

## РАДИОАКТИВНЫЙ УГЛЕРОД ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ И НЕПОРОГОВЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

А.Д. Сахаров

В этой статье, появившейся в советском журнале "Атомная энергия" в 1958 году, Андрей Дмитриевич Сахаров показал, что от радиоактивности, выделенной при взрыве одной водородной бомбы мощностью в одну мегатонну от рака, генетических нарушений и других болезней пострадает около десяти тысяч человек. Согласно этой оценке, при взрыве советской водородной бомбы мощностью в 58 мегатонн, проведенном в 1961 году (что составляет около 10% от мощности всех атмосферных ядерных взрывов) должно было погибнуть или серьезно заболеть около полумиллиона человек.

А.Д. Сахаров неоднократно сообщал Н.С. Хрущеву свое мнение о необходимости прекращения ядерных испытаний, но, согласно его воспоминаниям, Н.С. Хрущев резко ответил ему, что ученые должны заниматься разработкой оружия, а руководство будет решать, что с ним делать (Harison E. Salisbury, ed., *Sakharov Speaks*, New York, Alfred A. Knopf, 1974, pp. 32-34). Этот ответ убедил А.Д. Сахарова в том, что действовать через официальные каналы бесполезно.

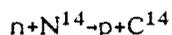
Несмотря на то, что эта статья А.Д. Сахарова появилась в английском переводе журнала "Атомная энергия", и что она переводилась другими авторами (в частности, Лайнусом Полингом, который сделал аналогичные оценки), она не была замечена на Западе.

Насколько оценки А.Д. Сахарова выдержали испытание временем? В кратком приложении к статье приведено сравнение принятых им предположений о полученной населением дозе радиоактивного облучения и биологическим воздействием полученной дозы с современными данными. Сделанные А.Д. Сахаровым оценки полученной дозы представляются несколько завышенными, а эффект биологического воздействия - несколько заниженным. Тем не менее, его оценка в 10 тысяч смертных случаев и серьезных заболеваний от непороговых биологических эффектов на каждую мегатонну мощности ядерных взрывов в атмосфере в течение нескольких тысяч лет, за которые распадается образованный при ядерных взрывах радиоактивный углерод-14, близка к той, которая может быть сделана на основе современной информации.

Фрэнк фон Хиппель,  
председатель американской редколлегии журнала

### 1. Введение

При взрыве всех видов ядерного оружия, включая и так называемую "чистую" (безосколочную) водородную бомбу, в атмосферу попадает огромное количество нейтронов (§2), которые захватывают азотом воздуха по реакции



с образованием долгоживущего радиоактивного изотопа углерода  $C^{14}$ . Радиоуглерод попадает в ткани человека и при распаде вызывает радиационное поражение, измеряемое дозой  $7,5 \cdot 10^{-4}$  р на мегатонну мощности взрыва (§3).

Для численной оценки человеческих потерь, обусловленных образованием радиоуглерода, автор исходит из следующих предположений:

1) численность человечества составит в ближайшие тысячелетия 30 млрд. человек;

2) облучение половых желез дозой 1 р приводит к наследственным болезням в  $10^{-4}$  случаев (§4);

3) другие непороговые биологические эффекты утраивают число жертв (§4).

Общее число жертв радиоуглерода мегатонного взрыва в этих предположениях составляет 6 тыс. 600 человек. Эти жертвы распределяются на срок порядка 8 тыс. лет. Как следует из данных О.И. Лейпунского<sup>1</sup>, непороговые биологические эффекты, обусловленные радиостронцием и внешним облучением радиоцезием, увеличивают цифру потерь в 1,5 раза за счет жертв нашего и следующего поколений. Общее число жертв уже проведенных ядерных испытаний (мощностью 50 Мт) оценивается в 500 тыс. человек. Это, по-видимому, заниженная оценка. Нельзя исключить того, что полное

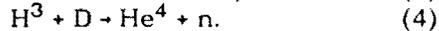
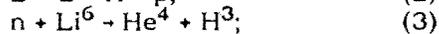
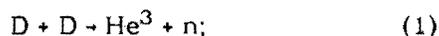
число жертв уже равно 1 млн. человек и увеличивается на 200-300 тыс. человек ежегодно.

Продолжение испытаний и всякие попытки узаконить ядерное оружие и его испытания противоречат гумманности и международному праву. Наличие радиоактивной опасности от так называемой "чистой" (т.е. безосколочной) бомбы лишает какой-либо почвы пропагандистские высказывания о качественно особом характере этого вида оружия массового уничтожения.

