

## ПРОНИКАЮЩИЕ В ГРУНТ ЯДЕРНЫЕ БОЕГОЛОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

*Роберт У. Нелсон*

Ряд ведущих сотрудников правительства США и руководителей американских ядерных лабораторий недавно поддержали предложение о разработке в США нового поколения проникающего в грунт ядерного оружия (ПГО) малой мощности, способного разрушить зарытые на большую глубину укрепленные цели. Часто предполагается, что ПГО вызовет «минимальный сопутствующий ущерб» и может применяться даже вблизи густо населенных районов, поскольку ПГО предназначено для подземного взрыва и обладает значительно меньшей мощностью по сравнению с типичными вооружениями в ядерном арсенале США.

Мы покажем в этой статье, что ПГО не может проникать в грунт достаточно глубоко, чтобы ядерный взрыв не вышел на поверхность, и это обязательно приведет к весьма интенсивным и смертельным радиоактивным осадкам. Изготовленный из самой твердой стали снаряд не сможет вынести значительных напряжений от ударов о грунт и разрушится при скоростях, превышающих примерно 1 км/с. Это ограничивает максимально возможную глубину проникновения в железобетон величиной, равной примерно учетверенной длине снаряда (около 12 м для снаряда трехметровой длины). Чтобы подземный взрыв оказался «запертым», его следует проводить на глубине, превышающей  $90 \text{ КТ}^{1/3}$  м (КТ – мощность взрыва в кт). Проникший в грунт заряд образует открытую воронку или шахту, что позволяет произвести выброс горячей плазмы и радиоактивного материала при ядерном взрыве. ПГО скорее всего создаст воронку с радиусом порядка  $50 \text{ КТ}^{1/3}$  м, что сопровождается выбросом большого количества радиоактивной грязи и обломков. Килотонная мини-ПГО, если применить ее в типичной населенной местности стран третьего мира, разбросает смертельную дозу радиоактивных осадков на площади в несколько квадратных километров, что приведет к гибели десятков тысяч гражданских лиц.

Статья получена 4 января 2002 г. и принята к публикации 20 февраля 2002 г.

Автор – участник программы по науке и всеобщей безопасности в Принстонском университете, Принстон, Нью Джерси, США. Почтовый адрес: Robert W. Nelson, Princeton University, Program on Science and Global Security, H0213E-Quad, Princeton, NJ, USA. Электронный адрес: rnelson@princeton.edu

### ВВЕДЕНИЕ

Все сильнее звучат голоса группы американских политиков и руководителей американских военных лабораторий, призывающих США разработать новое поколение точных ядерных боеголовок малой мощности («минибомб») с мощностью несколько кт тротилового эквивалента или ниже<sup>1,2</sup>. Как они утверждают, небольшое ядерное оружие необходимо для унич-

---

<sup>1</sup> В недавно вышедшем докладе Национального института по общественной политике сказано, что «Соединенным Штатам может понадобиться развернуть простое, маломощное и точное ядерное оружие для возможного применения против отобранных укрепленных целей типа подземных хранилищ биологического оружия», K.B.Payne et al., Rationale and Requirements for U.S. Nuclear Forces, Technical report, National Institute for Public Policy (January 2001). В число соавторов входят Стивен Хадли – ныне помощник советника президента Буша по национальной безопасности, Роберт Джозеф – директор по стратегии распространения в Совете по национальной безопасности, а также Стивен Камбон и Уильям Шнейдер мл. – два основных советника Буша по обороне. Многие аналитики рассматривают этот документ как отражение взглядов администрации Буша на недавно опубликованный пересмотр ядерной стратегии.

<sup>2</sup> Д-р Стивен Янгер, недавно назначенный директором Агентства по уменьшению угроз для обороны и бывший до этого заместителем директора лаборатории ядерного оружия в Лос

тожения укрепленных подземных командных бункеров и хранилищ для химического или биологического оружия. В то время, как обычные «разрушители бункеров» способны уничтожить неглубокие засыпные структуры на глубине менее 10 м от уровня поверхности, ядерное оружие требуется для уничтожения «укрепленных и глубоко зарытых целей» – объектов с защитой, эквивалентной 30-100 м железобетона<sup>3,4</sup>.

Но большие мощности ядерного оружия, находящегося сейчас в арсенале США, обычно превышающие 100 кт, настолько разрушительны для любого гражданского населения, что ни один американский президент не сможет рассчитывать на его применение. Однако, как полагают сторонники минибомб, введя в арсенал ядерное оружие малой мощности с возможностью глубокого проникновения в грунт, Соединенные Штаты будут способны разрушать такие укрепленные цели с «ограниченным побочным ущербом»<sup>5</sup>. Один из сотрудников Пентагона следующим образом изложил такие взгляды в газете «Вашингтон Пост» весной 2000 г.: «Сейчас нужно нечто, способное угрожать бункерам, прорытым на глубине 300 м в граните, без уничтожения окружающего гражданского населения»<sup>6</sup>.

В этой статье мы покажем, что задача создания неопасного ядерного оружия, проникающего в грунт, физически невозможна. Мы ответим на ряд очевидных технических вопросов, которые исчезли из дебатов еще на раннем этапе: Как глубоко может врыться в грунт проникающее устройство? Сможет ли оно разрушить укрепленный бункер, покрытый 30-100 м железобетона? Будет ли ядерный взрыв камуфлетным (без следов на поверхности) или же он приведет к выпадению радиоактивных осадков и к другим поражающим эффектам?

Если даже ПГО сможет проникнуть на большую глубину, оно создаст открытую воронку или открытую шахту, из которой может выделяться горячая плазма и радиоактивные продукты ядерного взрыва. Для оценки эффекта можно обратиться к самому первому подземному ядерному испытанию «Паскаль-А», проведенному 26 июля 1957 г. в незакрытой шахте диаметром 1 м и глубиной 150 м. «Паскаль-А» планировался как проверка безопасности с ожидаемой мощностью порядка 0.5-1 кг тротилового эквивалента. Но его реальная мощность оказалась равной около 55 тонн (в 55000 раз выше ожидаемой) и взрыв застал всех врасплох. Физики Роберт Кемпбелл и Роберт Браунли подготовили первый письменный отчет:

Браунли: «Это был самый чудесный в мире факел, потому что ночью все стало видно. Голубое пламя поднялось на десятки метров в воздух. Каждый, кто был рядом, упал на землю, а затем все они вскочили в свои машины и умчались как бешеные».

Кемпбелл: «Им очень повезло, что не пришлось ехать сквозь облако осадков... Это было бы плохо, но эффектно. И всего лишь одна десятая радиации оказалась на окружающем грунте по сравнению с тем, если бы взрыв произошел на поверхности»<sup>7</sup>.

При дальнейших взрывах в незакрытых шахтах обычно 5-10% их продуктов деления высвобождались в окружающую среду<sup>8</sup>.

В следующем разделе будет показано, как проникновение в грунт всего на несколько

---

Аламосской лаборатории, является сторонником эволюции американского арсенала в сторону боеголовок ствольного типа меньшей мощности на основе высокообогащенного урана. См. S.M.Younger, Nuclear Weapons in the Twenty-First Century, Technical Report LAUR-00-2850, Los Alamos National Laboratory (June 2000).

