

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-70

P16-96-70

М.М.Комочков

О ВОЗМОЖНЫХ ПОСЛЕДСТВИЯХ  
ОБЛУЧЕНИЯ ЛЮДЕЙ МАЛЫМИ ДОЗАМИ  
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1996

— данные комиссий (комитетов или фондов), основанные на результатах наблюдений за жителями Хиросимы и Нагасаки, пережившими атомную бомбардировку,

— прочие данные.

### 2.1. Вероятность $W(D)$ по данным комиссий:

Более 90000 человек, переживших атомные бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки, были включены в пожизненное обследование состояния здоровья. Вначале эти исследования проводились Комиссией по изучению последствий атомной бомбардировки (КИПАБ), затем в 1975 году контроль за проведением этих исследований взял на себя Фонд исследований радиационных эффектов (ФИРЭ) в Хиросиме. Результаты этих эпидемиологических наблюдений в совокупности с данными дозиметрии легли в основу анализа различных научных комиссий и, в частности, Международной комиссии по радиологической защите [2—4]. Часть результатов представлена на рис.1. Крестиками обозначена вероятность  $W(D, \Delta t)$  избыточной (над контрольной группой) смертности от твердых ( $T$ ) раков (все раки, кроме лейкемии) за период  $\Delta t$  с 1950 г. по 1982 г.:

$$W(D, \Delta t) = \frac{N(D, \Delta t)}{N_0(D)} - \frac{N(K, \Delta t)}{N_0(K)},$$

где  $N(D, \Delta t)$  — количество смертных исходов раковых заболеваний в период с 1950 г. по 1982 г. в группе с дозой  $D$ ,  $N_0(D)$  — число исходных лиц в группе с дозой  $D$ ,  $N(K, \Delta t)$  — количество смертельных исходов раковых заболеваний в 1950—1982 гг. в контрольной группе — жители Хиросимы и Нагасаки, пережившие атомную бомбардировку и получившие дозу менее  $10^{-3}$  Зв,  $N_0(K)$  — число исходных лиц в контрольной группе. Все значения, указанные в формуле после знака равенства величин, заимствованы из таблицы 13-А работы [5], для которой источником являлась КИПАБ. Следует сделать два замечания о дозах. Во-первых, здесь и далее имеется в виду эффективная доза. Во-вторых, доза в Зв (как это дано в работе [5]) приблизительно равна дозе в Гр из-за малого вклада нейтронов в суммарную дозу жителей Хиросимы, а тем более в Нагасаки (от менее чем 1% до 6,5% в единицах кермы в зависимости от города и места от эпицентра взрыва [11]).

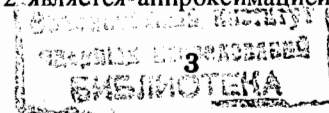
Значения  $N(D, \Delta t)$  и  $N(K, \Delta t)$  являются не полными выходами смертельных случаев от происшедшего облучения, т.к. не учитывают последующих (после 1982 г.) смертей. ФИРЭ проанализировал данные эпидемиологических наблюдений вплоть до 1986 г., ввел поправки на пожизненный выход смертельных раковых исходов согласно мультипликативной модели [2,4] и получил зависимость эффекта от дозы, представленную на рис.1 ломаной линией 1 [10]. Линия 2 является аппроксимацией МКРЗ данных ФИРЭ при

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] представлен уровень радиационного риска сотрудников ОИЯИ, в период с 1965 г. по 1994 г. работавших с источниками ионизирующих излучений, а также населения г.Дубны. Этот результат найден как произведение средней или коллективной дозы в год на соответствующие коэффициенты вероятности стохастических эффектов, рекомендованные МКРЗ [2—4]. Последние не являются ни данными прямых экспериментов, ни продуктом эпидемиологических наблюдений, а выведены путем анализа многочисленных работ, основой большинства которых является банк дозиметрических и эпидемиологических данных наблюдений за жителями Хиросимы и Нагасаки, пережившими атомные бомбардировки. Незавершенность и нестабильность (в результате уточнений) этих данных [2—5] приводит к различным значениям номинальных коэффициентов вероятности стохастических эффектов  $W'$  [2—10], что порождает многочисленные дискуссии, а главное — различные оценки радиологических последствий облучения людей, работающих с источниками ионизирующих излучений или проживающих на загрязненных радионуклидами территориях. Цель настоящей работы — дать краткий анализ доступных материалов по эффекту биологического действия на людей малых доз ионизирующих излучений.

