

## Анализ действия малых доз ионизирующего излучения на онкозаболеваемость человека

Петин В.Г., Пронкевич М.Д.

ФГБУ МРНЦ Минздравсоцразвития России, Обнинск

В этом обзоре суммированы и проанализированы опубликованные другими авторами экспериментальные и эпидемиологические данные по действию малых доз ионизирующего излучения на онкозаболеваемость у человека. Продемонстрировано, что у людей, проживающих в условиях повышенного естественного радиационного фона, у лиц, переживших бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, у профессионалов – работников ядерных предприятий, а также у ликвидаторов радиационных аварий не наблюдалось увеличенного выхода онкологических заболеваний. Более того, в некоторых случаях зафиксирована даже пониженная по сравнению со средними общенациональными уровнями смертность от рака. Наиболее впечатляющие результаты опубликованы после обследования когорты людей, в течение 25 лет проживающих на Тайване в загрязнённых радиацией квартирах. Было установлено, что онкозаболеваемость у этих людей была в 40 раз меньше, чем в контроле, хотя накопленные суммарные дозы превышали дозы у ликвидаторов чернобыльской аварии. Приведённые данные показывают, что облучение малыми дозами радиации уменьшает риск возникновения злокачественных новообразований у людей. Возможные механизмы полезного действия радиации обсуждаются.

**Ключевые слова:** *ионизирующее излучение, малые дозы, онкозаболеваемость, радиационный гормезис.*

Понятие «малые дозы» не имеет единого определения. Результаты многих эпидемиологических исследований показывают, что при остром воздействии редкоионизирующей радиации в дозах 200 мГр и ниже не отмечено случаев детерминированного развития какой-либо патологии. Более того, при этих дозах не удается выявить увеличения стохастических событий, в том числе злокачественных опухолей. Поэтому Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) рекомендовал дозы в 200 мГр и ниже относить к малым дозам, а мощность дозы 0,1 мГр/мин и ниже – к малым мощностям доз [93].

Ионизирующее излучение – постоянно существующий природный агент. Изучение закономерностей биологических эффектов малых доз ионизирующих излучений становится все более актуальным в связи с облучением больших популяций людей и биосферы в целом малыми дозами ионизирующего излучения. Известно, что уменьшение естественного природного излучения приводит к развитию различных патологических эффектов [14, 70]. Компенсация недостатка радиационного фона введением дополнительных источников радиации позволяет нормализовать различные показатели [15, 71]. Более того, некоторое увеличение естественного радиационного фона сопровождается целым рядом положительных эффектов – так называемым радиационным гормезисом [2, 14, 69, 70].

При оценке радиационной безопасности принимается во внимание беспороговая линейная концепция, в соответствии с которой любая малая доза радиации оказывает вредное воздействие на организм. Однако за последние годы появилось много публикаций, ставящих под

Петин В.Г.\* – заведующий биофизической лабораторией, д.б.н., профессор; Пронкевич М.Д. – ст. научн. сотр., к.б.н. ФГБУ МРНЦ Минздравсоцразвития России.

\*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел. (48439) 9-70-08, e-mail: vgpentin@yahoo.com.

сомнение эту концепцию и показывающих, что в области малых доз ионизирующего излучения использование этой модели некорректно [10, 11, 24, 29, 44, 45, 81]. Идея о беспороговом вредном действии радиации привела к тому, что экспериментальные результаты, демонстрирующие положительное действие малых доз ионизирующих излучений, практически не принимались во внимание. Только в 1994 г. после 12-летней задержки подготовленных материалов НКДАР ООН опубликовал обзор данных о положительных эффектах малых доз ионизирующего излучения [92]. В последние годы появился целый комплекс новых данных о проявлении радиационного гормезиса как для животных, так и для человека. Данные о радиационном гормезисе включают более 3000 сообщений. Данные о благоприятном воздействии малых доз ионизирующей радиации на людей включают в себя более 100 сообщений, причем некоторые из них констатируют благоприятное действие малых доз радиации на выход онкологических заболеваний. В связи с этим назрела необходимость систематического анализа и обобщения опубликованных данных о положительном действии малых доз ионизирующих излучений на выход онкологических заболеваний человека, что и является целью данной работы.

### **Повышенный естественный радиационный фон**

Естественный радиационный фон (ЕРФ) представляет собой хроническое облучение при малой мощности дозы. Население в большинстве стран проживает при естественном фоне ионизирующих излучений в среднем 2,4 мЗв/год. В соответствии с данными, опубликованными Международным комитетом по радиационной защите (ICRP), в мире многие люди подвергаются воздействию более высоких доз ЕРФ (5 мЗв/год и выше), но они не страдают от повышенной онкологической смертности или сокращения средней продолжительности жизни по сравнению с адекватно подобранным контролем [92].

Mason T.J., Miller R.W. [73] исследовали смертность от всех видов рака у населения, проживающего в сельской местности и городах США, расположенных как высоко над уровнем моря (более 3000 футов), в которых население подвергалось действию повышенной радиации, так и в местностях, расположенных на уровне моря. Смертность сравнивалась со средней смертностью по США в 1950-1969 гг. Было достоверно ( $p < 0,01$ ) показано, что отношения смертности населения, проживающего на большой высоте (4390 и 5280 футов над уровнем моря) с высоким уровнем радиационного фона и на уровне моря, к средней смертности по США от всех видов рака составляют 0,82 и 1,15 [73]. Авторы делают вывод, что космическая радиация на больших высотах может быть причиной снижения смертности от рака.

В 1950-1968 гг. было проведено исследование [52] в 7 штатах США с повышенным ЕРФ (2,1 мГр/год) и в 14 с низким фоном (1,18 мГр/год). Показано, что ежегодная смертность от онкозаболеваний на 100 тысяч человек в среднем по США составила 146,8, а в областях с повышенным ЕРФ – 126,3. Yalow R.S. [98] заметил, что в Колорадо при высокой фоновой дозе за счёт космического излучения, излучения от скал, содержащих повышенное количество урана, от зданий, построенных из скальных пород, а также за счёт излучения, получаемого при работе в атомной отрасли, заболеваемость и смертность от всех видов рака ниже, чем в других регионах с более низким природным уровнем излучения.

Анализ зависимости величины природного излучения и онкозаболеваемости [47], проведённый в 163 районах США, показал, что количество смертельных исходов от лейкемии и лимфомы за 1949-1951 гг. ниже на 19 % у мужчин и на 6 % у женщин, проживающих на высоте 2000-5000 футов над уровнем моря, чем у проживающих в районах ниже 500 футов. Совершенно очевидно, что увеличение дозы от космического излучения не только не увеличивает смертность от этих видов болезни, а напротив, уменьшает риск смерти.

Такая же обратная зависимость наблюдалась между повышенным фоном и смертностью от лейкемии [49]. Продемонстрировано, что количество смертей от лейкемии на 100 тысяч человек в год коррелирует с высотой над уровнем моря: смертность от лейкемии повышается при увеличении высоты до 2000 футов над уровнем моря, но затем на высоте 2000 футов и выше этот показатель достоверно снижается.

В работе [46] приводятся результаты изучения связи фона редкоизионизирующего излучения в 48 штатах США со смертностью от рака. Продемонстрировано, что этот показатель несколько уменьшался (в среднем от 18 до 14 смертей от рака на 10 000 населения в год) с увеличением фона гамма-квантов от 0,5 до 1,7 мГр/год.

