 года. Выявлено некоторое увеличение СО заболеваемости ЗНО желчного пузыря, для ЗНО остальных органов пищеварения – снижение заболеваемости, но оценки СО являлись статистически значимыми только для ЗНО печени (табл. 2).

В качестве наиболее существенных ограничений, характерных для большинства исследований канцерогенных эффектов профессионального облучения, авторы указывают на возможные неточности в оценках доз, распределение доз в узком диапазоне, использование данных о причинах смерти, полученных на основе свидетельств о смерти, отсутствие доступной для анализа информации о заболеваемости ЗНО и факторах, связанных с образом жизни. В отдельных исследованиях в число ограничений входят относительно молодой возраст участников и малая продолжительность периода наблюдения. Активно обсуждается «эффект здорового работника», связанный с особенностями профессионального отбора на радиационно-опасные производства [49].

### **Заключение**

В эпидемиологических исследованиях, включающих работников, подвергшихся профессиональному облучению в диапазоне малых доз, занятых в ядерной промышленности зарубежных стран, добыче и переработке урана, медицине и авиаперевозках, не получено убедительных доказательств влияния ионизирующего излучения на заболеваемость и смертность от ЗНО органов пищеварения. В когорте работников первого отечественного предприятия атомной промышленности ПО «Маяк» обнаружена положительная статистически значимая зависимость риска ЗНО пищевода и ЗНО желудка от дозы внешнего гамма-облучения, а также зависимость риска ЗНО печени, включая ГЦК, от дозы альфа-облучения от инкорпорированного плутония. Доля АС структуре ЗНО печени у работников ПО «Маяк» в сравнении с другими гистологическими типами опухолей была необычно большой. АС печени обнаружены у работников, подвергшихся альфа-облучению в высоких дозах.

