

ОБЩАЯ
РАДИОБИОЛОГИЯ

УДК 613.648.4:57.087.1:539.1.047

СРЕДНЯЯ НАКОПЛЕННАЯ ДОЗА ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАБОТНИКОВ
МИРОВОЙ ЯДЕРНОЙ ИНДУСТРИИ: МАЛЫЕ ДОЗЫ,
МАЛЫЕ ЭФФЕКТЫ. СРАВНЕНИЕ С ДОЗАМИ
ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ РАДИОЛОГОВ[#]

© 2022 г. А. Н. Котеров^{1,*}, А. Р. Туков¹, Л. Н. Ушенкова¹, М. В. Калинина¹, А. П. Бирюков¹

¹ГНЦ РФ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

*E-mail: govorilga@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.12.2021 г.

После доработки 12.01.2022 г.

Принята к публикации 02.03.2022 г.

Проведено синтетическое исследование по оценке средней накопленной за весь период занятости дозы внешнего облучения работниками ядерной индустрии как мировой профессиональной категории (1946–2010). Для выборки из 63 вариантов (18 стран; когорты различных ядерных предприятий, включая интернациональные группы) средняя и медианная дозы составили 31.1 и 24.0 мЗв соответственно. После обработки выборки на предмет выпадающих величин (до 52 вариантов) значения снизились до 21.7 и 20.7 мЗв. Какие бы величины ни учитывать, они ниже границы малых доз радиации с низкой ЛПЭ (до 0.1 Гр/Зв) и, в среднем для группы, не должны приводить ни к каким тканевым (детерминированным) эффектам. Оценка частоты смертности от рака при полученных дозах по избыточному относительному риску (ERR) на 1 Гр (на основе, например, показателя для объединенной когорты из 15 стран; Cardis E. et al., 2005) дала значения, которые невозможно выявить на фоне канцерогенных эффектов нелучевых факторов, конфаундеров и смещений. Так, ожидаемый прирост числа смертей от рака за 10 лет составил всего 0.036–0.06% от численности исследуемой группы. Полученные величины средних доз для работников ядерной индустрии сравнивались с аналогичными параметрами для медицинских радиологов (объединенный показатель для работ из семи стран; преимущественно 1950-е гг. и до 2000 г.), которые составили для среднего значения и медианы 62.9 и 61.9 мЗв соответственно. Зарегистрированная для медицинских радиологов средняя доза, таким образом, в 2–3 раза превышает показатель для работников ядерной индустрии. Хотя вклад инкорпорированных радионуклидов в дозу облучения для второй группы не рассматривался, обнаруженный факт может способствовать формированию относительно благоприятного имиджа занятости в атомной энергетике.

Ключевые слова: работники ядерной индустрии, средние дозы облучения, медико-биологические эффекты, медицинские радиологи

DOI: 10.31857/S0869803122030043

Профессиональные группы работников ядерной индустрии (разработка ядерного оружия, плутониевые и урановые руды, атомные электростанции и пр.) появились в СССР [1], США [2], Великобритании [3] и Франции (см. в [4]) уже в 1940-х годах. Однако самые ранние западные публикации по эффектам у указанного контингента, судя по нашим данным, – это статья 1976 г. по работникам Великобритании [5] и 1977 г. по Hanford site (США) [6]. Таким образом, открытые публикации появились относительно недавно.

Ведущие радиационные эпидемиологи (например, J.D. Voise Jr [7] из США и R. Wakeford [8] из Великобритании) называют работников ядер-

ной индустрии уникальным контингентом для эпидемиологического исследования эффектов малых доз радиации. Такие группы в наибольшей степени приближены к населению, поскольку последнее может испытывать хронические или фракционированные воздействия радиации, причем как в повседневной жизни, так и, порой, на рабочем месте, либо – при медицинской диагностике [9]. Уровень облучения населения увеличивается, в частности из-за медицинских рентгенологических процедур [10], из-за возрастания частоты авиаперелетов и пр. [7].

Важность исследования эффектов у работников ядерной индустрии обусловлена также тем, что для этой группы имеется, вероятно, максимально достоверная информация о накопленных дозах и типах облучения [11]. Так, именно для ра-

[#] Публикуется в авторской редакции.

ботников атомных станций, участников ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС, оказалось возможным суммировать вклад профессионального и аварийного облучения [12–14].

За прошедшие десятилетия с момента опубликования первых работ по эффектам у указанного контингента накопились многие сотни, если не тысячи соответствующих документов и статей по всему миру. Однако, если взять работников ядерной индустрии как некую мировую категорию среди профессиональных групп, имеющих дело с лучевым фактором (среди которых, например, еще рентгенологи и радиологи [11]), то нам неизвестны данные, позволяющие сравнить накапливаемые работниками дозы с показателями для иных профессиональных групп *в целом*. Кто получает за период занятости большую кумулятивную дозу, рентгенологи-радиологи, работники ядерной индустрии (включая разработку ядерного оружия), или какой-то иной облучавшийся контингент? Этот вопрос может возникнуть без связи с тем, к какой стране относится какая группа, и что за предприятие или учреждение она представляет.

Некие средние дозы приведены в работах по ряду объединяющих исследований на интернациональных когортах (трех стран в 1995 г. [15], 15 стран [4], 14 стран [16] и, вновь, трех стран (уже иных) в 2015–2017 гг. [17, 18]). Несмотря на определенную информативность, эти данные, все же, не могут считаться полностью репрезентативными для определения дозовой нагрузки на категорию работники мировой ядерной индустрии *как таковые*. В немногих имеющихся ныне пособиях (или главах в пособиях) по радиационной эпидемиологии [19–22] если и представлена “средняя” (average; mean) доза облучения для такой категории, то обычно по сведениям для объединенной когорты из 15 стран [4], не включавшей, в частности, российские данные и отдельную информацию для ряда крупных центров и лабораторий США и Великобритании.

Цель представленного исследования – определение средней и медианной дозы внешнего облучения, накопленной работниками ядерной индустрии *как мировой эпидемиологической категории*. Полученные данные, на основе известных дозовых зависимостей для стохастических и тканевых (детерминированных) эффектов радиации с низкой ЛПЭ [23–30], могут позволить оценить их вероятность у названного контингента *в принципе*. Кроме того, было проведено сравнение накопленных доз для работников ядерной индустрии и для медицинских радиологов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Работа выполнена на основе анализа опубликованных источников (синтетическое исследова-

ние). Сформированная база данных (база источников) по медико-биологическим эффектам и некоторым иным характеристикам работников ядерной индустрии [31] насчитывала на октябрь 2021 г. более 1200 публикаций и документов из порядка 40 стран мира. Не всю массу было возможно проанализировать в настоящее время; тем не менее, выборка охватывает основные источники на тему, процитированные в BEIR-VII; в документах НКДАР и МКРЗ [23–29]. Часть данных по национальным показателям взята из публикации по исследованию объединенной когорты из 15 стран [4]; значительная доля является результатом прямого поиска через систему PubMed и в имеющейся суббазе отечественных работ.

Из публикаций экстрагировали данные по средней кумулятивной дозе внешнего воздействия, как правило, радиации с низкой ЛПЭ, за весь период деятельности работников. Дозы от инкорпорированных радионуклидов, представленные в работах отдельно, в анализ не включали. Для исследований по национальным регистрам объединенных групп работников, имеющих дело с радиационным фактором (включающим также рентгенологов, радиологов и пр.), извлекали данные только для работников ядерной индустрии.

Построение диаграммы осуществляли с помощью Excel; статистический анализ выборки проводили с использованием программы Statistica, ver. 10. Оценка выпадающих величин выполнена по критерию Шовене [32, 33].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средняя и медианная доза для категории “работники мировой ядерной индустрии”

Всего в выборке были представлены профессионалы из 18 стран (Австралия, Бельгия, Болгария, Великобритания, Венгрия, Германия, Испания, Канада, Ю. Корея, Литва, Россия, Словакия, США, Финляндия, Франция, Швейцария, Швеция и Япония), не считая интернациональных когорт, которые включали контингенты из максимум 14–15 стран [4, 16].

