

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЗАПРЕЩЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРУЖИЯ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Дэн Л.Фенстермахер

"Мы занимаемся ядерным оружием с направленной передачей энергии по той основной причине, чтобы понять советские способности сконструировать и развернуть аналогичное оружие, что поставило бы в рискованное положение стратегические силы сдерживания или будущую оборонительную систему США."

Бывший министр энергетики США Джон С.Херрингтон¹.

"Ни в коем случае не очевидно, что Договор о полном запрещении ядерных испытаний помешает разработке нового поколения ядерных вооружений, хотя на США полный запрет испытаний несомненно окажет воздействие."

Бывший директор Лос-Аламосской национальной лаборатории Дональд Керр².

Под предлогом оценки потенциальной советской угрозы в США активно изучаются несколько концепций оружия третьего поколения. В статье приводятся технический анализ физических принципов и ожидаемые возможности трех концепций ядерного оружия с направленной передачей энергии (рентгеновский лазер, ядерное кинетическое оружие и микроволновые устройства), а также характеризуется влияние пороговых ограничений ядерных испытаний (с порогом выше или ниже 1 килотонны) на их разработку. Термоядерные реакторы с инерциальным удержанием плазмы (инерциальный термояд, или ИТ), специальное неядерное моделирование эффектов от ядерного оружия, а также сейсмически "тихие" контейнеры для взрывов малой мощности - все это может усложнить дискуссии о возможности верификации и долгосрочной эффективности запретов испытаний ядерного оружия.

Автор работает в центре по изучению проблем энергии и окружающей среды, Принстонский университет, Принстон, Нью Джерси, 08544, США. Часть исследований была выполнена при поддержке Центра по науке и международным делам при Школе по управлению им. Кеннеди в Гарвардском университете, США.

ВВЕДЕНИЕ

Хотя полное запрещение ядерных испытаний было провозглашено в качестве цели США еще с тех пор, как администрация Кеннеди подписала Договор о частичном запрещении испытаний в 1963 году, оно остается неосуществимым. Дебаты о запрещении испытаний имеют непростую историю, на их пути то и дело возникают препятствия в виде споров о возможности верификации, о значении испытаний для надежности ядерного арсенала, безопасности и сохранности боеголовок, проверки уязвимости оружия в условиях ядерного взрыва, а также о необходимости модернизации ядерных сил³. Возможность верификации разных режимов запрещения испытаний (и важность возможного обмана) всегда оставались спорными пробле-

мами. Однако недавно как технические, так и политические факторы сыграли в поддержку усилий по дальнейшему ограничению мощности подземных испытаний, которые пока что разрешены Договором 1974 года о порогах на испытания лишь до уровня в 150 килотонн. Множество экспертов выступало в поддержку более низкого уровня мощности испытаний как первого шага на пути к полному их запрещению⁴. Резолюции Палаты представителей Конгресса США 1986 и 1987 годов, если бы их поддержал Сенат, отказали бы в выделении средств на любые американские испытания выше порога в 1 килотонну (кт). Последние исследования возможностей сейсмического контроля на основе сети сейсмометров в пределах инспектируемой страны также предоставили доказательства детектирования при порогах около 1 кт⁵. Более

высокие пороги можно сделать более ограничительными, если комбинировать их с системой квот для ограничения числа испытаний данной мощности. Кое-кто приводит доводы, что разработка оружия третьего поколения (т.е. запитываемых ядерным взрывом устройств, которые либо трансформируют, либо отбирают, либо направляют энергию уникальным образом) может проводиться, даже если порог в 1 килотонну будет иметь законную силу⁶. Если это верно и если такие типы оружия, как полагают, могут служить серьезной угрозой со стороны любой сверхдержавы, то порог в 1 килотонну в лучшем случае лишь убавляет активность многих специалистов по контролю над вооружениями, но в то же время придаст законные основания для развития опасной гонки новых вооружений. Как представляется, единственная альтернатива - это полное запрещение испытаний⁷. Ситуация усложняется еще более тем, что официальное объяснение исследований систем третьего поколения в США заключается в оценке угрозы, которую могли бы причинить американским ядерным силам и военным системам соответствующие советские новшества⁸. Последующий анализ, основанный на несекретной информации, будет касаться физики и возможностей некоторых типов оружия третьего поколения. Будут обсуждаться три конкретные концепции: рентгеновские лазеры, кинетическое оружие с подпиткой от ядерного взрыва и микроволновые устройства с повышенным выходом излучения. В табл.1 приведены основные данные о связанных с каждой из них деталях. Будут также обсуждены относящиеся к разработке этих типов оружия проблемы инерциального термояда, установок с высокой плотностью энергии и неядерного моделирования эффектов ядерного оружия. Как будет видно, важность этих технологий и испытаний при малой мощности взрыва для разработки оружия третьего поколения (хотя сейчас еще не представляющих серьезную угрозу для безопасности) скорее всего будет увеличиваться со временем. Любое предложение по введению низкого порога испытаний или по всеобщему их запрещению должно принимать это обстоятельство во внимание.