Снижение уровней профессионального облучения работников, занятых в различных сферах деятельности, при отсутствии явных доказательств вреда, наносимого здоровью ионизирующим излучением в малых дозах, указывает на необходимость тщательного учета влияния нерадиационных факторов при проведении эпидемиологических исследований радиогенного риска ЗНО, включая опухоли органов пищеварения. Открытия молекулярной биологии, развитие методов математического моделирования способствуют продолжению эпидемиологических исследований на новом уровне для уточнения закономерностей радиационно-индуцированного канцерогенеза.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность) / Под ред. А.Д.Каприна и др. М.: МНИОИ им. П.А.Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. 276 с. [*Zlokachestvennyye Novoobrazovaniya v Rossii v 2023 Godu (Zabolevayemost' i Smertnost')* = Malignant Neoplasms in Russia in 2023 (Incidence and Mortality). Ed. A.D.Kaprin, et al. Moscow, Moskovskiy Nauchno-Issledovatel'skiy Onkologicheskiy Institut im. P.A.Gertsena Publ., 2024. 276 p. (In Russ.)]
2. Lu L., Mullins C.S., Schafmayer C., Zeißig S., Linnebacher M. A Global Assessment of Recent Trends in Gastrointestinal Cancer and Lifestyle-Associated Risk Factors. *Cancer Commun (Lond)*. 2021 Nov;41;11:1137-1151. Doi: 10.1002/cac2.12220.
3. Li Q. Bacterial Infection and Microbiota in Carcinogenesis and Tumor Development. *Front Cell Infect Microbiol*. 2023 Nov 15;13:1294082. Doi: 10.3389/fcimb.2023.1294082.
4. International Agency for Research on Cancer. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 100D. Radiation. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon, IARC, 2012. 362 p.
5. Ozasa K., Shimizu Y., Suyama A., Kasagi F., Soda M., Grant E.J., et al. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950-2003: an Overview of Cancer and Noncancer Diseases. *Radiat Res*. 2012 Mar;177;3:229-43. Doi: 10.1667/rr2629.1.
6. Keil A.P., Richardson D.B. Quantifying Cancer Risk from Radiation. *Risk Anal*. 2018 Jul;38;7:1474-1489. Doi: 10.1111/risa.12947.
7. Sakata R., Preston D.L., Brenner A.V., Sugiyama H., Grant E.J., Rajaraman P., Sadakane A., Utada M., French B., Cahoon E.K., Mabuchi K., Ozasa K. Radiation-Related Risk of Cancers of the Upper Digestive Tract among Japanese Atomic Bomb Survivors. *Radiat Res*. 2019 Sep;192;3:331-344. Doi: 10.1667/RR15386.1.
8. Sugiyama H., Misumi M., Brenner A., Grant E.J., Sakata R., Sadakane A., Utada M., Preston D.L., Mabuchi K., Ozasa K. Radiation Risk of Incident Colorectal Cancer by Anatomical Site among Atomic Bomb Survivors: 1958-2009. *Int J Cancer*. 2020 Feb 1;146;3:635-645. Doi: 10.1002/ijc.32275.
9. Sadakane A., French B., Brenner A.V., Preston D.L., Sugiyama H., Grant E.J., Sakata R., Utada M., Cahoon E.K., Mabuchi K., Ozasa K. Radiation and Risk of Liver, Biliary Tract, and Pancreatic Cancers among Atomic Bomb Survivors in Hiroshima and Nagasaki: 1958-2009. *Radiat Res*. 2019 Sep;192;3:299-310. Doi: 10.1667/RR15341.1.
10. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2024 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I. New York, Scientific Annex a United Nations, 2025. P. 199.
11. Little M.P., Bazyka D., Berrington de Gonzalez A., Brenner A.V., Chumak V.V., Cullings H.M., et al. A Historical Survey of Key Epidemiological Studies of Ionizing Radiation Exposure. *Radiat Res*. 2024 Aug 1;202;2:432-487. Doi: 10.1667/RADE-24-00021.1.
12. Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., Gilbert E., Hakama M., Hill C., et al. The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Estimates of Radiation-Related Cancer Risks. *Radiat Res*. 2007 Apr;167;4:396-416. Doi: 10.1667/RR0553.1.
13. Richardson D.B., Cardis E., Daniels R.D., Gillies M., Haylock R., Leuraud K., et al. Site-Specific Solid Cancer Mortality after Exposure to Ionizing Radiation: A Cohort Study of Workers (INWORKS). *Epidemiology*. 2018 Jan;29;1:31-40. Doi: 10.1097/EDE.0000000000000761.
14. Muirhead C.R., O'Hagan J.A., Haylock R.G., Phillipson M.A., Willcock T., Berridge G.L., Zhang W. Mortality and Cancer Incidence Following Occupational Radiation Exposure: Third Analysis of the National Registry for Radiation Workers. *Br J Cancer*. 2009 Jan 13;100;1:206-12. Doi: 10.1038/sj.bjc.6604825.
