

## ОПАСНОСТЬ РАССЕИВАНИЯ ПЛУТОНИЯ ПРИ АВАРИЯХ С ЯДЕРНЫМИ БОЕГОЛОВКАМИ

*Стив Феттер и Фрэнк фон Хиппель*

Ядерное оружие проектируется особенно тщательно, чтобы обеспечить исключительно малую вероятность случайного взрыва с заметным ядерным выходом, даже если это оружие попало в крушение, было обстреляно или оказалось в огне.<sup>1</sup> Если в подобные катастрофы вовлечено ядерное оружие, то основную опасность представляет возможное рассеивание плутония в окружающую среду. В частности, в результате взрыва значительная часть находившегося в боеголовке плутония может быть разбросана в виде мелких частиц, которые способны попасть в органы дыхания.<sup>2</sup>

Нам известны два случая, когда взорвалось химическое взрывчатое вещество (ВВ) в американских ядерных боеголовках, что привело к заражению окружающей площади плутошем:<sup>3</sup>

- В январе 1966 года произошло столкновение в воздухе между бомбардировщиком Б-52 и самолетом заправщиком над испанским городком Паломарес. Тормозные парашюты двух бомб полностью отказали и бомбы ударились об землю с большой скоростью. Произошел взрыв ВВ, сопровождавшийся значительным рассеиванием плутония. Затраты на очистку и возмещение причиненного ущерба составили 100 миллионов долларов.

- В январе 1968 года вблизи Туле (Гренландия) вспыхнул пожар на бомбардировщике Б-52. Экипаж покинул самолет, который ударился об лед с большой скоростью и сгорел. Произошел взрыв ВВ в четырех бомбах, находившихся на борту, в результате чего плутоний рассеялся на значительной ледяной поверхности.<sup>4</sup>

Практически немедленно после катастрофы в Туле ВВС США прекратили дежурные полеты бомбардировщиков с ядерным оружием на борту. Кроме того, в значительной части американских ядерных боеголовок, спроектированных за последнее десятилетие, использовалось "нечувствительное взрывчатое вещество", которое не должно было бы детонировать даже при высокоскоростном соударении.

Однако в ядерном арсенале США есть еще много более старых боеголовок, да и некоторые из новейших (особо выделим боеголовку W88 для ракет Трайдент II) по разным причинам все еще содержат обычные ВВ. Недавно американским военным лабораториям пришлось вынести вопросы безопасности этих боеголовок на широкое обсуждение.<sup>5</sup> Цель данной статьи состоит в том, чтобы предложить для рассмотрения некоторые новые стороны этой озабоченности.

Стив Феттер работает в школе обществоведения, Мерилендский университет, Колледж Парк, Мериленд, 20742, США, а Фрэнк фон Хиппель работает в Центре по изучению энергетики и окружающей среды, Принстонский университет, Принстон, Нью-Джерси, 08544, США.

Рассмотрим наихудший вариант гипотетической аварии, когда произошел подрыв ВВ в нескольких ядерных боеголовках. Проведенные на основе экспериментов и расчетов оценки показали, что от 10% до 100% содержащегося в боеголовках плутония (наилучшая оценка дает величину 20%) превратится в результате такого взрыва в оксид  $PuO_2$  в виде удобного для вдыхания аэрозоля (со средним аэродинамическим диаметром порядка 5 мкм или меньше).<sup>6</sup> Если предположить, что в аварию попали все боеголовки ракеты (а их может быть десять) и что каждая боеголовка содержит приблизительно 3 кг плутония, то в образовавшем-

ся аэрозоле будет по порядку величины 10 кг  $PuO_2$ .<sup>7</sup>

### РИСК ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ОТ ПЛУТОНИЕВОГО АЭРОЗОЛЯ

Основной риск от облучения плутониевым аэрозолем связан с его вдыханием: большая часть испускаемого плутошем излучения - это альфа-частицы с таким коротким пробегом (около 50 мкм в ткани), что они не могут пройти через кожу. Поэтому можно пренебречь внешним облучением от проходящего облака и от попавшего на почву плутония.<sup>8</sup> Если вдыхать аэрозоль со

средним аэродинамическим диаметром в один мкм, то около 15% вдыхаемого плутония задержится глубоко в легких со средним временем выхода оттуда порядка 1,4 лет.<sup>9</sup>

Воздействие на здоровье от радиационного облучения можно разделить на две категории: болезни и смерти от больших доз, происходящие в течение приблизительно года после облучения, и раковые заболевания от малых доз, которые возникают в течение всей оставшейся жизни облученной популяции, начиная через год-два после облучения. Как показано в Приложении, связанные с большими дозами эффекты маловероятны даже в наихудшем варианте аварии с распылением плутония - особенно за пределами военной базы. Поэтому мы сфокусируем наше рассмотрение на риске возникновения рака.

Основная опасность от облучения аэрозолями с меньшими концентрациями  $\text{PuO}_2$  заключается в возрастающей вероятности появления рака легких и других органов, куда переносится плутоний, в частности, костей. В последнем обзоре, посвященном риску от низких доз облучения при вдыхании альфа-излучателей, получена достаточно грубая оценка в одну смерть от рака на 1400 рад, выделенных в легочных тканях, или на 900 - 12000 рад в костных тканях при вдыхании  $\text{PuO}_2$ .<sup>10</sup>

Факторы преобразования дозы за 30 лет для тканевых (легочных) доз и костных (поверхностных) доз, появившиеся в литературе, лежат в диапазоне 1600 - 3700 и 3200 - 11000 рад на вдыхаемый мг аэрозоля из  $^{239}\text{PuO}_2$  со средним аэродинамическим диаметром 1 мкм, соответственно.<sup>11</sup> Мы используем в этой работе значения 3200 и 6500 рад/мг.<sup>12</sup> После коррекции на шестипроцентное содержание Pu-240 в плутонии оружейного класса (WgPu)<sup>13</sup> факторы преобразования для легочной и костной доз составят, соответственно, 3800 и 7600 рад на один вдыхаемый миллиграмм. Полный (легочный и костный) раковый риск поэтому составляет от 3 до 11 смертей на один вдыхаемый миллиграмм аэрозоля из WgPu.