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТА ОТ ДОЗЫ

Стохастические эффекты принято [2—4] представлять тремя составляющими: неизлечимым раком, излечимым раком и тяжелыми наследственными эффектами. К настоящему времени наиболее надежно разработана методология оценки последствий облучения и получены результаты лишь для одной из трех составляющих  $W'$  — неизлечимого рака, рассмотрением которой мы и ограничимся. Зависимость вероятности смертельных случаев рака от дозы  $D$  обозначим  $W(D)$ , а коэффициент этой вероятности (при допущении, что она линейна при малых дозах) —  $W'_c$ . Информацию о  $W(D)$  и  $W'_c$  можно представить в двух частях:



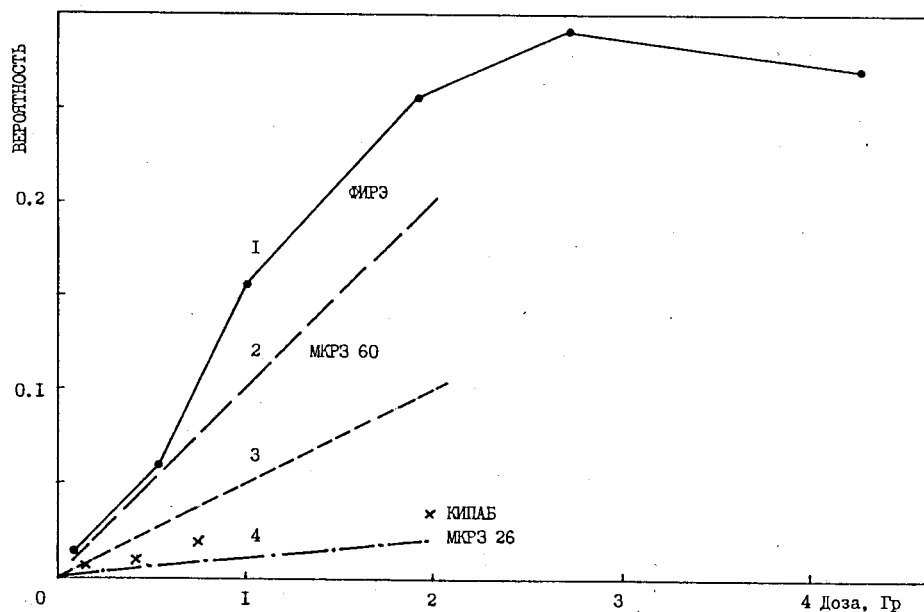


Рис.1. Вероятность смерти от рака (кроме лейкемии) в зависимости от дозы облучения (пояснения в тексте)

больших дозах, а линия 3 принята МКРЗ для области малых доз в целях контроля радиационной безопасности в нормальных условиях; отношение значений ординат линии 2 к значению ординат линии 3 равно 2. Это так называемый коэффициент, учитывающий эффективность дозы и мощности дозы (DDREF) значения которого получены не на людях и по разным работам колеблются в интервале 2—10 [2—4]. Линия 4 представляет рекомендации МКРЗ 1977 г. для целей радиационной защиты [12].

Отношение значения  $W_c'$ , рекомендованного МКРЗ в 1990 г. [2—4], к значению  $W_c'$ , рекомендованному в 1977 г. [12] (численно равно отношению ординат линии 3 к ординатам линии 4 рис.1 при одной и той же дозе), равно 4. Таким образом, согласно МКРЗ риск облучения малыми дозами со смертельным исходом увеличился в 4 раза; из них ~2 приходится на увеличение количества смертельных случаев после 1975 г. против ожидаемых и ~2 — на рост в будущем. Рост в будущем следует из замены модели оценки предстоящих смертей с аддитивной на мультипликативную [2—4], которая лучше описывает факт увеличения числа раковых смертей за последние два десятка лет.