## 2. Образование нейтронов при ядерных взрывах

При атомных взрывах каждый акт деления сопровождается увеличением числа нейтронов на  $\nu-1$  ( $\nu$  - число нейтронов деления, один нейтрон поглощен при делении). Лишь незначительная часть образовавшихся нейтронов поглощается оболочками (с образованием плутония). Принимаем, что на каждый акт деления (180 Мэв) выделяется  $\nu-1 = 1,5$  нейтронов. В военной технике принято энергию взрыва (обычно говорят "мощность") выражать эквивалентной массой тротила. 1 млн.т тротила соответствует делению 60 кг урана или плутония и выделение  $2,25 \cdot 10^{26}$  нейтронов.

Различают два типа чистотермоядерных бомб: с использованием химического соединения дейтерия с легким изотопом лития  $Li^6$ . В первом случае выделение нейтронов на единицу мощности значительно больше. Однако мы ограничимся рассмотрением второго случая, так как, по-видимому, именно этому типу оружия уделяется наибольшее внимание. В этом случае имеют место следующие основные реакции:



Эффективная вероятность (произведение сечения на скорость реагирующих частиц) для реакций (3) и (4) примерно в 100 раз больше, чем для реакций (1) и (2).

Основная энергия взрыва выделяется при цикле "быстрых" реакций (3) и (4). Эти реакции взаимно друг друга поддерживают и оставляют без изменения суммарное количество нейтронов и ядер трития. "Медленные" реакции (1) и (2) служат начальным источником нейтронов и трития.

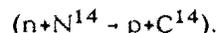
Конкретное рассмотрение кинетики реакций (1)-(4) показывает, что при достаточно большом выгорании  $Li^6$  на один цикл реакций (3)-(4) выделяется приблизительно

0,2 нейтрона и 0,2 ядра трития за счет реакций (1) и (2). При цикле (3)-(4) выделяется 22 Мэв энергии, т.е. один нейтрон выделяется на 110 Мэв энергии взрыва. Это число совпадает с  $180 \text{ Мэв} / 1,5 = 120 \text{ Мэв}$  для атомного взрыва.

В водородной бомбе, в которой применены урановые оболочки, значительная часть энергии возникает за счет деления  $U^{238}$  быстрыми надпороговыми нейтронами реакций (4) и (1). Однако в силу совпадения числа нейтронов для чистоатомного и чистотермоядерного взрыва и в этом случае возникает  $2,25 \cdot 10^{26}$  нейтр/Мт.

## 3. Вычисление дозы облучения

Используем экспериментальные данные, относящиеся к  $C^{14}$  естественного происхождения (см. ссылки<sup>2,3</sup>). Космические лучи вызывают в верхних слоях атмосферы разнообразные ядерные реакции, одним из продуктов которых являются нейтроны в количестве 2,6-2,4 нейтр/см<sup>2</sup>сек. Около 95% этих нейтронов захватываются после замедления азотом воздуха с образованием  $C^{14}$



Время полураспада  $C^{14}$  составляет 5570 лет.  $C^{14}$  даже в биохимических процессах химически очень близок к стабильному углероду. За время жизни  $C^{14}$  устанавливается постоянная концентрация его в стабильном углероде так называемого обменяемого резервуара, т.е. в атмосфере в виде  $CO_2$ , в воде рек и океанов в виде растворимых соединений и, наконец, в живых организмах. Эта концентрация для  $C^{14}$  естественного происхождения определена экспериментально. В 1 г природного углерода обменяемого резервуара происходит 0,25 расп/сек-г, что соответствует  $6 \cdot 10^{10}$  атомов  $C^{14}$  на  $5 \cdot 10^{22}$  атомов  $C^{12}$ . Поверхность Земли равна  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>2</sup>. Находим вероятность распада для одного образовавшегося в атмосфере ядра  $C^{14}$ , отнесенную к 1 г углерода обменяемого резервуара

$$0,25 / (2,6 \cdot 10^{18}) = 2 \cdot 10^{-20} \text{ 1/г.}$$

Принимаем, что геохимические условия Земли не претерпят в ближайшие тысячелетия существенных изменений. Тогда найденная для  $C^{14}$  естественного происхождения вероятность распада на 1 г углерода относится также и к ядрам углерода, возникающим в настоящую эпоху при ядерных взрывах.