<sup>3</sup> Maj. Gen, G.L. Curtin and G.W. Ullrich, "The Threats Go Deep", *Air Force Magazine* (October 1997), pp.47-49.

<sup>4</sup> Lt. Colonel E.M. Sepp, Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations, Occasional Paper Number 14, Air University, Maxwell Air Force Base (May 2000).

<sup>5</sup> Thomas W. Dowler and J.S. Howard II, "Countering the Threat of the Well-armed Tyrant: A Modest Proposal for Small Nuclear Weapons", *Strategic Review*, 29(4) (September 1991), pp.34-40.

<sup>6</sup> W. Pincus, "Senate Bill Requires Study of New Nuclear Weapons". *The Washington Post* (12 June 2000), p.A02.

<sup>7</sup> James Carothers et al., Caging the Dragon: The Containment of Nuclear Explosions. Technical Report DOE/NV-388/DNA TR-95-74, U.S. Department of Energy/Defense Nuclear Agency, available from Bechtel Nevada CIC, P.O.Box 98521, Las Vegas (1995).

<sup>8</sup> Office of Technology Assessment U.S. Congress. The Containment of Underground Nuclear Explosions Technical Report OTA-ISC-414, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. (October 1989).

метров увеличивает разрушительную силу более, чем на порядок величины. Похоже, что широко распространено заблуждение о связи этого эффекта и проникновения на очень большую глубину, которая потребует, чтобы взрыв оказался камуфлетным. Затем мы покажем, что максимально возможная глубина проникновения в укрепленный бетон ограничена примерно учетверенной длиной снаряда. Но глубина заглабления, необходимая для создания камуфлетного взрыва, оказывается гораздо большей. Ни одно ПГО не сможет проникнуть через укрепленную зону на глубину, требуемую для камуфлетного взрыва, даже имеющего мощность порядка 0.1 кт. Снаряд разрушится от сильных напряжений, возникающих при ударе о грунт, задолго до того, как сможет пройти требуемое расстояние. В разделе о радиоактивных осадках будет рассказано об осадках, получаемых от взрыва при неглубоком залегании, и об оценках смертельных случаев, ожидаемых в плотно населенных районах.

Найдено, что применение любого ядерного оружия, способного уничтожить закопанную цель, которую нельзя поразить обычными вооружениями, приводит с неизбежностью к исключительно высокому числу жертв у гражданского населения, если такое оружие использовано вблизи городов. Взрыв просто выбрасывает из воронки большую массу радиоактивных обломков, которые оседают на окружающую местность в виде исключительно интенсивных и смертельных осадков.

### **ЗАЧЕМ ЗАГЛУБЛЯТЬСЯ В ГРУНТ?**

Ядерный взрыв над поверхностью оказывается фактически очень грубым подходом к разрушению зарытой структуры типа укрепленного командного бункера или ракетной шахты. Поскольку грунт является практически жестким телом, основная часть энергии воздушной ударной волны от наземного взрыва отражается от него в атмосферу; большой контраст плотностей между воздухом и грунтом создает “несоответствие импедансов” и только небольшая часть всей энергии передается в грунт. Несколько метров грунта защитят наиболее укрепленные структуры почти от всех наземных ядерных взрывов за исключением самых мощных. Так, до недавнего времени считалось, что для разрушения укрепленных подземных целей типа советских командных бункеров потребуется боеголовка В53 с мощностью 9 Мт.

С другой стороны, заглабленный всего на несколько метров ядерный взрыв создает гораздо более интенсивную и разрушительную сейсмическую ударную волну, по сравнению с воздушным взрывом той же мощности. Ярко выраженное изменение величины “эквивалентной мощности” оружия от глубины залегания показано на рис.1. Заглабление менее, чем на один метр, увеличивает энергетическую связь более, чем на порядок величины. Поэтому более вероятно, что боеголовка разрушит заглабленную укрепленную структуру, когда прежде всего она проникнет в грунт рядом с целью до того, как произойдет взрыв.

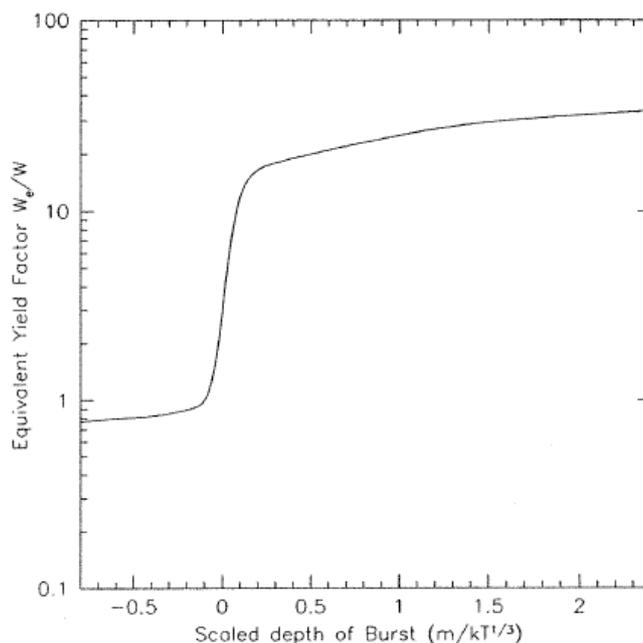
Соединенные Штаты заменили устаревшую боеголовку В53 в 1997 г., когда боезаряд бомбы В61 был помещен в корпус из укрепленной стали, на котором установлена новая конусная головка для обеспечения возможности проникновения в грунт. Мощность новой бомбы В61-11 могла меняться в пределах 0.3-300 кт. Но ее проникающая способность оказалась достаточно заурядной. При двух испытательных сбросах с высоты около 2.5 км вблизи Фэрбенкса (Аляска) незаряженная В61-11 проникла в мерзлый грунт тундры всего на 2-3 м. Для такой глубины проникновения потребуется гораздо более высокая степень преобразования энергии поверхностного взрыва в энергию грунтовой ударной волны, чтобы мощность 300 кт оказалась эквивалентной энергии 9 Мт при взрыве над поверхностью. Так как бомба В61-11 значительно легче, чем всякая четыре тонны боеголовка В53, ее можно доставлять на бомбардировщике-невидимке В-2А или даже на истребителе F-16, а не на уязвимом бомбардировщике В-52 (который предназначен для доставки В53). Бомба В61-11 обладает к тому же современными характеристиками по надежности и безопасности, которых нет у В53. И она создает меньше радиоактивных осадков, чем при поверхностном взрыве.

### **Ограничения на высокоскоростное проникновение в грунт**

В описанные выше испытаниях со сбросом бомбы В61-11 скорость соударения с грунтом не превышала 300 м/с. В принципе глубина проникновения 2-3 м выросла бы, если снабдить оружие двигательной системой, могущей обеспечить более высокую скорость соударения.