Ревизия данных дозиметрии [11] позволила объединить зависимость выхода раковых (кроме лейкемии) смертей от дозы для жителей Хиросимы и Нагасаки, которая в области малых доз стала ближе к линейной [10]. Кроме того, ревизия данных дозиметрии привела к росту номинального коэффициента вероятности лейкемии в 2,5 раза [2—4].

## 2.2. Другие версии

О зависимости эффекта от дозы кроме версий комиссий имеются и другие. Автор работы [5] за основу своего анализа выбрал данные КИПАБ и аппроксимировал их методом наилучшего согласия рассчитанных и наблюдаемых смертельных случаев рака за период с 1950 г. по 1982 г. Он считает доказанным (хотя не приводит возможные погрешности), что производная  $W_c'(D)$  с ростом дозы уменьшается в области малых доз, а не увеличивается, как это принято международными радиационными комиссиями, и, в частности, МКРЗ. Таким образом, по мнению автора [5], нет никаких оснований значения  $W_c'$ , полученные при больших дозах, делить на коэффициент DDREF для получения значений  $W_c'$  при малых дозах. Опираясь на свой анализ и переходя к пожизненному риску, автор получил значение  $W_c'$  равным  $\sim 0,3 \text{ Зв}^{-1}$  для диапазона доз от 0 до 5 сЗв. Таким образом, значение вероятности смертельных случаев рака на единицу дозы, полученное в работе [5], в шесть раз выше номинального значения  $W_c'$ , рекомендованного МКРЗ с убеждением, что недооценка риска маловероятна при этом.

Основной недостаток работы [5] заключается в том, что автор ее не принял во внимание погрешности полученных результатов. Этот пробел выполнен в работе [13], где указан\* доверительный интервал полученных данных (95%). Заимствованные из этой работы сведения представлены на рис.2, откуда следует, что лишь при дозе 33 сЗв имеет место статистически значимое значение по наблюдаемой смертности от всех раков, кроме лейкемии; результаты аппроксимированы прямой линией 1 при дозах облучения менее 50 сЗв. Данные по наблюдаемой смертности от лейкемии аппроксимированы при дозах менее 50 сЗв линейно-квадратной зависимостью 2 и не удовлетворяют статистической достоверности в доверительном интервале 95%. Линия 3 соединяет две первые точки ломаной линии 1 рис.1 — пожизненная смертность от всех раков кроме лейкемии жителей Хиросимы и Нагасаки, переживших атомную бомбардировку, по отношению к контрольной группе [10]. Треугольниками представлен относительный риск заболеваний раком среди ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС по результатам наблюдений в 1989—1992 гг. с указанием 95% доверительного интервала [14].

\*Результаты получены Shimizu (1992 г.) и представлены S.Okada [13].

Среди других публикаций, свидетельствующих о значениях риска больших, чем указывается МКРЗ [2—4], следует упомянуть работу [15] вместе с критическим анализом полученных результатов в совокупности с другими данными [16]. Этот анализ показывает возможность объяснить повышенный выход лейкемии у детей, проживающих вблизи предприятий атомной промышленности, другими причинами.

Заслуживает внимания информация [17] об увеличении выхода раковых заболеваний и, в частности, лейкемии, у детей, которые в утробном состоянии были облучены дозой 1 сГр при профилактической предродовой радиографии.

Имеет место и противоположная точка зрения на значения риска при облучении малыми дозами, рекомендуемые МКРЗ [2—4]. Так, например, группа ведущих специалистов России сообщает, что «...как показывают исследования советских специалистов, коэффициенты риска радиационно-индуцированного рака для излучений с малыми ЛПЭ, рекомендованные МКРЗ, завышены по крайней мере в 5 раз» [18]. К сожалению, более весомой аргументации не удалось отыскать для более низких значений коэффициентов риска радиационно-индуцированного рака в людях. В качестве наиболее сильного аргумента в обоснование ныне действующих норм радиационной безопасности в России [19] (которые по существу соответствуют номинальным значениям коэффициентов риска 1977 г. [12]) ссылаются на «...отсутствие наблюдаемого вреда при дозах, превышающих естественный фон для здоровья сотен тысяч людей во многих странах...» [18]. Основание для такого утверждения авторам, видимо, дает отсутствие практической возможности его проверить, т.к. для этого необходимы огромные массы людей с контролируемыми условиями проживания и дозами облучения [20].