Исследования, также демонстрирующие благоприятное влияние повышенного фона радиации, были проведены в США с 1990 по 1994 гг. [62]. Расчёты показали, что уровень природного фона в исследованных районах был в 3,2 раза больше, чем в контрольных. Онкосмертность в районах с повышенным фоном была в 1,26 раза ниже, чем в контрольных.

Показателем безопасности повышенного природного облучения служат результаты исследований, проведённых в Китае. В 1970-1978 гг. обширная провинция Янгжинг (Yangjiang) с повышенным радиационным фоном (2,1-4,27 мГр/год), источником которого является моназит – торийсодержащий минерал, сравнивалась с контрольной провинцией (0,77-1,65 мГр/год) [95]. Авторы подчеркивают, что обследованные семьи, живущие в этих местностях на протяжении 6 и более поколений, характеризуются одинаковой структурой населения, национальностью, занятостью, продуктами питания, эпидемиологическим статусом. Показано, что смертность после 1972 г. от всех видов рака была на 14,6 % ниже в провинции с повышенным фоном по сравнению с контрольной популяцией. В работе [68] приведены данные о повышенной иммунологической защищённости и пониженной смертности от рака жителей этой провинции. В период с 1979 по 1995 гг. обследовались 125 079 человек из той же провинции (средняя ежегодная эффективная доза – 6,4 мЗв). Не было обнаружено увеличения риска рака, связанного с высокими уровнями естественной радиации [89].

С 1990 г. проводились исследования жителей (385 103 чел.) полуострова Карунагаппилли (Karunagappilly, штат Керала, юго-западное побережье Индии), известного высоким уровнем фоновой радиации (до 35 мЗв/год, а в некоторых местах до 70 мЗв/год) из-за содержащегося в прибрежном песке тория [80]. Пуассоновский регрессионный анализ не показал статистически значимой зависимости заболеваемости всеми злокачественными новообразованиями от фонового уровня радиации, случаи лейкемии (30 случаев) также достоверно не зависели от повышенного фона.

В течение столетий жители Рамзара (Ramsar), прибрежного района на севере Ирана, проживали в домах с повышенным ЕРФ (около 2000 чел.). При средней эффективной дозе в этом районе 10 мЗв/год диапазон изменений мощностей дозы составлял 1-131 мЗв/год [86]. В некоторых из домов мощность дозы достигала 260 мЗв/год. Авторы работ [78, 79] сообщают, что частота рака и сердечных заболеваний у жителей Рамзара была меньше, чем на территориях с обычным фоном радиации.

Исследование смертности от онкологических заболеваний в пяти департаментах Франции с относительно низким ЕРФ и в двух департаментах с высоким ЕРФ показало отрицательную корреляцию между уровнем ЕРФ и смертностью детей от лейкемии, женщин – от рака молочной железы, а также мужчин и женщин – от рака щитовидной железы и легких [91].

В работе [43] авторами установлено, что в США под влиянием различных уровней излучения происходит обратная корреляция между концентрацией радона в домах и частотой смертности от рака легкого. Эти данные правдоподобны как для мужчин, так и для женщин. Результаты этих исследований включали 1700 различных территорий США и 272000 индивидуальных измерений в типичных домах, в которых проживают 90 % жителей. Было показано, что в определенном диапазоне концентраций радона в воздухе жилых помещений смертность от рака лёгких в США уменьшалась прямо пропорционально повышению уровня радона. Приводятся следующие конкретные цифры уменьшения смертности от рака лёгких (число событий на 10000 жителей в год) с увеличением концентрации радона: 18,5 мБк/л – 7; 37 мБк/л – 6,2; 74 мБк/л – 5,3; 185 мБк/л – 4,4. Для доказательства корреляции смертности от рака именно с концентрацией радона, было показано отсутствие корреляции по 50 другим показателям (пол, возраст, курение и т.д.). Исследования, демонстрирующие благоприятное влияние повышенного фона радона, также были проведены в Южной Саксонии, где природный фон радона повышен [34].

Аналогичные исследования были проведены в Японии [65, 76, 85, 88]. В городе Мисаса (Misasa, Япония) отмечена повышенная концентрация Rn (26-57 мБк/л). Анализ стандартизованного отношения смертности (Standardized mortality ratio – SMR), дающий оценку отношения смертности в исследуемой когорте к фоновому уровню смертности (принятому за единицу), показал, что для всех случаев рака SMR был достоверно ниже (0,538 – для женщин и 0,463 – для мужчин) на территориях с повышенной концентрацией Rn по сравнению с соседней территорией без радоновых источников (внешняя концентрация Rn – 11 мБк/л) [76]. Пуассоновский регрессионный анализ, проведённый в этой работе, показал, что относительные риски онкологических заболеваний жителей этого города были ниже, чем на контрольной территории для смертей от всех случаев рака (0,67), от рака лёгкого (0,55) и желудка (0,59). Авторами показано, что риск возникновения рака лёгкого не связан с повышенной концентрацией радона в городе Мисаса [85]. Эти результаты подтверждаются работой [88], где приведены данные об увеличенной, по сравнению с контрольной, смертностью населения района Японии с пониженным радоновым фоном.

Похожие результаты были получены в Северной Венгрии [67]. Воздействие радона было проанализировано в 1077 домах двух деревень, также были изучены случаи смертности их жи-

телей от онкологических заболеваний за последние 30 лет. Среди 1072 человек было обнаружено 60 заболеваний, только 4 из них – рак лёгкого. Минимум частоты онкологических болезней был зарегистрирован в группах с радоновым воздействием 110-185 мБк/л, там относительный риск ракового образования был в 4,1 раза меньше, чем в группе с меньшим радоновым воздействием, и в 5 раз меньше, чем в группе с большим радоновым воздействием. Результаты не показали роста частоты рака лёгкого в группах с радоновыми уровнями до 200 мБк/л, в то время как группы с радоновым воздействием более 200 мБк/л имели повышенный риск заболеваемости раком лёгкого.

Приведённые данные демонстрируют, что радиационный гормезис может индуцироваться излучением с высокими линейными потерями энергии (альфа-частицы радона и его продуктов распада). При этом выявляется любопытная закономерность, ранее выявленная в работах [15, 71], о существовании некоторого оптимального значения интенсивности излучения, при котором регистрируется радиационный гормезис.

### **Бомбардировка Хиросимы и Нагасаки**

После атомной бомбардировки в 1945 г. городов Хиросима и Нагасаки в Японии уже более 50 лет функционирует регистр Хибакуси (жителей этих городов, подвергшихся радиационному воздействию), получивших внешнее облучение в большом диапазоне доз, при этом средняя доза облучения составляла 220 мГр. Регистр располагает данными на 86572 человека. В основу заключения исследователей японского регистра положены рекомендации НКДАР ООН, Международной комиссии по радиологической защите, ВОЗ, МАГАТЭ для оценки радиационных рисков онкологических и неонкологических заболеваний. Среди полного числа выживших количество заболевших лейкемией на 21 % превышало средний показатель в Японии. По солидным опухолям выявлено, что только 4,3 % онкологических заболеваний могли быть обусловлены повышенным острым облучением. Некоторые данные японских исследователей указывали на то, что острое облучение в малых дозах (ниже 100 мЗв) могло быть не только безвредным, но даже полезным для здоровья. Комитет США по биологическому действию ионизирующих излучений сообщил об отсутствии смертности от лейкемии среди 2527 выживших после бомбардировки Нагасаки, получивших дозы в диапазоне от 31 до 69 сГр [36]. Любое отклонение дозы вне этого диапазона приводило к увеличению случаев лейкемии. Отсутствие случаев лейкемии было подтверждено в работе [66]. При анализе смертности в обоих городах за период с 1950 по 1978 г. было показано [63], что минимальная смертность от всех видов рака регистрировалась при дозе 7 сГр ( $2,1 \cdot 10^3$  человек/год) при смертности в контроле  $2,38 \cdot 10^3$  человек/год. Очень похожие результаты были приведены в работе [83]. Эти же авторы выявили диапазон доз (0,5-20 сЗв), внутри которого смертность от лейкемии была ниже, чем в контроле [84].