На рис. 1 приведена диаграмма, суммирующая данные для исследуемой выборки. Источники по порядку позиций можно найти в прилагаемой табл. 1.

Распределение показателей для всей группы не было нормальным (по тесту χ^2 отличие от нормального распределения при $p = 10^{-5}$). Показатели среднего значения с 95%-ными доверительными интервалами (CI) и медиана имели следующие величины:

Среднее: 31.1 мЗв (95% CI: 24.6; 37.5);

Медиана: 24.0 мЗв.

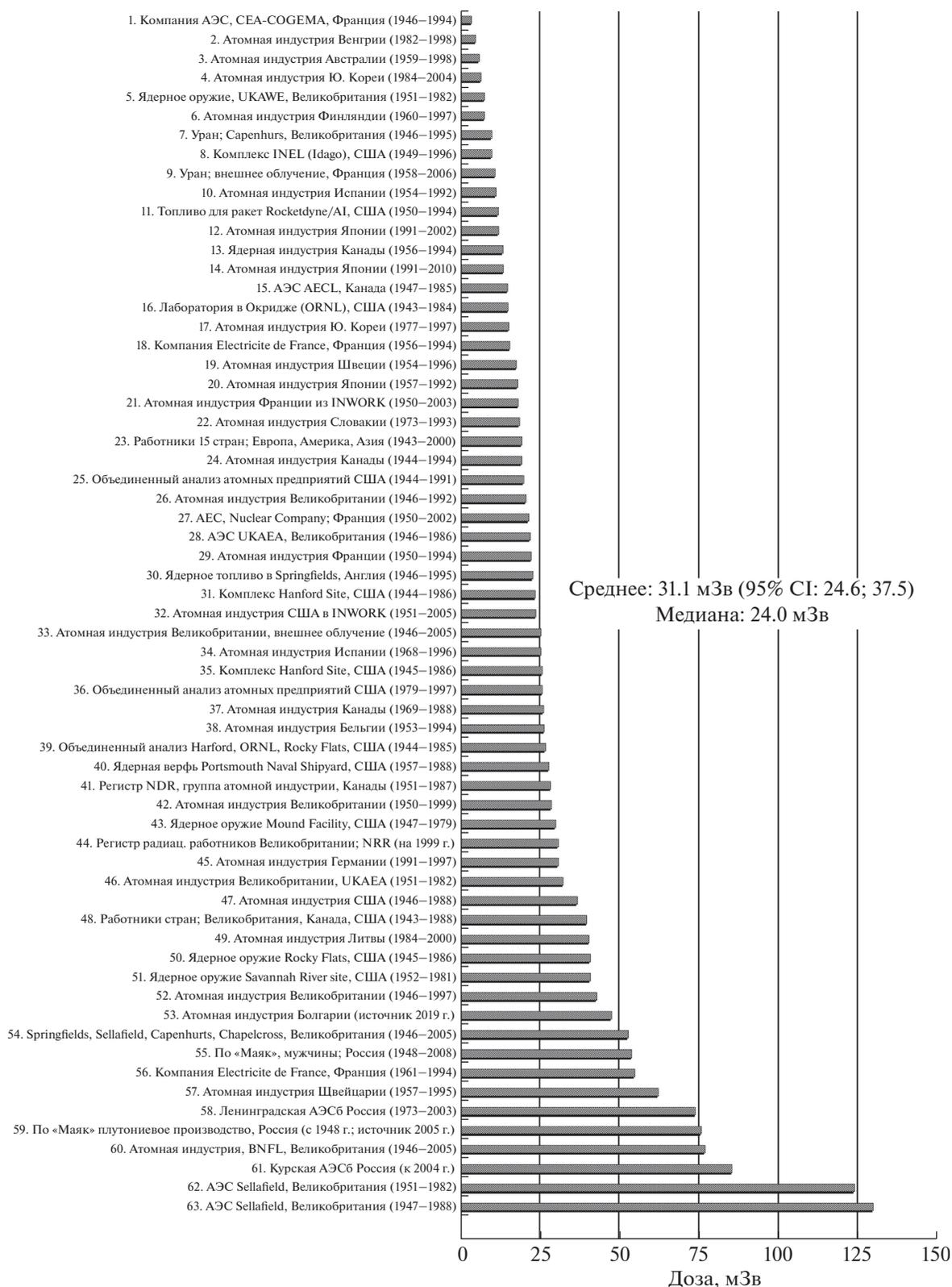


Рис. 1. Дозы внешнего облучения (преимущественно радиации с низкой ЛПЭ), накопленные работниками ядерной индустрии из разных стран за весь период занятости. Ссылки по порядку позиций приведены в табл. 1.

Fig. 1. Doses of external exposure (mainly of radiation with low LET) accumulated by nuclear workers from different countries over the entire period of employment. References in the order of positions are given in table 1.

Таблица 1. Источники с данными по дозам облучения работников ядерной индустрии*
Table 1. Sources with data on radiation doses to nuclear workers*

№ позиции	Ссылка	№ позиции	Ссылка	№ позиции	Ссылка	№ позиции	Ссылка
1	4	17	4	33	49	49	4
2	4	18	4	34	4	50	50
3	4	19	4	35	50	51	60
4	34	20	4	36	51	52	3
5	35	21	44	37	52	53	61
6	4	22	4	38	4	54	62
7	36	23	4	39	53	55	63
8	4	24	4	40	54	56	64
9	37	25	45	41	55	57	4
10	38	26	4	42	44	58	65
11	39	27	46	43	56	59	66
12	40	28	47	44	57	60	49
13	41	29	48	45	58	61	67
14	42	30	36	46	35	62	35
15	43	31	4	47	59	63	68
16	4	32	44	48	15	—	—

* В левых колонках представлены номера позиций с диаграммы на рис. 1.

* The left-hand columns show the position numbers from the diagram in the fig. 1.

Последовательное удаление с помощью критерия Шовене максимальных значений вариант (выпадали) уменьшило выборку с 63 вариант до 52, когда было достигнуто нормальное распределение (χ^2 ; $p = 0.54$). Показатели изменились следующим образом:

Среднее: 21.7 мЗв (95% CI: 18.3; 23.8);

Медиана: 20.7 мЗв.

Возможные медико-биологические эффекты у работников ядерной индустрии

Какие бы значения ни принимать из приведенных выше (до удаления выпадающих величин или после), очевидно, что в среднем работники мировой ядерной индустрии за весь период занятости получали дозы несколько больше *очень* малых (до 0.01 Гр/Зв [69]), но в разы меньше *просто* малых (до 0.1 Гр/Зв [23–26, 69]). Исходя из сводок данных по медико-биологическим эффектам различных диапазонов доз внешнего облучения радиацией с низкой ЛПЭ [20–30, 69], вряд ли можно ожидать существенных последствий.

Так, для облучения непосредственно семенников человека (два американских исследования 1960-х — начала 1970-х гг. на добровольцах в тюрьмах; до 6 Гр на орган; см. в [70]) было показано временное подавление сперматогенеза с достаточно высокой индивидуальной вариабельностью в диапазоне доз от 80–100 мГр (слабые быстрообратимые флуктуации показателя) до 150 мГр

[70]. В принципе считается, что порог дозы для названного эффекта составляет 0.1 Гр, и это наиболее проверенная по первоисточникам информация [71], хотя во многих публикациях и пособиях, в том числе российских [72], фигурирует (без ссылок) величина 0.15 Гр [27, 72–74].

