

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ ПРОТИВ БИОЛОГИЧЕСКИХ АГЕНТОВ В ПОДЗЕМНЫХ БУНКЕРАХ

Майкл Мэй, Захару Халдeman

В этой работе рассматриваются результаты некоторых расчетов эффективности проникающих в грунт ядерных боеприпасов мощностью от 1 до 10 килотонн против целей, содержащих биологические агенты. Эффективность зависит от деталей конструкции бункеров, от того, как хранятся биологические агенты, от расположения точки взрыва по отношению к бункеру, контейнерам с биологическими агентами и земной поверхности, от мощности взрыва и от геологии площадки взрыва. При определении эффективности решающую роль играет полнота стерилизации. Однако, для наиболее вероятных случаев полная стерилизация не может быть гарантирована. Более точные вычисления и эксперименты со специфическими типами целей могут повысить точность подобных предсказаний для таких целей, но останутся значительные неопределенности, относящиеся к реальной геологии, реальном расположении целей, и положению точки взрыва относительно цели. По результатам предварительных вычислений, потери от наземного воздействия подземных ядерных взрывов будут меньше потерь от распространения большого количества биологических агентов.

Статья получена 8 июня 2003 г. и принята к опубликованию 20 сентября 2003 г.

Авторы выражают благодарность Лью Гленну, Хансу Крюгеру, Грегу Мело, Робу Нелсону, Майло Нордайку, Роджеру Спиду, и Гэри Страдлингу за разъяснения и ссылки. Авторы полностью отвечают за любую ошибку в этой работе.

Авторы работают в Центре по сотрудничеству по международной безопасности, Стэнфорд, Калифорния, США

Почтовый адрес: Michael May, Center for International Security Cooperation, Encina Hall, Serra Street, Stanford, CA 94605-6165. Электронный адрес: mmay@stanford.edu

ВВЕДЕНИЕ

В этом отчете рассматриваются результаты некоторых расчетов и оценок, сделанных в отношении использования проникающих в грунт ядерных боеприпасов против целей, содержащих биологические агенты. Использование ядерного оружия против таких целей рассматривалось потому, что обычные взрывы, которые могут разрушить такие цели, как полагают, могут не дезактивировать эффективным образом биологические агенты, но могут, вместо этого, выбросить их, или некоторую их часть, в атмосферу. С другой стороны, считается, что ядерные взрывы, с присущими им очень высокой температурой и полем радиации, могут дезактивировать некоторую, или большую часть этих агентов.

Отчет состоит из двух разделов и заключения. В первом разделе рассматривается феноменология подземных ядерных взрывов. Большая часть этого раздела основана на данных, полученных в американской программе Plowshare по применению ядерных взрывов в мирных целях, проводившейся в 1960 – 70 г.г. Во втором разделе рассматриваются механизмы, посредством которых ядерное оружие может уничтожить биологические агенты, хранящиеся под землей, в бункерах, или каким-либо другим способом. Эффективность ядерных взрывов зависит от деталей конструкции бункеров, от того, как хранятся биологические агенты, от расположения взрыва по отношению к бункерам, емкостям с биологическими агентами, земной поверхности, от мощности взрыва, и от геологии площадки взрыва. Параметры проникновения снарядов в различные геологические формации базируются на экспериментах и расчетах, проведенных в Сандийской национальной лаборатории. Экспозиция излучению и теплу базируется на расчетах Ливерморской национальной лаборатории Лоуренса и на наших собственных оценках. Уязвимость биологических агентов определялась по различным несекретным источникам.

Полная версия этого отчета включает третий раздел, описывающий наземные эффекты ядерного взрыва, который во всех случаях приводит к выбросу на поверхность¹. Эти эффекты включают локальную радиоактивность, так же, как и значительные осадки, воздушную ударную волну, и сейсмическую активность на расстояниях порядка километров. Все оценки основаны на хорошо известных данных о воздействии ядерного оружия и расчетах. В заключении подытоживаются основные результаты и выделяются определенные политические последствия.

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

Основной идеей использования ядерного оружия против целей с биологическими агентами является то, что возникающее тепло и излучение смогут обезвредить биологические агенты, а не только разбросать их. Эта идея применима к целям с биологическими агентами, расположенными как на поверхности, так и под землей. Случай поверхностных целей с биологическими агентами рассматривался, среди прочих, Хансом Крюгером², и он не будет рассматриваться здесь далее. Идея использования проникающих в грунт ядерных боеприпасов против подземных целей (бункеров) состоит в том, что тепло и излучение будет передаваться цели более эффективно, если ядерный взрыв произойдет так близко, как это возможно, от подземной цели. В этом разделе мы подытожим сложную феноменологию, относящуюся к ядерным взрывам с двумя характерными значениями энерговыделения, 1 и 10 килотонн, на возможных глубинах взрыва, которых можно ожидать от проникающих в грунт ядерных боеприпасов против подземных целей с биологическими агентами (от нескольких до 30 метров, в зависимости от типа материала, которым закрыты цели). Мы приведем масштабные зависимости, обычно в форме диаграмм, для других значений энерговыделения и глубины взрыва, там, где это возможно.

Современные знания о феноменологии подземных ядерных взрывов в основном являются результатами, полученными в серии экспериментов, проведенных в США в рамках программы Plowshare в 1960 – 70 г.г.³ и в аналогичной, но более широкой программе ядерных взрывов в мирных целях, проведенной в СССР примерно в то же время. Расчеты, проведенные после этого, были нормированы к этим результатам. Результаты новых вычислений предприняты для новых геологических областей и для различных глубин взрыва могут считаться верными в лучшем случае до одной значащей цифры, нередко только с точностью до множителя 2. Частично это связано со сложностью вычислений, требующих большей точности, а частично с трудностью адекватного указания ключевых переменных, таких, как тип материала грунта.

Мы ограничиваем наше описание взрыва, сопровождающимся образованием воронки (продукты которых вырываются на поверхность с образованием взрывной воронки), поскольку выделения энергии, достаточные для нагрева и облучения крупных целей являются достаточно большими для того, чтобы образовать кратер на глубинах, которые могут быть достигнуты проникающими в грунт боеприпасами. Феноменология взрывов на выброс была описана в нескольких работах⁴. Подробный анализ многих результатов, полученных в программе Plowshare, приведен в сборнике Теллера и др. «Конструктивное применение ядер-

¹ Полная версия данной работы содержит дальнейшие дополнительные описания и подробности (включая расчеты и диаграммы) различных качественных и количественных аспектов использования проникающих в грунт ядерных боеприпасов против подземных целей с биологическими агентами. Мы отметили, в каких местах сокращенной версии был пропущен значительный материал. Полный отчет – по адресам <http://www.princeton.edu/~globsec/publications/SciGloSc.shtml> (март 2004 г.) и <http://cisac.stanford.edu> (март 2004 г.).

² Hans Kruger, "Radiation Neutralization of Stored Biological Warfare Agents with Low-Yield Nuclear Warheads," UCRL-ID-140193, Lawrence Livermore National Laboratory (August 21, 2000).

³ Lawrence Radiation Laboratory et al., *Proceedings of the Third Plowshare Symposium, Engineering with Nuclear Explosives* (Berkeley: University of California Press, 1964).

⁴ См. также Samuel Glasstone and Phillip J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons*, 3rd ed. (U.S. Departments of Defense and Energy, Third Edition, 1977), pp. 58 – 63.

ных взрывов»⁵, на которую мы будем далее ссылаться как на сборник Теллера и др. В этой работе можно найти также многие из приведенных здесь общих сведений.

Энергия ядерного взрыва высвобождается менее, чем за микросекунду после детонации⁶, порождая начальные температуры порядка 10 миллионов градусов Кельвина и начальные давления порядка миллиона атмосфер. Окружающий материал (грунт и элементы конструкции) испаряется, ионизируется и начинает быстро расширяться под большим давлением. В результате взрыв образует полость и посылает в грунт впереди образующейся полости сильную ударную волну. Эта ударная волна поначалу достаточно сильна для того, чтобы разрушить как скальный грунт, так и любую встречающуюся конструкцию, но ослабляется по мере распространения. Для рассматриваемых здесь энерговыделений в течение доли секунды ударная волна ослабляется до упругой волны на расстоянии в несколько сотен метров, или еще на более коротком расстоянии в поглощающем энергию материале, таком, как аллювий.