Но снаряд не сможет проникнуть на произвольно большую глубину просто в результате возрастания скорости соударения. Чтобы объяснить этот вывод, нам лучше всего процитировать Джорджа Ульриха – гражданского заместителя директора Агентства по специальным оборонительным вооружениям:

“Существует предел на то, как глубоко можно проникнуть обычный заглобляющийся снаряд (пенетратор). ....с общей точки зрения, не получится добиться магического решения и углубиться на 30 м или более в грунт. Если перейти на более высокие скорости, достигается фундаментальный предел материала, когда... снаряд будет разрушать сам себя в процессе проникновения, а в действительности глубина заглобления окажется меньше, чем при меньшей скорости. Итак, вы попадаете в различные режимы, где существуют фундаментальные ограничения физической природы на то, как глубоко можно проникнуть в грунт”<sup>3</sup>.



**Рисунок 1:** Коэффициент эквивалентной мощности (ось Y) как функция нормированной глубины залегания (ось X). Всего несколько метров залегания увеличивают энергетическую связь более, чем на порядок величины. Данные взяты из работы<sup>9</sup>.

Как показано ниже, задача заглобления на 30 м, упомянутая ранее, почти определенно оказывается слишком оптимистичной.

Глубина заглобления и образование воронки при соударении с твердой целью зависит от механических свойств как цели, так и снаряда, при высоких уровнях динамических напряжений. Теоретические формулы могут быть выведены в предположении, что материал цели ведет себя как идеальное упругое тело, и это хорошо работает для бронированных плит или для проникновения в глину и песок<sup>10,11</sup>. Но заглобленные цели по определению строятся из железобетона или же вырубаются в скалах. Такие материалы хрупки и имеют тенденцию разрушаться при кинетическом ударе, а теоретическое понимание этих процессов ограничено. Общепринято полагать, что в данных случаях более точны эмпирические формулы.

Балсон<sup>11</sup> пересмотрел много эмпирических формул по заглоблению в бетон. Он пришел к выводу, что наиболее точные результаты основаны на многочисленных результатах военного времени, полученных в Британской дорожной исследовательской лаборатории. Если выразить отношение массы пенетратора к площади его поперечного сечения через плотность и длину ( $M/A = \rho_p L$ ), результирующее выражение для глубины заглобления D можно

<sup>9</sup> R.N. Everett, B83 Conversion Options and Test History, DWSA Weapons Effects Manual EM-1, 1990. Материал получен по закону о свободном доступе к информации.

<sup>10</sup> J.V.Poncelet, *Cours de mecanique industrielle*, Paris (1829).

<sup>11</sup> P.S.Bulson, *Explosive Loading of Engineering Structures*, E&FN SPON, London (1997).

выразить следующим образом

$$\frac{D}{L} = 2,0 \left( \frac{\rho_p}{10^3 \text{ kg/m}^3} \right) \left( \frac{\text{MPa}}{Y_t} \right)^{1/2} \left( \frac{v}{533 \text{ m/s}} \right)^n \quad (1)$$

где  $\rho_p$  – численное значение плотности пенетратора (в г/см<sup>3</sup>),  $Y_t$  – численное значение предела прочности бетона на сжатие (в мегапаскалях – МПа), а скорость измерена в единицах (м/с); коэффициент  $n$  равен  $3.1Y_t^{-1/4}$ . Широкий набор данных, собранный в Сандийской национальной лаборатории (США), приводит к эмпирическим формулам, подытоженным в работе<sup>12</sup> для скоростей более 60 м/с

$$\frac{D}{L} = 1,3N \left( \frac{\rho_p}{10^3 \text{ kg/m}^3} \right) \left( 1 - \frac{Y_t - 14}{115 \text{ MPa}} \right) \left( \frac{v - 30}{1000 \text{ m/s}} \right) \quad (2)$$

где член  $N = (0.56 - 1.34)$  учитывает изменения формы носового конуса от плоской до конической. Эти формулы справедливы только при таких скоростях соударения, когда снаряд можно рассматривать как твердый пенетратор с постоянной длиной. Снаряд будет пластически деформироваться или эродировать, когда лобовое давление от удара достигает предела текучести материала оболочки снаряда  $\rho_t v_p^2 / 2 \geq Y_p$ . Следовательно, скорость соударения должна быть меньше следующей величины

$$v_{\max} = \left( \frac{2Y_p}{\rho_t} \right)^{1/2} = 1 \frac{\text{km}}{\text{s}} \left( \frac{2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3}{\rho_t} \right)^{1/2} \left( \frac{Y_p}{10^3 \text{ MPa}} \right) \quad (3)$$

Экспериментальные данные для пенетраторов из твердой стали, проникающих в бетон при высоких скоростях, приведены на рис.2 вместе с кривыми углубления, предсказываемыми уравнениями (1) и (2). Конкретная марка бетона, использованного в эксперименте, неизвестна, но предположим, что он обладает пределом текучести, лежащим в середине диапазона данных, приведенных в табл.1 ( $Y_t = 50$  МПа). В этом случае снаряд длиной 0,22 м способен проникнуть на глубину, которая по крайней мере в 4.3 раза превышает эту длину (0,95 м). Максимальная глубина заглупления примерно соответствует предсказанной максимальной скорости  $(2Y_p/\rho_t)^{1/2} = 913$  м/с, если применять параметры из табл.1. [Примечание переводчика: Если использовать параметры из табл.1, то значение максимальной скорости составит 894 м/с.] При этой скорости на снаряде наблюдаются следы эрозии, а при скорости 1200 м/с на снаряд действуют ненормально высокие пластические деформации и он разваливается на много осколков<sup>13</sup>.

В практических сценариях действительная глубина вертикального заглупления окажется значительно ниже величины, предсказываемой уравнениями (1) и (2) при  $v = v_{\max}$ . Во-первых, чтобы обеспечить целостность снаряда до взрыва, скорости соударения должны быть значительно меньше значения максимальной скорости, приведенного в уравнении (3). Может оказаться необходимым снижение скорости для уменьшения огромного замедления при ударе; при  $v = v_{\max}$  величина замедления дается формулой

$$\frac{a_{\max}}{g} = \frac{AY_p}{M_p g} = 10^5 \left( \frac{Y_p}{10^3 \text{ MPa}} \right) \left( \frac{10^3 \text{ kg}}{M_p} \right) \quad (4)$$

где  $g = 9.8 \text{ м.с}^{-2}$  – ускорение силы тяжести, величина  $A$  выражена в единицах (0.1 м<sup>2</sup>),  $Y_p$  – в МПа, а  $M_p$  – в тоннах. Это более, чем на порядок величины превышает высокие ускорения,

<sup>12</sup> C.W,Young, Equations for Predicting Earth Penetration by Projectiles: An Update, Technical Report Sand99-0013, Sandia National Laboratories (July 1988).

<sup>13</sup> J.Rogers, Unexplored Penetrator Regime Against Super-Hard Underground Facilities, Sandia National Laboratories (June 1996). Материал получен по закону о свободном доступе к информации.