РАСТУЩИЙ ИНТЕРЕС К ОРУЖИЮ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Министерство энергетики США (МЭ) и Организация стратегической оборонительной инициативы (ОСОИ) изучают пять типов оружия направленной передачи энергии⁹: рентгеновские лазеры (кодовое название "Экзалибур"), ядерное кинетическое оружие, или ЯКО, (кодовое название "Прометей"),

микроволновое оружие, лазеры оптического диапазона и пучки частиц. Были проведены ядерные испытания для, по крайней мере, трех из этих типов: рентгеновских лазеров, ЯКО и еще одного¹⁰, скорее всего, микроволнового устройства. Исследовательская программа по оружию направленной передачи энергии с ядерной накачкой (ЯОНПЭ), формально начатая в 1985 году, выросла до уровня финансирования в 350 млн. долларов как за 1987, так и за 1988 финансовые годы. Даже хотя это составляет всего лишь малую часть стоимости всей программы модернизации ядерных сил и Конгресс последовательно сократил расходы до 330 и 220 млн. долларов в 1989 и 1990 финансовых годах, соответственно, поднятые разработкой оружия третьего поколения вопросы продолжают сохранять зловещую перспективу. В статье из журнала "Тайм"¹¹ утверждается, что "дебаты идут не о том, можно ли разработать такое оружие, а о том, следует ли это делать", а также помещаются рисунки, где фантазия художника изображает, как микроволновые пучки разрушают Пентагон и линкор, а орбитальная ядерная пушка - боеголовки в космическом пространстве. В этой статье содержится намек, что "хилый" сорокатонный взрыв "Хэйзбрук", произведенный под землей 3 февраля 1987 года в Неваде, мог быть испытанием как раз такого ЯКО. Высказывания хорошо осведомленных официальных лиц, стремящихся "продать" идею ЯОНПЭ, звучат столь же возбужденно. Руководитель отдела МЭ по НИОКР и испытаниям оружейных программ сказал, что устройство "Прометей", "если его удастся создать, приведет к созданию оружия невероятной силы", а оптические лазеры с ядерной накачкой "демонстрируют громадный теоретический потенциал для выведения из строя наступательных и оборонительных систем вооружения даже через атмосферу"¹². В другом отчете, опубликованном в 1980 году, намекалось на существование лазерной системы на галоидах инертных газов (эксимерных лазеров) с ядерной накачкой. Со ссылкой на неназванного "эксперта" из Ливерморской лаборатории говорилось, что оружие использует 50 импульсных лазеров, расположенных вокруг небольшого ядерного устройства и непосредственно накачиваемых его взрывом, что это оружие будет способно стрелять по целям ПРО на расстоянии порядка 7500 км и что его можно будет поместить на орбиту "через 2-3 года после утверждения"¹³. Мы встречаемся с такой гласностью несмотря на отсутствие в открытой литературе анализа технической реализуемости или военной значимости данной концепции. Но прорывы в развитии систем третьего поколения не подорвали по

Таблица 1

Сравнительная оценка некоторых потенциальных устройств,
относящихся к оружию третьего поколения