Сравним это с методом оценки ракового риска, поддерживаемым Международной комиссией по радиологической защите (ICRP), где используется "эффективный эквивалент дозы" (ЭЭД), равный взвешенному среднему доз для некоторых органов. Придаваемый каждому органу вес определяется относительной вероятностью развития фатального ракового заболевания в данном органе при однородном облучении всего тела. Величина ЭЭД для аэрозоля из  $^{239}\text{PuO}_2$  составляет 15000 рем на один вдыхаемый миллиграмм, или 18000 рем на мил-

лиграмм WgPu. Разделив эту величину на фактор риска ICRP, равный 2000 рем на смерть от рака,<sup>14</sup> получим 9 смертей от рака на миллиграмм вдыхаемого WgPu.

В Приложении, посвященном эффектам от больших доз, на основе экспериментов над гончими собаками дается почти стопроцентная вероятность смерти от пульмонарной неоплазии (рака) для взрослого человека, вдохнувшего более 0.08 мг WgPu, если он не умрет раньше по какой-то другой причине. Если экстраполировать этот риск линейно в сторону меньших доз, он будет соответствовать 12 смертям от рака на вдыхаемый миллиграмм WgPu.

Итак, три приведенных различных подхода к проблеме оценки ракового риска от вдыхания  $\text{PuO}_2$  дают значения фактора риска в интервале от 3 до 12 смертей от рака на каждый вдыхаемый миллиграмм WgPu.

Мы используем обычное приближение линейной зависимости риска от дозы.<sup>15</sup> В результате будет ожидаться 3 - 12 смертей от рака независимо от того, вдохнуло ли целый миллиграмм  $\text{PuO}_2$  100 человек (в среднем по 0,01 мг на человека) или же 1000 человек (по 0,001 мг на каждого).

Рассеяние аэрозоля. Для оценки того, сколько плутониевого аэрозоля вдохнуло население с подветренной стороны от места его утечки, можно использовать распределение Гаусса (см. Приложение) и изучать, как предсказания этой модели будут зависеть от различных заданных метеоусловий и распределения населения. Однако в ситуациях, аналогичных рассматриваемой, когда риск заболевания раком линейно пропорционален дозе облучения без какого-то порога, гораздо большего доверия к оценкам можно добиться на основе исключительно простой модели атмосферного рассеивания - "модели клина"<sup>16</sup>. Простота результатов, получаемых с этой моделью, основана на том факте, что при линейно пропорциональном дозе раковом риске полное число заболеваний раком среди населения с подветренной стороны будет зависеть только от полного количества канцерогена, попавшего в легкие населения, а не от распределения доз среди населения. Точность предсказаний клиновой модели в подобных приложениях обычно сравнима с предсказаниями гауссовской модели, поскольку большая часть заболеваний раком обычно будет обусловлена очень малыми дозами на больших расстояниях от места утечки, где гауссовская кривая имеет тот же вид, что и аппроксимация модели клина.

В модели клина предполагается, что концентрация примесей постоянна в направлении, поперечном скорости ветра, в преде-

лах клина с углом раствора  $\theta$  (его значение лежит обычно в пределах 0,05 - 0,3 радиана) с подветренной стороны<sup>17</sup>) и в вертикальном направлении в пределах высоты  $H$  слоя перемешивания (обычно это 300 - 2500 м<sup>18</sup>). При этих условиях количество вдыхаемого плутония  $I$  (в миллиграммах) на каждого человека на расстоянии  $r$  (м) с подветренной стороны равно:

$$I(r) = \frac{Q(r)b}{\theta r H u} \quad (1)$$

где  $Q(r)$  - полное количество плутония (в миллиграммах), оставшееся в воздухе на расстоянии  $r$  с подветренной стороны;  $b$  - частота дыхания (она предполагается равной 3,3·10 м<sup>3</sup>/с для взрослого человека, выполняющего легкую работу),<sup>19</sup> а  $u$  - скорость ветра (обычно ее значение находится в пределах 0,25 - 7 м/с<sup>20,21</sup>).

В сухую погоду полное количество находящегося в воздухе вещества уменьшается с расстоянием  $r$  из-за выпадения по закону

$$Q(r) = Q_0 \exp\left(-\frac{r}{L}\right) \quad (2)$$

Среднее расстояние, которое проходит аэрозольная частица до выпадения, составляет

$$L = \frac{uH}{v} \quad (3)$$

где  $v$  - скорость выпадения. Для большинства аэрозолей наблюдаемые скорости выпадения

лежат в пределах 0,001 - 0,1 м/с.<sup>22</sup> Рекомендуемое значение для плутониевых аэрозолей, возникающих при неядерных взрывах ядерных боеголовок, равно 0,01 м/с.<sup>23</sup> Мы примем диапазон 0,003 - 0,03 м/с. Поэтому в сухую погоду величина  $L$  будет лежать в пределах от десятков до тысяч километров.

Когда идет дождь, появится второй экспоненциальный член, связанный с характерным временем вымывания  $\tau$ , значения которого лежат в пределах от 1000 с (неустойчивые атмосферные условия) до 10 000 с (устойчивые условия).<sup>24</sup> Соответствующая скорость вымывания

$$v_w = \frac{H}{\tau} \quad (4)$$

обычно много больше  $v$  и лежит в диапазоне 0,05 - 1 м/с. При дождливой погоде скорости выпадения и вымывания надо складывать:  $v = v_d + v_w$ .

В соответствии с моделью клина полное количество  $PuO_2$ , попавшего в органы дыхания всего населения с подветренной стороны, выражается в следующем виде:

$$I_p = \int_0^{\infty} I(r)\theta(r)\rho(r)dr \quad (5)$$

где  $\rho(r)$  - плотность населения на расстоянии  $r$  с подветренной стороны, усредненная по ширине клина.

Если плотность населения считать постоянной и равной  $\rho_0$ , то находится полное количество плутония, попавшего в органы дыхания,

Таблица 1

Число смертельных случаев от рака, вызванных попаданием в органы дыхания окисла плутония при прохождении облака, которое сначала содержало 10 кг аэрозоля  $PuO_2$ , в зависимости от скорости выпадения и средней плотности населения (фактор риска принимается равным 3-12 смертей от рака на каждый вдыхаемый мг  $WgPu$ )

Скорость выпадения (м/с)	Плотность населения (человек/км <sup>2</sup> )		
	30	300	3000
0,003	100 - 400	1000 - 4000	-
0,01	30 - 120	300 - 1200	-
0,03	10 - 40	100 - 400	1000 - 4000
0,1 (дождь)	3 - 12	30 - 120	300 - 1200
1,0 (дождь)	0 - 1	3 - 12	30 - 120

$$I_p = \frac{Q_0 b \rho_0}{v} \quad (6)$$

Средняя плотность населения сорока восьми материковых американских штатов составляет приблизительно 30 человек на квадратный километр; в наиболее плотно населенных северо-восточных штатах она приближается к 300 человек/км<sup>3</sup>, а величина 3000 человек/км<sup>3</sup> соответствует средней плотности в городских районах. В табл. 1 приведены наши оценки числа смертельных исходов при разных значениях плотности населения и скорости выпадения (при факторе риска 3 - 12 смертей от рака на каждый вдыхаемый миллиграмм WgPu).