испытываемые артиллерийскими ядерными снарядами<sup>14,15</sup>. Большая часть снарядов будет кроме того ударяться о грунт под углом  $\vartheta$  относительно нормали, получая горизонтальную скорость  $v_{hor} = v \sin \vartheta$ . Соответствующая глубина вертикального заглубления уменьшится, по крайней мере, на множитель  $\cos \vartheta$ , а, возможно, и сильнее, потому что летящие в воздухе бомбы при большом угле наклона стремятся двигаться по изогнутой траектории заглубления, направленной вперед по направлению горизонтальной скорости<sup>11</sup>. Наконец, поскольку снаряд – это не твердое тело, его средняя плотность будет несколько меньше, чем у рассмотренного здесь твердотельного снаряда.

**Таблица 1:** Плотность  $\rho$  и динамическая прочность  $Y$  разных материалов (Все величины являются приблизительными и зависящими от конкретного типа материала).

| Материал      | Плотность ( $10^3$ кг/м <sup>3</sup> ) | Прочность (МПа) |
|---------------|--|-----------------|
| Мягкие скалы  | 1,5 – 2                                | 30              |
| Железобетон   | 2,5                                    | 30 – 100        |
| Твердые скалы | 2,5                                    | 300             |
| Сталь E4340   | 8                                      | 1000            |

Поэтому мы приходим к выводу, что никакое ПГО не сможет углубиться в железобетон больше, чем на учетверенную длину снаряда – это составит 12 метров для снаряда длиной 3 метра. Самое успешное проникающее обычное оружие (GBU-28), как утверждается, углубляется в бетон на глубину около шести метров<sup>3</sup>.

### ПОДЗЕМНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ

Хотя разрушительная сила и вероятность уничтожения подземной укрепленной цели сильно возрастают, если зарыть ядерное оружие в грунт, сам по себе ядерный взрыв на глубине в несколько метров не будет камуфлетным. Подземный ядерный взрыв сначала испаряет лежащую рядом породу, создавая полость с высокотемпературной плазмой, имеющей начальное давление в несколько миллионов атмосфер, что на много порядков величины превышает давление лежащего сверху грунта или породы и даже прочность самой породы. Полость быстро расширяется и вызывает снаружи сильную сейсмическую ударную волну сжатия. Если взрыв происходит достаточно близко к поверхности, он выбрасывает из образуемой воронки грязь и обломки.

Требуемая величина заглубления для полного удержания продуктов подземного ядерного взрыва зависит прочности, пористости и уплотняющих характеристик породы (или почвы), а также от положения уровня подземных вод. На полигоне в Неваде взрыв должен производиться на глубине, превышающей эмпирически определенную минимальную глубину

$$D \geq 92 \text{ КТ}^{1/3} \text{ м} \quad (5)$$

где вершина «камина» находится как раз под поверхностью<sup>16</sup>. На практике во многих испытаниях при значениях глубин, лежащих вблизи минимальных, наблюдались утечки радиоактивности, а тщательно закупоренные шахты оказывались разрушенными. Это приводит к дополнительному коэффициенту безопасности. Все взрывы в Неваде проводились на глубине  $D = 122 \text{ КТ}^{1/3} \text{ м}$ <sup>8</sup>. Но еще большая глубина рекомендуется для среды со значительным содержанием воды. Более того, ни одно испытание не было проведено на глубине меньше 185 м. Требуемая глубина удержания взрыва только слегка зависит от мощности оружия.

<sup>14</sup> США имели на вооружении артиллерийские снаряды “Davy Crockett” с боеголовкой W48 с 1961 г. по 1991 г.. Мощность снаряда составляла 0.01 кт. Его можно было запускать безоткатным ружьем примерно метровой длины ( $L = 1$ ), которое мог переносить один человек; максимальная дальность полета  $D$  составила 4 км. Из простого анализа можно найти, что боеголовка испытывала среднее ускорение  $a/g = D/2L$ , что примерно равно 2000.

<sup>15</sup> S.I.Schwartz, ed., *Atomic Audit: The Costs and Consequences of U.S. Nuclear Weapons since 1940*. Brookings Institution Press, Washington, D.C. (1998).

<sup>16</sup> S.Glasstone and J.Dolan, *Effects of Nuclear Weapons*, U.S. DoD & U.S. DoE (1977).

Боеголовки с мощностью до 0.1 кт все еще надо закладывать на глубине около 43 м, чтобы взрыв оказался полностью камуфлетным. На рис.3 приведены значения минимальной величины заложения на полигоне в Неваде, чтобы взрыв оказался камуфлетным, в зависимости от ядерной мощности.

### Взрывы с образованием воронок: испытания по программе «Плаушер»

Основная часть наших представлений о неглубоких ядерных взрывах связана с серией ядерных испытаний по программа «Плаушер». Поначалу они предназначались для разработки возможности применять ядерные взрывы для проектов, связанных с крупными земляными работами, например, для прокладки каналов или создания новых гаваней. Поэтому ядерные взрывы проводились на сравнительно малой глубине и были оптимизированы на создание больших воронок. Мощность и глубина залегания для каждого испытания по программе «Плаушер», а также размеры возникшей воронки приведены в табл.2.

Если глубина заложения меньше той, которая требуется для получения камуфлетного взрыва, образуется воронка. Ее размер существенно зависит от глубины взрыва, типа почвы или породы, а также местного уровня подземных вод. Объемы воронок, образованных при заглубленном ядерном взрыве, приведены на рис.4. Боеголовка мощностью 1 кт, взорванная на глубине 30 м в сухом грунте или в мягкой породе, образует воронку радиусом примерно 55 м (это превышает по диаметру размер футбольного поля), окруженную валом выброшенного грунта, внешний размер которого в 2-3 раза превышает этот радиус<sup>16</sup>. Примерно 10-50% всей выброшенной из воронки массы становится локальным источником радиоактивных осадков.

Если подземные структуры помещены в твердую породу, они достаточно хорошо противодействуют ударным волнам в грунте<sup>16</sup>. Порода, будучи упругой средой, пропускает волну давления. Разрушение происходит прежде всего из-за растрескивания – повреждения при растяжении, когда волна отражается от границы воздух-стенка. При небольшой мощности взрыва трудно вызвать значительное поражение зарытой структуры, если только она не попадает в зону разрушения (это область вблизи воронки, где ударная волна достаточно сильна, чтобы упруго деформировать и разрушить породу. Гласстон<sup>16</sup> приводит критерий поражения умеренно заглубленных подземных структур. Серьезное повреждение, приводящее к разрушению, происходит только у структур, лежащих в пределах  $1.25R \approx 70 \text{ КТ}^{1/3}$  м от точки взрыва, если полагать, что произошел на оптимальной приведенной глубине  $30 \text{ КТ}^{1/3}$  м. Поэтому для разрушения структуры, зарытой на глубину 100 м, потребуется боеголовка с мощностью выше 3 кт. Но этот взрыв не окажется камуфлетным. Он образует воронку радиусом около 80 м и глубиной 30 м. Более высокие мощности понадобятся для проникновения на глубину, которая меньше оптимальной для образования воронки.