То же самое для влияния облучения на функции хрусталика: как ни снижен ныне порог катарогенных изменений, а все же он не находится ниже границы малых доз [27, 75, 76]. Хотя и имеются отдельные исследования для рентгенологов и радиологов, в которых заявлено об эффектах доз в 10–17 мЗв [77, 78], но вследствие неопределенности в дозиметрии и влияния различных нелучевых факторов подобные эффекты и маловероятны и не подтвердились авторами в последующих работах (при средней дозе в 0.111 Гр [79]). В настоящее время рекомендуемая МКРЗ доза от профессионального воздействия на хрусталик составляет не более 500 мЗв, в среднем по 20 мЗв в течение 5 лет, но не более чем 50 мЗв ежегодно [27].

Названные два эффекта — это единственные тканевые (детерминированные) реакции [27], которых можно было бы хоть как-то ожидать для “среднего” работника ядерной индустрии, но порог дозы, как видим, и здесь не достигается (причем без учета разницы в эффектах от острого и хронического воздействия).

Что же касается частоты злокачественных новообразований, то избыточный относительный

риск (ERR) на 1 Зв в объединенной когорте из 15 стран для всех раков, исключая лейкозы, составил 0.97 (95% CI: 0.14; 1.97) [4]. При удалении из выборки выпадающих данных для канадской группы с неопределенностями в дозиметрии [21, 24] получено значение 0.58 (–0.1; 1.39) [16, 80]. Таким образом, относительные риски (RR) составят 1.58, максимум 1.97 на 1 Гр.

В западных странах, по данным IARC (см. в [81]), в год регистрируется не более 150–200 смертей от всех злокачественных опухолей на 100000 населения (мужчины). Таким образом, для 100000 работников ядерной индустрии, если бы они получили дозу по 1 Гр каждый за десять лет, то, учитывая даже $RR = 1.97$, можно было бы ожидать не более 1940 дополнительных смертей от рака. Но работники ядерной индустрии массово, сотнями тысяч, получали ранее средние дозы никак не более 31 мЗв (медианные дозы – еще меньше) за весь период занятости (см. выше). Иными словами, ожидаемая прибавка смертности от раков для 100000 работников (абсолютный риск) составит 60 человек за 10 лет. Это – 0.06% от группы.

Однако ERR для когорты из 15 стран сильно искажается, как сказано, вкладом аномальной канадской группы, за что соответствующее исследование не раз критиковалось [21, 24] (и др.). Поэтому правильнее учитывать риск, показанный для 14 стран, т.е. $RR = 1.58$. В этом случае соответствующая прибавка смертности от злокачественных новообразований для 100000 работников ядерной индустрии за 10 лет будет равна 36 человек, что составит 0.036% от группы.

Подобные величины рисков, в связи со множеством канцерогенных нелучевых факторов обыденной жизни и работы, конфаундеров и смещений (bias), проблематично выявить в обсервационных, эпидемиологических исследованиях [82–84].

Сравнение накопленных доз для работников ядерной индустрии и медицинских радиологов

Представляло интерес выполнить то, о чем говорилось выше как о возможной значимости работы. А именно: попытаться сравнить средние накопленные дозы внешнего воздействия радиации с низкой ЛПЭ для категорий работников ядерной индустрии и медицинских специалистов, имеющих дело с радиационным фактором (рентгенологов, радиологов и пр.; собирательный термин здесь “медицинские радиологи”). Конкретных данных для второй группы обнаружено относительно мало; соответствующая информация приведена в табл. 2. Понятно, что необходимо сравнивать показатели для более или менее аналогичных временных периодов, учитывая, что рентгенологи как специалисты появились еще в

1897 г. [88], в то время как работники ядерной индустрии – только во второй половине 1940-х годов [1–4]. Для радиологов ранних периодов имеются данные об оцененных дозах [87, 88] (и др.), но эти значения весьма велики (см. примечания в табл. 2).

Для вариационного ряда из дозовых величин, сформированного на основе данных в табл. 2, по критерию Шовене последовательно выпадали четыре максимальных значения – от 250 до 551 мЗв (все – для китайских радиологов). Оставшаяся выборка характеризовалась нормальным распределением (χ^2 ; $p = 0.436$) и имела следующие центральные тенденции:

Среднее: 62.9 мЗв (95% CI: 33.0; 92.8);

Медиана: 61.9 мЗв.

Если сравнить эти значения с представленными выше показателями для работников ядерной индустрии, то оказывается, что медицинские радиологи за относительно сходный временной период накапливали почти в 2–3 раза большие средние дозы внешнего облучения. Конечно, нельзя сбрасывать со счетов и дозы внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов у работников ядерных производств, которые могли достигать значительных величин. К примеру, для Sellafield (Великобритания) в 1946–2005 гг. средняя доза внутреннего воздействия оценивалась в 212 мЗв [49], а для ПО “Маяк” за период 1948–2008 гг. – в 266 мЗв (от ^{239}Pu на печень) [94].

Тем не менее не все работники ядерной индустрии подвергаются воздействию радионуклидов, поэтому тот факт, что в качественном смысле накопленные ими дозы в разы меньше, чем для медицинских радиологов *как таковых*, может послужить положительным аргументом в пользу ответственного профессионального сознания.

Возможные ограничения при интерпретации результатов исследования

А. Данные для некоторых национальных групп работников в настоящей выборке могут отчасти повторяться, поскольку некоторые когорты вошли в наш анализ (рис. 1) и индивидуально, и в форме усредненных значений, полученных в объединенных исследованиях интернациональных когорт (три страны, 15 стран, 14 стран).

Б. Согласно авторам [12–14], данные по медико-биологическим зависимостям “доза–эффект” для работников ядерной индустрии могут быть результатом некорректных эпидемиологических исследований с использованием не суммарной дозы облучения, как этого требуют методы эпидемиологии и директивные документы, а доз только для одного вида облучения, т.е. профессионального (без учета вклада медицинского, аварийного и от естественного радиационного фона).

Таблица 2. Средние накопленные дозы облучения у медицинских специалистов радиационного профиля различных стран мира***Table 2.** Average cumulative radiation doses of medical specialists of radiation profile from different countries of the world*

Источник	Страна	Период начала работы	Средняя накопленная доза, мЗв	Примечание
Andersson M. et al., 1991 [85]	Дания	1954–1982	18.4	–
Ashmore J.P. et al., 1998 [55]	Канада	1951–1987	3.8	Национальный дозовый регистр (NDR) радиационных работников Канады. Для работников ядерной индустрии средняя накопленная доза равна 28.5 мЗв
Voice J.D. Jr et al., 1992 [86]	США	Не ранее 1953 г.; статья 1992 г.	50–200 (взята середина диапазона – 125)	Доза за десять лет
Simon S.L. et al., 2006 [87]	США	1916–1984	63.8	Различные специализации. Медиана 28.7 мЗв
Berrington A. et al., 2001 [88]	Великобритания	1955–1979	100	Дозы для более ранних периодов: в 1897–1920 гг. – 20 Зв; в 1921–1935 гг. – 3.8 Зв; в 1936–1954 гг. – 1.25 Зв
Wang Z.Q. et al., 1998 [89]	Китай	До 1960-х гг.	530	Реконструкция доз физической и биологической дозиметрией
То же	Китай	1960–1969	260	
То же	Китай	После 1970-х гг.	60	
Wang J.X. et al., 2002 [90]	Китай	1950–1970	551	В работах Wang J.X. et al., 2000; 2001 [91, 92] приведены несколько иные величины и период: 1950–1970 гг. – 508 мЗв; 1970–1990 гг. – 68 Зв
То же	Китай	1970–1980	82	
Sun Z. et al., 2016 [93]	Китай	1950–1995	250	Медиана дозы – 120 мГр
Mrena S. et al., 2011 [77]	Финляндия	1962–2000	19, 60 и 65 (взято среднее 48)	Три группы с различной степенью катарактогенного эффекта. Максимальная доза – 300 мЗв
Auvinen A. et al., 2015 [79]	Финляндия	1969–1998	111	–
Rajabi A.B. et al., 2015 [78]	Иран	Статья 2015 г.	17.2	Максимальное значение среди ряда специализаций (для электрофизиологической лаборатории)

* Имеется еще ряд работ по стохастическим эффектам у медицинских радиологов, рентгенологов и пр. (12 публикаций для США, 6 – для Китая, 2 – для Великобритании, 1 – для Финляндии и 1 – для Кувейта), но сведения о средних накопленных (кумулятивных) дозах в них не обнаружены.