Обращает на себя внимание то, что в табл. 1 в строчке, соответствующей очень малым скоростям выпадения, нет данных для наибольшей плотности населения. Причины в том, что для значений  $v = 0,003 - 0,01$  м/с величина  $L$  скорее всего примет значение в сотни км, что гораздо больше любого городского района.

Мы сопоставили предсказания модели клина соответствующим предсказаниям гауссовской модели и получили достаточно близкое согласие независимо от погодных условий.

Хотя максимальное значение в таблице (четыре тысячи смертей от рака) велико само по себе, возрастание ракового риска для отдельного представителя облученной части населения окажется незначительным и обычно по порядку величины составит около 0,1%. Например, при усредненных условиях ( $H = 1000$  м,  $\theta = 0,2$  радиана,  $u = 2$  м/с и  $v = 0,01$  м/с) дополнительный индивидуальный риск смерти от рака составит 0,2 -

0,9% на расстоянии 10 км и 0,02 - 0,09% на расстоянии 100 км от места выброса. Небольшой индивидуальный риск отражает тот факт, что обычно полный риск распределяется на очень большую численность населения. Для сравнения укажем, что в настоящее время индивидуальный риск смерти от рака составляет для США около 20%. В США уже могло произойти много подобных крупномасштабных раковых "событий", связанных с широкомасштабными выбросами в окружающую среду канцерогенных химических веществ и оставшихся незамеченными на таком значительном фоне.<sup>25,26</sup>

Для наглядного примера мы оценили последствия гипотетического выброса десяти килограммов оружейного плутония в виде аэрозоля, который мог бы произойти на военно-морской базе Бангор (штат Вашингтон) - одной из двух баз для подлодок Трайдент, при ветре, дующем в сторону Сиэттла. Поскольку база расположена в 30 км от центра Сиэттла, это может оказаться почти наилучшим случаем для подобной аварии. В табл. 2 представлены данные о плотности населения в направлении на Сиэттл и далее за ним в зависимости от расстояния, а в табл. 3 приведены оценки (по клиновой модели) количества смертельных случаев от рака, вызванного таким выбросом, при ветре, дующем в направлении на город, для разных комбинаций скорости осаднения, скорости ветра и высоты слоя перемешивания. Средняя скорость ветра в Сиэттле составляет 4 м/с, так что среднее значение  $Nu$  будет порядка 4000 м<sup>2</sup>/с с разбросом в интервале примерно от 1000 до 10 000 м<sup>2</sup>/с. Подсчитанное число смертельных случаев от рака в сухую погоду колеблется от 20 до 2000.<sup>27</sup> Эти оценки хорошо согласуются с предсказаниями, полученными по формуле, которая рекомендована Агентством по защите от ядерной энергии.<sup>28</sup>

Таблица 2  
Плотность населения в направлении на Сиэттл в зависимости от расстояния до военно-морской базы Бангор

Район	Расстояние (км)	Плотность населения (человек/км <sup>2</sup> )
Графство Китсап	0 - 18	130
Пьюджет-Саунд	18 - 28	0
Сиэттл	28 - 38	2 300
Озеро Вашингтон	38 - 41	0
Бельвю	41 - 50	1200
Восточные пригороды	50 - 70	1200 exp (-0,24(r-50))
Горные районы	более 70	10

Таблица 3

Число смертей от рака, предсказываемое клиновой моделью, при выбросе десяти килограммов оружейного плутония в военно-морской базе Бангор, когда ветер дует в сторону Сиэттла

Скорость выпадения (м/с)	Высота перемешивания * скорость ветра $u$ ( $m^2/c$ )		
	1000	3000	10000
0,003	400 - 1700	180 - 700	80 - 300
0,01	300 - 1200	150 - 600	50 - 200
0,03	150 - 600	100 - 400	40 - 170
0,1 (дождь)	20 - 90	45 - 180	30 - 120
1,0 (дождь)	1 - 5	1 - 5	2 - 9

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВЫ

После прохождения облака за ним остается полоса, загрязненная оксидом плутония  $PuO_2$ . Главная опасность, связанная с этим загрязнением, заключается в том, что плутониевая пыль может снова подняться в воздух и попасть в органы дыхания. Концентрация плутониевого загрязнения  $\sigma$  ( $mg/m^2$ ) в данной точке просто связана с количеством  $I$  плутония, которое находящийся в этой точке человек вдохнет за время прохождения облака

$$\sigma = \frac{vI}{b} \quad (7)$$

где снова  $v$  - скорость осаждения (м/с), а  $b$  - частота дыхания ( $m^3/c$ ).

Отношение концентрации повторно поднятого в воздух аэрозоля к величине  $\sigma$  можно характеризовать "коэффициентом повторной возгонки"  $K$ . Поэтому достаточно

легко сравнить вдыхаемое количество повторно возогнанного плутония  $I_r$  с величиной  $I$ , если известен коэффициент  $K$  (1/м) как функция времени

$$\frac{I_r(t)}{I} = v \int_0^t K(x) dx \quad (8)$$

Как следовало бы ожидать, коэффициент  $K$  будет уменьшаться со временем, поскольку плутониевый аэрозоль впитывается в почву и соединяется с частицами больших размеров. Основываясь на рассмотрении небольшого объема доступной информации, Комиссия по атомной энергии в своем исследовании 1974 года предложила в качестве начального значения коэффициента  $K$  в населенных районах величину  $K_0 = 10^{-5} m^{-1}$ , которая со временем стремится к пределу  $K_1 = 10^{-9}$  согласно следующей интерполяционной формуле

$$K(t) = K_0 \exp(-5t) + K_1 \quad (9)$$

Таблица 4

Отношение накопленной дозы от вдыхания повторно поднятого в воздух плутония к дозе, полученной при прохождении облака, для некоторых значений скорости осаждения и времени экспозиции один месяц и один год