**Таблица 2:** Данные о экспериментах по выбросу грунта в рамках программы «Плаушер»<sup>17,18,19</sup>. (Обратите внимание, что даже при взрывах с очень малой мощностью образуются значительные воронки.  $F_c$  – доля образованного при взрыве гамма-излучения, проявляющегося в выпавших поблизости радиоактивных осадках. Величина  $F_c$  нормирована на 3380 рад/час на кт мощности и квадратную милю, а также через час после взрыва; коэффициент экранирования местностью принят равным 0.8.)

| Событие   | Мощность (кт) | Глубина (м) | Радиус кратера (м) | Доля активности |
|-----------|---------------|-------------|--------------------|-----------------|
| Дэнни Бой | 0,43          | 34          | 33                 | 0,04            |
| Седан     | 104           | 195         | 188                | 0,1             |
| Паланкин  | 4,3           | 82          | 37                 | -               |

<sup>17</sup> J.B. Knox, Prediction of Fallout from Subsurface Nuclear Detonations. In A.W.Klement Jr, ed., *Radioactive Fallout from Nuclear Weapons Tests*, U.S. Atomic Energy Commission (November 1965).

<sup>18</sup> L.J. Vortman, "Nuclear Excavation", *Education for Peaceful Uses of Nuclear Explosives*, L.E.Weaver, ed., pp.65-80, University of Arizona Press, Tucson, AZ (1970).

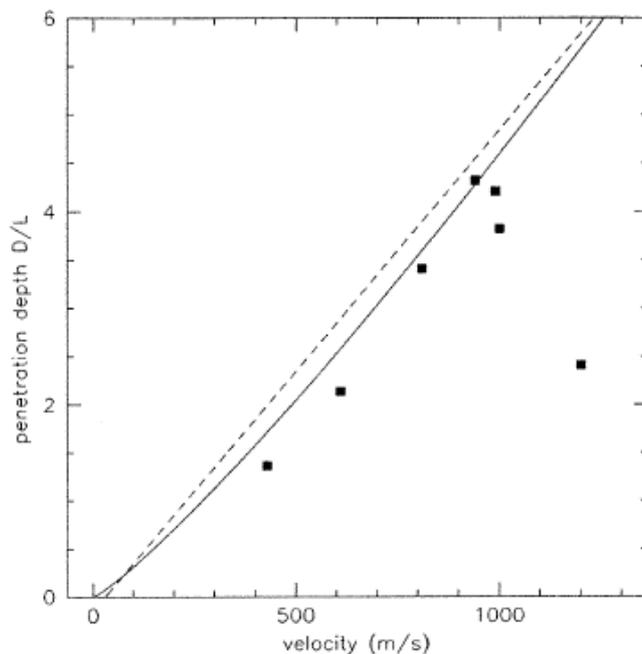
<sup>19</sup> J.B. Knox, Technologies Being Used in Nuclear Explosive Engineering, *Education for Peaceful Uses of Nuclear Explosives*, pp.115-132, University of Arizona Press, Tucson, AZ (1970).

|           |     |     |     |        |
|-----------|-----|-----|-----|--------|
| Кабриолет | 2,3 | 53  | 56  | -      |
| Скунер    | 35  | 109 | 131 | -      |
| Типот ЕСС | 67  | 34  | 45  | 0,46   |
| Нептун    | 0,1 | 30  | 31  | 0,005  |
| Джангл У  | 1,2 | 5,2 | 80  | 0,64   |
| Джангл С  | 1,2 | 0   | -   | 0,5    |
| Бланка    | 19  | 257 |     | 0,0005 |

## РАДИОАКТИВНЫЕ ОСАДКИ ОТ НЕГЛУБОКОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Поверхностные и неглубокие ядерные взрывы создают гораздо больше интенсивных локальных радиоактивных осадков, чем эквивалентные по мощности высотные взрывы, у которых огненный шар не касается почвы. Когда огненный шар ударяет о поверхность земли, он уносит с собой в воздух большие количества грязи и осколков. Кроме радиоактивных продуктов деления, образованных самим оружием, в этом веществе содержатся также ядра, ставшие радиоактивными в результате облучения большим количеством нейтронов, образовавшихся при ядерном взрыве. Возникшее облако радиоактивной пыли не поднимается столь высоко, как классическое грибоподобное облако, но обычно представляет собой узкую колонну выходящего горячего газа, окруженную широкой волной продуктов выброса и взвешенных в воздухе мелких частиц.

Пространственное распределение излучения зависит от ряда параметров: глубина заложения заряда, тип почвы или породы и содержание влаги в них, локальная скорость ветра и атмосферных осадков, а также вид окружающей местности. Следовательно, количественные оценки радиоактивных осадков и доз облучения будут по существу грубыми. Тем не менее, можно использовать фактические данные по радиоактивным осадкам, измеренным в серии ядерных испытаний неглубокого заложения по программе «Глаушер», проведенных в начале 60-х гг.<sup>20,21</sup>. На рис.5 видно радиоактивное облако от взрыва Кабриолет с мощностью 2.3 кт. Заряд был заглублен на 53 м. Сильно радиоактивное облако у основания достигает диаметра примерно 2.5 км.

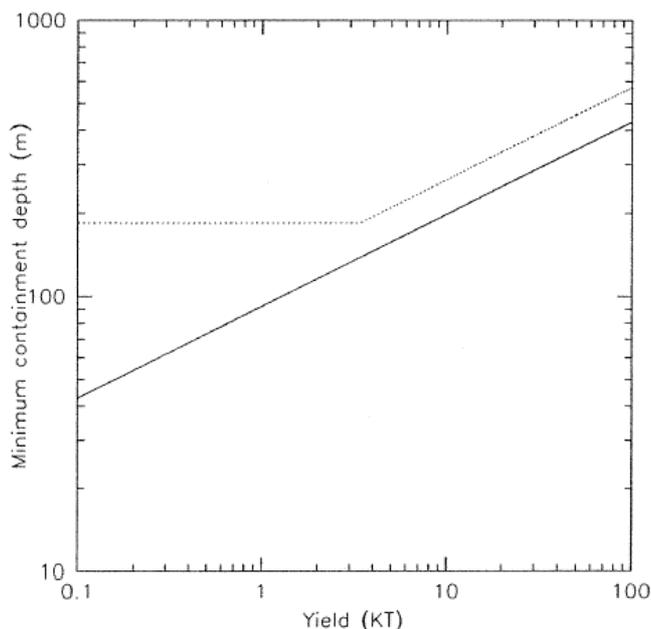


**Рисунок 2:** Глубина проникновения в зависимости скорости соударения снаряда из стали

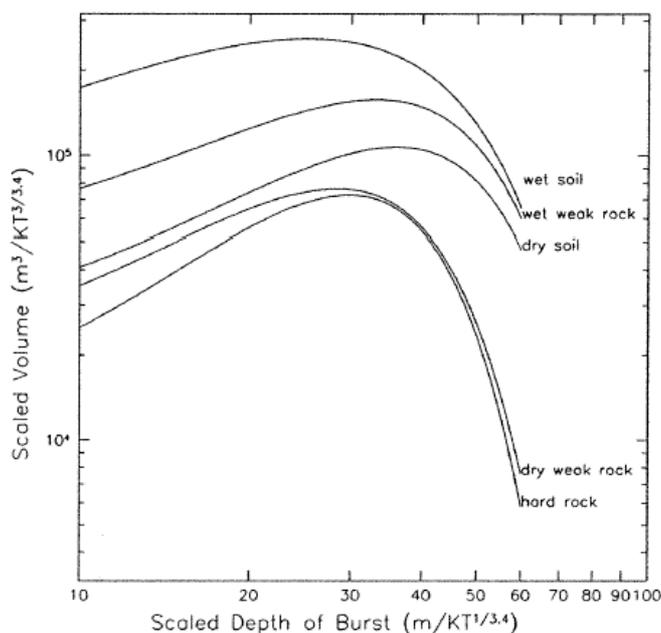
<sup>20</sup> Lt. Col. B.C.Hughes, Nuclear Construction Engineering, Technical Report 2, U.S. Arms Engineering Nuclear Cratering Group, Livermore, California (1968).