В течение нескольких микросекунд с момента детонации температура внутри полости уменьшается ниже температуры испарения грунта, но остается выше его температуры плавления. При камуфлетных взрывах (без выброса грунта) отношение расплавленного грунта к испаренному составляет примерно 8 к 1⁷. Расплавление обычно заканчивается в течение не более десятков миллисекунд, так что это отношение, вероятно, сохраняется также и для взрывов, которые образуют воронку.

В случае достаточно глубокого камуфлетного взрыва рост полости останавливается, когда давление в полости станет равно давлению находящегося выше грунта. Для взрыва с выбросом, который образует воронку, как в случае проникающих в грунт боеприпасов, баланс давления не будет достигнут до тех пор, пока ударная волна не достигнет поверхности. В этот момент времени поверхность грунта отколется вверх под действием давления в ударной волне и в грунт начнет двигаться волна разрежения⁸ от поверхности грунта в направлении полости. Когда волна разрежения достигнет расширяющейся полости, она зафиксирует горизонтальный радиус полости, так что рост полости станет асимметричным, и в основном направленным вверх, и более медленным, чем раньше. Радиус полости, используемый здесь, является радиусом нижней половины полости, образовавшейся в результате испарения, расплавления, и расширения под давлением горячих газов до тех пор, пока давление не будет высвобождено в результате расширения. Непосредственно после выброса радиус полости может находиться в интервале от нескольких метров до нескольких десятков метров в зависимости от энерговыделения, глубины взрыва, и материала грунта. Расстояния и времена, при которых достигается заданное давление или температура, пропорциональны кубическому корню из энерговыделения. Во время периода формирования полости в геологических формациях, для которых имеются данные испытаний, температура равна тысяче градусов Кельвина или больше. К этому моменту большая часть энергии взрыва сохраняется в веществе полости.

Период непосредственно после возврата волны разрежения является фазой газового ускорения. В то время как нижняя часть полости достигает своего полного размера, расширяющиеся вверх в полости газы придают грунту над ней дополнительный толчок. История давления в течение фазы газового ускорения, вместе с глубиной взрыва и составом грунта (в особенности, количеством летучих составляющих, таких, как вода) определяют форму и размеры воронки. Вообще говоря, радиус и глубина воронки подчиняются несколько иному масштабному соотношению, чем процессы на начальной стадии, более близкому к степени с показателем 1/3,4⁹. Большая часть материала в воронке падает либо в саму воронку, либо на окружающий гребень. Материал может оказаться сжатым или растрескавшимся, в зависимости от его начального состояния, и может захватить большую часть радиоактивности

⁵ Teller et al., *The Constructive Uses of Nuclear Explosives* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1968).

⁶ Там же, стр. 129.

⁷ Там же, стр. 132.

⁸ Волна разрежения представляет собой область с более низким давлением и плотностью, разгружающая при своем продвижении высокое давление.

⁹ Milo D. Nordyke, "On Cratering: A Brief History, Analysis, and Theory of Cratering," UCRL-6578, Lawrence Livermore National Laboratory (1961).

или других выброшенных материалов.

Когда эти события переходят одно в другое, каждое из них устанавливает начальные условия для последующих, и для целей анализа полезно иметь в виду четыре довольно различных временных периода:

Период 1. В течение микросекунды после взрыва, во время которого происходит начальное нейтронное и гамма-облучение на нескольких средних длинах свободного пробега по поглощению¹⁰, тепловое излучение от взрыва нагревает и испаряет непосредственные окрестности. Во время этого периода не происходит существенного перемещения вещества.

Период 2. От нескольких до нескольких сотен миллисекунд после взрыва (в зависимости от глубины взрыва и природы грунта), во время которых высокое давление взрыва создает полость, радиоактивные продукты деления и прочая радиоактивность смешиваются с испаренным материалом и ударная волна уплотняет грунт и достигает поверхности земли. После этого волна разрежения возвращается к полости, которая продолжает расти только вверх, но еще не происходит большого выброса газов.

Период 3. Вслед за периодом 2 и до нескольких секунд после взрыва, во время которых подземная полость прорывается к поверхности, образуя воронку, а некоторая часть радиоактивности с некоторыми из оставшихся биоорганизмов перемешиваются с выбросом. В этом интервале времени проявляется также воздействие подземной ударной волны, воздушной ударной волны, и сильных сейсмических волн. Зона уплотненного и впоследствии растрескивающегося грунта обычно простирается до расстояний, превышающих конечный радиус полости в полтора – три раза. Размер трещин в этой зоне разрушения зависят от природы скального грунта и от геологических особенностей (например, от присутствия грунтовых вод или других неоднородностей).

Период 4. От секунд до часов после взрыва, во время которых радиоактивное облако движется по ветру, и радиоактивные осадки могут выпасть или вымыться дождем.

Время выброса, радиус полости и температура (периоды 1 и 2)

В последующем мы представим оценки радиуса полости после того, как полость перестанет расти во всех направлениях, кроме направления вверх (т.е., после разрежения), температуры, с которой газы будут вырываться в атмосферу, и количества грунта, испаренного и расплавленного в течение ранней фазы периода 2. Массы расплавленного и испаренного грунта влияют на радиус полости, температуру в полости, и дозу радиации, полученную биологическими агентами. Время выброса определяет продолжительность экспозиции биологических агентов к воздействию тепла и радиации, в то время как время разрежения влияет только на радиус полости. Радиус полости важен, поскольку за пределами полости до прорыва газов не будет заметного количества тепла или радиации, что означает, что любые биологические агенты, не попавшие в полость, не будут стерилизованы до прорыва газов. Мы отметим, что «время прорыва» является приближенным понятием. Мы оцениваем его, предполагая, что рост полости по вертикали продолжается с постоянной скоростью после того, как волна разрежения вернется в полость, и что прорыв происходит на начальном положении поверхности земли. Оба эти предположения, скорее всего, неправильны. Кроме того, прорыв газов не происходит мгновенно. Эти неопределенности влияют на длительность облучения биологических агентов.

Для расчета времени прорыва следует: (1) сначала сложить времена прохождения ударной волны и волны разрежения; (2) определить скорость, с которой расширяется полость в момент возвращения волны разрежения к границе полости, и (3) использовать эту скорость для определения времени, которое потребуется полости для прохождения оставшегося расстояния до первоначальной поверхности земли. В результате, время прорыва равно времени разрежения плюс разность глубины и радиуса полости, поделенной на ско-

¹⁰ Средняя длина свободного пробега для поглощения представляет собой среднее расстояние, на котором поглощается нейтрон или гамма-квант. Средняя длина свободного пробега для поглощения зависит от энергии нейтрона или гамма-кванта. Поглощение нейтронов может произойти после серии столкновений (рассеяния), во время которых нейтрон теряет энергию.

рость полости¹¹.

Мы рассмотрим ниже взрывы на выброс с энерговыделением в 1 и 10 килотонн на глубинах в 10 и 30 метров в пустынном аллювии (один набор результатов для базальта). Мы также включим некоторые более качественные замечания по граниту и бетону. Гранит является прочным скальным грунтом с большой скоростью звука, в то время как аллювий относится к грунтам со значительно меньшей скоростью звука. В бетоне ядерных взрывов не проводилось, но характеристики такого взрыва могут быть определены и они могут оказаться важными для оценки воздействия ядерного взрыва на сильно упрочненные цели. Глубины выбирались в качестве оптимистических возможностей проникновения некоторых проникающих боеприпасов. Наши оценки были сделаны на основе приведенных времен прихода ударной волны и роста полости, нормированного для этих результатов, вместе с приближенными данными по уравнениям состояния для рассматриваемой среды, показанными в табл. 1.

Табл. 1. Некоторые свойства среды.