Скорость выпадения (м/с)	Длительность экспозиции	
	1 месяц	1 год
0,003	0,064	0,19
0,01	0,21	0,63
0,03	0,64	1,9
0,1 (дождь)	2,1	6,3
1,0 (дождь)	21	63

Таблица 5

Число смертельных случаев от рака, связанных с вдыханием плутониевого аэрозоля в момент прохождения облака и после его прохождения в предположении, что городские районы ( $r = 3000$  км) и небольшие сильно зараженные зоны ( $v$  не менее  $0,1$  м/с) в течение месяца достаточно хорошо очищаются

Скорость выпадения (м/с)	Плотность населения (человек/км <sup>2</sup> )		
	30	300	3000
0,003	120 - 500	1200 - 5000	-
0,01	50 - 200	500 - 2000	-
0,03	30 - 120	300 - 1200	1600 - 7000
0,1 (дождь)	10 - 40	100 - 400	1000 - 4000
1,0 (дождь)	7 - 30	70 - 300	700 - 3000

где время измеряется в годах.<sup>29</sup> Используя эту зависимость, найдем, что

$$\frac{I_r(t)}{I} = v (0,2K_0[1 - \exp(-5t)] + K_\infty t)$$

( 10 )

В табл. 4 приведены значения отношения  $I_r(t)/I$ , подсчитанные при разных скоростях осаднения, по истечению одного месяца и одного года (для времен более одного года доза от повторно поднятого в воздух плутония будет пренебрежимо мала). Отметим, что этим эффектом можно пренебрегать только при низких или умеренных скоростях осаднения (не более  $0,01$  м/с) и коротких временах экспозиции (менее месяца).

Эвакуация и/или обеззараживание, как было сделано в Паломаресе, могли бы уменьшить эту опасность для населения в наиболее загрязненных районах. Однако в большинстве случаев практически вся доза для населения наберется за счет очень больших площадей (порядка  $1000$  км<sup>2</sup> при  $v = 0,01$ ) мало зараженных районов, которые будет чересчур дорого обеззараживать или эвакуировать. Поэтому, пожалуй, следует использовать множитель  $[1 + I_r(\infty)/I]$  для умножения на количество смертных случаев от рака, приведенных в табл. 1, за исключением более высоких значений  $v$  (не менее  $0,1$  м/с) и городских районов, где зараженные зоны скорее всего будут очищены. В табл. 5 приведено число смертельных случаев от рака при вдыхании плутониевого аэрозоля за время прохождения облака и после него с учетом сделанных предположений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несчастный случай, связанный с рассеиванием килограммовых количеств плутония в виде аэрозоля, мог бы в наихудшем варианте (например, авария на военно-морской базе Бангор при слабом ветре, дующем в сторону Сиэттла, и малой скорости осаднения аэрозоля) вызвать несколько тысяч смертей от рака в течение последующих десятилетий при практически незамеченном увеличении общего числа смертельных случаев от рака в данном районе. Даже при наихудших предположениях не ожидаются быстрые смертельные исходы, вызываемые большими дозами, - при облучении за пределами базы такого определенно не будет.

Однако, как можно судить по полученному на Три-Майл-Айленд и в Паломаресе опыту, психологические травмы и стоимость возмещения убытков, а также очищения особо загрязненных мест могут оказаться огромными.

Чтобы представить себе дополнительные перспективы этого риска, предположим, что вероятность практического наихудшего сценария аварии составляет  $0,1\%$  в год.<sup>30</sup> Ожидаемое число смертельных случаев будет в этом случае порядка одного в год, поскольку при усредненных условиях авария с наихудшим исходом приведет к  $1000$  (по порядку величины) смертям от рака.

Этот риск можно уменьшить, но не исключить полностью, если перепроектировать и переделать боеголовки на использование нечувствительного ВВ - но за какую-то цену. Новая боеголовка стоит где-то около  $1$  млн. долларов и срок ее активного существования составляет  $20 - 30$  лет.

Если бы заменить старые боеголовки с чувствительным ВВ в среднем на 10 лет раньше окончания срока их годности на боеголовки с нечувствительным ВВ, то дополнительные расходы составят по крайней мере 300 тысяч долларов на боеголовку. Если бы это было сделано примерно для 3000 боеголовок, которые придется устанавливать на американские подлодки после ограничений, определяемых договором СНВ, то полная стоимость будет порядка одного миллиарда долларов, или 100 миллионов долларов на каждый год с уменьшенным риском. Принимая во внимание, что ожидаемое число жизней, спасенных в результате этих расходов, порядка одной в год или даже меньше, конечные затраты на спасение одной жизни будут в 250 - 3000 раз больше по сравнению с другими вкладами в проблему спасения жизней, которые в настоящее время предпринимают Соединенные Штаты.<sup>31</sup> Поэтому мы приходим к заключению, что к уменьшению опасности от рассеивания плутония путем перехода к боеголовкам с нечувствительным ВВ не следует относиться как к программе, требующей много шума. Однако, если правительство собирается заменять устаревшие боеголовки, было бы желательно иметь для замены конструкции с нечувствительным ВВ. Если таких конструкций пока еще нет, их разработке должен быть придан приоритет во всех дальнейших ядерных испытаниях, пока не будет достигнуто всеобщее запрещение таких испытаний.

Другая опасность, на которую намекают недавние газетные публикации о безопасности боеголовок, заключается в том, что в определенных условиях детонация химической взрывчатки в боеголовке может привести к ядерному взрыву с мощностью свыше 4 фунтов тротилового эквивалента. Конкретно существует очевидное опасение, что такое могло бы произойти при почти одновременных подрывах взрывчатки на боеголовках W88 ракеты Трайдент II, размещенных достаточно плотно вокруг ракетного двигателя третьей ступени.<sup>32</sup> Нам трудно развивать эти опасения без соответствующих оценок мощности ядерного взрыва, который мог бы иметь место при таком событии.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### РИСК ОТ БОЛЬШИХ ДОЗ

**Влияние больших доз на здоровье.** Значительная часть попавшего в органы дыхания оксида плутония  $PuO_2$  останется в легких на долгое время, так как это соединение малорастворимо. Поэтому с точки зрения повреждения легочной ткани доминиру-

ют краткосрочные эффекты.