<sup>21</sup> P.W. Allen, "Venting and Fallout Prediction", *Education for Peaceful Uses of Nuclear Explosions*, L.E.Weaver, ed., pp.193-204. University of Arizona Press, Tucson, AZ (1969).

Е4340 с бетоном. Сплошная кривая соответствует уравнению (1), а штрихованная – уравнению (2). Квадратики – экспериментальные данные для стальных снарядов длиной 0.22 м. Прочность бетонной мишени неизвестна, но мы использовали значение  $Y = 50$  МПа, соответствующее средней величине из табл.1, в качестве характерного примера. На этих снарядах наблюдалась сильная эрозия при скоростях соударения выше 900 м/с, которые очень близки к предсказанной критической скорости  $v_{max} = 913$  м/с (если использовать данные табл.1). При скорости  $v = 1200$  м/с снаряд сильно деформируется и распадается на много осколков.



**Рисунок 3:** По оси Y отложена минимальная глубина заложения заряда (сплошная линия), требуемая для полного удержания продуктов подземного ядерного взрыва. Штрихованная линия соответствует более ограничительному критерию, принятому на американском полигоне в Неваде. Мощность взрыва в кт отложена по оси X.



**Рисунок 4:** Нормированный объем воронки, возникшей в результате заглубленного ядерного взрыва, как функция нормированной глубины заложения заряда  $D/KT^{1/3.4}$ . Наибольшие

воронки возникают в грунте или в слабых влажных породах, а максимум соответствует глубине заложения  $30-40 \text{ м/КТ}^{1/3.427}$ . Диаметр и глубина воронки связаны с объемом соотношениями  $R_a = 1.2 V_a^{1/3}$  и  $D = 0.5 V_a^{1/3}$ . Взрыв мощностью 1 кт на глубине 30 м образует воронку с радиусом примерно 55 м, что больше размера футбольного поля. Обозначения около кривых (сверху вниз): влажный грунт, влажная слабая порода, сухой грунт, сухая слабая порода, твердая порода.

Приблизительные законы подобия для высоты и диаметра такого облака у основания можно заимствовать из работы<sup>20</sup> (рис.6.10):

$$H_s \approx 570 \text{ КТ}^{0.2} \text{ м}; \quad R_s \approx 1 \text{ КТ}^{0.3} \text{ км} \quad (6)$$

Они основаны на испытаниях, когда взрыв производился на приведенной глубине примерно  $46 \text{ КТ}^{1/3}$  м, которой соответствует воронка максимального размера.

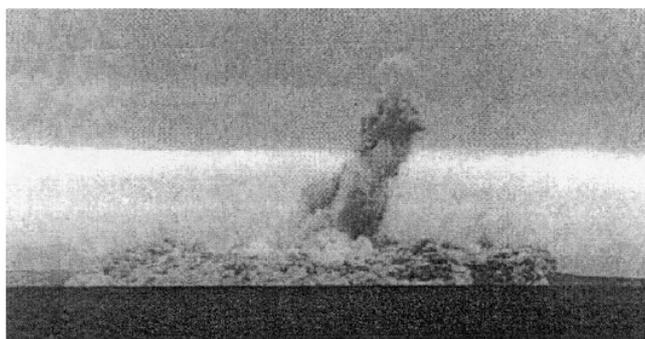
Можно оценить характеристическую скорость осадков  $v$  и время их выпадения  $t_v$ , если приравнять силу тяжести силе трения Стокса ( $mg = 6\pi\eta va$ ), действующей на частицу сферической формы с радиусом  $a$  и массой  $m = \pi a^3 \rho / 3$ , которая падает в воздухе, имеющем вязкость  $\eta = 1.82 \times 10^{-5}$  Па-с,

$$v = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} \approx 3a^2 \text{ м/с} \quad (7)$$

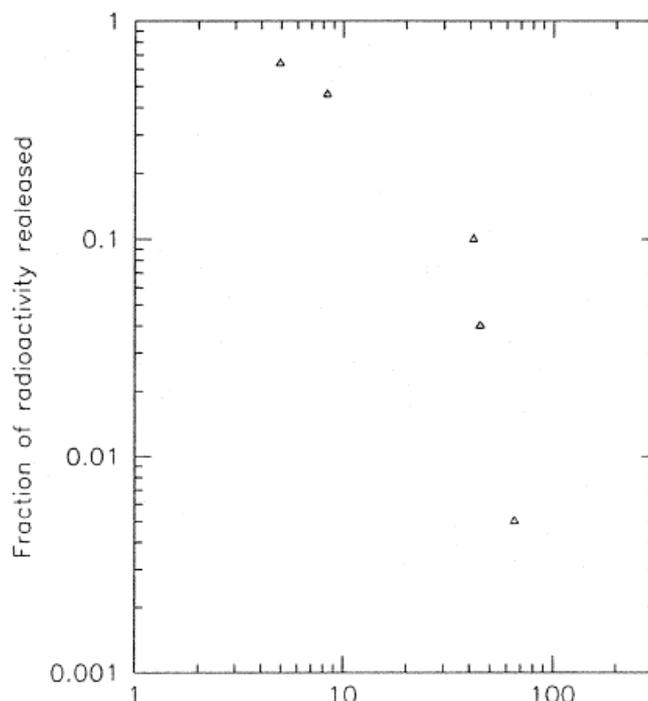
где принято значение  $\rho = 2.5 \text{ г/см}^3$  в качестве характерной плотности частиц грунта, и радиус  $a$  выражен в единицах 100 мкм. При взрывах на поверхности и под поверхностью образуются частички грязи и осколков, размеры которых превышают размеры частиц, характерных для взрывов на большой высоте. Такие частицы будут осаждаться на почву с характерным временем

$$t_d \approx H_s/v \approx 190 \text{ КТ}^{0.2} a^{-2} \text{ с} \quad (8)$$

где радиус  $a$ , как и выше, выражен в единицах 100 мкм. Частицы с размером 10-100 мкм поэтому будут оседать за времена, измеряемые от нескольких минут до нескольких часов, а это гораздо короче, чем для взрывов на большей высоте. Это приводит к почти немедленному воздействию осевшего на поверхность излучения на людей, живущих в пределах нескольких км от места взрыва, даже при взрывах с относительно низкой мощностью.