Свойство	Гранит	Аллювий
Объемная плотность, г/см ³	2,67	1,52
Скорость звука, км/сек	5,44	0,82
Теплота плавления (10 ¹² эрг/г)	0,035	0,075
Теплота испарения (10 ¹² эрг/г)	0,219	0,229

Источник: James F. Shackelford, ed., *CRC Materials Science and Engineering Handbook*, 3rd ed. (Boca Raton, FL: CRC Press, 2001); и Teller et al., Table 4.2, p. 162.

Мы начнем с некоторых качественных оценок проникновения в скальный грунт. Данные и расчеты из работы Юнга и др.¹² приводят к оценке верхнего предела проникновения в 10 метров для некоторых типов скального грунта при использовании разумных параметров веса, диаметра и конфигурации боеприпаса¹³. Антун, Ломов и Гленн¹⁴ показали, что пять последовательных ударов пенетратора в одну и ту же дыру в граните позволили проникнуть всего лишь на 5,6 метра, когда первая бомба проникла на 2,1 метра, а пятая – на 0,4 метра. Оценка Нелсона¹⁵ по проникновению 4-метрового пенетратора в бетон составила 12 метров. Гленн¹⁶ отметил, что бетонные конструкции обычно не очень хорошо заделаны, и позволяют поперечные смещения, которые ограничивают проникновение. Собрав все эти данные вместе и отметив, что изменение проникающей способности от параметров грунта и конфигурации является довольно слабым, кажется маловероятным, что глубина проникновения в любой прочный грунт превысит 10 метров, хотя детали будут зависеть от параметров площадки цели и от конструкции снаряда. По всей вероятности, глубина проникновения в гранит будет значительно меньше. Поскольку ядерные взрывы не производились в больших бетонных конструкциях, мы не имеем феноменологических данных для таких событий. Взрывы проводились в граните, базальте, туфе, и других породах.

В самые ранние времена (несколько микросекунд), соответствующие максимальному ожидаемому проникновению в граните, расчеты параметров, относящихся к стерилизации

¹¹ Подробности, связанные с радиусом полости и временем выброса, включая методы и диаграммы, можно найти в полной версии этого отчета.

¹² C. W Young, "Penetration Equations," Sandia National Laboratories (October 1997); C. W Young, "Depth Prediction for Earth—Penetrating Projectiles," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, SM 3:813 (May 1969).

¹³ Пример приводится в полной версии этого отчета.

¹⁴ T. H. Antoun, I. M. Lomov, and L. A. Glenn, "Simulation of the Penetration of a Sequence of Bombs Into Granite," UCRL-JC-150778, Lawrence Livermore National Laboratory (November 12, 2002). Авторы благодарят д-ра Лью Гленна за многие полезные комментарии и критику.

¹⁵ Robert Nelson, "Low-Yield Earth-Penetrating Nuclear Weapons," *Science & Global Security* 10 (2002).

¹⁶ Лью Гленн, частное сообщение.

биологического агента, в особенности плохо определены. На этих глубинах проникновения является промежуточной между поверхностными взрывами и подземными взрывами. Радиус полости составляет несколько метров, температуры на короткое время достигают тысяч градусов Кельвина. Здесь еще может иметь место негидродинамический перенос энергии.

Для аллювия мы сделали оценки времен прорыва и радиусов полости в это время, исходя из интерполяции и экстраполяции к ранним временам из данных программы Plowshare и расчетов (смотрите Приложение 1). Количество испаренного вещества боеприпаса будет несущественно по сравнению с количеством расплавленного и испаренного грунта. Оценки количества расплавленного и испаренного грунта могут быть сделаны масштабированием по данным взрыва Hardhat (для гранита) и Sedan (для аллювия). Эти данные также позволяют нам оценить давления в ударной волне на максимальном расстоянии, где происходит испарение. Из этих значений давления и соответствующих степеней сжатия Гюгонио можно сделать грубую оценку температуры и связанной с ней степени ионизации и диссоциации при завершении испарения. Предполагается, что газ в полости за расходящейся ударной волной расширяется адиабатически, поскольку механизмы передачи тепла из газовой полости относительно медленны. (Конечно, перенос энергии через ударную волну впереди газовой полости не является адиабатическим.) Этот метод приводит к оценкам температуры прорывающихся газов в области 1000 градусов Кельвина для глубины взрыва 30 метров в аллювии и нескольких тысяч градусов Кельвина для глубины взрыва 10 метров в других материалах. Эти оценки имеют точность с фактором порядка 2 в любую сторону. Подробности приведены в Приложении 1.

Данные в табл. 2 применимы к пустынному аллювию, но они могут быть разумно представительны для других типов грунта, таких, как мягкие глины. Большая часть результатов была масштабирована по данным взрыва Sedan мощностью 100 килотонн с образованием кратера в аллювии, с некоторой дополнительной информацией из масштабированной истории ударной волны, полученной по 19 взрывам в аллювии, с использованием обычных и ядерных взрывных устройств. Эти данные не позволяют провести масштабирование для взрыва в 10 килотонн на глубине 10 метров. Значения для этого случая были рассчитаны с использованием одиночного экспериментального значения для прихода взрывной волны¹⁷ (среднего по 14 взрывам в аллювии), в предположении отношения удельных теплоемкостей γ для испаренной среды, равного 1,1, скорости звука в твердой среде в 0,82 метра в миллисекунду, и отсутствия замедления полости в первые несколько миллисекунд. Все эти предположения считаются разумными, но, тем не менее, результат является грубой оценкой.

Табл. 2. Значения времени прорыва в аллювии.

Мощность, глубина	Время прорыва, мсек	Радиус полости, м	Масса пара, т	Масса расплава, т
1 кт, 30 м	> 200	13	10^2	10^3
10 кт, 30 м	> 100	18	10^3	10^3-10^4
1 кт, 10 м	30	6	10^2	10^3
10 кт, 10 м	9	8	10^3	10^3-10^4

Мы можем только сделать оценки по порядку величины для массы испаренного и расплавленного грунта, используя сохранение энергии и данные по пиковым напряжениям.

Отверстие до поверхности, оставленное проникающим боеприпасом, может повлиять на феноменологию. В частности, ранняя феноменология проникающего боеприпаса может отличаться от плотного взрыва на выброс. Величина этого эффекта будет зависеть от диаметра отверстия. Учитывая эту информацию, можно сделать грубую оценку этого эффекта, предположив, что газ будет двигаться со скоростью волны разрежения через отверстие к поверхности. В то же самое время, по грунту вокруг отверстия будет двигаться ударная волна со скоростью, большей, скорости движения материала по отверстию, что приведет к закрытию отверстия. Направление этих изменений приведет к некоторому понижению давления и температуры в момент прорыва, но его величина остается непонятной. Похоже, что влияние на размеры полости и на времена экспозиции (которые масштабируются как куби-

¹⁷ См. ссылку [5], рис. 4.40, стр. 177.

ческий корень из давления) будет еще меньше. Для более точного описания феноменологии потребуются двумерные компьютерные вычисления.

Если биологические агенты находятся в конструкции, в которой имеются туннели, коридоры, или любые другие большие пустые пространства, то ранняя феноменология будет изменена более серьезно. Если значительная часть энергии уйдет в эти пространства, то процесс формирования полости изменится, и указанные времена и температуры также изменятся. Во втором разделе статьи мы рассмотрим одну такую конструкцию и оценим, как будут нарушены профили температуры и радиации.

В зависимости от конструкции цели, бетон может составить некоторую или даже большую часть испаряемого и расплавляемого материала, и это, в свою очередь, повлияет на размер полости при прорыве, время до прорыва, и температуру в этот момент. Бетон обладает меньшей прочностью на сжатие и на растяжение по сравнению с прочным скальным грунтом, несколько меньшей скоростью звуковой волны и волны сжатия, и значительно большим содержанием воды (20 – 50 процентов по сравнению с несколькими процентами)¹⁸. Эти характеристики согласуются с оценками более глубокого потенциального проникновения боеприпасов в бетон по сравнению со скальным грунтом, возможно, до 20 метров; большему максимальному радиусу полости, превышающему 10 метров для рассматриваемых значений энерговыделения и глубины взрыва; и длительности экспозиции порядка десятков миллисекунд. Бетон не является простым материалом в отношении таких важных параметров, как давление пара и скорость звука, и поэтому мы ограничимся качественными соображениями. Любые количественные предсказания феноменологии и эффективности ядерного взрыва в бетонном массиве будут зависеть от минералогии, пористости (сжимаемости), цементированности, атмосферного воздействия, содержания воды, а также от деталей процесса связи бетона с окружающей геологической средой.