В 1962 г. в обширном исследовании смертности среди переживших атомную бомбардировку жителей Хиросимы и Нагасаки авторы [35] сообщают, что население, жившее за пределами городов во время бомбардировки и обследованное как «необлучённый контроль», характеризовалось неожиданно пониженной смертностью по отношению к смертности всего населе-

ния Японии. Фактически же это было население, облучённое в малых дозах. Отношение наблюдаемой смертности к ожидаемой равнялось 0,77 с большой степенью достоверности ( $p < 0,01$ ).

Данные, составленные по материалам [56, 57], показывают, что у людей, переживших атомную бомбардировку, смертность от лейкемии только при дозе 40 сГр достоверно выше контроля и составила 300 случаев на  $10^5$  человек за 35 лет. При дозе 10 сГр частота смертности составила 40 случаев на  $10^5$  человек за 35 лет. В контроле частота смертности была около 180 случаев на  $10^5$  человек за 35 лет.

### Радиационные аварии

В сентябре 1957 г. на предприятии «Маяк» (Восточный Урал) произошел серьёзный инцидент, когда громадное количество радиоактивных отходов попало в реку Теча и окружающую среду. В результате тысячи людей получили высокие дозы, но непосредственных смертей от больших доз облучения не было зарегистрировано. В работе [13] приводятся данные, свидетельствующие об эффектах гормезиса у людей после взрыва ёмкости хранилища высокоактивных отходов на предприятии «Маяк». Облучённые люди были разбиты на 3 дозовые группы, которые получили средние дозы 496, 120 и 40 мЗв. Онкологическая смертность в этих группах была, соответственно, на 28, 38 и 27 % ниже, чем в необлучённой контрольной популяции того же региона.

Наиболее серьёзной была авария на ядерном реакторе в Чернобыле. Это была действительно катастрофа и печальная трагедия в ядерной промышленности. Для устранения последствий аварии было привлечено около 200000 рабочих-ликвидаторов. В 1986 и 1987 гг. они получили дозу около 100 мЗв. Состояние здоровья этих рабочих изучалось Международным Чернобыльским проектом (ICP), поддержанным Международным агентством по атомной энергии (IAEA) и Всемирной организацией здравоохранения (WHO). Учёные из российских медицинских центров и агентств также присоединились к ним. В работе [69] отмечается, что по результатам выполнения Международного Чернобыльского проекта на основании линейной беспороговой модели было предсказано 150 дополнительных смертей от лейкемии среди 200000 ликвидаторов в течение 10 лет. Если же предполагать, что ликвидаторы имели похожую онкологическую смертность, как и выжившие после бомбардировки японцы, то прогнозировалось 100 дополнительных смертей от лейкемии в пределах 10 лет после аварии. Однако фактически были верифицированы 48 случаев лейкемии в течение 13 лет после аварии [8, 25, 59]. Авторы работы [69] делают вывод, что хроническое облучение ликвидаторов уменьшило их смертность от лейкемии. Они предполагают, что общая смертность от онкологических заболеваний этих рабочих также должна быть понижена.

Результаты радиационно-эпидемиологических исследований, проведённых на базе Национального радиационно-эпидемиологического регистра (НРЭР), свидетельствуют, что в Брянской области, которая в наибольшей степени в РФ подвергалась радиационному воздействию, показатель заболеваемости лейкозами населения не превышает аналогичной величины

по стране в целом; не было зарегистрировано повышения и общей смертности от рака [7, 59]. Другое исследование на 65905 ликвидаторах через 8 лет после аварии также показало, что смертность от рака и других причин была несколько уменьшена [58, 60]. Анализ стандартизованного отношения смертности (SMR), проведённый в этих работах, показал, что это отношение для всех причин смерти ликвидаторов и для смертности от злокачественных новообразований (1991-1998 гг.) было ниже 1, т.е. ниже фоновой смертности по стране.

Анализ смертности 105 ликвидаторов, проживавших в Калужской области, за 10 лет после аварии показал [16], что 41,9 % из них погибли от травм и отравлений, 33,3 % – умерли от болезней системы кровообращения. Структура смертности соответствует таковой для мужчин трудоспособного возраста. Этот вывод подтверждается результатами работы [25].

### **Профессиональное и медицинское облучение**

Две организации США – Американское ядерное общество (American Nuclear Society, ANS) и Общество медицинских физиков (Health Physics Society, HPS) – заявляли, что 50 или 100 мЗв/год в течение всей жизни не имеют очевидного вредного эффекта на рабочих предприятий атомной промышленности. Действительно, если 100 мЗв острого облучения может быть полезным [65], то 100 мЗв хронического облучения могут быть также полезными.

Известны многочисленные исследования продолжительности жизни и заболеваемости раком рентгенологов и рентгентехников, профессионально облучаемых во время работы [18]. Полученные данные прямо подтверждают радиационный гормезис. До 1940-1950 гг., когда не было должной защиты работающих в рентгеновских и радиологических кабинетах, и профессионалы получали большие дозы облучения, были отмечены их высокая смертность и значительное повышение заболеваемости раком [100]. По мере улучшения защиты и, следовательно, уменьшения дозы облучения, различия в продолжительности жизни и онкозаболеваемости рентгенологов уменьшались. В работе [32] проведено исследование смертности среди 2028 техников-радиологов в Японии за период 1969-1982 гг. Она оказалась на 28 % ниже по сравнению со смертностью всего населения. Ретроспективный анализ 12195 мужчин радиологов, которые получали малые дозы радиации в течение длительного времени, показал [99], что за период с 1963 по 1993 гг. было зарегистрировано 1097 смертей, включая 435 от рака. Достоверное снижение SMR было показано для всех случаев рака, включая рак желудка и лёгких, по сравнению со смертностью от рака всего населения Японии. Похожие данные [77] были получены при обследовании 146022 американских радиологов-техников (из них 73 % – женщины). Риск смертности радиологов был ниже для всех раков (SMR=0,82) по сравнению с населением США.

В соответствии с прогнозом, основанным на линейной беспороговой модели, ожидалось 1,5-2 % дополнительных онкологических заболеваний за счёт компьютерной томографии от всех случаев рака населения США [82]. В результате проведённого анализа авторы делают вывод, что использование компьютерной томографии может уменьшать, а не увеличивать риск онкологических заболеваний.

Тщательные медицинские обследования профессионалов, связанных с атомной энергией, проводятся во всех странах. Результаты обширных эпидемиологических обследований опубликованы во многих работах [31, 37, 53, 54, 55, 64, 74, 96, 97]. Совокупность этих исследований включает в себя большое количество профессионалов и тщательно отобранного необлучённого контроля. В контрольную когорту включали людей с тех же территорий, с учётом пола, возраста, курения и социально-экономического фактора. Во всех этих публикациях отмечается уменьшение смертности от рака с увеличением доз, накопленных за период рабочего стажа 10-34 года. Приведем конкретные примеры.