**Рисунок 5:** Испытание «Кабриолет» мощностью 2,3 кт проводилось при глубине заложения 52 м. При этом образовалась воронка глубиной 36 м и диаметром 110 м. Волна у основания, обладающая высокой радиоактивностью, достигла диаметра около  $2.5 \text{ км}^{17}$ .



**Рисунок 6:** Доля  $F_c$  образованной при взрыве полной радиоактивности, связанная с локальной дозой гамма-излучения от радиоактивных осадков, в зависимости от приведенной глубины заложения заряда (см. табл.2). Величина  $F_c$  нормирована на  $3380 \text{ (миля)}^2 \cdot \text{рад}/(\text{час} \cdot \text{КТ})$  через час после взрыва; коэффициент экранирования окружающей местностью принят равным  $0.8^{17,18,19}$ .

Радиоактивность связана с распадом большого числа радионуклидов. С достаточной точностью локальная доза уменьшается со временем по степенному закону

$$R = R_1(x,y)t^{-1/2} \quad (9)$$

где  $R_1$  - полная доза гамма-излучения в некоторый момент (обычно один час) после взрыва<sup>16</sup>. Такое степенное приближение справедливо для отрезков времени от нескольких минут до шести месяцев. Величина  $R_1$  будет зависеть от расстояния до места взрыва, характера окружающей местности, погодных условий и т.п. На рис.7 представлены изодозы для испытания «Дэнни Бой» с мощностью  $0.43 \text{ кт}$ . Глубина заложения равна  $34 \text{ м}$  (а приведенная глубина равна  $45 \text{ м}$ ) и при этом выпавшая доля полной радиоактивности  $F_c$  составляет  $0.04$ .

Можно грубо представить картину выпадения осадков в виде гауссовской кривой с характерным радиусом, равным радиусу облака, распространяющегося в виде волны вдоль поверхности (см. уравнение 6)

$$R_1 = R_c \exp(-r^2 / R_s^2) \quad (10)$$

Нокс<sup>17</sup> выразил полную активность испытаний по программе «Плоушер» в виде поверхностного интеграла<sup>22</sup>

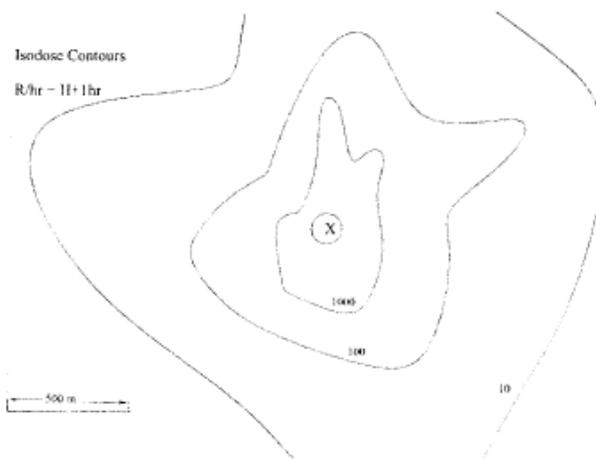
$$AI = \int R_1 dA = 3380 F_c \text{ (миля)}^2 \cdot \text{рад}/(\text{час} \cdot \text{КТ}) \quad (11)$$

где  $F_c$  - доля полной выделенной при взрыве радиоактивности, связанная с локальными осадками (см. табл.2 и рис.7). Если бы равномерно распределить радиоактивные осадки от

<sup>22</sup> Гласстон утверждает, что соответствующий поверхностный интеграл равен примерно  $2900 \text{ (миль)}^2 \cdot \text{рад}/(\text{час} \cdot \text{КТ})$  [см. ссылку 16]. Но поскольку мы выводим полную активность из доли  $F_c$ , нам больше подходит нормировка Нокса [см. ссылку 16].

килотонного взрыва на поверхности ( $F_c = 1$ ) площадью в квадратную милю, то доза составит 3380 рад/час. Подставив уравнение (10) в интеграл, получим

$$R_c = (F_c A_l) / (\pi L_B^2) \approx 2800 F_c \text{ КТ}^{0.5} \text{ рад/час} \quad (12)$$



**Рисунок 7:** Приблизительные контуры изодоз, полученных через час после взрыва, для испытания «Дэнни Бой» мощностью 0.43 кт. Заложение заряда на глубину 34 м (приведенная глубина 45 м) уменьшает выпавшую долю полной радиоактивности до 0.04. Практически любой человек, находящийся внутри контура 100 рад, получит смертельную дозу излучения, если быстро его не эвакуировать<sup>23</sup>.

### Оценка смертельных случаев от проникающего в грунт оружия

Смертельные случаи от проникшей в грунт радиации в основном связаны с ионизирующим излучением локальных осадков. Полная доза между временем выпадения осадков  $t_d$  и временем эвакуации  $t_e$  равна

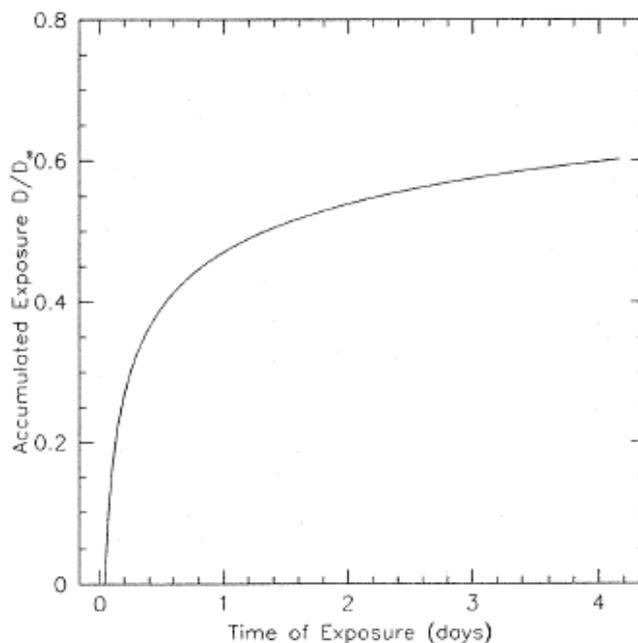
$$D = \int_{t_d}^{t_e} R dt = 5R_1(t_f^{-0.2} - t_e^{-0.2}) \equiv R_1 f \quad (13)$$

Величина  $f$  зависит от выбора моментов выпадения и эвакуации. При  $t_d = 0.5$  часа и  $t_e = 3$  часа значение  $f$  составит 1.7, а для  $t_d = 0.1$  и  $t_e = 12$  часов –  $f = 4.9$ . Проинтегрированная доза облучения в зависимости от срока экспозиции отложена на рис.8. Отметим, что большая часть интегрированной дозы облучения определяется несколькими первыми часами. Это оставляет мало времени для эвакуации.