* There are also a number of studies on stochastic effects by medical radiologists, roentgenologists, etc. (12 publications for the USA, 6 for China, 2 for the UK, 1 for Finland, and 1 for Kuwait), but information on the average accumulated (cumulative) doses were not found in them.

Однако, исходя из Санитарных правил СП 2.6.1.758-99, “суммарная доза от всех видов облучения используется для оценки радиационной обстановки и ожидаемых медицинских последствий, а также для обоснования защитных мероприятий и оценки их эффективности” [96]. В настоящее время в связи с тем, что ни один медико-дозиметрический регистр не соответствует указанным требованиям, отсутствует возможность проведения корректных исследований по оценке риска возникновения радиационно-индуцированных заболеваний при малых дозах облучения на существующих регистрах, как в России, так и за рубежом. Поэтому результаты, получаемые на материале регистров и опубликованных источников, можно рассматривать как предварительные.

Японские исследователи определяли дозы от диагностических радиологических исследований для оценки радиационных рисков у выживших после атомных бомбардировок. Сделан вывод, что воздействие А-бомбы нельзя надежно оценить, если медицинские дозы не будут тщательно включены в эти долгосрочные оценки [97].

Уже появляются работы, подтверждающие указанное положение [98]. Был оценен эксцесс относительного риска возникновения солидных раков у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС с использованием дозы внешнего облучения, накопленной при работе в 30-километровой зоне, и величины суммарной экспозиции — дозы, полученной в Чернобыле вкуче с дозой профессионального облучения. Имело место значительное (в 8.6 раза) различие в величине ERR на 1 Гр при использовании данных только по дозам, полученным в результате ликвидации аварии, и при суммарных дозах облучения. Такое различие в величине риска заставляет задуматься о правомерности использования этих данных при оценке влияния дозы внешнего облучения на заболеваемость злокачественными новообразованиями без учета влияния других источников радиации. РНКРЗ одобрила работу по оценке риска возникновения радиационно-индуцированных заболеваний с использованием доз различных видов облучения, проводимую ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, и рекомендовала организациям, разрабатывающим и эксплуатирующим медико-дозиметрические регистры, организовать сбор информации о дозах от всех видов облучения [99].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работники ядерной индустрии появились как профессиональная категория в 1940-х годах в разных странах, преимущественно при разработке атомного оружия и первых АЭС [1–4]. Эта деятельность считалась и считается заведомо опас-

ной, хотя, вследствие “эффекта здорового работника”, лучшего медицинского обслуживания и других предпочтений, стандартный индекс смертности сравнительно с генеральной популяцией (SMR) для таковых работников разных стран почти всегда оказывается сниженным. Результат мета-анализа указанного показателя продемонстрировал $SMR = 0.75$ даже для смертности от рака [95]. Ранее нами отмечалось, что для объединенной когорты работников Великобритании в 1940-х — до середины 1950-х годов SMR составлял 0.4–0.6 (т.е. смертность была на 40–60% ниже, чем у соответствующей поло-возрастной группы населения), хотя потом индекс возрос до 0.7–0.8 и более. На то, что это не особенность только Великобритании, указывала сходная тенденция и для мужчин — работников ПО “Маяк” (начиная с середины 1970-х годов и до 2010 г.) [31].

В связи с ростом числа работников ядерной индустрии в мире, со становлением этой группы занятых как некоей мировой профессиональной категории, практическую и социальную значимость представляет любая информация о данной группе как бы *в целом* — для сравнения с другими группами занятых, в том числе также имеющими дело с радиационным фактором.

В представленном исследовании были оценены средняя и медианная дозы внешнего облучения, как правило радиацией с низкой ЛПЭ, накапливаемые работниками ядерной индустрии на протяжении их занятости. Сформированная выборка (база источников) составила 63 позиции, по 18 странам и целому ряду ядерных инсталляций, как оружейного, так и энергетического плана. Было обнаружено, что в исследованиях за периоды от 1946 до 2010 г. средняя и медианная дозы составили для всей выборки 31.1 и 24.0 мЗв соответственно. А после обработки выборки на предмет выпадающих величин, заканчивающейся формированием вариационного ряда с нормальным распределением, — 21.7 и 20.7 мЗв соответственно.

Эти значения выше диапазона очень малых доз (до 0.01 Гр/Зв [69]), но меньше малых доз (до 0.1 Гр/Зв [23–26, 69]). Учитывая принятую для практики радиационной защиты и оценки лучевых последствий линейную беспороговую гипотезу [20–29], такие дозы в среднем не должны приводить ни к каким тканевым (детерминированным) эффектам [27], а оценка по ERR на 1 Гр для частоты смертности от рака (на основе показателя для объединенной когорты из 15 стран [4]) показывает значения, которые невозможно реально выявить на фоне канцерогенных эффектов нелучевых факторов вкуче с различными конфаундерами и смещениями. Так, по расчетам на основе указанного риска [4] и годовой смертности от рака в западных странах [81], при названных

величинах средних доз за 10 лет в группе из 100 000 работников ядерной индустрии теоретически возможна атрибутивная облучению прибавка числа злокачественных новообразований, составляющая всего 0.036–0.06% от всей группы. Такие риски проблематично выявить в обсервационных, эпидемиологических исследованиях [82–84].

Другой группой, профессионально имеющей дело с радиацией, являются медицинские радиологи (собираательное наименование для рентгенологов, радиологов и других специалистов, использующих лучевые методы в медицине). Проведенное здесь исследование накопленной медицинскими радиологами дозы (источники из семи стран) показало, что для периода преимущественно с 1950-х годов и до 2000 г. среднее значение и медиана составляют минимум 62.9 и 61.9 мЗв соответственно.

Полученная для медицинских радиологов средняя доза, таким образом, в 2–3 раза превышает показатель для работников ядерной индустрии. И хотя речь идет только о дозе внешнего облучения (вклад инкорпорированных радионуклидов для второй группы работников не рассматривался), обнаруженный факт, выявленный для категории работников ядерной индустрии *в целом*, может способствовать формированию относительно благоприятного имиджа занятости в атомной энергетике.

В то же время при использовании какой-либо части от общей дозы облучения человека (в данном случае – только профессиональной, хотя существует еще медицинская и пр. экспозиции) для расчета риска возникновения индуцированных радиацией заболеваний возможно получение некорректных результатов, неизвестно насколько далеких от истины [98].

Сказанное еще раз подчеркивает актуальность и необходимость создания единого медико-дозиметрического регистра работников предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом» с информацией о дозах от всех источников излучения на человека, обозначенных в директивных документах.