Опыты с гончими собаками показали, что при вдыхании относительно большого количества аэрозоля повреждение легких из-за альфа-облучения приводит к смерти от острой дыхательной недостаточности в течение недели. Это произойдет при начальном отложении в альвеолах около 60 мкг  $^{239}PuO_2$  на каждый грамм обескровленной легочной ткани,<sup>33</sup> что соответствует полностью вдыханию около 100 мг оружейного плутония взрослым человеком.<sup>34</sup>

Те же самые опыты с собаками показывают, что при меньших дозах смерть наступает позднее из-за дыхательной недостаточности, вызванной обширным фиброзом. Отложение 2 мкг  $^{239}PuO_2$  на грамм обескровленной легочной ткани (это соответствует вдыханию около 3 мг оружейного плутония взрослым человеком) вызовет смерть в течение нескольких месяцев.<sup>35</sup> При еще меньших дозах фиброз развивается медленнее. Подгонка по методу наименьших квадратов соотношения между начальным отложением в альвеолах плутония-239 Y (в мкг на грамм легочной ткани) и средним сроком жизни собак t (дни), которым была дана эта доза, дает следующий результат:<sup>36</sup>

$$Y = 560t^{-1,028} \quad (11)$$

Для самого большого возраста собак (15 лет) это соотношение дает для отложения в альвеолах величину 0,09 мкг  $^{239}PuO_2$  на грамм обескровленной легочной ткани. Эта же величина совпадает с наименьшей дозой, при которой собаки умирали от фиброза в данных опытах.

Опухоли в легких (рак) начали проявляться у собак, проживших 3 - 5 лет после облучения, и они оказались основной причиной смерти облученных собак, которые прожили более 5 лет. Подгонка по методу наименьших квадратов зависимости между дозой и сроком жизни для собак, умерших от опухолей:<sup>37</sup>

$$Y = 11000t^{-1,416} \quad (12)$$

Эта кривая пересекает значение максимального срока жизни гончих при  $Y = 0,04$  мкг/г, что соответствует вдыханию около 0,08 мг оружейного плутония взрослым человеком.

**Рассеивание аэрозоля на малых расстояниях.** Вдыхание больших доз, что рассматривается в данном приложении, произойдет (если вообще это возможно) вблизи от места выброса, где приближения клиновой модели не будут выполняться. Для оценок влияния больших доз на здоровье при аварии мы ис-

пользовали модель облака с гауссовым распределением, чтобы рассчитать рассеяние плутония на малых расстояниях. В этой модели проинтегрированная по времени концентрация плутония на уровне почвы (мг·с/м<sup>3</sup>) с подветренной стороны от места выброса дается выражением

$$\chi(x,y) = \frac{Q(x)}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

( 13 )

где  $x$  - расстояние с подветренной стороны, а  $y$  - расстояние в направлении, перпендикулярном скорости ветра (в метрах),  $Q(x)$  - масса плутониевого аэрозоля (в мг), сохранившегося в облаке на расстоянии  $x$  от места аварии,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  - это стандартные горизонтальный и вертикальный разбросы концентрации аэрозоля в облаке в точке  $x$ ,  $u$  - средняя скорость ветра (в м/с) и  $h$  - высота облака над центральной линией клина. Формулы для величин  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  для точечного источника приведены в книге "Reactor Safety Study" при различных атмосферных условиях, колеблющихся от крайне неустойчивых (класс "А") до весьма устойчивых (класс "F").<sup>38</sup> Мы преобразовали эти формулы так, чтобы они давали начальные стандартные разбросы  $\sigma_y^0$  и  $\sigma_z^0$  в образовавшемся при взрыве облаке для  $x = 0$  и соответствовали мгновенному (а не непрерывному) выбросу. Поскольку слой перемешивания в атмосфере обычно имеет конечную высоту  $H$  (с типичными значениями от 300 до 2500 м), мы преобразовали также уравнение (13), чтобы запретить диффузию плутония выше слоя перемешивания и учесть отражения от верхней границы этого слоя и от грунта.

Количество плутония, оставшегося в облаке на расстоянии  $x$ , дается выражением (14), где  $Q$  - начальное количество плутония

в облаке (мг), а  $v$  - скорость осаждения аэрозоля (м/с).

$$Q(x) = Q_0 \exp\left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{v}{u} \int_0^x \frac{dr}{\sigma_z} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$$

( 14 )

Как упоминалось ранее, в наихудшем случае может произойти детонация ВВ в нескольких боеголовках баллистических ракет (возможно, и детонация ракетного топлива), что приведет к рассеянию почти 10 кг WgPu (10<sup>7</sup> мг) в виде частиц, которые можно вдыхать. Как указано выше, в зависимости от размера и состава аэрозоля величина  $v$  может принимать значения в интервале от 0,001 до 0,1 м/с - типичное значение для плутониевых аэрозолей составляет 0,01 м/с.

Начальная высота ( $h$ ) и размеры ( $\sigma_y^0$  и  $\sigma_z^0$ ) облака зависят от количества энергии, выделяемой при взрыве. Рассеяние заметных количеств PuO<sub>2</sub> в виде аэрозоля при спокойном сгорании кусков плутония на уровне грунта считается маловероятным.<sup>39</sup> Поскольку вес последней ступени ракеты обычно составляет 100 - 200 кг, в боеголовке, по-видимому, содержится 20 - 50 кг ВВ. Так как стандартные ВВ ядерных боеприпасов выделяют почти вдвое больше энергии по сравнению с тринитротолуолом (ТНТ), происшествие может вылиться во взрыв с тротиловым эквивалентом от 40 до более чем 400 кг ТНТ в зависимости от того, сколько боеголовок оказались вовлеченными в эту аварию. Детонация топлива в третьей ступени ракеты может быть эквивалентна дополнительным 4 - 8 тоннам ТНТ.<sup>40</sup> В табл. 6 приведены оценки начальных высоты и радиуса облака для малого, среднего и большого энерговыделения при взрыве.<sup>41</sup> При всех равных остальных параметрах более слабые взрывы гораздо опаснее, потому что несую-

Таблица 6

Высота и средний радиус облака для малого, среднего и большого энерговыделения при случайном взрыве, сопровождающемся детонацией ВВ в одной или нескольких ядерных боеголовках и, возможно, топлива в третьей ступени баллистической ракеты.