При обследовании 22552 рабочих Атомного оружейного комплекса Великобритании между 1951 и 1982 гг. было обнаружено, что смертность от всех причин была на 23 % ниже общенационального уровня, от рака – ниже на 18 % [37].

По данным национального регистра рабочих атомных предприятий Великобритании был проведён анализ причин смертности рабочих основных предприятий атомной отрасли этой страны (всего 95217 человек) [64]. Было показано, что риск смертности от всех злокачественных новообразований в исследуемой когорте был ниже ( $SMR=0,84$ ), чем в целом по стране. Ещё одним доказательством того, что смертность в когорте работающих в атомной энергетике, оказывается ниже национального уровня смертности в Великобритании, является работа [48], демонстрирующая, что наблюдаемое количество смертей от всех случаев рака было ниже контроля ( $SMR=0,86$ ). Для лейкемии смертность была равна ожидаемой по стране. В работе [64] проявление благоприятного влияния облучения наблюдалось в снижении уровня смертности в диапазоне доз от 10 до 30 сЗв за 33 года трудовой деятельности. Авторы подчеркивают, что такой вывод можно считать весомым, потому что он получен на достаточно больших популяциях, в которых рабочие были одинаково здоровыми как при поступлении на работу, так и в период трудовой деятельности, т.е. эффект «здорового рабочего» не проявлялся. Понятие «здоровый рабочий» включает в себя повышенные требования к здоровью рабочих ядерных предприятий, их регулярные медицинские осмотры и их большую обеспеченность в материальном отношении.

Исследование 35000 мужчин и женщин, работников ядерного завода в Ханфорде (США), показало [54], что смертность на предприятии была достоверно ниже для всех случаев рака ( $SMR=0,85$ ), чем в целом по стране. Изучение работников нескольких ядерных предприятиях США [53] не выявило корреляции между дозой радиационного воздействия и смертностью от всех видов рака, в том числе лейкемии.

При исследовании 9000 рабочих на АЭС Калверт Клифс (США) с 1969 по 1988 гг. было выявлено 346 случаев смерти, 101 из них – от злокачественных новообразований [61]. Средняя кумулятивная доза была низкой – 21 мЗв, 12 % рабочих получили дозу более 50 мЗв. Взаимосвязи ионизирующего излучения и возможной смертью от новообразований выявлено не было. Только две смерти от лейкемии, при четырёх ожидаемых, было зарегистрировано на национальном уровне.

Было проведено изучение [96] когорты из 15727 рабочих Национальной лаборатории (ядерного центра) Лос-Аламос. Результаты указывают на то, что вся смертность среди рабочих, нанятых с 1943 по 1977 г., была ниже контроля ( $SMR=0,63$ ). Смертность от рака также была ниже контрольной ( $SMR=0,64$ ).

Сравнили три группы работников ядерной верфи США: 27872 человека, получивших кумулятивные дозы более 5 мГр, 10348 рабочих, получивших дозы менее 5 мГр; 32510 – необлучённых сотрудников верфи [87]. Показано, что смертность в когортах облучённых рабочих была на 24 % ниже, чем в необлучённом контроле. В облучённых когортах смертность от всех злокачественных новообразований была ниже на 17 %, чем в контроле.

В Финляндии было проведено обследование 15619 рабочих ядерных реакторов [33]. Не наблюдалось увеличения случаев рака в целом. Анализ смертности от всех причин и от рака, проведённый французскими учеными с 1977 по 2004 г. на когорте из 9285 рабочих предприятий ядерного топливного цикла, выявил, что эти показатели были значительно ниже аналогичных по стране [75].

Международное агентство по исследованию рака (IARC) опубликовало данные, касающиеся состояния здоровья профессионалов, работающих на ядерных предприятиях [40, 90, 94]. Результаты этого масштабного анализа получены при усреднении данных когорт рабочих атомной промышленности 15 стран мира: Австралия, Бельгия, Канада, Финляндия, Франция, Венгрия, Япония, Республика Корея, Литва, Словакия, Испания, Швеция, Швейцария, Великобритания и США. Эти исследования включали 407391 сотрудника атомной промышленности, которые работали в течение, по крайней мере, одного года. Усреднение данных, полученных в разных странах, позволило авторам сделать вывод, что имеется несколько повышенный риск рака даже при малых дозах и мощностях доз, типичных для атомной промышленности [39, 40]. Авторы сообщают [40], что полученные оценки несколько выше, но статистически совместимы с оценками, на которых базируются текущие рекомендации радиационной защиты. При анализе этих усреднённых результатов было показано [51], что смертность среди рабочих ядерных предприятий не зависит от дозы и что данные по общей смертности профессионалов имеют значительные разбросы, на основании которых прийти к определенным выводам о рисках невозможно. Однако эти авторы предполагают, что облучение низкими дозами ионизирующего излучения не связано с повышенным риском развития рака и смертности от него. Luskеy T.D. [72] сравнил результаты исследований здоровья 152000 рабочих ядерных предприятий, получивших среднюю дозу 55 мЗв, и 149000 необлучённых рабочих с похожими условиями работы (чтобы не объяснять полученные результаты влиянием «здорового рабочего»). Он показал, что среди облучённых рабочих смертность от рака была ниже, чем в контрольной группе.

### **Инцидент на Тайване**

Упомянувшиеся выше факты о полезности малых доз ионизирующего излучения для человечества кажутся неправдоподобными. Но влияние на здоровье хронического облучения жителей, проживающих в течение 25 лет в городе Тайпей (Taереі, Тайвань) в квартирах, загрязнённых  $^{60}Co$ , определённо указывают на то, что результаты разных учёных о положительном

действию малых доз облучения могут быть вполне правдивыми. Кратко упомянем суть этого инцидента.

В 1982-1983 гг. источник  $^{60}\text{Co}$  (или несколько источников) случайно попали на свалку металлических отходов, которые были переплавлены и из них изготовлены конструкции для строительства домов. В 1983-1984 гг. из них были построены 180 зданий, в которых размещались около 1700 квартир. Первая загрязнённая квартира была обнаружена в 1992 г., а затем одна за другой были выявлены и остальные. В этих квартирах проживало и продолжает проживать около 10000 населения, подвергаясь хроническому облучению при очень высокой мощности дозы вплоть до 1 мЗв/час, а оценённая максимальная ежегодная доза достигала 1 Зв. В первый же год проживания (1983) мощность дозы достигала 50 мЗв/год. После 21 года проживания в загрязнённых квартирах усреднённая общая накопленная доза варьировала в диапазоне от 0,4 до 6,0 Зв. Эти дозы были выше, чем усреднённые дозы, полученные выжившими после бомбардировки в Японии и выше, чем дозы, полученные ликвидаторами через 2 года после чернобыльской аварии [41].

Этот непреднамеренный эксперимент доказал, что хроническое облучение людей могло эффективно снижать выход онкологических заболеваний человека. Действительно, в соответствии с линейной беспороговой концепцией полученные дозы могли индуцировать 36 повышенных смертей от лейкемии и 40 от солидных раков после 21 года проживания. В действительности же такие цифры не подтвердились. Наоборот, в нескольких публикациях [41, 69] авторы отмечали, что смертность от рака среди взрослых, проживавших в этих зданиях в течение 9-20 лет, составляла только 3 % от случаев смертности общей взрослой популяции острова. Анализ хромосомных aberrаций среди этих пациентов не выявил значимых изменений.