15. Gillies M., Haylock R. The Cancer Mortality and Incidence Experience of Workers at British Nuclear Fuels Plc, 1946-2005. *J Radiol Prot*. 2014 Sep;34;3:595-623. Doi: 10.1088/0952-4746/34/3/595.
16. Laurent O., Samson E., Caër-Lorho S., Fournier L., Laurier D., Leuraud K. Updated Mortality Analysis of SELTINE, the French Cohort of Nuclear Workers, 1968-2014. *Cancers (Basel)*. 2022 Dec 23;15;1:79. Doi: 10.3390/cancers15010079.
17. Boice J.D. Jr, Cohen S.S., Mumma M.T., Golden A.P., Howard S.C., Girardi D.J., et al. Mortality among Workers at the Los Alamos National Laboratory, 1943-2017. *Int J Radiat Biol*. 2022;98;4:722-749. Doi: 10.1080/09553002.2021.1917784.
18. Kelly-Reif K., Bertke S.J., Daniels R.D., Richardson D.B., Schubauer-Berigan M.K. Ionizing Radiation and Solid Cancer Mortality among US Nuclear Facility Workers. *Int J Epidemiol*. 2023 Aug 2;52;4:1015-1024. Doi: 10.1093/ije/dyad075.
19. Zablotska L.B., Lane R.S., Thompson P.A. A Reanalysis of Cancer Mortality in Canadian Nuclear Workers (1956-1994) Based on Revised Exposure and Cohort Data. *Br J Cancer*. 2014 Jan 7;110;1:214-23. Doi: 10.1038/bjc.2013.592.
20. Akiba S., Mizuno S. The Third Analysis of Cancer Mortality among Japanese Nuclear Workers, 1991-2002: Estimation of Excess Relative Risk per Radiation Dose. *J Radiol Prot*. 2012 Mar;32;1:73-83. Doi: 10.1088/0952-4746/32/1/73.
21. Сокольников М.Э., Кошурникова Н.А., Юркин А.М. и др. Заболеваемость солидными раками (без учёта раков лёгкого, печени и скелета) в когорте работников ПО «Маяк», 1948-2017 гг. // Вопросы радиационной безопасности. 2021. Т.3. №103. С. 56-71 [Sokol'nikov M.E., Koshurnikova N.A., Yurkin A.M., et al. Incidence of Solid Cancers (Excluding Lung, Liver, and Skeletal Cancers) in a Cohort of Workers at the Mayak Production Association, 1948-2017. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Radiation Safety Problems. 2021;3;103:56-71 (In Russ.)].
22. Sokolnikov M., Preston D., Gilbert E., Schonfeld S., Koshurnikova N. Radiation Effects on Mortality from Solid Cancers other than Lung, Liver, and Bone Cancer in the Mayak Worker Cohort: 1948-2008. *PLoS One*. 2015 Feb 26;10;2:e0117784. Doi: 10.1371/journal.pone.0117784.
23. Жунтова Г.В., Азизова Т.В., Банникова М.В., Григорьева Е.С. Факторы риска заболеваемости раком пищевода в когорте работников предприятия атомной промышленности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т.2. №68. С. 75-79 [Zhuntova G.V., Azizova T.V., Bannikova M.V., Grigor'yeva Ye.S. Risk Factors for Esophageal Cancer in a Cohort of Workers at a Nuclear Industry Enterprise. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;268:75-79 (In Russ.)]. Doi:10.33266/1024-6177-2023-68-2-75-79.
24. Zhuntova G.V., Azizova T.V., Grigoryeva E.S. Risk of Stomach Cancer Incidence in a Cohort of Mayak PA Workers Occupationally Exposed to Ionizing Radiation. *PLoS One*. 2020 Apr 15;15;4:e0231531. Doi: 10.1371/journal.pone.0231531.
25. Sokolnikov M.E., Gilbert E.S., Preston D.L., Ron E., Shilnikova N.S., Khokhryakov V.V., et al. Lung, Liver and Bone Cancer Mortality in Mayak Workers. *Int J Cancer*. 2008 Aug 15;123;4:905-11. Doi: 10.1002/ijc.23581.
26. Zhuntova G., Bannikova M., Azizova T. Incidence Risk of Hepatobiliary Malignant Neoplasms in the Cohort of Workers Chronically Exposed to Ionizing Radiation. *Sci Rep*. 2024 Jul 30;14;1:17561. Doi: 10.1038/s41598-024-63503-z.
27. Romanov S.A., Efimov A.V., Aladova E.E., Suslova K.G., Kuznetsova I.S., Sokolova A.B., et al. Plutonium Production and Particles Incorporation into the Human Body. *J Environ Radioact*. 2020 Jan;211:106073. Doi: 10.1016/j.jenvrad.2019.106073.
28. Napier B.A. The Mayak Worker Dosimetry System (Mwds-2013): an Introduction to the Documentation. *Radiat Prot Dosimetry*. 2017 Nov 1;176;1-2:6-9. Doi: 10.1093/rpd/ncx020.
29. Durmaz S., Basak M., Ozguven B.Y., Eken K.G., Erturk S.M. Primary Hepatic Angiosarcoma: a Rare and Very Aggressive Liver Tumour. *J Coll Physicians Surg Pak*. 2022 Dec;32;12:SS209-SS211. Doi: 10.29271/jcpsp.2022.Supp.S209.
30. Сохина Л.П., Колотинский Я.И., Халтурин Г.В. Плутоний в девичьих руках. Екатеринбург: ЛИТУР, 2003, 160