Можно выразить ту же мысль на языке теории линейных уравнений. Всякое решение системы линейных уравнений (с незави-

симыми переменными  $x, t$ ) с правой частью  $q(t)$  в правой точке  $x = 0$  можно выразить в виде суперпозиции сингулярных решений: Сингулярное решение

$$\begin{aligned} &\text{источник } \delta(x) \delta(t-t_0); \\ &\text{решение } n(x, \tau), \tau=t-t_0 \end{aligned}$$

( $n$  - гриновская функция).

Суперпозиция

$$\begin{aligned} &\text{источник } \delta(x) q(t); \\ &\text{решение } N(x, t) = \\ &\int_0^t q(t-\tau) n(x, \tau) d\tau \end{aligned}$$

В частном случае стационарного источника  $q_0$  в точке  $x = 0$  имеем для точки  $x = x_0$

$$\begin{aligned} N_0(x_0) &= q_0 \int_0^t n(x, \tau) d\tau, \text{ т.е.} \\ &\int n d\tau = \frac{N}{q_0}. \end{aligned}$$

В нашем случае  $x$  означает координаты разных точек обмениваемого резервуара:  $x = 0$  - верхний слой атмосферы;  $q_0 = 2,6$  нейтр/см<sup>2</sup>сек-4 $\pi R^2$ ;  $N_0 = 0,25$  расп/сек-г;  $R = 6,3 \cdot 10^8$  - радиус Земли;  $n(x_0, t-t_0)$  - число распадов в 1 г природного углерода в точке  $x_0$  в 1 сек. в момент  $t$ , приходящееся на образование одного ядра  $C^{14}$  в атмосфере в момент  $t_0$ .

Находим

$$\int n dt = 2 \cdot 10^{-20} \text{ 1/г.}$$

Для взрыва мощностью в 1 Мт получаем  $2,25 \cdot 10^{26} \cdot 2 \cdot 10^{-20} = 4,5 \cdot 10^6$  расп/Мт-г.

Дозу облучения выражаем в рентгенах, приближенно отождествляя рентген с радом, для которого принимается выделение 100 эрг энергии ионизации в 1 г ткани.

Максимальная энергия  $\beta$ -распада  $C^{14}$  составляет 0,154 Мэв, около 2/3 полной энергии в среднем уносится нейтрино. Таким образом, в тканях выделяется 0,05 Мэв, т.е.  $8 \cdot 10^{-8}$  эрг/расп.

Приняв далее, что углерод составляет 18% от веса тканей, находим полное выделение на 1 г ткани, от одной мегатонной бомбы

$$\begin{aligned} 0,18 \cdot 4,5 \cdot 10^6 \cdot 8 \cdot 10^{-8} &= 7,0 \cdot 10^{-2} \text{ эрг/г=} \\ &= 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ р.} \end{aligned}$$

Менее определены данные о распределении распада по времени, т.е. о виде функции  $n(x_0, t)$ . Исходя из оценки Андерсо-

на<sup>2</sup> массы в обмениваемом резервуаре 8,5 г/см<sup>2</sup>, можно предполагать, что в пределах этого резервуара выравнивание происходит за время, малое по сравнению со временем жизни  $C^{14}$ , а отвод  $C^{14}$  за пределы резервуара малосущественен. В этих предположениях распределение распада по времени будет описываться естественной экспоненциальной кривой вида  $\exp(-t / 8 \text{ тыс.лет})$ .

#### 4. Непороговые биологические эффекты радиации

Термоядерная война содержит в себе потенциальную опасность получения летальной дозы радиации (около 600 р) всем человечеством. Эта опасность, по-видимому, отсутствует при испытаниях ядерного оружия, поскольку при нынешнем темпе испытаний дозы облучения для отдельного человека никогда не превысят 1 р. Однако этой радиации в дополнение к естественной радиации и другим вредностям подвергаются миллиарды людей, причем (в случае  $C^{14}$ ) на протяжении сотен поколений. Количество жертв пропорционально суммарной дозе для человечества (р-чел.) безотносительно к дисперсии облучения по группам людей и по времени.

Простейшим непороговым эффектом радиации является воздействие на наследственность<sup>4-6</sup>. Материальным носителем наследственности является ген - специальная структура в хромосомах клеточных ядер. Для необратимого изменения гена (так называемой генной мутации) достаточно одного акта ионизации, поэтому генетические изменения могут возникать при самых малых дозах облучения с вероятностью, точно пропорциональной дозе.