Более 2000 детей родились в загрязнённых квартирах с 1983 г., среди них по статистике должно наблюдаться около 46 детей с врождёнными наследуемыми дефектами (синдром Дауна, гемофилия, мукополисахаридоз, церебральный паралич, адренолейкодистрофия и др.). Фактически выявлены только 3 ребенка с врождёнными заболеваниями сердца или только 6 % от аналогичных заболеваний в общей популяции населения Тайваня [42]. На этом основании высказывается предположение, что мы живем в условиях дефицита ионизирующего излучения. Поскольку радиационные дозы от естественного фона и от мирного использования ядерной энергии, а также медико-диагностического использования ионизирующего излучения никогда не были больше доз, накопленных жителей, проживающих в загрязнённых квартирах на Тайване, то не исключается, что повышенное хроническое облучение населения и профессионалов, работающих на объектах ядерной энергетики, может быть полезным.

### **Заключение**

Известны многие обзоры и монографии, посвящённые положительному действию ионизирующих излучений [2, 3, 5, 12, 14, 15, 19, 21, 38, 70, 71, 93]. Главный вывод, который следует из этих работ, заключается в необходимости естественного радиационного фона для существования биосферы. Было показано, что снижение ЕРФ приводит к различным отклонениям от

нормального развития. Повышение ЕРФ в 10 и даже в 100 раз во многих случаях оказывало положительное действие на продолжительность жизни человека и животных, их иммунитет, плодовитость и другие показатели жизнедеятельности. Более того, в некоторых процитированных выше публикациях отмечается положительное действие и более высоких доз излучения.

В данной работе проведён обзор литературных данных по влиянию малых доз ионизирующих излучений на развитие онкологических заболеваний. Большая совокупность данных проанализирована для различных когорт людей, подвергавшихся действию повышенных доз ионизирующего излучения. В соответствии с этими данными, люди, проживающие в условиях повышенного естественного радиационного фона (5 мЗв/год и выше), не подвержены повышенной онкологической смертности или сокращению средней продолжительности жизни по сравнению с адекватно подобранным контролем. Более того, в некоторых районах с повышенным ЕРФ, наблюдаются даже пониженные, по сравнению со средними общенациональными уровнями, выходы онкологических заболеваний и смертности от рака [49, 62, 80, 95]. Эти наблюдения, если и не доказывают защитной функции облучения в малых дозах, то, во всяком случае, опровергают тезис об обязательном увеличении канцерогенеза с увеличением природного фона.

Совокупность вышеприведённых обследований людей, проживающих при повышенном радоновом фоне, показывает, что действительно существует некоторая оптимальная концентрация радона, при которой регистрируется минимальный уровень онкологических заболеваний лёгких и гортани [43]. Как повышение, так и понижение концентрации радона, по сравнению с оптимальным значением, приводит к увеличению заболеваемости раком. Таким образом, вопреки представлению о преимущественно повреждающем действии радона, показано его возможное благоприятное влияние, снижающее проявление рака лёгкого. Это противоречит рекомендациям экологической комиссии США [50], считающей, что любое количество радона неизбежно ведёт к ухудшению здоровья и учащению заболеваний раком лёгкого.

Атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки (6 и 9 августа 1945 г., соответственно) – единственные в истории человечества примеры использования ядерного оружия. Общее количество погибших составило от 90 до 166 тысяч человек в Хиросиме и от 60 до 80 тысяч человек – в Нагасаки. Несмотря на эти трагические последствия, было отмечено что население, жившее за пределами городов во время бомбардировок и обследованное как «необлучённый контроль» характеризовалось неожиданно пониженной смертностью по отношению к смертности всего населения Японии. Фактически же это было население, облучённое в малых дозах. Отношение наблюдаемой смертности к ожидаемой равно 0,77 [35]. Был выявлен диапазон доз (0,5-20 сЗв), внутри которого смертность от лейкемии была ниже, чем в контроле [84].

Другими примерами значительных тяжёлых последствий воздействий ионизирующих излучений на людей стали радиационные аварии на предприятии «Маяк» в 1957 г. и на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г. И в этих случаях, несмотря на трагические последствия, анализ литературных данных показал, что в некоторых случаях были выявлены положительные эффекты действия радиации. По результатам выполнения Международного Черно-

быльского проекта прогнозировалось 150 дополнительных случаев лейкемии, однако фактически было верифицировано только 48 таких событий. Авторы многих проанализированных работ делают вывод, что хроническое облучение ликвидаторов уменьшило не только их смертность от лейкемии, но и не было зарегистрировано повышения общей смертности от рака [7, 25, 59, 69].

Положительное действие радиации на развитие онкологических заболеваний отмечалось во многих публикациях для людей, подвергшихся облучению вследствие профессиональной деятельности. Однако усреднение результатов, полученных в 15 странах на ядерных предприятиях, не подтвердили этих выводов [40, 90, 94]. Тем не менее, дальнейший анализ этих результатов показал, что протрагированное облучение низкими дозами ионизирующего излучения не связано с повышенным риском развития рака и смертности [51, 72].

Наиболее убедительные данные о положительном действии ионизирующей радиации продемонстрированы после 25-летнего проживания 10 тысяч человек в загрязнённых  $^{60}\text{Co}$  квартирах на Тайване. Согласно правительственной статистике Тайваня, должны ожидаться 200 случаев спонтанных смертей от рака в этой популяции людей, фактически наблюдалось 5 таких случаев или 2,5 % от среднего числа, регистрируемого на Тайване [42, 69]. Никаких генетических последствий хронического облучения этих жителей также не было зарегистрировано. На этом основании высказывается предположение, что мы живем в условиях дефицита ионизирующего излучения. Более того, появляются публикации о том, что хроническое облучение ионизирующим излучением может использоваться как средство профилактики от рака [42, 72].

Можно отметить два возможных механизма запуска радиационного гормезиса. Наиболее широко распространённая точка зрения связана с повышением иммунитета под действием малых доз ионизирующего излучения [56, 65, 68, 71]. Другая точка зрения связана с запуском систем восстановления ДНК клеток под действием малых доз ультрафиолетовых излучений. Такое предположение было выдвинуто в работе [17]. В соответствии с этой гипотезой, свечение Вавилова-Черенкова, частью которого является ультрафиолетовый свет, может запускать систему репарации клеток. Это излучение возникает при движении заряженных частиц со скоростью, превышающую скорость света в биологической среде. Действительно, стимуляция восстановления репродуктивной способности под влиянием ультрафиолетового излучения в малых дозах была продемонстрирована ранее [30].

Наш обзор был бы не полным без упоминания противоположной точки зрения – о вредности малых доз ионизирующего излучения [1, 4, 6, 26, 27, 28]. Ошибочность взглядов этих авторов опровергнута самой жизнью и представленными в данной работе результатами. Научная критика таких представлений достаточно подробно проанализирована в литературе [9, 11, 20-24, 29].

Опасность радиации (радиофобию) связывают с радиационными авариями, испытанием атомного оружия и даже эксплуатацией АЭС. Известно, что радиофобия и ионизирующая радиация могут взаимодействовать синергически, т.е. усиливать действие друг друга. Не исключено, что последствия аварии на Чернобыльской АЭС могли усиливаться боязнью радиации.

Именно поэтому представляется актуальным добиваться снижения радиофобии, особенно при действии малых доз ионизирующего излучения. Совокупность представленных данных показывает возможное положительное действие малых доз радиации на онкозаболеваемость человека и тем самым демонстрирует потенциальную возможность снижения радиофобии. Кроме того, эти данные указывают на фундаментальную значимость радиационного гормезиса и необходимость проведения детальных и обширных исследований в этом направлении. Стоит отметить, что на основании представленных результатов не следует делать какие-либо выводы, связанные с изменением норм радиационной безопасности. Для этого необходимы дальнейшие многолетние исследования влияния различных режимов хронического облучения на жизнеспособность, онкозаболеваемость, репродуктивную способность, иммунитет, генетическую стабильность и другие показатели животных различной степени сложности.