Энерговыделение	Эквивалентная мощность взрыва (кг ТНТ)	Высота облачного слоя (м)	Средний радиус (м)
Малое	40	230	19
Среднее	400	410	44
Большое	4000	740	110



Таблица 7

Количество плутония, вдыхаемое отдельным человеком (в миллиграммах) за время прохождения облака в некоторых подветренных точках на центральной линии облака для неустойчивых, нейтральных и устойчивых погодных условий и при наихудших предположениях о скорости ветра (1 м/с), высоте облака (энерговыведение с тротиловым эквивалентом 40 кг ТНТ) и толщине слоя перемешивания ( $H = 300$  м)

Расстояние по направлению ветра (км)	Доза (в миллиграммах)		
	Неустойчивые	Нейтральные	Устойчивые
0,1	0,08	0,07	0,08
0,2	0,1	0,06	0,06
0,5	0,07	0,04	0,05
1,0	0,03	0,03	0,03
2,0	0,02	0,02	0,02
5,0	0,003	0,014	0,011
10,0	0,002	0,011	0,006

щее плутоний облако остается ближе к поверхности.

Как показали эксперименты, приблизительно 5% всей радиоактивности облака в начальный момент обнаруживаются в слое между грунтом и  $T/4$ , где  $T$  - высота облака; 30% лежит в слое между  $T/4$  и  $T/2$ ; 40% - между  $T/2$  и  $3T/4$  и 25% - между  $3T/4$  и  $T$ . Мы промоделировали эту ситуацию, используя четыре источника облаков, содержащих упомянутые выше доли плутония и имеющих высоту центральной линии  $T/8$ ,  $3T/8$ ,  $5T/8$  и  $7T/8$ , значения  $\sigma_y^0$ , равные  $R/4$ ,  $R/3$ ,  $R/2$  и  $R/2$ , где  $R$  - начальный радиус облака, а также значение  $\sigma_z^0$ , равное  $T/8$ .<sup>42</sup>

Количество плутония (мг), которое вдохнет человек, стоящий на открытом грунте, дается выражением

$$I(x,y) = \chi(x,y)b \quad (15)$$

где  $b$  - частота дыхания ( $m^3/c$ ). Как было отмечено выше, для взрослого человека с небольшой нагрузкой величина  $b$  составляет 20 л/мин, или  $3,3 \cdot 10^{-4}$  м/с.

В табл. 7 представлены результаты гауссовской модели облака, где выделено 10 кг  $WgPu$ , при таких условиях, которые способствуют максимальным дозам для отдельных лиц ( $u = 1$  м/с,  $H = 300$  м); расчеты проведены для неустойчивого, нейтрального и устойчивого состояний погоды.<sup>43</sup> Максимальная доза в 0,08 мг (это, пожалуй, минимальная доза, вызывающая пороговые эффекты) встречается только на близких расстояниях (менее 500 м) и при малых скоростях ветра (не более 1 м/с). Поэтому очень маловероятно, чтобы дозы, превышающие 0,08 мг, можно было встретить в каком-либо

месте, где находится гражданское население.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если провести эвакуацию населения из районов, расположенных вокруг места выброса плутония, после прохождения облака во избежание постоянного облучения от выпавшего плутония, то почти определенно не будет резкого влияния на здоровье людей от аварии с наихудшим сценарием даже вблизи места выброса и при наихудших погодных условиях. Это особенно справедливо для гражданского населения, которое обычно располагается не ближе нескольких километров от мест загрузки или хранения ракет или ядерного оружия. Даже если живущее поблизости население не эвакуировать и не обеззараживать почву в течение длительного периода (это весьма маловероятные предположения), то максимальная внешняя доза превысит 0,08 мг только при очень ограниченном наборе погодных условий в сочетании с очень низкой высотой облака. Поэтому для всех практических целей можно пренебречь пороговыми эффектами на здоровье при подобных несчастных случаях.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Американские ядерные боеголовки сконструированы таким образом, чтобы "при детонации, инициированной в любой одной точке системы ВВ (а не в нескольких точках, что произойдет при правильной установке запускающего кода и запланированной последова-