Нельзя не упомянуть о крайней точке зрения на эффект действия малых доз излучения на людей, который выражается в якобы их благотворном влиянии (гормезис) [13,21,22]. Наиболее выразительно гормезис отстаивается в работе [23], автор которой не сомневается в опасности причинить непосредственный вред здоровью людей путем снижения их облучаемости при переходе на более жесткие международные рекомендации [2—4].

### 2.3. Размышления над приведенными данными

Наиболее обескураживающим результатом представленных данных является большой разброс значений коэффициентов вероятности смертельных случаев радиационно-индуцированного рака  $W_c'$  в области малых доз облучения. Отношение максимального значения  $W_c'$  из работы [5] к минимальному [12], на который сегодня опирается, по существу НРБ-76/87, составляет ~30. Если же принять во внимание работу [24], то амплитуда разброса превы-

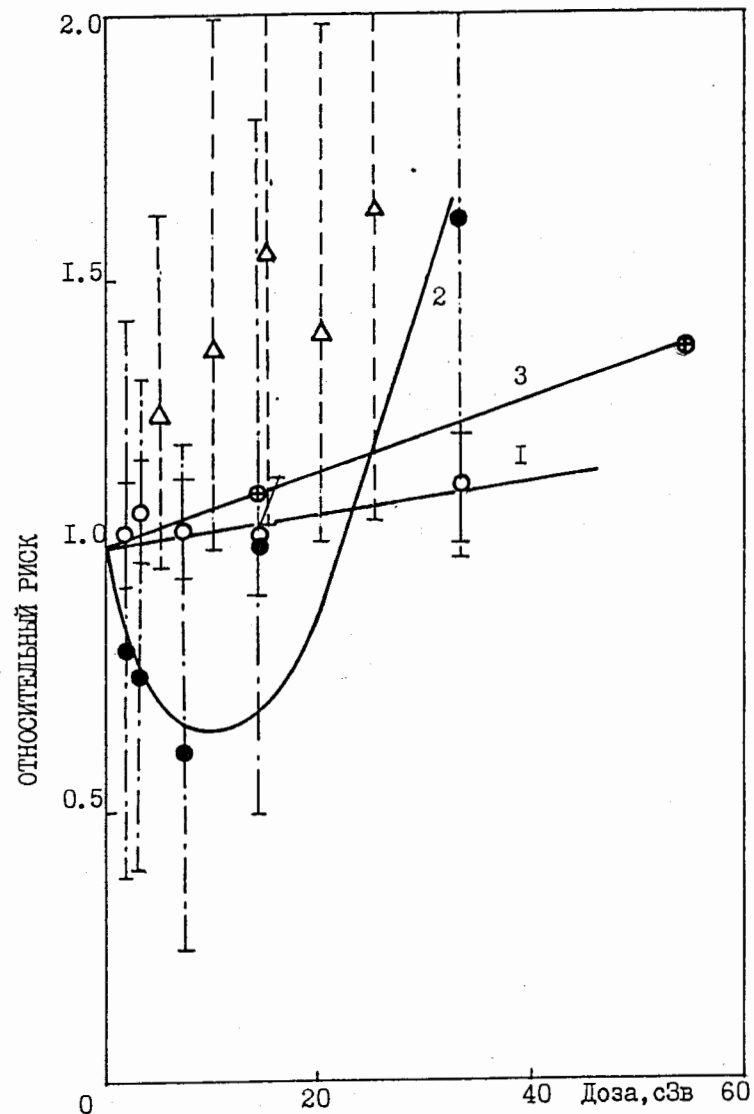


Рис.2. Зависимость относительного риска от дозы:  $\Delta$  — заболевание раком ликвидаторов аварии на ЧАЭС (1989—1992 гг.); смертность среди жителей Хиросимы и Нагасаки, переживших атомную бомбардировку:  $\oplus$  — пожизненная для всех;  $\bullet$ ,  $\circ$  — наблюдаемая для тех, кому было менее 40 лет во время бомбардировки;  $\bullet$  — от лейкемии;  $\circ$  — от всех раков за 1965—1985 гг. кроме лейкемии.