## Литература

1. **Барьяхтар В.Е.** (Ред.) Чернобыльская катастрофа. Киев: Наукова Думка, 1995. 568 с.
2. **Булдаков Л.А., Калистратова В.С.** Радиоактивное излучение и здоровье. М.: Информ-Атом, 2003. 165 с.
3. **Булдаков Л.А., Калистратова В.С.** Радиационное воздействие на организм – положительные эффекты. М.: Информ-Атом, 2005. 246 с.
4. **Бурлакова Е.Б., Голощапов А.Н., Горбунова Н.В. и др.** Особенности биологического действия малых доз облучения //Радиац. биол. Радиоэкология. 1996. Т. 36. С. 35-38.
5. **Вайсерман А.М., Мехова Л.В., Кошель Н.М., Войтенко В.П.** Заболеваемость и смертность от рака при облучении в малых дозах: эпидемиологические аспекты //Радиац. биол. Радиоэкология. 2010. Т. 50, № 6. С. 691-702.
6. **Гофман Дж.** Рак, вызываемый облучением в малых дозах: неформальный анализ проблемы, в 2 томах. /Перевод с англ. Под редакцией Е.Б. Бурлаковой и В.Н. Лысцова. М., 1994. 320 с (1 том); 251 с (2 том).
7. **Иванов В.К., Цыб А.Ф.** Медицинские радиологические последствия Чернобыля для населения России: оценка радиационных рисков. М.: Медицина, 2002. 392 с.
8. **Иванов В.К., Цыб А.Ф., Иванов С.И.** Ликвидаторы чернобыльской катастрофы: радиационно-эпидемиологический анализ медицинских последствий. М.: Галанис, 1999. 312 с.
9. **Ильин Л.А.** Реалии и мифы Чернобыля. М.: ALARA limited, 1994. 445 с.
10. **Кеирим-Маркус И.Б.** Ещё о регламентации облучения человека //Мед. радиология и радиац. безопасность. 2000. Т. 45, № 3. С. 41-44.
11. **Корогодин В.И., Корогодина В.Л.** Онкогенные последствия облучения человека //Мед. радиология и радиац. безопасность. 1997. Т. 42, № 2. С. 26-30.
12. **Котеров А.Н.** Малые дозы радиации: факты и мифы. Книга первая: Основные понятия и нестабильность генома. М.: Изд-во «ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2010. 283 с.
13. **Кошурникова Н.А., Болотникова М.Г., Ильин Л.А. и др.** Риск рака легкого при облучении от инкорпорированного плутония //Мед. радиология и радиац. безопасность. 1996. Т. 41, № 6. С. 50-56.
14. **Кузин А.М.** Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. М.: Наука, 1991. 117 с.
15. **Кузин А.М.** Идеи радиационного гормезиса в атомном веке. М.: Наука, 1995. 158 с.
16. **Лушников Е.Ф., Ланцов С.И.** Смертность ликвидаторов в Калужской области за 10 лет после аварии на Чернобыльской АЭС //Мед. радиол. и радиац. безопасность. 1999. Т. 44, № 2. С. 36-44.
17. **Морозов И.И.** О биологической роли свечения Вавилова-Черенкова //Радиац. биол. Радиоэкология. 1996. Т. 36, Вып. 6. С. 921-925.
18. Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) //Ионизирующие излучения: источники и биологические эффекты: Доклад 1982 г. в Генеральной Ассамблее. Т. 1. ООН: Нью-Йорк, 1982. 882 с.
19. **Петин В.Г.** Многообразие проявления радиационного гормезиса: Сборник научных работ лауреатов областных премий и стипендий. Калуга, 2010. Вып. 6. С. 233-242.
20. **Петин В.Г.** Биологические эффекты, индуцируемые малыми дозами ионизирующего излучения: не пришло ли время для смены парадигмы? //Актуальные проблемы биологии и экологии /Под ред. А.В. Селиховкина. Санкт-Петербург: СПбГЛТА, 2011. С. 270-280.

21. **Петин В.Г., Пронкевич М.Д.** Анализ действия малых доз ионизирующего излучения на лабораторных животных: Сборник научных работ лауреатов областных премий и стипендий. Калуга, 2011. Вып. 7. С. 201-210.
22. **Тихонов В.А.** Книга Дж. Гофмана «Рак, вызываемый облучением в малых дозах: независимый анализ проблемы» //Мед. радиология и радиац. безопасность. 1997. Т. 42, № 2. С. 74-75.
23. **Тихонов В.А.** Книга А.В. Яблокова «Атомная мифология». Заметки эколога об атомной индустрии» //Мед. радиология и радиац. безопасность. 2000. Т. 45, № 3. С. 74.
24. **Филюшкин И.В., Петоян И.М.** Объективизация оценок канцерогенного риска у человека при низких уровнях облучения: новый взгляд на старую проблему //Мед. радиология и радиац. безопасность. 2000. Т. 45, № 3. С. 33-40.
25. **Цыб А.Ф., Иванов В.К.** К полувековому юбилею журнала. Радиологические последствия Чернобыля //Мед. радиология и радиац. безопасность. 2006. Т. 51, № 1. С. 18-27.
26. **Шевченко В.А.** Интегральная оценка генетических последствий действия ионизирующих излучений //Радиац. биол. Радиоэкология. 1997. Т. 37. С. 569-576.
27. **Яблоков А.В.** Атомная мифология. Заметки эколога об атомной индустрии. М.: Наука, 1997. 271 с.
28. **Яблоков А.В.** Некоторые проблемы экологии и радиационной безопасности //Мед. радиология и радиац. безопасность. 1998. Т. 43, № 1. С. 24-29.
29. **Ярмоненко С.П.** Низкие уровни излучения и здоровье: радиобиологические аспекты //Мед. радиология и радиац. безопасность. 2000. Т. 45, № 3. С. 5-32.
30. **Abbaszade I.G., Mamedov T.G.** Features of small-dose UV-light effect of *Escherichia coli* WP2 cells and their mutants //Studia Biophysica. 1988. V. 128. P. 89-94.
31. **Abbat I.D., Hamilton T.R., Weeks J.L.** Epidemiological studies in three corporations covering the Canadian Nuclear fuel cycle //Biol. Effects of Low Level Radiation. Vienna: IAEA, 1983. P. 351-361.
32. **Aoyama T., Futamura A., Kato H., Nakamura M., Sugahara T.** Mortality study of Japanese radiological technologists //J. Jpn. Assoc. Radiol. Tech. 1987. P. 91-96.
33. **Auvinen A., Pukkala E., Hyvönen H., Hakama M., Rytömaa T.** Cancer incidence among Finnish nuclear reactor workers //J. Occup. Environ. Med. 2002. V. 44, N 7. P. 634-638.
34. **Becker K.** Health effects of high radon environments in central Europe: another test for the LNT hypothesis? //Nonlinearity Biol. Toxicol. Med. 2003. V. 1, N 1. P. 3-35.
35. **Beebe G.W., Ishida M., Jablon S.** Studies of the mortality of A-bomb survivors. Plan of Study and Mortality in the Medical Subsample (Selection I), 1950-1958 //Radiat. Res. 1962. V. 16, N 3. P. 253-280.
36. BEIR Committee. BEIR-I: The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation. Washington: National Academy Press, 1972.
37. **Beral V., Fraser P., Carpenter L., Booth M., Brown A., Rose G.** Mortality of employees of the atomic weapons establishment //British Medical Journal. 1988. V. 297. P. 757-770.
38. **Calabrese E.J., Baldwin L.A.** Radiation hormesis and cancer //Human and ecological risk assessment. 2002. V. 8, N 2. P. 327-353.
39. **Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., Gilbert E. et al.** Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries //British Medical Journal. 2005. V. 331. P. 77-80.
40. **Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., Gilbert E. 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, N 4. P. 396-416.