- тельности показаний внешних датчиков в промежутке времени от запуска до подлета к цели), вероятность ядерного взрыва с тротиловым эквивалентом свыше 4 фунтов (1,8 кг) ТНТ не превосходила одной миллионной". US Arms Control and Disarmament Agency, Fiscal Year 1979 Arms Control Impact Statement, p. 92.
2. При анализе экспериментов, в число которых входило сгорание металлического плутония при сильных пожарах, было найдено, что доля плутония, приобретенного вид удобного для вдыхания аэрозольного оксида  $\text{PuO}_2$ , занимает диапазон от менее, чем 0,001 процента до нескольких процентов. См. Ralph H. Condit, Plutonium Dispersal in Fires: Summary of What is Known (Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1986), p. 10.
  3. Ссылка 2, стр. 11.
  4. Отчет об измерении загрязнения плутонием и об очистке см. в USAF Nuclear Safety Study 65 (Kirtland AFB, New Mexico: Directorate of Nuclear Safety, 1970), part 2, "Project Crested Ice".
  5. R. Jeffrey Smith, "Defective Nuclear Shells Raise Safety Concerns", Washington Post, 23 May 1990, p. A-1. В письме сенатору Эдварду Кеннеди (9 июля 1990 года) советник президента Буша по вопросам национальной безопасности Brent Scookroft утверждает, что "последние откровения о безопасности ряда боеголовок подчеркивают важность ядерных испытаний".
  6. Supplementary Documentation for an Environmental Impact Statement Regarding the Pantex Plant (Los Alamos National Laboratory, report LA-9445-PNT-D, 1982); Report of the Safety Criteria for Plutonium Bearing Nuclear Weapons (Washington DC: US Atomic Energy Agency, report RS/5640/1032, 23 January 1973; частично рассекречен 9 января 1989 г.), summary, p. 10.
  7. Из ссылки 6 следует, что по крайней мере в некоторых типах ядерного оружия содержится плутоний-238, обеспечивающий питание радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РТГ). Количество плутония-238 зависит от энергопотребления ядерного оружия; один грамм  $\text{Pu-238}$  генерирует около 0,57 ватт тепла, которые можно преобразовать максимально в 0,06 ватт электрической мощности. Хотя 14,5 г  $\text{Pu-238}$  представляют такую же опасность для здоровья, что и 4 кг  $\text{Pu-239}$  (если считать, что угроза про- порциональна скорости распада), их можно было бы использовать для получения всего лишь одного ватта электрической мощности. Если энергопотребление превышает 1 ватт, то при анализе опасности следует учитывать  $\text{Pu-238}$ . Однако мы не знаем, каковы требования к уровню мощности в ядерных вооружениях, но в любом случае  $\text{Pu-238}$  в РТГ следует предохранять от рассеивания при авариях гораздо надежнее, нежели основное плутониевое ядро. По этим причинам мы пренебрежем в данной статье вкладом плутония-238 в воздействие на здоровье, хотя в ней мы и обратили внимание на эту возможность.
  8. Количество попавшего в легкие аэрозоля пропорционально его концентрации в воздухе  $c_0$  (в единицах  $\text{мг}/\text{м}^3$ ) и длительности экспозиции ( $T_0$ ). Накопленная за 30 лет доза в легких будет равна  $D_i b T_0 c_0$ , где  $b$  - частота дыхания (около  $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  для взрослого человека, занятого легкой работой), а  $D_i$  - доза на каждый миллиграмм плутониевого аэрозоля, попавшего в легкие. Ниже мы увидим, что  $D_i = 3800$  и  $7600$  рад/мг для легочных и внутренних костных клеток, соответственно, то-есть, для тех органов, где риск заболеть раком будет наибольшим при вдыхании  $\text{PuO}_2$ . Внешняя доза от облучения всего тела облаком аэрозоля будет равна  $D_c c_0 T_0$ , а внешняя доза от осевшего на почву плутония составит  $D_g c_0 T_0 v T$ , где  $D_c = 1,2 \cdot 10^{-8}$  рад  $\cdot \text{м}^3/(\text{мг} \cdot \text{с})$ ,  $D_g = 6,6 \cdot 10^{-10}$  рад  $\cdot \text{м}^3/(\text{мг} \cdot \text{с})$  для плутония-239,  $v$  - скорость осаждения (порядка  $10^{-2} \text{ м}/\text{с}$  в сухую погоду), а  $T$  - длительность облучения загрязненным грунтом (в секундах). Отношение внешней дозы от облака к дыхательной дозе равно поэтому  $D_c/(bD_i) = 10^{-8}$ , а отношение "грунтовой" дозы к дыхательной -  $(D_g T v)/(D_i b) = 4 \cdot 10^{-12}$ . Поскольку считается, что в легких возникает значительная часть всех раковых заболеваний, возникающих при внешнем гамма-облучении всего тела, "облачная" доза дает пренебрежимо малый дополнительный риск, а для того, чтобы накопившаяся "грунтовая" доза сравнялась с дыхательной, потребуется около 10 тысяч лет. Аналогичные пропорции для плутония-240 столь же низки. См. Steve Fetter, Internal Dose Conversion Factors of 19 Target Organs and 9 Irradiation Times and External Dose-rate Conversion Factors for 21 Target Organs and 259 Radionuclides Produced in potential

- Fusion Reactor Materials, Idaho Falls: National Engineering Laboratory, report EGG-FSP-8036, 1988).
9. Reactor safety Study (Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission, report NUREG-75/014, 1975), appendix VI, pp.D-2,D-7.
  10. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters (BIERIV) (Washington DC: National Academy Press, 1988) p.332.
  11. В соответствии с табл. 23 в книге "Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects" (New York: United Nations, 1982), средняя накопленная доза в легочных и костных клетках человека от вдыхания  $\text{PuO}_2$ , возникшего при атмосферных ядерных испытаниях, равнялась 1,6 и 4,8 миллирад/беккерель, соответственно. Поскольку удельная активность плутония-239 составляет 0,06024 кюри/г, это соответствует 3700 и 11000 рад/мг.  
В таблице VI D-2 книги "Reactor Safety Study" (Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission, 1975) приводится 30-летняя доза для легких и костей -  $2,9 \cdot 10^8$  и  $5,2 \cdot 10^8$  рэм/кюри. Поскольку в работе принимается значение  $Q = 10$  рэм/рад, эти величины преобразуются в 1800 и 3200 рад/мг.  
D.E.Dunning Jr, J.J.Killough, S.R.Bernard, J.C.Pleasant, and P.J.Walsh приводят следующие коэффициенты преобразования для легочных и костных поверхностей: 580 и 4160 рэм/кюри, в работе "Estimates of Internal Dose Equivalent to 22 Target Organs for Radionuclides Occuring in Routine Releases from Nuclear Fuel-Cycle Facilities", vol.III, ORNL/NUREG/TM-190/V3, Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1981, pp. 43 - 44. Если разделить эти величины на принятое значение  $Q = 20$  рэм/рад (для альфа-частиц) и умножить на отношение 30-летней и 50-летней доз, приведенное Феттером, то они преобразуются в 1600 и 9300 рад/мг.
  12. Феттер в приложении к работе "Internal Dose Conversion Factors" (ссылка 11) приводит следующие значения 30-летних доз для легочных и костных поверхностей -  $2,9 \cdot 10^8$  и  $5,2 \cdot 10^8$ , соответственно. При использовавшемся значении  $Q = 20$  рэм/рад (для альфа-частиц) эти величины преобразуются в 3200 и 6500 рад/мг для плутония-239.
  13. Удельная альфа-активность свежего оружейного плутония в 1,17 раз выше, чем чистого плутония-239. Спустя период полураспада плутония-241 (14 лет) активность возрастет еще на 10% из-за альфа-распада америция-241.
  14. International Commission on Radiological Protection, Recommendations for the Commission-1990, ICRP/90/6-01, draft, February 1990, pp.3 - 13.
  15. Для обсуждения этого приближения смотрите работу 10, Приложение II.
  16. "Report to the American Physical Society by the Study Group on Light-Water Reactor Safety", Reviews of Modern Physics, v. 47, (1975), p. S45.
  17. Reactor Safety Study (ссылка 9), таблица VI A-1.
  18. Там же, рисунки VI A-4 and A-5.
  19. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters (ссылка 10), p. 147. Отношение частоты дыхания к легочной массе не меняется с возрастом более, чем в два раза (см. также ссылку 9, таблицы IV D-4 and D-5).
  20. Reactor Safety Study (ссылка 9), таблица VI 5-2.
  21. Следует заметить, что в принципе можно значительно уменьшить количество плутония, попавшего в органы дыхания, если население останется в зданиях с закрытыми окнами и выключенной приточной вентиляцией на время прохождения аэрозольного облака. Немедленно после его прохождения следует открыть окна и вытяжную вентиляцию. См., например, статью Bernard Cohen, Health Physics, 32, pp. 359 - 379, 1977.
  22. Ссылка 9, таблица VI B-1.
  23. G.A.Shmel, "Particle and Dry Gas Deposition: A Review", Atmospheric Environment, v. 14, (1980).
  24. Ссылка 9, Приложение VI, стр. E-13.
  25. В связи с этим заметим, что около 3000 кг  $\text{PuO}_2$  было рассеяно в земной атмосфере в результате атмосферных ядерных испытаний конца 50-х и начала 60-х годов, больше 80% которых было проведено в северном полушарии. В среднем 0,13 нанограмма попало в органы дыхания каждого человека, живущего в северном полушарии. Если использовать приведенные выше коэффициенты ракового риска, то это соответствует дополнительным 0,4 - 1,6 смертям от рака на миллион жителей северного полушария. Если предположить среднюю численность населения северного полушария, облученного при осаждении плутония, равной 3 миллиардам человек (исходя из средней плотности населения около 10 человек на  $\text{км}^2$ ), то от 1000 до 5000 человек уже умерло или умрет от рака в результате вдыхания