Каждый ген является своего рода буквой биохимической программы эмбрионального развития потомства данного индивидуума. Поэтому изменение одного гена в отдельных случаях (доминантные мутации, накопление мутаций) приводит к весьма существенным изменениям наследственности.

В современном человеческом потомстве обнаруживается около 2% рождений с наследственными болезнями (шизофрения, гемофилия, диабет и многие другие), которые имеют свое причиной появившиеся мутации. Число мутаций меньше этой цифры, так как некоторые лица, страдающие наследственными болезнями, имеют потомство и одна мутация проявляется на протяжении нескольких поколений. Но это обстоятельство не нарушает пропорциональности числа мутаций числу наследственных болезней. Согласно распространенному мнению, осно-

ванному на опытах Меллера на мышах, 5% мутаций, а значит и наследственных болезней, определяется естественной радиацией (10 р за жизнь человека в 60 лет). Собирая цифры, находим коэффициент увеличения наследственных болезней от радиации:

$$(0,02-0,05)/10=10^{-4} \text{ 1/р}^1$$

Средняя численность человечества за время распада  $C^{14}$ , вероятно, составит около 30 млрд.чел. (в 10-12 раз больше, чем сейчас). Такая численность не противоречит продовольственным возможностям земного шара с учетом прогресса науки.

Приняв эту цифру, находим (только за счет радиоуглерода)

$$3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-4} \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} = 2200 \text{ жертв/Мт}$$

наследственных болезней от мегатонной бомбы, или 110 000 жертв всех уже проведенных испытаний. Мы предполагаем при этом, что суммарная мощность уже проведенных испытаний равна 50 Мт.

В мире животных и растений мутации иногда способствуют возникновению биологически более совершенного вида. Возможно мнение, что и у человека мутации (и наследственные болезни) следует приветствовать как необходимую жертву биологическому прогрессу человеческого рода. В действительности сейчас природа человека меняется в основном социальными факторами. Неконтролируемые мутации мы склонны рассматривать только как зло, как дополнительную к другим причинам гибель десятков и сотен тысяч людей в результате экспериментов с ядерным оружием.

Дальнейшим примером непорогового (в известном смысле) биологического эффекта радиации является возможное увеличение частоты раковых заболеваний<sup>7</sup> и лейкемией.

Экспериментально известно, что канцерогенные эффекты разных канцерогенных веществ нерациональной природы суммируются. Нет оснований считать, что активные радикалы, возникающие от ионизации среды, будут вести себя в этом отношении качественно иначе. Поэтому увеличение числа раковых заболеваний или, что то же, уменьшение возраста наступления рака будет линейной функцией дозы, полученной человечеством. Суммарный коэффициент для всех видов рака и лейкемией принимается того же порядка, что и для генетических последствий, т.е.  $1-2 \cdot 10^{-4}$  жертв/р. Частичным подтверждением принятого коэффициента являются данные о частоте лейкемии, этой профессиональной болезни радиологов, в известном смысле родственной ра-

ку. Влияние радиации на эту болезнь легко поддается изучению, так как ее природная частота мала. Доза в 1 р создает за один год добавочную смертность от лейкемии  $2 \cdot 10^{-6}$ , а за среднее время дожития в 30 лет -  $6 \cdot 10^{-5}$ . Коэффициент того же порядка предполагаем для остальных форм рака.

Следующим возможным (но не доказанным экспериментально) непороговым эффектом радиации является снижение иммунологических реакций организма. Непороговым эффектом является, по всей вероятности, также преждевременное старение и смерть. Средняя продолжительность жизни врачей-рентгенологов и радиологов (получивших в среднем, по всей вероятности, дозу не более 1000 р) уменьшена, по данным статистики, на 5 лет. Это дает коэффициент повышения смертности порядка  $10^{-4}$  1/р.

Далее, возможно, следует учесть, что если для человеческого рода мутации не нужны, то для вирусов и бактерий они могут явиться важным шагом в их борьбе за жизнь. Пример - мутационное возникновение дифтерита в середине XIX в., а также периодически возникающие пандемии гриппа, затрагивающие большую часть населения земного шара. Оценка этого эффекта затруднительна, однако правдоподобно, что его вред для здоровья населения того же порядка, как от генетического поражения человека.

В целом, по нашей ориентировочной и, вероятно, заниженной оценке, потери человечества от всей совокупности непороговых биологических эффектов следует по меньшей мере утроить по сравнению с цифрой только для генетических потерь, т.е. принять потери равными  $3 \cdot 10^{-4}$  1/р. Формальное суммирование всех упомянутых выше эффектов (без скидки на "неясность") привело бы к цифре  $6 \cdot 10^{-4}$  1/р.