41. **Chen W.L., Luan Y.C., Shich M.C., Chen S.T., Kung H.T., Soong K.L., Yeh Y.C. et al.** Is chronic radiation an effective prophylaxis against cancer? //J. American Physicians and Surgeons. 2004. V. 9, N 1. P. 6-10.
42. **Chen W.L., Luan Y.C., Shieh M.C., Chen S.T., Kung H.T. et al.** Effects of Cobalt-60 Exposure on Health of Taiwan Residents Suggest New Approach Needed in Radiation Protection //Dose Response. 2007. V. 5. P. 63-75.
43. **Cohen B.L.** Relationship between exposure to radon and various types of cancer //Health Phys. 1993. V. 65, N 5. P. 529-531.
44. **Cohen B.L.** Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products //Health Phys. 1995. V. 68, N 2, P. 157-174.
45. **Cohen B.L.** Problems in the radon vs lung cancer test of linear no-threshold theory and a procedure for resolving them //Health Phys. 1997. V. 72, N 4. P. 623-628.
46. **Cohen J.J.** Natural background as an indicator of radiation-induced cancer /Proc. 5<sup>th</sup> Int. Cong. of IRPA. Yavneh: Israel Health Physics Society, 1980. P. 357-360.
47. **Craig L., Seidman H.** Leukemia and lymphoma mortality in relation to cosmic radiation //Blood. 1961. V. 17, N 3. P. 319-327.
48. **Darby S.C., Kendall G.M., Fell T.P., Doll R., Goodill A.A., Conquest A.J., Jackson D.A., Haylock R.G.** Further follow up of mortality and incidence of cancer in men from the United Kingdom who participated in the United Kingdom's atmospheric nuclear weapon tests and experimental programmes //British Medical Journal. 1993. V. 307. P. 1530-1535.
49. **Eckhoff N.D., Shultis J.K., Clack R.W., Ramer E.R.** Correlation of leukemia mortality rates with altitude in the United States //Health Phys. 1974. V. 27, N 4. P. 377-380.
50. Environmental Protection Agency (EPA). Federal Register. National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides; Proposed Rules. 1991. V. 56, N 138.
51. **Fornalski K.W., Dobrzyński L.** The healthy worker effect and nuclear industry workers //Dose Response. 2010. V. 8, N 2. P. 125-147.
52. **Frigerio N.A., Stowe R.S.** Carcinogenic and genetic hazard from background radiation /Biological and Environmental Effects of Low Level Radiation. Vienna: IAEA, 1976. V. 2. P. 285-289.
53. **Gilbert E.S., Fry S.A., Wiggs L.D., Voelz G.L., Cragle D.L., Petersen G.R.** Analyses of Combined Mortality Data on Workers at the Hanford Site, Oak Ridge National Laboratory, and Rocky Flats Nuclear Weapons Plant //Radiat. Res. 1989. V. 120, N 1. P. 19-35.
54. **Gilbert E.S., Petersen G.R., Buchanan J.A.** Mortality of Workers at the Hanford Site: 1945-1981 //Health Phys. 1989. V. 56, N 1. P. 11-25.
55. **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, N 3. P. 375-380.
56. **Hattori S.** State of research and perspectives on radiation hormesis in Japan //Int. J. Occup. Med. Toxicol. 1994. V. 3. P. 203-217.
57. **Hattori S.** Radiation hormesis research findings and therapeutic applications //Int. J. Low Radiation. 2005. V. 1, N. 4. P. 369-375.
58. **Ivanov V.K., Gorski A.I., Maksioutov M.A., Tsyb A.F., Souchkevitch G.N.** Mortality among the Chernobyl emergency workers: estimation of radiation risks (preliminary analysis) //Health Phys. 2001. V. 81, N 5. P. 514-521.

59. **Ivanov V.K., Tsyb A.F., Ivanov S.I., Pokrovsky V.** Medical radiological consequences of the Chernobyl catastrophe in Russia: estimation of radiation risks. St. Petersburg: Nauka, 2004. 388 p.
60. **Ivanov V.K.** Late cancer and noncancer risks among Chernobyl emergency workers of Russia //Health Phys. 2007. V. 93, N 5. P. 470-479.
61. **Jablon S., Boice J.D. Jr.** Mortality among workers at a nuclear power plant in the United States //Cancer Causes Control. 1993. V. 4, N 5. P. 427-430.
62. **Jagger J.** Natural background radiation and cancer death in Rocky Mountain States and Gulf Coast States //Health Phys. 1998. V. 75, N 4. P. 428-430.
63. **Kato H., Schull W.J., Awa A., Akiyama M., Otake M.** Dose-response analyses among atomic bomb survivors exposed to low-level radiation //Health Phys. 1987. V. 52, N 5. P. 645-652.
64. **Kendall G.M., Muirhead C.R., MacGibbon B.H., O'Hagan J.A., Conquest A.J., Goodill A.A., Butland B.K., Fell T.P., Jackson D.A., Webb M.A.** Mortality and occupational exposure to radiation: first analysis of the National Registry for Radiation Workers //British Medical Journal. 1992. V. 304. P. 220-225.
65. **Kondo S.** Health Effects of Low-Level Radiation. Osaka, Japan: Kinki University Press and Madison; Wisconsin: Medical Physics Publishing Co., 1993. 203 p.
66. **Land C.E.** Estimating cancer risks from low doses of ionizing radiation //Science. 1980. V. 209. P. 1197-1203.
67. **Lázár I., Tóth E., Marx G., Cziegler I., Köteles G.J.** Effects of residential radon on cancer incidence //J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2003. V. 258, N 3. P. 519-524.
68. **Liu S.Z., Liu W.H., Sun J.B.** Radiation hormesis: its expression in the immune system //Health Phys. 1987. V. 52, N 5. P. 579-583.
69. **Luan Y.C., Shieh M.C., Chen S.T. et al.** Re-examining the health effects of radiation and its protection //Int. J. Low Radiation. 2006. V. 3, N 1. P. 27-44.
70. **Luckey T.D.** Hormesis with Ionizing Radiation. Tokyo: Boca Raton Publisher, CRC Press, 1980.
71. **Luckey T.D.** Radiation hormesis. Tokyo: Boca Raton Publisher, CRC Press, 1991.
72. **Luckey T.D.** Radiation prevents much cancer //Int. J. Low Radiation. 2007. V. 4, N 4. P. 336-344.
73. **Mason T.J., Miller R.W.** Cosmic radiation at high altitudes and US cancer mortality, 1950-1969 //Radiat. Res. 1974. V. 60, N 2. P. 302-306.
74. **Matanoski G.M., Sartwell P., Elliott E., Tonascia J., Sternberg A.** Cancer risks in radiologists and radiation workers //Radiation Carcinogenesis: Epidemiology and Biological Significance /Eds. Boice J. D. and Fraumeni F. New York: Raven Press, 1984. P. 83-96.
75. **Metz-Flamant C., Rogel A., Caër S., Samson E., Laurier D., Acker A., Tirmarche M.** Mortality among workers monitored for radiation exposure at the French nuclear fuel company //Arch. Environ. Occup. Health. 2009. V. 64, N 4. P. 242-250.
76. **Mifune M., Sobue T., Arimoto H., Komoto Y., Kondo S., Tanooka H.** Cancer mortality survey in a spa area (Misasa, Japan) with a high radon background //Jpn. J. Cancer Res. 1992. V. 83, N 1. P. 1-5.
77. **Mohan A.K., Hauptmann M., Freedman D.M., Ron E., Matanoski G.M., Lubin J.H., Alexander B.H., Boice J.D.Jr., Doody M.M., Linet M.S.** Cancer and other causes of mortality among radiologic technologists in the United States //Int. J. Cancer. 2003. V. 10, N 103. P. 259-267.
78. **Monfared A.S., Jalali F., Sedaghat S., Mansoorzade E., Jarrahi A.M., Hajiahmadi M., Samavat H.** High natural background radiation areas in Ramsar, Iran: can inhabitants feel safe? //Int. J. Low Radiat. 2006. V. 3, N 2/3. P. 171-177.