Таким образом, при построении корректной радиационной безопасности первостепенной задачей радиационной эпидемиологии, радиационной медицины и радиационной гигиены в настоящее время необходимо считать сбор и формирование индивидуальной дозы от всех видов облучения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ И ВОЗМОЖНОСТЬ СУБЪЕКТИВНЫХ УКЛОНОВ

Конфликт интересов отсутствует. Представленное исследование выполнено в рамках бюджетной темы

НИР ФМБА России и не поддерживалось никакими иными источниками финансирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гуськова А.К.* Атомная отрасль страны глазами врача. М.: Реальное Время, 2004. 240 с. [*Gus'kova A.K.* The nuclear industry of the country through the eyes of a doctor. Moscow: Realnoe Vremia, 2004. 240 p. (In Russ.)]
2. *Boice J.D. Jr., Cohen S.S., Mumma M.T. et al.* Mortality among mound workers exposed to polonium-210 and other sources of radiation, 1944–1979 // *Radiat. Res.* 2014. V. 181. № 2. P. 208–228. <https://doi.org/10.1667/RR13395.1>
3. *Atkinson W.D., Law D.V., Bromley K.J., Inskip H.M.* Mortality of employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946–97 // *Occup. Environ. Med.* 2004. V. 61. № 7. P. 577–585. <https://doi.org/10.1136/oem.2003.012443>
4. *Cardis E., Vrijheid M., Blettner M. et al.* Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries // *Br. Med. J.* 2005. V. 331. № 7508. P. 77–82. <https://doi.org/10.1136/bmj.38499.599861.E0>
5. *Reissland J.A., Kay P., Dolphin G.W.* The observation and analysis of cancer deaths among classified radiation workers // *Phys. Med. Biol.* 1976. V. 21. № 6. P. 903–919. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/21/6/001>
6. *Mancuso T.F., Stewart A., Kneale G.* Radiation exposures of Hanford workers dying from cancer and other causes // *Health Phys.* 1977. V. 33. № 5. P. 369–385. <https://doi.org/10.1097/00004032-197711000-00002>
7. *Boice J.D. Jr.* The importance of radiation worker studies // *J. Radiol. Prot.* 2014. V. 34. № 3. P. E7–E12. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/3/E7>
8. *Wakeford R.* The growing importance of radiation worker studies // *Br. J. Cancer.* 2018. V. 119. № 5. P. 527–529. <https://doi.org/10.1038/s41416-018-0134-6>
9. *Simon S.L., Linet M.S.* Radiation-exposed populations: who, why, and how to study // *Health Phys.* 2014. V. 106. № 2. P. 182–195. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000006>
10. UNSCEAR 2010. Report to the General Assembly, with Scientific Annex. V. I. Ann. A. Medical radiation exposures. New York: United Nations, 2010. P. 23–220.
11. UNSCEAR 2000. Report to the General Assembly, with Scientific Annex. Volume I. Annex E. Occupational radiation exposures. New York: United Nations, 2000. P. 499–654.
12. *Туков А.Р., Дзагоева Л.Г.* Сравнительный анализ заболеваемости злокачественными новообразованиями и смертности от них у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС, работавших на предприятиях атомной промышленности и атомных электростанциях России // *Мед. радиология и радиац. безопасность.* 2002. Т. 47. № 4. С. 27–33. [*Tukov A.R., Dzagoeva L.G.* Cancer incidence and cancer mortality among liquidators of the

- Chernobyl accident, working in the nuclear industry of Russia; comparative analysis // *Medit. Radiologiya. Radiat. Bezopasnost* ('Medical Radiology and Radiation Safety'; Moscow). 2002. V. 47. № 4. P. 27–33. (In Russ. Engl. abstr.)]
13. *Шафранский И.Л., Туков А.Р., Клеева Н.А.* Заболеваемость раком щитовидной железы и оценка рисков его развития у работников предприятий атомной промышленности России, принимавших участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС // *Мед. радиология и радиац. Безопасность*. 2011. Т. 56. № 2. С. 30–37. [*Shafran-sky I.L., Tukov A.R., Kleeva N.A.* Cancer thyroid incidence and radiogenic risk in nuclear power workers participated in the recovery of Chernobyl NPP accident // *Medit. Radiologiya. Radiat. Bezopasnost* ('Medical Radiology and Radiation Safety'; Moscow). 2011. V. 56. № 2. P. 30–37. (In Russ. Engl. abstr.)]
 14. *Туков А.Р., Гнеушева Г.И., Суворова Ю.В., Дикарев В.А.* Заболеваемость неонкологическими болезнями лиц, подвергающихся профессиональному радиационному воздействию // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2013. Т. 45. № 2. С. 14–21. [*Tukov A.R., Gneusheva G.I., Suvorova Yu.V., Dikarev V.A.* Non cancer disease in professional exposed to occupational radiation // *Medicine of Extreme Situations* (Moscow). 2013. V. 45. № 2. P. 14–21. (In Russ. Engl. abstr.)]
 15. *Cardis E., Gilbert E.S., Carpenter L. et al.* Effects of low doses and low dose rates of external ionizing radiation: cancer mortality among nuclear industry workers in three countries // *Radiat. Res.* 1995. V. 142. № 2. P. 117–132. <https://doi.org/10.2307/3579020>
 16. *Wakeford R.* Nuclear worker studies: promise and pitfalls // *Br. J. Cancer*. 2014. V. 110. № 1. P. 1–3. <https://doi.org/10.1038/bjc.2013.713>
 17. *Daniels R.D., Bertke S.J., Richardson D.B. et al.* Examining temporal effects on cancer risk in the International Nuclear Workers' Study // *Int. J. Cancer*. 2017. V. 140. № 6. P. 1260–1269. <https://doi.org/10.1002/ijc.30544>
 18. *Richardson D.B., Cardis E., Daniels R.D. et al.* Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS) // *Br. Med. J.* 2015. V. 351. Art. h5359. <https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>
 19. *Wing S.* Basics of radiation epidemiology // *Radiation Health. Effects* / Eds G.M. Burdman, L. Kaplan. Seattle: Hanford Health Information Network, 1994. <http://www.geocities.ws/irradiated45rems/7page6.html> (address data 10.12.21).
 20. *Boice J.D. Jr.* Ionizing Radiation // *Schottenfeld and Fraumeni Cancer Epidemiology and Prevention* / Eds D. Schottenfeld and J.F. Fraumeni. 3th ed. New York: Oxford University Press, 2006. P. 259–293.
 21. *Berrington de Gonzalez A., Bouville A., Rajaraman P., Schubauer-Berigan M.* Ionizing Radiation // *Schottenfeld and Fraumeni Cancer Epidemiology and Prevention* / Eds M.J. Thun et al. 4th ed. New York: Oxford University Press. Printed by Sheridan Books, Inc., USA, 2018. P. 227–248.
 22. *Zeeb H., Merzenich H., Wicke H., Blettner M.* Radiation Epidemiology // *Schottenfeld and Fraumeni Cancer Epidemiology and Prevention* / Eds M.J. Thun et al. 4th ed. New York: Oxford University Press. Printed by Sheridan Books, Inc., USA, 2018. P. 2003–2037.
 23. National Research Council (NRC), Division on Earth and Life Studies, Board on Radiation Effects Research, Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII. Phase 2.* National Academies Press, 2006. 422 p.
 24. *Dauer L.T., Brooks A.L., Hoel D.G. et al.* Review and evaluation of updated researches on the health effects associated with low-dose ionizing radiation // *Radiat. Prot. Dosim.* 2010. V. 140. № 2. P. 103–136. (Appendix to BEIR-VII.) <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq141>
 25. ICRP Publication 99. Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk. *Annals of the ICRP* / Ed. J. Valentin. Amsterdam – New-York: Elsevier, 2006. 147 p.
 26. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP* / Ed. J. Valentin. Amsterdam – New York: Elsevier, 2007. 329 p.
 27. ICRP Publication 118. ICRP Statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Annals of the ICRP* / Ed. C.H. Clement. Amsterdam – New York: Elsevier, 2012. 325 p.
 28. UNSCEAR 2006. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I. Annex A. Epidemiological studies of radiation and cancer. New York: United Nations, 2008. P. 17–322.
 29. UNSCEAR 2012. Report to the General Assembly, with Scientific Annex. Annex B. Uncertainties in risk estimates for radiation-induced cancer. New York, 2014. 219 p.
 30. *Котеров А.Н., Вайнсон А.А.* Биологические и медицинские эффекты излучения с низкой ЛПЭ для различных диапазонов доз // *Мед. радиология и радиац. безопасность*. 2015. Т. 60. № 3. С. 5–31. [*Kotero A.N., Wainson A.A.* Health effects of low Let radiation for various dose ranges // *Medit. Radiologi-ya. Radiat. Bezopasnost* ('Medical Radiology and Radiation Safety', Moscow). 2015. V. 60. № 3. P. 5–31. (In Russ. Engl. abstr.)]
 31. *Котеров А.Н., Ушенкова Л.Н., Калинина М.В., Бирюков А.П.* Краткий обзор мировых исследований лучевых и нелучевых эффектов у работников ядерной индустрии // *Медико-биологические проблемы жизнедеятельности (Гомель)*. 2020. № 1. С. 17–31. [*Kotero A.N., Ushenkova L.N., Kalinina M.V., Biryukov A.P.* Brief review of world researches of radiation and non-radiation effects in nuclear industry workers // *Medical and Biological Problems of Life Activity* (Gomel). 2020. № 1. P. 17–31. (In Russ. Engl. abstr.)]
 32. *Кокунин В.А.* Статистическая обработка данных при малом числе опытов // *Укр. биохим. журн.* 1975. Т. 47. № 6. С. 776–790. [*Kokunin V.A.* Statistical processing of data from a small number of experiments //