Общие потери от радиоуглерода имевших место испытаний составят около 330 тыс.человек.

Как известно, важным фактором является выпадение в виде радиоактивных осадков радиостронция и радиоцезия. Используя данные О.И.Лейпуновского [1], можно оценить эффект поражения костей стронцием и внешнего облучения цезием как 0,5 от эффекта  $C^{14}$ . Кратко изложим для полноты соответствующие оценки. При продолжении испытаний на современном уровне (10 - 15 Мт/год) содержание радиостронция в костях составит около 65 стронциевых единиц (мкмккюри на 1 г кальция), т.е. доза облучения составит  $160 \cdot 10^{-3}$  р/год или  $1-1,5 \cdot 10^{-2}$  р/Мт. Эта доза вызывает жертвы в количестве примерно вдвое меньше, чем найденная выше доза  $7,5 \cdot 10^{-4}$  р/Мт для радиоуглерода, так как относится к контингенту около

2,5 млрд. человек (множитель 1/12) и только к скелету, что следует учесть множителем 1/3. Эффект внешнего облучения гамма-лучами радиоцезия порядка  $10^{-3}$  р/Мт, т.е. с учетом меньшего контингента составляет по числу жертв около 100% от  $C^{14}$ . Таким образом, общие потери от взрыва мощностью 1 Мт составят 10 тыс. человек, а общие потери от всех имевших место ядерных взрывов - 500 тыс. человек. Это - нижняя оценка, так как учет других радиоизотопов, других путей заражения и более полный учет всех непороговых и пороговых биологических эффектов приведет к ее увеличению. Нельзя исключить того, что полное число жертв уже сейчас приближается к 1 млн. человек и каждый год продолжения испытаний увеличивает это число на 200-300 тыс. человек.

Какие моральные и политические выводы следует сделать из приведенных цифр?

Один из аргументов сторонников теории "безобидности" испытаний заключается в том, что космические лучи приводят к большим дозам облучения, чем дозы от испытаний. Но этот аргумент не отменяет того факта, что к уже имеющимся в мире страданиям и гибели людей дополнительно добавляются страдания и гибель сотен тысяч жертв, в том числе в нейтральных странах, а также в будущих поколениях. Две мировые войны тоже добавили менее 10% к смертности в XX в., но это не делает войны нормальным явлением.

Другой распространенный в литературе ряд аргумент сводится к тому, что прогресс цивилизации и развитие новой техники и во многих других случаях приводит к человеческим жертвам. Часто приводят пример с жертвами автомобилизма. Но аналогия здесь не точна и не правомерна. Автотранспорт улучшает условия жизни людей, несущих за это головную ответст-

венность. Несчастья же, вызываемые испытаниями, есть неизбежное следствие каждого взрыва. По мнению автора, единственная специфика в моральном аспекте данной проблемы - это полная безнаказанность преступления, поскольку в каждом конкретном случае гибели человека нельзя доказать, что причина лежит в радиации, а также в силу полной беззащитности потомков по отношению к нашим действиям.

Прекращение испытаний непосредственно сохранит жизнь сотням тысяч людей и будет иметь еще большее косвенное значение, способствуя ослаблению международной напряженности, способствуя уменьшению опасности ядерной войны - основной опасности нашей эпохи.

Автор пользуется случаем выразить свою благодарность О.И.Лейпунскому за ценное обсуждение.

*Поступила в редакцию 8 VII 1958 г.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О.И.Лейпунский. Атомная энергия III, 12, 530 (1957).
2. E.C.Anderson. Annual Rev.Nucl.Sci.2, 63 (1953).
3. W.F.Libby. Radiocarbon Dating, University of Chicago Press, 1955.
4. H.J.Muller. Acta radiol. 41, 5 (1954).
5. Н.П.Дубинин. Радиация и наследственность человека (рукопись).
6. С.Н.Ардашников, Н.Шапиро. О возможности влияния на наследственность человека повышения уровня радиации, вызванного испытаниями атомного оружия (рукопись).
7. Biological Hazards of Atomic Energy (ed. Glucksmann), Clarendon Press, Oxford, 1953.

Приложение

#### ПЕРЕСМОТР ДОПУЩЕНИЙ САХАРОВА

*Фрэнк фон Хиттель*

Оценка Сахарова - это произведение двух множителей:

- коллективной дозы для населения, т.е. суммы всех подсчитанных индивидуальных доз, полученных от радиоактивного излучения ядерного взрыва за все время, пока радиоактивность еще не затухла;

- суммы набора коэффициентов риска, связывающих каждую индивидуальную дозу с вероятностью причинить ущерб здоровью.