79. **Mortazavi S.M.J., Karam P.A.** Apparent lack of radiation susceptibility among residents of the high background radiation area in Ramsar, Iran: can we relax our standards? /The Natural Radiation Environment VII /Eds. McLaughlin J.P., Simopolos S.E., Steinhausler F. Amsterdam: Elsevier, 2005. P. 1141-1147.
80. **Nair R.R., Rajan B., Akiba S., Jayalekshmi P., Nair M.K. et al.** Background radiation and cancer incidence in Kerala, India-Karanagappally cohort study //Health Phys. 2009. V. 96, N 1. P. 55-66.
81. **Rozhdestvensky L.M.** Alternatives of non-threshold and threshold concepts of carcinogenic and mutagenic effects of low LET radiation: the analysis of postulates and arguments //Int. J. Low Radiation. 2006. V. 2, N 3/4. P. 154-171.
82. **Scott B., Sanders C.L., Mitchel R.E.J., Boreham D.R.** CT scans may reduce rather than increase the risk of cancer //J. Am. Phys. Surg. 2008. V. 13. P. 8-11.
83. **Shimizu Y., Kato H., Schull W.J.** Studies of the mortality of A-bomb survivors. 9. Mortality, 1950-1985: Part 2. Cancer mortality based on the recently revised doses (DS86) //Radiat. Res. 1990. V. 121, N 2. P. 120-141.
84. **Shimizu Y., Kato H., Schull W.J., Mabuchi K.** Dose-response analysis among atomic-bomb survivors exposed to low-level radiation //Eds. Sugahara T., Sagon L.A., Aoyama T. London: Excerpta Medica, 1992. P. 71-74.
85. **Sobue T., Lee V.S., Ye W., Tanooka H., Mifune M., Suyama A., Koga T., Morishima H., Kondo S.** Residential radon exposure and lung cancer risk in Misasa, Japan: a case-control study //J. Radiat. Res. (Tokyo). 2000. V. 41, N 2. P. 81-92.
86. **Sohrabi M.** World high level natural radiation and/or radon-prone areas with special regards to dwellings /High levels of natural Radiation /Eds. Wei L., Sugahara T., Tao Z. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1997. P. 57-68.
87. **Sponsler R., Cameron J.R.** Nuclear shipyard worker study (1980–1988): a large cohort exposed to low-dose-rate gamma radiation //Int. J. Low Radiation. 2005. V. 1, N. 4. P. 463-478.
88. **Suzuki Y., Honjo S., Kawamura H., Koishi F., Suzuki T., Hirohata T.** Cancer mortality in low radon spa area //Jpn. J. Cancer Res. 1994. V. 85, N 11. P. 1063-1066.
89. **Tao Z., Zha Y., Akiba S. et al.** Cancer mortality in the high background radiation areas of Yangjiang, China during the period between 1979 and 1995 //J. Radiat. Res. 2000. V. 41. P. 31-41.
90. **Thierry-Chef I., Marshall M., Fix J.J., Bermann F., Gilbert E.S., Hacker C. et al.** The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: study of errors in dosimetry //Radiat. Res. 2007. V. 167, N 4. P. 380-395.
91. **Tirmarche M., Rannou A., Mollie A., Sauve A.** Epidemiological study of regional cancer mortality in France and natural radiation //Radiat. Protect. Dosim. 1988. V. 24, N 1-4. P. 479-482.
92. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Sources and effects of ionizing radiation / Document A/AC 82/R 542. New York: United Nations, 1994.
93. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Report: "Summary of low-dose radiation effects on health". New York: United Nations, 2010.
94. **Vrijheid M., Cardis E., Ashmore P., Auvinen A., Bae J.M., Engels H. et al.** Mortality from diseases other than cancer following low doses of ionizing radiation: results from the 15-Country Study of nuclear industry workers //Int. J. Epidemiol. 2007. V. 36, N 5. P. 1126-1135.
95. **Wei L., Zha Y., Tao Z., He W., Chen D., Yuan Y.** Epidemiological investigation of radiological effects in high background radiation areas of Yangjiang, China //J. Radiat. Res. 1990. V. 31. P. 119-136.

96. **Wiggs L.D., Johnson E.R., Cox-Devore C.A., Voelz G.** Mortality through 1990 among white male workers at the Los Alamos National Laboratory: Considering exposures to plutonium and external ionizing radiation //Health Phys. 1994. V. 67, N 6. P. 577-588.
97. **Wing S., Shy C.M., Wood J.L., Wolf S., Cragle D.L., Frome E.L.** Mortality among workers at Oak Ridge National Laboratory. Evidence of radiation effects in follow-up through //JAMA. 1991. V. 20, N 265 (11). P. 1397-1402.
98. **Yalow R.S.** Concerns with low-level ionizing radiation //Mayo Clin Proc. 1994. V. 69, N 5. P. 436-440.
99. **Yoshinaga S., Aoyama T., Yoshimoto Y., Sugahara T.** Cancer mortality among radiological technologists in Japan: updated analysis of follow-up data from 1969 to 1993 //J. Epidemiol. 1999. V. 9, N 2. P. 61-72.
100. **Yoshinaga S., Mabuchi K., Sigurdson A.J., Doody M.M., Ron E.** Cancer risks among radiologists and radiologic technologists: review of epidemiologic studies //Radiology. 2004. V. 233, N 2. P. 313-321.

### **Analysis of effects of low dose radiation on cancer incidence**

**Petin V.G., Pronkevich M.D.**

Medical Radiological Research Center of the Russian Ministry of Health  
and Social Development, Obninsk

In the review we generalized and analyzed published experimental and epidemiological data on effects of low dose radiation on cancer incidence. It was shown that no increase in cancer incidence was observed in those resided under enhanced natural radiation. Japanese cohort of atomic bomb survivors, nuclear workers and cleanup workers of nuclear incidents. Moreover, in some cases lower cancer mortality as compared to the baseline mortality was observed. The most impressed data on the Taiwan cohort resided in radioactive apartments during 25 years were published. Cancer incidence in that population was 40 times lower than in the control group, at the same time accumulated doses were higher than in clean-up workers of the Chernobyl accident. Analyzed data demonstrate that exposure to low dose radiation reduces risk of cancer development. Possible mechanisms of beneficial action of low level radiation are discussed.

**Key words:** *ionizing radiation, low doses, cancer morbidity, radiation associated hormesis.*