Для целей определения воздействия на подземные бункеры, содержащие биологические агенты, мы отметим, что без определения конструкции и материалов бункеров, а также устройства контейнеров с биологическими агентами, правильными будут только оценки по порядку величины. Даже с такими исходными данными потребуются сложные вычисления для того, чтобы получить лучшие результаты по сравнению с приведенными здесь оценками по порядку величины.

Параметры кратера (период 3)

После того, как газы из полости прорвутся к поверхности, температура и давление в том, что было полостью, будут быстро уменьшаться, и их энергия быстро перейдет к кинетической энергии грунта и обломков. По наблюдениям, этот материал поднимается больше, чем на 600 метров над поверхностью земли. Когда он падает в свое исходное положение и вокруг него, он еще более уплотняет грунт. В конце концов образуется типичный неглубокий кратер с гребнем на краю, как показано на рис. 1.

Во всех представленных случаях образуются большие кратеры с радиусом и глубиной в интервале от 20 до 80 метров, в зависимости от энерговыделения и материала грунта¹⁹. Кратеры окружены гребнями различной высоты, составляющей заметную величину от глубины кратера и почти такими же широкими, как радиус кратера. Кратеры частично заполняются первоначально выброшенным материалом, в форме обломков или уплотненного материала, в зависимости от геологии. Геологические параметры, такие, как содержание воды, могут заметно изменить результаты. Отверстие, оставленное проникающим боеприпасом,

¹⁸ Представленные выводы основаны на материальных константах из справочника Charles T. Lynch, ed., *CRC Handbook of Materials Science* (Cleveland: CRC Press, 1974); на статьях Nordyke, Huggins, Terhune, Cherry and Peterson, Cameron and Scorgie из сборника *Peaceful Nuclear Explosions* (Vienna: International Atomic Energy Agency, 1970), в которых обсуждаются характеристики скального грунта, и отношение радиуса полости к прочности материала, а также на обсуждениях с профессором Робертом Татумом из Стэнфордского университета, кому мы выражаем благодарность.

¹⁹ Больше подробностей приведено в сборнике *Peaceful Nuclear Explosions* (см. предыдущую ссылку [18], а также в ссылке [5]). Некоторые примеры параметров воронки и объема раздробленного скального грунта приведены в полной версии этого отчета.

может повлиять на образование кратера, хотя его влияние, скорее всего, будет невелико.

Давление в зависимости от расстояния до взрыва (периоды 3 и 4)

В табл. 3 мы приводим пиковые напряжения на различных расстояниях от камуфлетных взрывов в граните. Эти давления являются пиковыми, но не стационарными. Взрывы на выброс не так хорошо связаны с грунтом, как полностью камуфлетные взрывы. Для получения более точных ответов необходимы двумерные расчеты до расстояний в несколько сотен метров. Гранит и прочие скальные породы обладают ненулевым пределом текучести, так что в этих расчетах скалярные давления должны быть заменены на тензор напряжений. Для сравнения, полностью камуфлетный взрыв в граните Hardhat привел к появлению пиковых радиальных напряжений, превышающих 1 кбар на 100 метрах и 100 бар на 500 метрах.

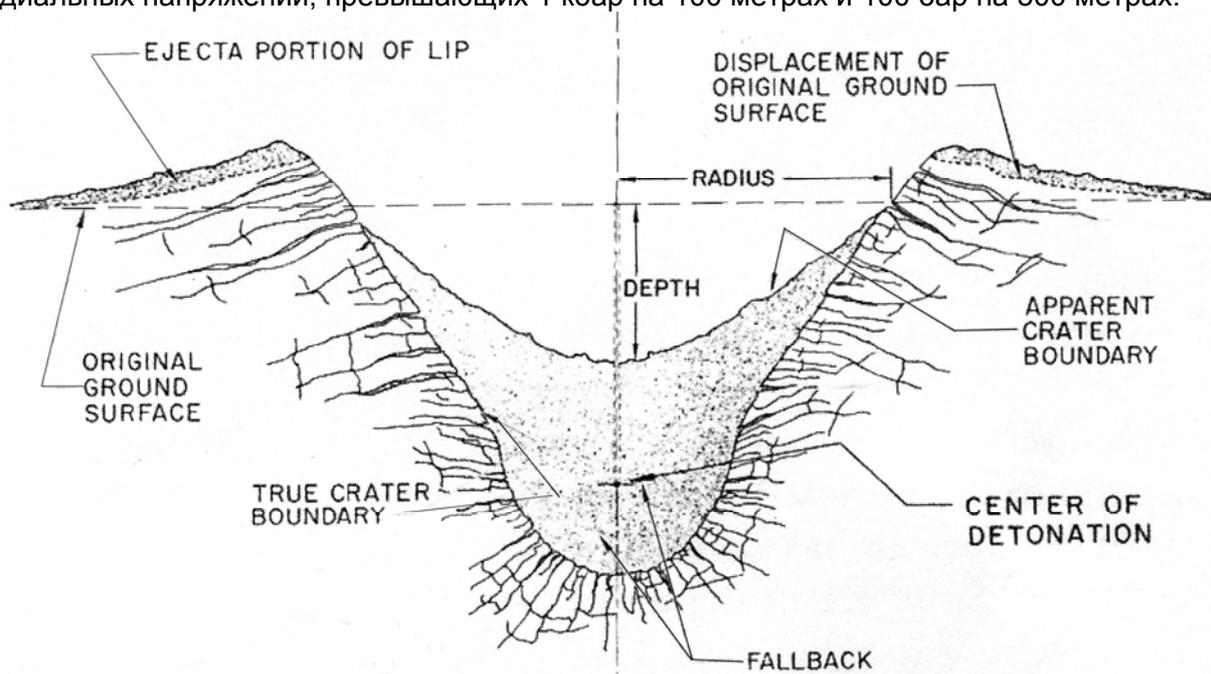


Рис. 1. Типичный неглубокий кратер с гребнем вокруг края. Надписи на рисунке (по часовой стрелке из левого верхнего угла): 1 – часть гребня из обломков; 2 - исходная поверхность земли; 3 – граница истинного кратера; 4 – выпадение; 5 – эпицентр взрыва; 6 – граница видимого кратера; 7 – смещение исходной поверхности земли; 8 – радиус; 9 – глубина. Источник: Teller et al.. *The Constructive Uses of Nuclear Explosives*, Fig. 4.49, p. 187 (McGraw-Hill Book Company, 1968).

Табл. 3. Радиусы для некоторых значений пиковых напряжений в граните.

Выделение энергии	Радиус для 1 кбар, м	Радиус для 3 кбар, м	Радиус для 20 кбар, м
1 кт	60	40	15
10 кт	140	90	30

Источник: интерполяция данных из Teller et al.. Fig. 4.4, p. 132, и Fig. 4.26, p. 165, при помощи табл 1.

В аллювии и других породах давление уменьшается быстрее, чем в скальном грунте. Такие породы, как аллювий, практически не имеют предела текучести. Аллювий обладает разнообразными свойствами и не может быть характеризован для того, чтобы получить надежное соотношение между давлением и расстоянием на больших расстояниях без подробной геологической информации. Даже если аллювий в среднем хорошо характеризуется, в нем существуют значительные локальные вариации. Неоднородности являются правилом. Имея в виду эти неопределенности и экстраполируя данные, приведенные в сборнике Теллера и др.²⁰, мы получим пиковое давление в 1 килобар на 40 метрах для взрыва в аллювии с энерговыделением в 1 килотонну.

Отверстие, оставленное проникающим боеприпасом, вероятно, также не будет оказывать заметного влияния на эти и другие относящиеся к поздним временам результаты.