- Ukr. Biokhim. Zh. ("Ukrainian Journal of Biochemistry", Kiev). 1975. V. 47. № 6. P. 776–791. (In Russ.)]
33. Руди Д.Ю., Попова М.В., Петров С.И. Грубая погрешность и критерии их исключения // Сб. докл. 5-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках специализир. форума 'Expo Build Russia' "Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии". (Екатеринбург, 14 апреля 2016 г.). Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2016. С. 179–181. [Rudi D.Yu., Popova M.V., Petrov S.I. Gross error and criteria for their exclusion // Reports of 5th international scientific and practical conference within the framework of the specialized forum 'Expo Build Russia' "Efficient and high-quality supply and use of electricity". (Yekaterinburg, April 14, 2016). Yekaterinburg: Publ. house of UMC UPI, 2016. P. 179–181. (In Russ.)] https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/40261/1/eksie_2016_49.pdf (access data 10.12.2021)
 34. Ahn Y.S., Park R.M., Koh D.H. Cancer admission and mortality in workers exposed to ionizing radiation in Korea // J. Occup. Environ. Med. 2008. V. 50. № 7. P. 791–803. <https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e318167751>
 35. Beral V., Fraser P., Carpenter L. et al. Mortality of employees of the Atomic Weapons Establishment, 1951–1982 // Br. Med. J. 1988. V. 297. № 6651. P. 757–770. <https://doi.org/10.1136/oem.2003.012443>
 36. McGeoghegan D., Binks K. The mortality and cancer morbidity experience of workers at the Springfields uranium production facility, 1946–95 // J. Radiol. Prot. 2000. V. 20. № 2. P. 111–137. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/20/2/301>
 37. Bouet S., Davesne E., Samson E. et al. 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. V. 92. № 2. P. 249–262. <https://doi.org/10.1007/s00420-018-1375-7>
 38. Rodriguez Artalejo F., Castano Lara S. et al. Occupational exposure to ionising radiation and mortality among workers of the former Spanish Nuclear Energy Board // Occup. Environ. Med. 1997. V. 54. № 3. P. 202–208. <https://doi.org/10.1136/oem.54.3.202>
 39. Ritz B., Morgenstern H., Froines J., Young B.B. Effects of exposure to external ionizing radiation on cancer mortality in nuclear workers monitored for radiation at Rocketdyne/Atomics International // Am. J. Ind. Med. 1999. V. 35. № 1. P. 21–31. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0274\(199901\)35:1<21::aid-ajim4>3.0.co;2-x](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0274(199901)35:1<21::aid-ajim4>3.0.co;2-x)
 40. 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. V. 32. № 1. P. 73–83. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/32/1/73>
 41. 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. V. 110. № 1. P. 214–223. <https://doi.org/10.1038/bjc.2013.592>
 42. Kudo Sh., Yoshimoto K., Furuta H. et al. Occupational radiation exposure and leukemia mortality among nuclear workers in Japan: J-EPISODE, 1991–2010 // Jpn. J. Health Phys. 2018. V. 53. № 3. P. 146–153. <https://doi.org/10.5453/jhps.53.146>
 43. Gribbin M.A., Weeks J.L., Howe G.R. Cancer mortality (1956–1985) among male employees of Atomic Energy of Canada Limited with respect to occupational exposure to external low-linear-energy-transfer ionizing radiation // Radiat. Res. 1993. V. 133. № 3. P. 375–380. <https://doi.org/10.2307/3578225>
 44. Thierry-Chef I., Richardson D.B., Daniels R.D. et al. Dose estimation for a study of nuclear workers in France, the United Kingdom and the United States of America: methods for the International Nuclear Workers Study (INWORKS) // Radiat. Res. 2015. V. 183. № 6. P. 632–642. <https://doi.org/10.1667/RR14006.1>
 45. Schubauer-Berigan M.K., Daniels R.D., Bertke S.J. et al. Cancer mortality through 2005 among a pooled cohort of U.S. nuclear workers exposed to external ionizing radiation // Radiat. Res. 2015. V. 183. № 6. P. 620–631. <https://doi.org/10.1667/RR13988.1>
 46. Metz-Flamant C., Samson E., Caer-Lorho S. et al. Leukemia risk associated with chronic external exposure to ionizing radiation in a French cohort of nuclear workers // Radiat. Res. 2012. V. 178. № 5. P. 489–498. <https://doi.org/10.1667/RR2822.1>
 47. Fraser P.L., Carpenter N., Maconochie C. et al. Cancer mortality and morbidity in employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946–86 // Br. J. Cancer. 1993. V. 67. № 3. P. 615–624. <https://doi.org/10.1038/bjc.1993.113>
 48. Metz-Flamant C., Laurent O., Samson E. et al. Mortality associated with chronic external radiation exposure in the French combined cohort of nuclear workers // Occup. Environ. Med. 2013. V. 70. № 9. P. 630–638. <https://doi.org/10.1136/oemed-2012-101149>
 49. Gillies M., Haylock R. The cancer mortality and incidence experience of workers at British Nuclear Fuels plc, 1946–2005 // J. Radiol. Prot. 2014. V. 34. № 3. P. 595–623. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/3/595>
 50. Gilbert E.S., Omohundro E., Buchanna J., Holter N. Mortality of workers at the Hanford site: 1945–1986 // Health Phys. 1993. V. 64. № 6. P. 577–590. <https://doi.org/10.1097/00004032-199306000-00001>
 51. Howe G.R., Zablotska L.B., Fix J.J. et al. Analysis of the mortality experience amongst U.S. nuclear power industry workers following chronic low-dose exposure to ionizing radiation // Radiat. Res. 2004. V. 162. № 5. P. 517–526. <https://doi.org/10.1667/rr3258>
 52. Sont W.N., Zielinski J.M., Ashmore J.P. et al. First analysis of cancer incidence and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada // Am. J. Epidemiol. 2001. V. 153. № 4. P. 309–318. <https://doi.org/10.1093/aje/153.4.309>
 53. Gilbert E.S., Fix J.J. Accounting for bias in dose estimates in analyses of data from nuclear worker mortality studies // Health Phys. 1995. V. 68. № 5. P. 650–660. <https://doi.org/10.1097/00004032-199505000-00004>