Серьезные последствия начинают проявляться при полных дозах порядка 100-200 рад. В официальных американских оценках предполагается, что полная доза в 450 рад вызовет 50% смертельных случаев в течение 60 дней заболевания (LD-50 = 450 рад). Однако, обычно считается, что синергетические эффекты доз облучения совместно с травмами и стрессами, связанными с ядерным взрывом и его последствиями, уменьшают это значение, так что LD-50 лежит где-то между 250-450 рад; соответствующая доза стопроцентного смертельного исхода лежит в пределах 400-600 рад<sup>24</sup>. Таким образом, смертельный исход от облучения составит 100% внутри контура, характеризуемого величиной  $R_1 = D/f$  порядка 100-200 рад, при сроках эвакуации  $t_e$  около 3 часов.

<sup>23</sup> Captain M.M. Williamson, Fallout Calculations and Measurement. In *Engineering with Nuclear Explosives: Proceedings of the Third Plowshare Symposium*, pp.139-152. University of California, Lawrence Radiation Laboratory, April 1964.

<sup>24</sup> W. Daugherty, B. Levi and F. von Hippel, "The Consequences of 'Limited' Nuclear Attacks on the United States", *International Security*, 10(4) (1986), pp.3-45.



**Рисунок 8:** Полная доза облучения в зависимости от сроков после выпадения осадков (уравнение 13). Большая часть дозы накапливается за первые сутки, еще до того, как сможет эвакуироваться основная часть любого городского населения.

Функция летальности  $L(D)$  определяет долю смертей, произошедших среди населения, облученного до полной дозы  $D$ . Выше некоторой максимальной дозы  $D > D_1$  смерть очевидна, так что  $L=1$ , а ниже минимальной дозы  $D < D_0$  нет смертей за небольшие сроки, так что  $L=0$ . Проведем для функции летальности линейную аппроксимацию между двумя предельными случаями

$$L(D) = (D - D_0)/(D_1 - D_0) \quad D_0 < D < D_1 \quad (14)$$

Смерть возникает с вероятностью 50% при дозе  $D_{50} = (D_0 + D_1)/2$ .

Полное число ожидаемых смертельных случаев – это просто доля смертельной дозы  $L(D)$ , умноженная на плотность населения  $\sigma$  и проинтегрированная по всей площади

$$N = \int L[D(r)]\sigma(r)dA \quad (15)$$

При постоянной плотности населения этот интеграл можно явно вычислить с использованием функции Гаусса (см. уравнение 10)<sup>25</sup>. Вклад от промежуточных областей  $D_0 < D < D_1$  обычно мал. В хорошем приближении надо учитывать только ту область, где  $D > D_1$  и  $L=1$ . Тогда находим следующий результат

$$N \approx \sigma\pi R_S^2 \ln[2800fF_cKT^{0.5}/D_1] = 3.3 KT^{0.6}\sigma \ln[5.6fF_cKT^{0.5}] \quad (16)$$

(величина  $\sigma$  имеет размерность  $\text{км}^{-2}$ ). При вычислении использовались уравнение (6) и значение  $D_1 = 500$  рад, а принятая плотность городского населения типична для стран третьего мира<sup>26,27</sup>. Если положить  $fF_c \geq 0.5$ , это подразумевает несколько десятков тысяч смертей от взрыва мощностью 1 кт.

<sup>25</sup> Результат таков  $N = \sigma\pi R_S^2 \ln[fR_c/D_1] + \sigma\pi R_S^2 [1 - \ln D_1/(D_1 - D_0)]$ .

<sup>26</sup> Например, плотность населения Багдада на 1985 г. превышает 5238 человек на кв. км.

<sup>27</sup> Central Intelligence Agency, CIA Atlas of the Middle East. Адрес в сети Интернет: <http://www.lib.utexas.edu/maps/atlas.east/iraq.pop.jpg>, 1993.

## ДРУГИЕ ЭФФЕКТЫ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Будет присутствовать ряд дополнительных разрушительных эффектов, хотя в чем-то не столь разрушительных для человеческой жизни по сравнению с описанными выше радиоактивными осадками.

**1. Сейсмические волны.** Только несколько процентов всей энергии при заглубленном ядерном взрыве передается сейсмическим волнам, проникающим на большие расстояния. Тем не менее, даже взрыв мощностью 1 кт вызовет заметные структурные повреждения из-за сейсмических движений рядом местом взрыва. Наиболее серьезные повреждения происходят от волн с частотами примерно 5-10 Гц, которые лежат вблизи естественных резонансов высоких зданий. На таких частотах серьезные структурные повреждения возникают при ускорениях выше 0.1 g, а полное разрушение – при ускорениях порядка g и выше. По эмпирическим данным поверхностное ускорение порядка  $(2-10)KT^{0.7} R^{-2}$  см/с<sup>2</sup>, где R – расстояние (в км) от источника взрыва. Поэтому можно ожидать полного разрушения зданий из-за сейсмических волн на расстояниях  $R \leq 0.5KT^{0.35}$  км и значительных повреждений вплоть до расстояний  $R \leq 2KT^{0.35}$  км.

**2. Воздушный взрыв, индуцированный движением грунта.** Когда сейсмическая ударная волна от заглубленного взрыва достигает поверхности, грунт быстро перемещается вверх и вниз, напоминая поршень, что вызывает резкий импульс давления воздуха. Неукрепленные структуры серьезно повреждаются при избыточном давлении около 0.15 атм и полностью разрушаются при 0.4 атм. На основе данных, опубликованных в книге Гласстона и Долана<sup>16</sup>, можно ожидать, что серьезные повреждения жилым домам и связанные с этим травмы от падающих материалов и обломков произойдут на площади порядка нескольких  $KT^{1/3}$  квадратных километров.

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Сторонники создания нового поколения ядерных боеголовок малой мощности редко конкретизируют ситуации, где ядерные устройства оказались бы способными выполнить уникальные задачи. Один из их четких сценариев заключается в том, чтобы применить эти боеголовки в качестве замены обычных вооружений для нападения на сильно заглубленные сооружения. Но на основе проведенного нами анализа такая задача не кажется практичной или возможной без создания массового радиоактивного загрязнения.

Ядерное ПГО малой мощности окажется способным разрушить только относительно мало заглубленные сооружения. Несмотря на возрастающую эффективность заглубленного взрыва, даже боеголовка мощностью 1 кт не сможет разрушить структуру, защищенную бетоном толщиной более 30 м. Все еще нужны боеголовки с очень большой мощностью (100 кт и выше), чтобы разрушить объекты, помещенные за защитой, эквивалентной 100 м бетона.

Возможность проникновения снарядов с большой кинетической энергией ограничена пределом прочности оболочки снаряда и способностью компонентов оружия выдержать удар, вызванный соударением с грунтом. Показано, что снаряд длиной 3 м, изготовленный из самой прочной стали, не сможет пройти в железобетон глубже, чем на 12 м. Ядерный взрыв на такой глубине просто приведет к выбросу грунта из большой воронки и образованию радиоактивного материала, который выпадет на местное население в виде радиоактивных осадков.

## Благодарности

Автор хотел бы поблагодарить Фрэнка фон Хиппеля за первоначальное предложение этой темы и за внимательное руководство. Очень высоко оцениваются полезные обсуждения с Халом Фейвесоном, Джеффом Форденом, Джошуа Хэндлером, Зиа Мианем, Грэггом Мелло, Павелом Подвигом, Шероном Винером и Дэвидом Райтом.