РАЗРУШЕНИЕ БУНКЕРОВ И УНИЧТОЖЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

В этом разделе отождествляются механизмы, которые могут уничтожить биологические агенты и бункеры, и рассматривается степень их возможного уничтожения подземным ядерным взрывом. При оценке эффективности проникающих в грунт ядерных боеприпасов против подземных бункеров, содержащих биологические агенты, следует делать различие между уничтожением бункера и уничтожением биологических агентов. Бункер уничтожается некоторой комбинацией тепла, давления и прочих явлений в ударной волне. С другой стороны, механизмами уничтожения биологических агентов являются тепло и радиация. Консервативным, но реалистичным критерием для уничтожения самих биологических агентов может быть то, сможет ли взрыв предоставить достаточно тепла и излучения, чтобы уничтожить биологические агенты до того, как они выйдут на поверхность. После выброса другие воздействия, такие, как влияние атмосферы и радиоактивные осадки, могут дезактивировать выброшенные биологические агенты, но их эффективность еще более неопределенна.

Уничтожение биологических агентов теплом и радиацией

Мы перейдем к механизмам разрушения биологических агентов и начнем с воздействия радиации на биологические агенты. Существуют критерии стерилизации биологических агентов для экспозиций, аналогичных десяткам и сотням миллисекунд перед прорывом. Коммерческим стандартом стерилизации является интегральная доза радиации в 2,5 мегарад, а другие авторы указывают, что может оказаться достаточной доза в 1 мегарад²¹. Вероятно, что будут иметь значение специфическая природа биологических агентов и их среда хранения, так что наши результаты следует рассматривать только как иллюстративные.

Эффективность радиации ядерного взрыва зависит от конфигурации хранения биологических агентов и от точного расположения взрыва по отношению к этой конфигурации. В кратком анализе, таком, как этот, не имеется возможности исследовать все или даже большую часть вероятных конфигураций и расположений. Для целей этого раздела мы рассмотрим только два случая, которые охватывают интервал соответствующих параметров.

Вариант 1. Взрыв происходит внутри большого железобетонного сооружения, пустого, за исключением примерно 1000 бочек, каждая из которых содержит раствор с биологически-

²⁰ См. ссылку [5], рис. 4.32, стр. 171.

²¹ Hans Kruger, "Delayed Fission Debris Radiation Effect on Chemical and Biological Agents Stored in a Bunker," UCRL-130475, Lawrence Livermore National Laboratory (1998).

ми агентами. Этот случай подробно рассматривался Хансом Крюгером²², который анализировал бункер 60 метров длиной, 10 метров высотой, и 10 метров шириной, с бетонными стенами толщиной 1 метр, верхняя поверхность которого находится на глубине 10 метров ниже поверхности земли²³. Мы предполагаем, что боеприпас проник точно внутрь бункера, и что в соседних помещениях не находится никаких биологических агентов. Эти предположения базируются на определенных неявных обстоятельствах: точная локализация цели и точная доставка оружия, неглубокое расположение бункера и простая конструкция бункера. Как таковые, они представляют один тип предельных случаев.

Вариант 2. Взрыв происходит в грунте, или из-за того, что емкости с биологическими агентами отдельно зарываются в грунт, либо из-за того, что взрыв происходит за пределами бункера.

Для каждого варианта мы рассмотрим последовательность событий, которые могут привести к экспозиции биологических агентов. Полезно разделить эту последовательность на четыре процесса, разделенных во времени и (или) в пространстве. Здесь мы снова связываем эту последовательность событий с четырьмя периодами, ранее рассматривавшимися в этом отчете.

1. Мгновенное гамма-излучение (период 1). Около 5 МэВ на деление или $1,2 \cdot 10^{18}$ эрг/кт высвобождаются в виде мгновенного гамма-излучения²⁴. Коэффициент поглощения гамма-квантов с энергией от 0,5 до 2 МэВ в большинстве веществ лежит в пределах от 0,05 до 0,1 см²/г, что дает среднюю длину пробега от 5 до 10 сантиметров при плотности в 2 г/см³. Это приводит к исключительно высоким дозам (превышающим 10^{10} рад) в небольших массах (несколько тонн или менее) в непосредственной близости от взрывного устройства. Что войдет в эту облученную массу, будет зависеть от начального объема, в котором генерируются гамма-лучи, и природы вещества в непосредственном окружении. Для варианта 1 таким веществом будут любые бочки с биологическими агентами, находящимися в прямой видимости взрыва. Если биологические агенты находятся в жидком растворе, как предположил Крюгер (смотри сноску 21), то плотность, вероятно, будет близка к 1 г/см³. Если они находятся в твердой форме, например, как споры сибирской язвы, то плотность будет примерно такой же или несколько меньшей. Для варианта 2 материалом является окружающий грунт. В любом случае, количество эффективно облученных в этом процессе биологических агентов будет составлять, по всей вероятности, небольшую часть от всего запаса.

2. Мгновенное нейтронное и захватное гамма-излучение (период 1). Около 5 МэВ на деление или $1,2 \cdot 10^{18}$ эрг/кт появляется в форме нейтронов с энергией 2 МэВ, из которых некоторая часть повторно поглощается, производя новые деления²⁵. Эта доля будет зависеть от конструкции ядерного взрывного устройства, но были проведены оценки, показавшие, что имеется около одного избыточного нейтрона на деление, или около $0,6 \cdot 10^{18}$ эрг/кт (на основании $1,46 \cdot 10^{23}$ делений на килотонну). Дополнительные 10 МэВ в гамма-лучах ($2,4 \cdot 10^{18}$ эрг/кт) немедленно появляются в месте захвата нейтронов²⁶ и снова поглощаются на расстоянии 5 – 10 сантиметров. Сечение поглощения для нейтронов с энергией 2 МэВ в большинстве материалов мало по сравнению с сечением рассеяния и быстро возрастает по мере потери энергии нейтронами, так что расстояние, на котором поглощаются нейтроны (эффективная средняя длина пробега для поглощения) близка к расстоянию замедления. Это расстояние зависит от специфических элементов в окружающей среде, в особенности, от содержания легких атомов, так что содержание воды, например, может привести к различиям. Базальт представляет собой сухой скальный грунт, в котором около 50 % приходится на

²² Там же.

²³ В докладе Конгрессу по уничтожению укрепленных и глубоких подземных целей Министерства обороны и Министерства энергетики США от июля 2001 г. Отмечается, что многие подземные цели строились открытым методом. Такие цели являются неглубокими, и часто содержат всего лишь одно помещение. С другой стороны, имеются и более глубокие бункеры с многими помещениями. Наши результаты не зависят от количества материала, находящегося в бункере.

²⁴ См. табл. 6 в Department of Energy, Nuclear Physics and Reactor Theory Handbook (1993) по адресу <http://www.tpub.com/doenuclearphys/nuclearphysics31.htm> (31 марта 2004 г.).

²⁵ Там же.

²⁶ Там же.

SiO₂, менее 2 % на воду, и остальное – на прочие окислы²⁷. Полное сечение для нейтронов в области 1 – 2 МэВ для кремния равно 1 – 3 барна²⁸. Сечение $n - \gamma$ в области 1 – 2 МэВ для кремния равно 5 – 60 мбарн и увеличивается до 500 мбарн в области 400 кэВ²⁹, что соответствует средней длине свободного пробега в несколько сантиметров. М снова в обоих случаях это приводит к очень малой облученной массе во всех случаях, даже принимая во внимание тот факт, что перед захватом должно произойти несколько столкновений и что к итогу следует добавить среднюю длину пробега захватного гамма-излучения. Нейтроны также приводят к значительной наведенной радиоактивности. Мы учитываем этот эффект вместе с воздействием радиоактивности продуктов деления в следующем подразделе.

3. *Облучение от радиоактивного распада перед прорывом (период 2)*. В течение нескольких следующих миллисекунд радиоактивные продукты деления и наведенная радиоактивность перемешиваются с испаренным материалом. Для того, чтобы облучить этот материал, смешивание должно происходить только до размеров, сравнимых с соответствующими средними длинами пробега. Учитывая высокую температуру и скорость звука, такое перемешивание будет происходить за короткое время по сравнению с имеющимися несколькими миллисекундами. Учитывая массы испаренного материала, указанные в табл. 2 и 3, поначалу все излучение будет сосредоточено внутри этого материала. Некоторое перемешивание и облучение может также произойти с расплавленным материалом и стенками полости.