шает 100. Рекомендации МКРЗ [2—4], которые в части  $W_c'$  хотя и занимают положение близкое к среднему значению, тем не менее не являются результатом, непосредственно вытекающим из данных наблюдений, а есть продукт их аналитической обработки, основанной на прогнозе о будущей смертности около половины когорты людей, переживших атомную бомбардировку и использовании коэффициента DDREF. Любопытно, что еще в пятидесятых годах А.Д.Сахаров использовал для оценки возможной гибели людей значение, равное  $5 \cdot 10^{-4}$  на 1 рад [25], что в точности совпадает с нынешней рекомендацией МКРЗ для населения в случае его облучения фотонами, электронами и мюонами всех энергий [2—4]. В области малых доз (<15 сЗв) отсутствуют статистически значимые (с доверительным интервалом 95%) результаты. Наличие статистически значимых результатов при дозе 15 сЗв и более для ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, которые превышают значения относительного риска для жителей, переживших атомную бомбардировку, вселяет неуверенность в том, что недооценка риска МКРЗ маловероятна [2—4]. Такое сравнение (треугольники и линии 1,3 на рис.2) кажется правомерным, если учесть, что отношение числа умирающих от рака к числу заболевших им составляет 0,8 [4] с учетом перечня злокачественных новообразований и их вклада у ликвидаторов [14]. Стохастическая природа рассматриваемого эффекта — появление злокачественных новообразований и отсутствие статистически значимых результатов наблюдений в области малых доз — объясняют большой диапазон значений коэффициентов вероятности для этого эффекта, предлагаемых и отстаиваемых различными авторами [2—5,9,10,18,23,24]. Таким образом, основная принципиальная трудность решения проблемы определения последствий малых доз ионизирующего излучения на человека заключается в том, что последствия приходится искать на фоне, в десятки раз превышающем эффект; при этом как эффект, так и фон имеют стохастическую природу. Следствием этой трудности является проблема выборки популяций для определения фона (контрольная группа) и эффекта. Основные пути решения проблемы определения последствий малых доз ионизирующих излучений на человека почти очевидны:

— продолжение и совершенствование эпидемиологических наблюдений над когортами людей, подвергшихся облучению;

— продолжение и постановка модельных опытов на животных, микроорганизмах и клетках с целью выявления закономерностей воздействия ионизирующих излучений на живую среду;

— развитие методов математического моделирования радиобиологических процессов в живой среде, происходящих под действием излучений.

Разумеется, оптимальное сочетание всех путей решения проблемы является наиболее эффективным и скорым способом достижения цели.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Состояние проблемы определения последствий облучения людей малыми дозами ионизирующих излучений можно охарактеризовать следующими соображениями:

а) Основными источниками данных являются результаты эпидемиологических наблюдений за когортами людей, подвергшихся облучению дозами, выходящими за пределы области их малых значений; минимальная эффективная доза общего облучения, при которой получен статистически значимый результат в пределах 95%-го доверительного интервала, составляет 15 сЗв.

б) Отношение максимальных значений коэффициента вероятности радиационно-индуцированных смертей к их минимальным значениям, отстаиваемых различными авторами работ, составляет число ~100. Такой коридор неопределенности является следствием стохастической природы как эффекта, так и фона при низком уровне статистической достоверности.

в) Основная принципиальная трудность решения проблемы определения последствий воздействия малых доз на человека заключается в том, что последствия приходится искать на фоне, в десятки раз превышающем эффект.

г) Прогресс в решении проблемы определения последствий облучения людей малыми дозами, видимо, следует искать в оптимальном сочетании эпидемиологических наблюдений за облученными людьми и моделировании эффекта, как радиобиологическим путем, так и математическими методами.