- c. [Sokhina L.P., Kolotinskiy Ya.I., Khalturin G.V. *Plutoniya v Devich'ikh Rukakh* = Plutonium in Girls' Hands. Ekaterinburg, LITUR Publ., 2003. 160 p. (In Russ.)].
31. Ishikawa Y., Wada I., Fukumoto M. Alpha-Particle Carcinogenesis in Thorotrast Patients: Epidemiology, Dosimetry, Pathology, and Molecular Analysis. *J Environ Pathol Toxicol Oncol.* 2001;20;4:311-5.
  32. Sharp G.B. The Relationship between Internally Deposited Alpha-Particle Radiation and Subsite-Specific Liver Cancer and Liver Cirrhosis: an Analysis of Published Data. *J Radiat Res.* 2002 Dec;43;4:371-80. Doi: 10.1269/jrr.43.371.
  33. Yamamoto Y., Chikawa J., Uegaki Y., Usuda N., Kuwahara Y., Fukumoto M. Histological Type of Thorotrast-Induced Liver Tumors Associated with the Translocation of Deposited Radionuclides. *Cancer Sci.* 2010 Feb;101;2:336-40. Doi: 10.1111/j.1349-7006.2009.01401.x.
  34. Lin R.T., Boonhat H., Lin Y.Y., Klebe S., Takahashi K. Health Effects of Occupational and Environmental Exposures to Nuclear Power Plants: a Meta-Analysis and Meta-Regression. *Curr Environ Health Rep.* 2024 Sep;11;3:329-339. Doi: 10.1007/s40572-024-00453-8.
  35. Zhang L., Chu J., Xia B., Xiong Z., Zhang S., Tang W. Health Effects of Particulate Uranium Exposure. *Toxics.* 2022 Sep 30;10;10:575. Doi: 10.3390/toxics10100575.
  36. Richardson D.B., Rage E., Demers P.A., Do M.T., DeBono N., Fenske N., Deffner V., Kreuzer M., Samet J., Wiggins C., Schubauer-Berigan M.K., Kelly-Reif K., Tomasek L., Zablotska L.B., Laurier D. Mortality among Uranium Miners in North America and Europe: the Pooled Uranium Miners Analysis (PUMA). *Int J Epidemiol.* 2021 May 17;50;2:633-643. Doi: 10.1093/ije/dyaa195. PMID: 33232447.
  37. Kelly-Reif K., Sandler D.P., Shore D., Schubauer-Berigan M., Troester M.A., Nylander-French L., Richardson D.B. Mortality and Cancer Incidence among Underground Uranium Miners in the Czech Republic 1977-1992. *Occup Environ Med.* 2019 Aug;76;8:511-518. Doi: 10.1136/oemed-2018-105562.
  38. Zablotska L.B., Fenske N., Schnelzer M., Zhivin S., Laurier D., Kreuzer M. Analysis of Mortality in a Pooled Cohort of Canadian and German Uranium Processing Workers with no Mining Experience. *Int Arch Occup Environ Health.* 2018 Jan;91;1:91-103. Doi: 10.1007/s00420-017-1260-9.
  39. Samson E., Piot I., Zhivin S., Richardson D.B., Laroche P., Serond A.P., Laurier D., Laurent O. Cancer and Non-Cancer Mortality among French Uranium Cycle Workers: the TRACY Cohort. *BMJ Open.* 2016 Apr 5;6;4:e010316. Doi: 10.1136/bmjopen-2015-010316.
  40. Bouet S., Davesne E., Samson E., Jovanovic I., Blanchardon E., Challeton-de Vathaire C., Richardson D.B., Leuraud K., Laurier D., Laurent O. Analysis of the Association between Ionizing Radiation and Mortality in Uranium Workers from Five Plants Involved in the Nuclear Fuel Production Cycle in France. *Int Arch Occup Environ Health.* 2019 Feb;92;2:249-262. Doi: 10.1007/s00420-018-1375-7.
  41. Berrington A., Darby S.C., Weiss H.A., Doll R. 100 Years of Observation on British Radiologists: Mortality from Cancer and other Causes 1897-1997. *Br J Radiol.* 2001 Jun;74;882:507-19. Doi: 10.1259/bjr.74.882.740507. PMID: 11459730.