Сначала мы рассмотрим вариант 2. Здесь присутствие бочек с биологическими агентами не должно заметно повлиять на описанную ранее феноменологию. В табл. 2 и 3 показано, что перед прорывом имеется интервал порядка 10 миллисекунд для взрыва на глубине в 10 метров и порядка 30 – 100 миллисекунд на глубине порядка 30 метров. В течение этого времени энергия от гамма-радиоактивности продуктов деления (от деления Pu-239, но другие расщепляющиеся материалы дают примерно такие же значения) примерно равна 0,55 МэВ/деление в секунду³⁰. Используя среднюю энергию гамма-квантов в 0,5 МэВ, среднюю энергию бета-лучей в 1,2 МэВ³¹ и отношение гамма, бета, равное 3 к 2³², мы получаем бета-активность в 0,88 МэВ на деление в секунду и полную активность в 1,43 МэВ на деление в секунду, или $2 \cdot 10^{23}$ МэВ на килотонну в секунду для промежутка от 1 до 10 миллисекунд.

При однородном перемешивании биологических агентов с испаренным материалом (будь то грунт или раствор с биологическим агентом) на масштабах порядка сантиметров и для энерговыделений и масс, указанных в табл. 2 и 3, мы получим для времени порядка 10 миллисекунд, т.е., для глубины в 10 метров, дозу, меньшую 1 – 2,5 мегарад, необходимой для стерилизации большинства биологических агентов. Если время облучения для более глубоких взрывов увеличится до 100 миллисекунд, то доза облучения несколько превысит требующиеся 1 – 2,5 мегарад. Реальное время облучения до прорыва будет неопределенным по причинам, указанным выше в разделе по феноменологии. Кроме того, вероятно, что облучение будет неоднородным. Количество биологических агентов, облученных сильнее указанного критерия, может оказаться малым по сравнению с общим хранящимся количест-

²⁷ См. ссылку [5], табл. 3.3, стр. 96. Это объемные свойства. Пустоты в базальте могут быть заполнены дополнительной водой. Мы благодарим Грега Мелло за это и многие другие полезные замечания.

²⁸ См. J. K. Dickens et al., "²⁸Si (n, n' gamma) photon production cross sections for E(gamma) = 1,78 MeV, 5,0 ≤ E(n) ≤ 9,5 MeV," Oak Ridge Linear Accelerator (1975), <http://www.nea.fr/dbforms/x4swdisp.cgi710397.003>; и B.J. Atkins et al., "Neutron capture mechanism in light and closed shell nuclides," Oak Ridge Linear Accelerator (1975), <http://www.nea.fr/dbforms/x4swdisp.cgi730288.003>.

²⁹ Там же.

³⁰ См. ссылку [21], рис. 4, на базе измерений R. E. Sund and R.B. Walton, "Gamma Rays from Short-Lived Fission Products Isomers," *Phys. Rev.* 86:824 (1966).

³¹ См. ссылку [21], рис. 1 и 2, где показаны спектры бета- и гамма-лучей от деления на момент 2,2 сек, на базе J. K. Dickens et al., "Fission Product Energy Release for Times Following Thermal-Neutron Fission of Plutonium 239 and 241 between 2 and 14000 Seconds," *Nuc. Sc. Eng.* 78:126 (1981). Крюгер и другие отмечали, что спектр слабо зависит от времени. Зависимость спектра от энергии вызывающего деление нейтрона также невелика.

³² См. ссылку [30].

вом, зависящим от доли биологических агентов в полости (то есть, в зависимости от того, поглотила ли полость всю область хранения). Мы полагаем, что наши грубые оценки достаточны для того, чтобы заявить, что при глубине взрыва в 10 метров степень уверенности в полной стерилизации материала внутри полости мала. Для глубины взрыва в 30 метров уверенность в полной стерилизации материала внутри полости выше. Наши грубые методы оценки не могут дать более количественных результатов, но мы отметим, что неопределенность положения взрыва относительно точного расположения биологических агентов также преобразуется в меньшую уверенность в степени стерилизации.

Если взрыв происходит внутри укрепленного бункера, так, как это рассматривалось Крюгером (вариант 1), то можно ожидать, что последовательность событий существенно изменится. В частности, вероятно, что изменится перемешивание и время, имеющееся до образования кратера. Ни мы, ни Крюгер (в цитированном документе) не проводили двумерных и трехмерных вычислений, нужных для описания связанных процессов облучения, перемешивания, и гидродинамических течений, которые действительно имеют место. Мы сделали попытку оценить влияние конечного времени облучения и последующих перемещений, но очевидно, что это может быть сделано лишь весьма приблизительно.

Статические вычисления, сделанные Крюгером с помощью программы MCNP, здесь не могут быть значительно улучшены. Крюгер получил различные результаты в зависимости от того, какая часть из 200 литров предполагаемого биологического агента будет испарена, и того, как измеряется доза в паре или жидкости, но все результаты лежат в пределах от 2 до 10 мегарад на килотонну в секунду, с небольшими изменениями в течение первых 100 миллисекунд³³. В течение 10 первых миллисекунд снова получаемая величина лежит ниже критерия для стерилизации в 1 – 2,5 мегарад. После 100 миллисекунд стерилизация может быть полной, в зависимости от скорости накопления дозы, которая, в свою очередь, зависит от того, как много материала будет экспонироваться. Это соответствует выводу Крюгера о том, что для стерилизации биологических агентов потребуется от полусекунды до секунды, если только не была испарена лишь малая часть раствора.

Из приведенных выше оценок следует, что для обеих вариантов 1 и 2 полнота стерилизации будет сильно зависеть от облучения после начала прорыва и во время формирования кратера, когда условия предсказать будет труднее. Это будет сделано ниже. Кроме того, полнота стерилизации при любой глубине взрыва будет зависеть от особенностей конфигурации цели.

4. *Облучение в кратере и на его гребне (период 3).* Процесс образования кратера, вкратце описанный в первом разделе этого отчета, занимает много миллисекунд, во время которых биологические агенты, испарившиеся или нет, и окружающая их среда участвуют в сложном движении. По мере того, как полость прорывается к поверхности и происходит образование кратера, биологические агенты, оставшиеся в сильно радиоактивном кратере и на его гребне, получают дополнительную дозу радиации. Кроме того, выброшенные биологические агенты будут подвержены действию атмосферного излучения и, возможно, подвергнутся высушиванию. Для оценки этих эффектов потребуются дальнейшие исследования.

Большая часть биологических агентов (но не все), которые не останутся под землей, будут захвачены в высокорadioактивном материале кратера и гребня. Интерполируя объем раздробленного скального грунта при взрыве Danny Boy (Теллер и др., табл. 4-6, стр. 190-191), мы получим массу раздробленного скального грунта порядка 10^5 тонн, с которым будут перемешаны биологические агенты, без сомнения, неоднородно. Масса этого материала примерно в 1000 раз больше массы, перемешанной с газами полости. С другой стороны, длительность облучения возрастает от миллисекунд до того временного интервала, пока материал останется на месте. Если мы предположим, что так будет примерно в течение часа, то длительность облучения возрастет более, чем в миллион раз, так что доза теперь будет в диапазоне 20 – 100 мегарад. Из-за того, что процесс образования кратера в периоде 3 происходит при низких температурах, когда вещество остается твердым, то не удастся достичь такой степени перемешивания, какая характерна для полости. Вместо этого будут наблюдаться горячие и холодные пятна, в которых биологические агенты получают большее или

³³ См. ссылку [21], рис. 7 – 10. Применение наших грубых методов оценки для сценария 1 к этому случаю дает результаты того же порядка величины, что и более тщательные вычисления Крюгера.

меньшее облучение. Мы не смогли оценить этот эффект.