Ниже я дам обзор того, что мы знаем о каждом из этих вопросов.

#### КОЛЛЕКТИВНЫЕ ДОЗЫ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ

В докладе ООН 1982 года "Источники и воздействие ионизирующего излучения" (стр.243) содержится оценка дозы, полученной населением Земли от проведенных ранее атмосферных испытаний, - это 0.26 рад от углерода-14 и 0.12 рад от осколков деления (1 рад примерно равен  $10^{-2}$  зиверта). Дозы подсчитаны точно таким же образом, как это делал Сахаров. В этом случае накопленные дозы определяются путем интегрирования

по времени средней мощности индивидуальных доз:

$$\text{накопленная доза} = \int_0^t d(t) dt$$

Практически вся доза от углерода-14 с периодом полураспада 5600 лет, который очень медленно (в течение тысяч лет) диффундирует из системы атмосфера-водная поверхность-биосфера в глубины океана, проявится еще в далеком будущем. Большая часть дозы от короткоживущих осколков деления уже накоплена.

В соответствии с тем же докладом ООН (стр.227), подсчитанная суммарная мощность атмосферных испытаний составила 545 Мт. Поэтому приведенная выше оценка приводит к расчетной индивидуальной дозе от углерода-14  $0,26/545 = 5 \cdot 10^{-4}$  рад на Мт. Оценка Сахарова почти в полтора раза выше.

Коллективная доза для населения получается путем перемножения индивидуальной дозы и численности населения Земли, соответствующей тому периоду, в течение которого население подвергается излучению. Эта численность, на которую надо умножить дозу от осколков деления, составляет около 4 миллиардов человек. (Население Земли в 1960 г. составило около 3 миллиардов человек, а сейчас оно превышает 5 миллиардов). Однако для доминирующего изотопа углерода-14 90% дозы будет накоплено после 2050 года. Соответствующая численность земного населения для столь отдаленного будущего неизвестна.

Сахаров сделал предположение, что равновесная численность населения Земли составит 30 миллиардов человек - в 6 раз больше, чем в прошедших 80-х годах. Сегодня это число представляется неправдоподобно большим. Прогноз ООН на 2050 год составляет около 10 миллиардов. Если принять эту величину, то коллективная доза от углерода-14 в пересчете на ядерный взрыв в 1 Мт составит  $5 \cdot 10^{-4} \times 10^{10} = 5 \cdot 10^6$  чело-

веко-рад - около четверти сахаровской оценки. Дозы облучения от других изотопов, образованных при ядерном взрыве, увеличат эту величину всего где-то на 20 %, так как в то время, когда эти дозы накапливались, население Земли было меньше.

### КОЭФФИЦИЕНТЫ РИСКА

В соответствии с докладом Национальной академии наук США "Влияние на здоровье низких уровней ионизирующего излучения", 1990, (табл. 4-2), принятая в США оценка риска умереть от рака в результате облучения всего тела гамма- и бета-лучами дает сейчас величину около  $0,9 \cdot 10^{-3}$  на рад с неопределенностью порядка 30%. Эту оценку следовало бы приблизительно удвоить до величины  $1,8 \cdot 10^{-3}$ , если включить несмертельные случаи заболевания раком. В докладе НАН США (табл. 2-1) дается оценка риска в  $0,06 \cdot 10^{-3}$  случаев серьезных генетических нарушений в последующих поколениях на рад, но с очень большой неопределенностью.

В итоге эти коэффициенты приводят примерно к  $2 \cdot 10^{-3}$  случаям заболевания раком и приобретения генетических последствий на рад. С другой стороны, Сахаров использовал величину  $3 \cdot 10^{-4}$  с учетом таких эффектов (угроза иммунной системе организма, а также мутации бактерий гриппа и ряда других бактерий), для которых я не смог найти последних официальных оценок. Даже в таком случае сахаровский коэффициент риска составляет всего одну шестую от официальной современной оценки только раковых и генетических последствий.

В итоге сейчас представляется, что проведенные Сахаровым подсчеты коллективной дозы для населения преувеличены в четыре раза, а сумма коэффициентов риска преуменьшена в шесть раз, но произведение этих множителей существенно не изменилось (с учетом все еще очень большой неопределенности каждого из них).