  42. Boice J. Jr., Dauer L.T., Kase K.R., Mettler F.A. Jr., Vetter R.J. Evolution of Radiation Protection for Medical Workers. *Br J Radiol.* 2020 Aug;93;1112:20200282. Doi: 10.1259/bjr.20200282. Epub 2020 Jun 4. PMID: 32496817; PMCID: PMC7446021.
  43. Boice J.D. Jr., Cohen S.S., Mumma M.T., Howard S.C., Yoder R.C., Dauer L.T. Mortality among Medical Radiation Workers in the United States, 1965-2016. *Int J Radiat Biol.* 2023;99;2:183-207. Doi: 10.1080/09553002.2021.1967508. Epub 2022 May 16. PMID: 34731066.
  44. Lee W.J., Ko S., Bang Y.J., Choe S.A., Choi Y., Preston D.L. Occupational Radiation Exposure and Cancer Incidence in a Cohort of Diagnostic Medical Radiation Workers in South Korea. *Occup Environ Med.* 2021 Dec;78;12:876-883. Doi: 10.1136/oemed-2021-107452.
  45. Lopes J., Baudin C., Feuardent J., Roy H., Caër-Lorho S., Leuraud K., Bernier M.O. Cohort Profile: ORICAMs, a French Cohort of Medical Workers Exposed to Low-Dose Ionizing Radiation. *PLoS One.* 2023 Jun 8;18;6:e0286910. Doi: 10.1371/journal.pone.0286910.
  46. Scheibler C., Toprani S.M., Mordukhovich I., Schaefer M., Staffa S., Nagel Z.D., McNeely E. Cancer Risks from Cosmic Radiation Exposure in Flight: a Review. *Front Public Health.* 2022 Nov 22;10:947068. Doi: 10.3389/fpubh.2022.947068.
  47. Hammer G.P., Auvinen A., De Stavola B.L., Grajewski B., Gundestrup M., Haldorsen T., Hammar N., Lagorio S., Linnarsjö A., Pinkerton L., Pukkala E., Rafnsson V., dos-Santos-Silva I., Storm H.H., Strand T.E., Tzonou A., Zeeb H., Blettner M. Mortality from Cancer and other Causes in Commercial Airline Crews: a Joint Analysis of Cohorts from 10 Countries. *Occup Environ Med.* 2014 May;71;5:313-22. Doi: 10.1136/oemed-2013-101395.
  48. Park S., Lee G.B., Lee D., Cha E.S., Han K., Cho M., Seo S. Cancer Risk among Air Transportation Industry Workers in Korea: a National Health Registry-Based Study. *BMC Public Health.* 2024 Sep 7;24;1:2435. Doi: 10.1186/s12889-024-19904-w.
  49. Котеров А.Н., Ушенкова Л.Н., Калинина М.В., Бирюков А.П. «Эффект здорового работника» по показателям общей смертности и смертности от злокачественных новообразований у персонала предприятий ядерной и химической индустрии: мета-анализы // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т.68. №4. С. 43–50 [Koteroov A.N., Ushenkova L.N., Kalinina M.V., Biryukov A.P. The Healthy Worker Effect in Terms of Overall Mortality and Mortality from Malignant Neoplasms among Personnel of Nuclear and Chemical Industry Enterprises: Meta-Analyses. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68;4:43–50 (In Russ.)].

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Участие авторов.** Статья подготовлена одним автором.

**Поступила:** 20.02.2026. Принята к публикации: 25.03.2026.

**Conflict of interest.** The author declare no conflict of interest.

**Financing.** The study had no sponsorship.

**Contribution.** The article was prepared by one author.

**Article received:** 20.02.2026. Accepted for publication: 25.03.2026.