Из приведенного выше анализа мы делаем вывод, что простые методы оценки при отсутствии подробного знания цели не предоставляют надежного способа определить, какая часть биологических агентов в бункере будет уничтожена излучением. Имеется небольшой объем вблизи точки взрыва, размером несколько средних дин свободного пробега для гамма-квантов или несколько длин замедления для нейтронов, но в этом объеме в несколько кубических метров вряд ли будет содержаться большая часть биологических агентов. Значительно больший объем полости (сотни или тысячи кубических метров) перед прорывом будет поначалу содержать все высокорadioактивные продукты деления и наведенную активность, но только в течение не более десятков миллисекунд. За это время radioактивность продуктов деления и наведенная radioактивность создадут дозу, которая будет зависеть от деталей конфигурации и от материала, окружающего биологические агенты, но она может быть сравнима со стерилизующей дозой, но не будет очень сильно превышать ее. И, наконец, большая часть биологических агентов (или все) будут перемешаны с высокоактивными продуктами деления и наведенной radioактивностью в течение гораздо большего времени во время процесса образования кратера, в кратере и в обломках гребня. Для времен, превышающих несколько секунд, несомненно, биологические агенты, которые остаются в пределах пробега гамма- или бета-лучей, получают дозу в один мегарад или больше. Однако, не имеется способа узнать, каким образом биологические агенты будут распределены в обломках и окончательном radioактивном выпадении без гораздо более детальных расчетов и экспериментов. В частности, вероятно, что раствор с биологическими агентами, из-за различия в химии и растворимости, будет распределяться иначе, чем radioактивный материал, с соответствующим различным распределением обломков и radioактивных выпадений.

5. *Тепло.* Тепло может оказаться лучшим механизмом разрушения, чем излучение, хотя и здесь имеются неопределенности. Температуры в полости достигают порядка 1000 градусов Кельвина в интервале времени от нескольких миллисекунд до сотен миллисекунд (см. Приложение 1). Данные, относящиеся к эффективности такой тепловой экспозиции для различных специфических биологических агентов для таких периодов, указывают, что температуры порядка тысячи градусов Кельвина или выше при временах порядка 10 миллисекунд или выше дезактивируют большинство химических и биологических агентов³⁴. На основании наших оценок температуры и времени, биологические агенты, экспонированные к температурам полости, будут поэтому стерилизованы. Что произойдет за этими рамками пространства и времени, то есть, после прорыва газов из полости и в зоне разрушения скального грунта, простирающейся за пределы полости, гораздо менее определено.

В бункере (вариант 1, см. выше) начальное излучение от взрыва повысит температуру бочек с биологическими агентами на расстоянии нескольких метров до той же самой, или более высокой температуры, чем было рассчитано нами для материала грунта для того же самого расстояния. То же самое верно и для варианта 1. За расстояниями, примерно эквивалентными радиусу полости, приведенному в табл. 2 и 3, однако, тепло будет переноситься все еще твердому или жидкому биологическому агенту за времена, которые будут доступны до прорыва газов из полости. При характерных для этого процесса температурах перенос тепла излучением неэффективен. В этот период 2 перемешивание неиспаренных биологических агентов с горячими газами будет определять конвекция, поскольку именно тепло от газа будет диффундировать в еще твердый или жидкий материал. Для переноса тепла будет выделено всего несколько десятков, и не более сотен, миллисекунд. Очень грубая оценка диффузии тепла в газе при температуре в 10^4 градуса Кельвина приводит к временам диффузии порядка секунды на расстояниях по крайней мере порядка миллиметров³⁵. По-

³⁴ Гэри Страдлинг, частное сообщение, основанное на несекретных расчетах. Были проведены также секретные расчеты по стерилизации биологических агентов теплом и излучением.

³⁵ Теплопроводность для непроводящих твердых или жидких материалов по порядку величины равна 0,1 – 1 ватта на метр на градус Кельвина. См. Walter Benenson et al., ed., *Handbook of Physics* (New York: Springer-Verlag, 2002), p. 794. В том же справочнике приводятся удельные теплоты и плотности для интересующих нас материалов порядка от одной до нескольких тысяч джоулей на килограмм и тысяч килограммов на кубический метр. Сле-

этому может не хватить времени для нагрева бочек, которые не находятся в непосредственной близости от места взрыва за времена, доступные до прорыва, если перемешивание происходит только на масштабах сантиметров или больше. И снова для того, чтобы сделать более точную оценку эффективности взрыва для нагревания смеси, потребуется намного более точный анализ, соединенный с экспериментами.

Мы отметим, что намного более точные расчеты доступны современным компьютерам, и что можно провести полезные эксперименты с взрывчатыми веществами и трассировочными химическими реактивами, не обращаясь к ядерным взрывам или применению настоящих биологических агентов. С другой стороны, останутся неопределенности, относящиеся к расположению биологических агентов и положению эпицентра взрыва по отношению к цели.

Деактивация биологических агентов экспозицией в атмосфере

Если любые активные биологические агенты будут выброшены в атмосферу, то они могут быть дезактивированы различными природными механизмами, включая токсичное действие кислорода, загрязнениями (озоном, смогом), относительной влажностью, температурой, и ультрафиолетовым и видимым излучением. Эти факторы окружающей среды дезактивируют биологические агенты высушиванием, разрывом клеточной оболочки, или созданием помехи клеточным процессам. Определенной модели дезактивации биологических агентов в атмосфере не существует. Как отмечалось ранее, биологические агенты характеризуются различной химией, и фракционируются и конденсируются по-другому, чем радиоактивность. Их срок жизни также определяется разными законами. Для того, чтобы учесть не только химию и срок жизни биологических агентов, но и долговременное воздействие радиации, потребуются комплексные расчеты с учетом этих факторов. Мы не имеем данных, относящихся к судьбе биологических агентов в таком радиоактивном облаке.

Предварительные расчеты Ханса Крюгера³⁶ указывают, что при одинаковой погоде и условиях взрыва расстояние, на котором возникает заданный уровень потерь от спор сибирской язвы, существенно превышает расстояние, на котором возникает такой же уровень потерь от радиоактивных осадков, если только не будут уничтожены практически все споры. Если болезни, вызываемые биологическими агентами, имеют большую инфекционную активность по сравнению с сибирской язвой, то зависимость отклика от экспозиции может стать нелинейной, как наблюдается у радиации. Пролить свет на эти явления могут более детальные компьютерные расчеты.

Разрушение бункера

В течение периодов 2 и 3 после взрыва, как отмечалось в разделе по феноменологии, взрывная волна распространяется наружу, формируя зону разрушения вокруг полости. Зона разрушения обычно простирается на расстояния от полутора до трех радиусов полости. Большинство сооружений внутри этой зоны будет разрушено, но биологические агенты, вероятно, не будут стерилизованы мгновенно, поскольку они, за исключением некоторой части, которая может протечь через трещины, будут находиться за пределами действия уничтожающего тепла и радиации. Биологические агенты, которые не были стерилизованы излучением и теплом, могут выйти на поверхность через эти трещины или в процессе образования кратера, возможно, через длительное время после взрыва. Ядерный взрыв будет воздействовать на бункер, такой, какой был описан Крюгером, по-другому, чем на материал грунта. Взаимодействия давления на границах будут сложными, и влияние на бункер будет зависеть от его конструкции и материалов. Несмотря на эти различия, которые могут только быть исследованы в более сложных вычислениях и экспериментах, отмечавшихся ранее, оценка верхнего предела разрушающего потенциала в зоне разрушения может быть получена из изучения ожидаемых давлений за пределами полости, приведенных в табл. 3 и следующего материала из раздела 1. В граните пиковое напряжение сжатия для камуфлетного взрыва превышает 1 килобар на 60 м для взрыва в 1 килотонну, и на 140 м для взрыва в 10 кило-

довательно, постоянная тепловой диффузии будет равна по порядку величины 10^{-7} на квадратный метр на секунду.

³⁶ Ханс Крюгер, частное сообщение.

тонн. Даже в диссипативной среде, такой, как аллювий, пиковое напряжение сжатия будет превышать 1 килобар на расстояниях до 40 м.