54. *Sponsler R., Cameron J.R.* Nuclear shipyard worker study (1980–1988): a large cohort exposed to low-dose-rate gamma radiation // *Int. J. Low Radiat.* 2005. V. 1. № 4. P. 463–478.
55. *Ashmore J.P., Krewski D., Zielinski J.M. et al.* First analysis of mortality and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada // *J. Epidemiol.* 1998. V. 148. № 6. P. 564–574. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a009682>
56. *Wiggs L.D., Cox-DeVore C.A., Wilkinson G.S., Reyes M.* Mortality among workers exposed to external ionizing radiation at a nuclear facility in Ohio // *J. Occup. Med.* 1991. V. 33. № 5. P. 632–637.
57. *Muirhead C.R., Goodill A.A., Haylock R.G. et al.* Occupational radiation exposure and mortality: second analysis of the National Registry for Radiation Workers // *J. Radiol. Prot.* 1999. V. 19. № 1. P. 3–26. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/19/1/002>
58. *Hammer G.P., Fehringer F., Seitz G. et al.* Exposure and mortality in a cohort of German nuclear power workers // *Radiat. Environ. Biophys.* 2008. V. 47. № 1. P. 95–99. <https://doi.org/10.1007/s00411-007-0134-z>
59. *Carpenter L., Higgins C., Douglas A. et al.* Combined analysis of mortality in three United Kingdom nuclear industry workforces, 1946–1988 // *Radiat. Res.* 1994. V. 138. № 2. P. 224–238. <https://doi.org/10.2307/3578592>
60. *Cragle D.L., McLain R.W., Qualters J.R. et al.* Mortality among workers at a nuclear fuels production facility // *Am. J. Ind. Med.* 1988. V. 14. № 4. P. 379–401. <https://doi.org/10.1002/ajim.4700140404>
61. *Aneva N., Zaharieva E., Katsarska O. et al.* Inflammatory profile dysregulation in nuclear workers occupationally exposed to low-dose gamma radiation // *J. Radiat. Res.* 2019. V. 60. № 6. P. 768–779. <https://doi.org/10.1093/jrr/trz059>
62. *McGeoghegan D., Binks K., Gillies M. et al.* The non-cancer mortality experience of male workers at British Nuclear Fuels plc, 1946–2005 // *Int. J. Epidemiol.* 2008. V. 37. № 3. P. 506–518. <https://doi.org/10.1093/ije/dyn018>
63. *Azizova T.V., Hamada N., Bragin E.V. et al.* Risk of cataract removal surgery in Mayak PA workers occupationally exposed to ionizing radiation over prolonged periods // *Radiat. Environ. Biophys.* 2019. V. 58. № 2. P. 139–149. <https://doi.org/10.1007/s00411-019-00787-0>
64. *Rogel A., Carre N., Amoros E. et al.* Mortality of workers exposed to ionizing radiation at the French National Electricity Company // *Am. J. Ind. Med.* 2005. V. 47. № 1. P. 72–82. <https://doi.org/10.1002/ajim.20113>
65. *Ivanov V.K., Ilyn L.A., Tsyb A.F. et al.* About assessment of potential risk in the nuclear industry using an example of the Leningrad NPP // *Radiation&Risk (Obninsk)*. 2004. (Special issue). P. 18–26.
66. *Окладникова Н.Д., Скотт Б.Р., Токарская З.Б. и др.* Уровень нестабильных и стабильных аберраций при инкорпорации нетранспортабельных соединений плутония-239 // *Мед. радиология и радиац. безопасность*. 2005. Т. 50. № 6. С. 23–32. [*Okladnikova N.D., Scott B.R., Tokarskaya Z.B. et al.* Evaluation of genome stability at incorporation of non-transportable compounds of ^{239}Pu // *Medits. Radiologiya. Radiat. Bezopasnost* ('Medical Radiology and Radiation Safety', Moscow). 2005. V. 50. № 6. P. 23–32. (In Russ. Engl. abstr.)]
67. *Туков А.Р.* Сбор ретроспективных данных о случаях онкологических заболеваний, наполнение БД медицинского раздела регистра и анализ данных о частоте заболеваний различной нозологии среди персонала Курской АЭС с начала работы станции до 2004 г. Разработка методики прогнозирования и оценки радиационных рисков онкологических заболеваний при пролонгированном облучении и программного обеспечения по реализации методики. Отчет по теме “Создание медико-дозиметрического регистра персонала Курской АЭС (МДР Курской АЭС)”. ГИЦ – Институт биофизики Минздрава РФ. М.: 2005. 17 с. [*Tukov A.R.* Collecting retrospective data on cases of oncological diseases, filling out the database of the medical section of the register and analyzing data on the incidence of diseases of various nosologies among the personnel of the Kursk NPP from the start of operation of the station until 2004. Development of a methodology for predicting and assessing radiation risks of oncological diseases with prolonged exposure and software for implementation techniques. Report on the topic ‘Creation of a medical and dosimetric register of the Kursk NPP personnel (MDR of the Kursk NPP)’. State Scientific Center – Institute of Biophysics; Ministry of Health of the Russian Federation. M.: 2005 17 p. (In Russ.)]
68. *Douglas A.J., Omar R.Z., Smith P.G.* Cancer mortality and morbidity among workers at the Sellafield plant of British Nuclear Fuels // *Br. J. Cancer.* 1994. V. 70. № 6. P. 1232–1243. <https://doi.org/10.1038/bjc.1994.479>
69. *Котеров А.Н.* От очень малых до очень больших доз радиации: новые данные по установлению диапазонов и их экспериментально-эпидемиологические обоснования // *Мед. радиология и радиац. безопасность*. 2013. Т. 58. № 2. С. 5–21. [*Kotero A.N.* From very low to very large doses of radiation: new data on ranges definitions and its experimental and epidemiological basing // *Medits. Radiologiya. Radiat. Bezopasnost* ('Medical Radiology and Radiation Safety', Moscow). 2013. V. 58. № 2. P. 5–21. (In Russ. Engl. abstr.)]
70. *Clifton D.K., Bremner W.J.* The effect of testicular x-irradiation on spermatogenesis in man. A comparison with the mouse // *J. Androl.* 1983. V. 4. № 6. P. 387–392. <https://doi.org/10.1002/j.1939-4640.1983.tb00765.x>
71. *Pasqualotto F.F., Agarwal A.* Radiation effects on spermatogenesis // *Fertility Preservation in Male Cancer Patients* / Eds J.P. Mulhall, L.D. Applegarth, R.D. Oates and P.N. Schlegel. Published by Cambridge University Press. C. Cambridge University Press, 2013. P. 104–109. https://www.clevelandclinic.org/ReproductiveResearch-Center/docs/publications/88_Pasqualotto_and_Agarwal_Radiation_effects_on_spermatogenesis.pdf (address data 10.12.2021)

72. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных – М.: Высш. школа, 2004. 549 с. [Yarmonenko S.P., Wainson A.A. Radiobiology of Humans and Animals. Moscow, Visshaya Shkola, 2004. 549 p. (In Russ.)]
73. Larsson E., Meerkhan S.A., Strand S.E., Jonsson B.A. A small-scale anatomic model for testicular radiation dosimetry for radionuclides localized in the human testes // J. Nucl. Med. 2012. V. 53. № 1. P. 72–81. <https://doi.org/10.2967/jnumed.111.095133>
74. Hall E.J., Giaccia A.J. Radiobiology for the Radiologist. 7th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2012. 576 p.
75. Ainsbury E.A., Bouffler S.D., Dorr W. et al. Radiation cataractogenesis: a review of recent studies // Radiat. Res. 2009. V. 172. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1667/RR1688.1>
76. UNSCEAR 2012. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex A. Attributing health effects to ionizing radiation exposure and inferring risks. New York: United Nations, 2015. 86 p.
77. Mrena S., Kivela T., Kurttio P., Auvinen A. Lens opacities among physicians occupationally exposed to ionizing radiation – a pilot study in Finland // Scand. J. Work Environ. Health. 2011. V. 37. № 3. P. 237–243. <https://doi.org/10.2307/41151548>
78. Rajabi A.B., Noohi F., Hashemi H. et al. Ionizing radiation-induced cataract in interventional cardiology staff // Res. Cardiovasc. Med. 2015. V. 4. № 1. Article e25148. <https://doi.org/10.5812/cardiovascmed.25148>
79. Auvinen A., Kivela T., Heinavaara S., Mrena S. Eye lens opacities among physicians occupationally exposed to ionizing radiation // Ann. Occup. Hyg. 2015. V. 59. № 7. P. 945–948. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mev022>
80. Cardis E., Vrijheid M., Blettner M. 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. V. 167. № 4. P. 396–416. <https://doi.org/10.1667/RR0553.1>
81. Канцерогенез / Под ред. Д.Г. Заридзе. М.: Медицина, 2004. 576 с. [Carcinogenesis / Ed. D.G. Zaridze. Moscow: Meditsine, 2004. 576 p. (In Russ.)]
82. Handbook of Epidemiology / Eds W. Ahrens, I. Pigeot. 2nd ed. New York; Heidelberg; Dordrecht; London: Springer, 2014. 2498 p.
83. Bhopal R.S. Concepts of Epidemiology: Integrated the Ideas, Theories, Principles and Methods of Epidemiology. 3rd ed. Oxford: University Press, 2016. 442 p.
84. Котеров А.Н., Ушенкова Л.Н., Зубенкова Э.С. и др. Сила связи. Сообщение 1. Градации относительного риска // Мед. радиология и радиац. безопасность. 2019. Т. 64. № 4. С. 5–17. [Koterov A.N., Ushenkova L.N., Zubenkova E.S. et al. Strength of association. Report 1. Graduation of relative risk // Medits. Radiologiya. Radiat. Bezopasnost ('Medical Radiology and Radiation Safety', Moscow). 2019. V. 64. № 4. P. 5–17. (In Russ. Engl. abstr.)] https://doi.org/10.12737/article_5d1adb25725023.14868717
85. Andersson M., Engholm G., Ennow K. et al. Cancer risk among staff at two radiotherapy departments in Denmark // Br. J. Radiol. 1991. V. 64. № 761. P. 455–460. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-64-761-455>
86. Boice J.D. Jr., Mandel J.S., Doody M.M. et al. A health survey of radiologic technologists // Cancer. 1992. V. 69. № 2. P. 586–598. [https://doi.org/10.1002/1097-0142\(19920115\)69:2<586::aid-cncr2820690251>3.0.co;2-3](https://doi.org/10.1002/1097-0142(19920115)69:2<586::aid-cncr2820690251>3.0.co;2-3)
87. Simon S.L., Weinstock R.M., Doody M.M. et al. Estimating historical radiation doses to a cohort of U.S. radiologic technologists // Radiat. Res. 2006. V. 166. № 1. Pt. 2. P. 174–192. <https://doi.org/10.1667/RR3433.1>
88. 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. V. 74. № 882. P. 507–519. <https://doi.org/10.1259/bjr.74.882.740507>
89. Wang Z.Q., Li B.X., Gao Z.W. et al. Epidemiological findings and requirement for dose reconstruction among medical diagnostic X-ray workers in China // Radiat. Prot. Dosim. 1998. V. 77. № 1/2. P. 119–122. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032301>
90. Wang J.X., Zhang L.A., Li B.X. et al. Cancer incidence and risk estimation among medical x-ray workers in China, 1950–1995 // Health Phys. 2002. V. 82. № 4. P. 455–466. <https://doi.org/10.1097/00004032-200204000-00004>
91. Wang J.X., Li B.X., Gao Z.W. et al. Cancer risk assessment among medical X-ray workers in China // The Effects of Low and Very Low Doses of Ionizing Radiation on Human Health / Ed. WONUC. Elsevier Science B.V. 2000. P. 483–491.
92. Wang J.X., Zhang L.A., Li B.X. et al. Cancer risk assessment among medical X-ray workers in China // Zhongguo Yi Xue Ke Xue Yuan Xue Bao. 2001. V. 23. № 1. P. 65–68, 72. (In Chinese.)
93. Sun Z., Inskip P.D., Wang J. et al. Solid cancer incidence among Chinese medical diagnostic X-ray workers, 1950–1995: estimation of radiation-related risks // Int. J. Cancer. 2016. V. 138. № 12. P. 2875–2883. <https://doi.org/10.1002/ijc.30036>
94. Sokolnikov M., Preston D., Gilbert E. et al. Radiation effects on mortality from solid cancers other than lung, liver, and bone cancer in the Mayak worker cohort: 1948–2008 // PLoS One. 2015. V. 10. № 2. Article e0117784. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117784>
95. Park E.S., Moon K., Kim H.N. et al. Radiation exposure and cancer mortality among nuclear power plant workers: a meta-analysis // J. Prev. Med. Public Health. 2010. V. 43. № 2. P. 185–192. (In Korean. English abstract.) <https://doi.org/10.3961/jpmph.2010.43.2.185>
96. Санитарные правила СП 2.6.1.758-99. “Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)”. [Sanitary rules SP 2.6.1.758-99. ‘Ionizing radiation, radiation safety. Radiation Safety Standards (NRB-99)’. (In Russ.)] <http://base.garant.ru/12119739/> (address data 10.12.2021).

97. Kato K., Sawada S. Medical X-ray doses' contributions to the ionizing radiation exposures of atomic-bomb survivors // *J. Radiat. Res.* 1991. V. 32. (Suppl.). P. 136–153.
https://doi.org/10.1269/jrr.32.supplement_136
98. Туков А.Р., Бирюков А.П., Шафранский И.Л. Безопасна ли радиационная безопасность? // *Радиация и риск.* 2018. Т. 27. № 2. С. 7–19. [Tukov A.R., Birukov A.P., Shafransky I.L. Radiation safety – Is it safe? // *Radiatsiya i risk (Radiation and Risk; Obninsk).* 2018. V. 27. № 2. P. 7–19. (In Russ. Engl. abstr.)] <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2018-27-2-7-19>
99. Заключение РНКРЗ от 3 июля 2017 г. Conclusions of Russian National Commission on Radiation Safety of July 3, 2017. (In Russ.) <https://cyberleninka.ru/article/n/zaklyuchenie-rnkrz-po-dokladu-a-r-tukova-radiatsionnaya-epidemiologiya-i-radiatsionnaya-bezopasnost> (address data 10.12.2021)

Average Accumulated Radiation Doses for World Nuclear Workers: Low Doses, Low Effects. Comparison with Doses for Medical Radiologists

A. N. Koterov^{a,#}, A. R. Tukov^a, L. N. Ushenkova^a, M. V. Kalinina^a, and A. P. Biryukov^a

^a*A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: govori1ga@inbox.ru*

A synthetic study was carried out to assess the average external exposure dose accumulated over the entire period of employment by nuclear workers as a world professional category (1946–2010). For a sample of 63 variants (18 countries; cohorts of various nuclear installations, including international groups), the average (mean) and median doses were 31.1 mSv and 24.0 mSv, respectively. After processing the sample for outliers (up to 52 variants), the values decreased to 21.7 mSv and 20.7 mSv. Whatever values are taken into account, they are below the limit of low doses radiation with low LET (up to 0.1 Gy/Sv) and, on average for group, should not lead to any tissue (deterministic) effects. Estimation of cancer mortality rate at the doses received in terms of excess relative risk (ERR) per 1 Gy (based, for example, on the value for a pooled cohort of 15 countries; Cardis E. et al., 2005) gave values that cannot be detected against the background of carcinogenic effects of non-radiation factors, confounders and biases. Thus, the expected increase in the number of deaths from cancer over 10 years was only 0.036–0.06% of the size of the study group. The obtained values of the average doses for nuclear workers were compared with those for medical radiologists (combined values for studies from seven countries; mainly 1950s and up to 2000), which amounted to 62.9 mSv and 61.9 mSv for the mean and median, respectively. The average dose received for medical radiologists is thus 2–3 times higher than that for nuclear workers. Although the contribution of incorporated radionuclides to the radiation dose for the second group was not considered, the discovered fact can have an effect to the formation of a relatively favorable image of employment in the nuclear power industry.

Keywords: nuclear workers, average radiation doses, health effects, medical radiologists