- плутония - грубо говоря, один человек на каждый килограмм выброшенного в атмосферу плутония.
26. Четыре тысячи смертей от рака за время жизни 250-ти миллионного населения США соответствуют среднему индивидуальному риску порядка  $10^{-5}$ . Это тот диапазон, для которого Агентство по охране окружающей среды (EPA) стремится установить регулируемые пределы допустимого риска для канцерогенов. См., например, работу Eliot Marshall, "EPA's High Risk Carcinogen Policy", *Science*, v. 218, (1982), p.975.
  27. Приближения клиновой модели явно нарушаются, когда облако достигнет гор, но вклад в оценку числа смертей от малонаселенных районов, удаленных более чем на 70 км, относительно мал.
  28. Используя написанный в виде "поваренной" книги справочник для офицеров по оценке эффектов разрушения складов ядерного оружия в военное время, мы подсчитали, что при любых метеоусловиях число ожидаемых смертей от рака в одном только Сиэттле будет в интервале от 30 до 1000, а это сравнимо с 10 - 900 смертями от рака, полученными для Сиэттла на основе клиновой модели. См. Field Command, Defense Nuclear Agency, Estimation of the Hazard from Plutonium Dispersal, Kirtland Air Force Base, 1977.
  29. U.S. Atomic Energy Proposed Final Environmental Statement Liquid Metal Fast Breeder Reactor Program, WASH-1535, 1974, appendix II-G.
  30. Два крупных выброса плутония из американского ядерного оружия произошли за первые 50 лет ядерной эпохи в местах с малой плотностью населения. Приведшие к этому причины (дежурные полеты бомбардировщиков с ядерным оружием) были ликвидированы.
  31. В работе Bernard Cohen, "Reducing the Hazards of Nuclear Power: Insanity in Action", *Physics and Society*, v. 16 (1987), p. 2 цитируются оценки затрат в диапазоне от 20 000 до 140 000 долларов на каждую жизнь, спасенную в результате разных мер защиты от рака, 400 000 долларов на спасение от диализа почек и от 30 000 до 300 000 долларов на жизнь, спасенную в результате разных программ по улучшению безопасности на автострадах, предпринятых Министерством транспорта США в начале 80-х годов.
  32. R. Jeffrey Smith, "Defective Nuclear Shells Raise Safety Concerns", *Washington Post*, 23 May 1990, p. A-1.
  33. W.J.Bair, J.E.Ballou, J.E.Park, and C.I.Sanders, "Plutonium in Soft Tissues with Emphasis on the Respiratory Tract" in H.C.Hodge, J.N.Stannard, and J.B.Hursh, eds., *The Handbook of Experimental Pharmacology*, Vol.36: Uranium-Plutonium-Transplutonium Elements (New York: Springer-Verlag, 1973), p. 548.
  34. Удельная альфа-активность свежего оружейного плутония (6% плутония-240) равна 72,5 микрокюри на миллиграмм, что в 1,17 раз выше, чем для плутония-239. Обескровленная легочная ткань человека весит около 500 г. Доля от попавшего в легкие вещества, которая сразу же откладывается в альвеолах, составляет от 5 до 50 % при среднем аэродинамическом диаметре (MMAD) аэрозоля в пределах от 0,2 до 10 мкм; при MMAD, равном 1 мкм, эта доля близка к 25%. Поэтому попавшие в легкие 100 мг WgPu эквивалентны осаждению в альвеолах 0,06 мг плутония-239 на грамм обескровленной легочной ткани. Для человеческого организма около 60% этого осаждения останется в легких со средним временем жизни удержания 1,4 года.
  35. Кривая доза-смертность в работе 33 (стр. 548) указывает на начальное отложение в альвеолах 2 мкг/г при сроке выживания 6 месяцев, что соответствует вдыханию взрослым человеком трех мг WgPu.
  36. Ссылка 9, стр. 548.
  37. Там же.
  38. Ссылка 9, таблица VI A-1.
  39. Report of the Safety Criteria for Plutonium-Bearing Nuclear Weapons (ссылка 6, Приложение, стр.28).
  40. Предположим, что третья ступень, несущая 10 боеголовок с весом 100 - 200 кг у каждой, дает им приращение скорости в 2,5 км/с при скорости истекающих газов 2,5 км/с. Предположим также, что платформа разделения весит вместе с топливом столько же, сколько боеголовки, и что полная масса ступени в 1,1 раза превосходит массу топлива. Тогда, используя формулу Циолковского, получим, что масса топлива в третьей ступени будет больше массы одной боеголовки в  $(e - 1) \cdot 2 \cdot 10 / (1,1 - 0,1e) = 40$  раз, то-есть от 4 до 8 тонн.
  41. H.W.Church, *Cloud Rise from High Explosive Detonations* (Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratory, report # TID 4000, UC/41, 1969). Приводятся следующие формулы для высоты (Т) и радиуса (R) облака:  $T = 76 W^{0,25}$  и  $R = 3,5 W^{0,375}$ , где Т и R выражаются в

метрах, а W - в фунтах тротилового эквивалента.

42. Supplementary Documentation for Environmental Impact Statement Regarding the Pantex Plant: Dispersion Analysis for Postulated Accidents, LA-9445-PNTX-D (Los Alamos, New Mexico: Los Alamos

National Laboratory, 1982).

43. Доза в данной точке примерно обратно пропорциональна  $u$  и на расстояниях менее 10 км относительно нечувствительна к увеличению величин  $v$  и  $H$  в 10 раз.