Живучесть подземных бункеров будет зависеть от их конструкции. Имеются данные, по взрывам Hardhat (5 килотонн в граните Клаймакс на Невадском полигоне) и Pile Driver (61 килотонна в такой же геологической формации) о том, что подземные сооружения выдержали 1 килобар и некоторые особенно усиленные сооружения выдержали 2 килобара, оставшись практически неповрежденными³⁷. Следовательно, должным образом сконструированные бункеры в граните могут пережить 2 килобара. С другой стороны, туннели в граните без облицовки и дополнительного крепежа могут быть разрушены при давлениях, в десять раз меньших. Сильно упрочненные подземные структуры, такие, как самые прочные ракетные шахты, как полагают, могут выдержать дваление в 500 бар, но их главная уязвимость связана с непрочным оборудованием, которое должно быть установлено на противоударной подвеске. Таким образом, если проникающий в грунт ядерный боеприпас в 1 килотонну взорвется внутри бункера, то самый прочный из бункеров будет разрушен, если только в нем не будет помещений, удаленных намного дальше от места взрыва, чем на 40 – 60 метров.

Можно предположить, что бункер для хранения не будет столь же прочным, как указанные выше сооружения, поскольку такие строения очень дороги в разработке, строительстве и испытаниях, и требуют специальной технологии. В таком случае бункер может быть разрушен на расстояниях в сто и более метров от эпицентра взрыва. Следует отметить, что указанные выше давления являются верхними пределами, которые становятся все менее и менее применимыми по мере уменьшения приведенной глубины, и взрыв становится все менее и менее похожим на камуфлетный взрыв³⁸. В частности, они не являются надежными для случаев с глубиной взрыва 10 метров. Содержимое бункера, например, контейнеры, могут быть гораздо прочнее или гораздо слабее приведенных выше значений. Вообще говоря, легче укрепить малые объемы с относительно простой технологией, чем большие пространства, такие, как туннели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты этого анализа приводят к следующим выводам:

1. Проникающий в грунт ядерный боеприпас в диапазоне 1 – 10 килотонн может предоставить достаточно тепла и излучения для того, чтобы стерилизовать все или почти все биологические агенты, хранящиеся на расстоянии до 10 – 30 метров, в зависимости от мощности и глубины взрыва. Это небольшое расстояние поражения означает, что взрыв должен произойти внутри объема цели, что накладывает исключительно высокие требования на локализацию цели и точность доставки.
2. Будут ли в заданной конфигурации хранения стерилизованы все биологические агенты, или нет, существенным образом зависит от деталей этой конфигурации, в особенности от размеров бункера, расположения и защиты биологических агентов в бункере, или, если агенты хранятся непосредственно в грунте, от расстояния между ними.
3. Сооружения и контейнеры с агентами могут быть уничтожены на расстояниях, которые превышают радиус стерилизации биологических агентов, так что любые оставшиеся активные агенты могут быть распределены над поверхностью земли. Глубокие цели, по видимому, избегнут эффективной стерилизации биологических агентов.
4. Распространение любого оставшегося живого биологического агента будет подвержено различным структурам фракционирования и осаждения по сравнению с радиоактивными осадками, и может быть подвержено атмосферному воздействию и излучению радиоактивных осадков. На основании предварительных расчетов кажется вероятным, что распространение биологических агентов из цели или заметной их части приведет к потерям, превышающим потери от поверхностного воздействия рассматриваемых ядерных взрывов в грунте, в предположении, что цели расположены далеко от населенных районов.

У нашего анализа есть важные ограничения, в дополнение к ограничениям, накладывае-

³⁷ Л.А. Гленн, частное сообщение.

³⁸ Glasstone and Dolan, Chapter 5.

мым неопределенностям с целями. Среди них:

1. Влияние бункера на образование начальной подземной полости и последующей феноменологии.
2. Геологические характеристики района цели.
3. Перемешивание, химия, время жизни, и повторное осаждение специфических биологических агентов.
4. Влияние отверстия, оставленного проникающим боеприпасом. Мы полагаем, что этот последний фактор не повлияет на наши основные выводы.

Более точные расчеты и эксперименты могут ослабить или исключить эти ограничения; однако, эффективность и побочные эффекты взрыва будут продолжать зависеть от очень точного нацеливания, а также от детального знания расположения цели, геологии, природы биологических агентов и их среды хранения, и местных атмосферных условий.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОЛОСТИ ПЕРЕД ВЫБРОСОМ

Мы рассчитали температуру в полости при выбросе из подгонки экспериментальных данных по давлению в полости в интересующей нас среде в зависимости от приведенного радиуса. Эти подгонки для гранита показаны графически в сборнике Теллера и др. на рис. 4.25 и 4.26, и для аллювия на рис. 4.32, дополненные в случае аллювия оценками испаренной массы и радиуса испарения для взрыва Sedan³⁹. Мы используем давления в волне и соотношения Гюгио для соответствующей среды из табл. 4.3. для того, чтобы получить температуру в зависимости от молекулярного веса M , используя формулу для идеального газа: $P_{vent} = \rho T_{vent}/M$, или, $T_{vent}/M = (12 \cdot P_{vent})/\rho$.

В этой формуле T выражено в градусах Кельвина, P – в килобарах, а плотность ρ в метрических тоннах на кубометр, что совпадает со значением в граммах на кубический сантиметр. С этой формулой имеется несколько проблем, которые мы обсудим позже, но мы считаем, что неопределенности не выведут температуры за указанные пределы.

1. Давление в ударной волне и сжатие по Гюгио справедливы сразу же за ударной волной. По мере перехода от фронта ударной волны внутрь как давление, так и плотность падают. Результаты более точных разностных решений гидродинамических уравнений показывают, что в результате температура является приблизительно однородной, как показано схематически в сборнике Теллера и др. на рис. 1.4с, стр. 7. Физически это можно понять осколку начальная центральная температура достаточно высока, чтобы обеспечить однородность, и что последующее расширение не является достаточно быстрым для создания большой неоднородности температуры.
2. Степень диссоциации и ионизации в газах полости, которые определяют эффективный молекулярный вес M , будут изменяться по мере понижения температуры. Минимальное значение M равно 2, что соответствует полной диссоциации и ионизации, что достигается только при температурах, превышающих 10^4 градусов Кельвина. Если температура достаточно низка, так что происходит только диссоциация, и если двуокись кремния является представителем газового состава, то M достигает максимального значения около 20. В наших расчетах мы искали подходящие комбинации T_{vent} и M в конце испарения грунта. Анализ диапазона подходящих комбинаций приводит к возможному фактору неопределенности 2 по отношению к значениям T_{vent} и M .
3. Формула для идеального газа, приведенная выше и относящаяся к давлению и температуре газа непосредственно за фронтом ударной волны, справедлива только приближенно. Для расширения на поздних стадиях мы используем для адиабатического расширения закон идеального газа, $TV^{\gamma-1} = \text{const}$. Теллер и др. (стр. 136) предполагали $\gamma = 4/3$.

³⁹ См. ссылку [5], стр. 132 – 133. Там радиус испарения при взрыве Sedan оценивается в 10 метров для 100 килотонн. Испаренная масса оценивается в одну восьмую от расплавленной массы, или 7500 тонн для 100 килотонн. Эти величины приводятся к 2 с небольшим метрам и 60 – 70 с небольшим тоннам для 1 килотонны.

Нордаик⁴⁰ использовал еще меньшие значения γ для ударной волны, распространяющейся в направлении грунта, поскольку из-за выброса летучих веществ и конденсации это не должно повлиять на поведение за фронтом ударной волны при интересующих нас температурах. Для очень коротких времен выброса, соответствующих неглубоким взрывам в граните, газ может вести себя более или менее как идеальный газ с $\gamma = 5/3$. Различие между $\gamma = 5/3$ и $\gamma = 4/3$ может привести к дополнительному фактору неопределенности 2 в соотношении давления и температуры.

Эти неопределенности приводят нас к пониманию того, что оценки температуры, вероятно, в любом случае являются правильными с точностью до множителя 2.

⁴⁰ M. D. Nordyke, "Peaceful Uses of Nuclear Explosions," endnote 18, p. 54.