Автор благодарен Е.А.Красавину и В.И.Корогодину за постановку задачи и поддержку работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Комочков М.М. — ОИЯИ, Р16-94-57, Дубна, 1994.
2. ICRP. Publication 60. 1990 Recommendation of the ICRP. Annals of the ICRP, v.21, No.1-3, Pergamon Press, Oxford, 1991.
3. Рекомендации МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по Радиологической защите 1990 года. Публикации 60 МКРЗ, часть 1, 61 МКРЗ. Перевод с английского. М.: Энергоиздат, 1994.
4. Рекомендации МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ, часть 2. Перевод с английского. М.: Энергоиздат, 1994.
5. Гофман Д. — Рак, вызываемый облучением в малых дозах. Перевод с английского. М.: Социально-экологический союз, 1994.
6. Morgan K.Z. — Maximum Permissible Levels of Exposure to Ionizing Radiation. In: Proceedings in the Summer School on Radiation Protection, Boris Kidric Institute of Nuclear Science, Gavtat, Yugoslavia, September 20—30, 1970.

7. Rossi H.H. — Estimates of the Hazard of Low Doses of Ionizing Radiation. IEEE Transactions of Nuclear Science, 1980, NS-27, p.23.
8. Данстер X. — Атомная техника за рубежом, 1987, №10, с.35.
9. Филюшкин И.В. — Атомная энергия, 1990, 69, с.405.
10. Kellereger A.M. — Kertechnik, 1990, 55, No.4, p.198.
11. Preston D.L., Pierce D.A. — Radiation Res., 1988, 144, p.437.
12. Рекомендации МКРЗ. Радиационная защита. Публикация 26 МКРЗ. Перевод с английского. М.: Атомиздат, 1978.
13. Sugahara T. et al. — Panel Discussion on Health Effects of Low-Dose Ionizing Radiation: Scientific Findings and Non-Threshold Hypothesis. JAERI — Conf. 95-010, Tokyo, 1995.
14. Иванов В.К., Цыб. А.Ф., Максютов М.А. и др. — В сб.: Библиотека журнала «Медицинская радиология и радиационная безопасность». Медицинские последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Материалы научно-практического симпозиума, г.Обнинск, 18—20 мая 1994 г. М.: ИЗДАТ, 1995, с.37.
15. Black D. — Report of the Independent Advisory Group. Investigation of the Possible Increased Incidence of Cancer in West Cumbria. London, HMSO, 1984.
16. Little M.P. et al. — Health Physics, 1995, 68, p.299.
17. В работе [13], с.7.
18. Булдаков Л.А. и др. — В Трудах симпозиума, Мюнхен, 7—11 мая 1990: Radiation Protection Infrastructure, IASA, Vienna, 1990, p.185.
19. Нормы радиационной безопасности НРБ — 76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП — 72/87. М.: Энергоатомиздат, 1988.
20. Goss S.G. — Health Physics, 1995, 29, p.641.
21. He Weihul et al. — Chin J. Radiology Med. Protect., 1985, vol.5.5, No.2, p.109.
22. Giaferoni et al. — Bull. World Health Organ., 1992, vol.62, p.696.
23. Кеирим-Маркус И.Б. — Атомная энергия, 1995, 79, с.279.
24. Петоян И.М. — Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Институт биофизики Министерства здравоохранения СССР. М., 1985.
25. Корогодин В.И. — ОИЯИ, P19-90-288, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 февраля 1996 года.

Комочков М.М.

P16-96-70

О возможных последствиях облучения людей  
малыми дозами ионизирующих излучений

— Дан краткий анализ публикаций по результатам эпидемиологических наблюдений за смертностью от рака людей, облученных ионизирующим излучением. Статистически значимый результат получен при дозах более 15 сЗв. Отношение максимальных значений коэффициента вероятности радиационно-индуцированных смертей к их минимальным значениям составляет два порядка. Обсуждены природа и причины такой дисперсии значений.

— Работа выполнена в Отделении радиационных и радиобиологических исследований ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод автора

Komochkov M.M.

P16-96-70

About Possible Consequences of Men Irradiation  
by Small Dose of Ionizing Radiation

A short analysis of the reports on the results of epidemiological control over cancer deaths of men exposed by ionizing radiation is presented. The statistically significant results are over 15 cSv. The ratio of maximum significancies of probability coefficients of radiation induced fatal cancer to their minimum ones is two orders. The nature and reasons for such dispersion of significancies have been discussed.

The investigation has been performed at the Department of Radiation and Radiobiological Research, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1996