	Рентгеновский лазер	Ядерное кинетическое оружие	Микроволновые устройства
Число испытаний (до конца 1987 г.)	около шести	не менее одного	?
Задачи	АСАТ ПРО (?) Дискриминация на баллистическом участке (?)	Дискриминация или поражение на балли- стическом участке Поражение системы самоподрыва АСАТ (?) Поле боя (?)	Атака мобильных МБР или систем управления ПВО (?) АСАТ (?)
Базирование	Космос Перехват с Земли	Космос Перехват с Земли (?) На поле боя (??)	Космос На МБР (?) Под землей (??)
Конкурирующие программы	Другие типы ОНПЭ Другие типы КО для АСАТ и ПРО	Пучки нейтральных частиц Химические лазеры	Гиротроны и вирка- торы Взрывные генерато- ры Лазеры на свобод- ных электронах
Меры противодей- ствия	Экранировка (?)	Воздух на пути пучка Экранировка (?)	Экранировка Волоконная оптика Помехоустойчивые схемы
Неопределенности	Физика Наведение	Испарение частиц Опасность для других компонентов косми- ческого базирования	Отсутствие види- мых повреждений Фокусировка пучка Прохождение через воздух
В таблице собраны основные вопросы, связанные с концепциями оружия третьего по- коления, которые обсуждаются в данной статье. Данные для пунктов "задачи" и "базиро- вание" предположительные - они только указывают на круг проблем, которые могут рас- сматриваться. В таблице использованы следующие сокращения: АСАТ - противоспутниковое оружие; ПРО - противоздушная оборона; МБР - стратегические межконтинентальные ракеты; ОНПЭ - оружие направленной передачи энергии; КО - кинетическое оружие.			

тенциала договора о низких порогах или полном запрещении ядерных испытаний для предотвращения гонки вооружений третьего поколения. До тех пор, пока не будут поняты сложные принципы такого оружия и оно не станет действовать эффективно, разработка систем типа рентгеновского лазера резко задержится без испытаний с более высокой мощностью ядерного взрыва. Во-вторых, маловероятны быстрые прорывы в разработке экзотических типов оружия при любой мощности испытаний даже в режиме договора с порогом ниже одной килотонны, поскольку при этом явно ослабляется широкая техническая, политическая и финансовая поддержка, требуемая для разработки ядерного оружия. Но как только станут понятными детали реальной конструкции систем третьего поколения, а механизмы их действия окажутся более эффективными благодаря непрекращающимся испытаниям и экспериментам, тогда испытания при низких уровнях мощности приобретут более значительную актуальность и одновременно могут оказаться более обоснованными опасения об имеющих военное значение обманах при испытаниях с низким уровнем мощности взрыва.

РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЙ С МАЛОЙ МОЩНОСТЬЮ И ОРУЖИЕ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Недавно мы узнали, что в дополнение к пяти процентам от объявленных американских испытаний, имевшим мощность ниже 1 килотонны, двадцать процентов всех американских испытаний за последние 25 лет не были официально объявлены, причем у большинства из них мощности также были ниже 1 килотонны¹⁴. Таким образом существует несколько отличающихся друг от друга режимов испытаний с мощностью выше и ниже 1 килотонны. Значение этих порогов для оружия первого, второго и третьего поколений показано в табл.2. Режим с наименьшей мощностью связан с определением договора о "всеобщем" запрещении ядерных испытаний, о котором договорились на соответствующих переговорах при администрации Картера, - он включает ядерные взрывы с тротиловым эквивалентом до 100 кг¹⁵. Для конструкций третьего поколения в рамках этого класса испытаний наиболее существенной активностью, по-видимому, окажется моделирование эффектов поражения. Одно из устройств для этих целей - лаборатория модельных испытаний (ЛМИ) в Сандийской национальной лаборатории - стоимостью более 40 миллионов долларов было завершено в конце 1987 года после четырехлетней разработки. В ЛМИ входят ядерные реакторы работающие

в режиме нейтронных всплесков, источники рентгеновских и гамма-лучей, образованных электронными ускорителями высоких энергий, устройства для моделирования электромагнитного импульса (ЭМИ) и постоянные источники излучения, использующие большие запасы изотопов с высоким уровнем радиоактивности. ЛМИ обладает способностью проводить "разработку оружия с более низкой себестоимостью по сравнению с тем, что можно достичь только на основе подземных испытаний ядерного оружия в Неваде"¹⁶. Следующий режим, охватывающий четыре порядка величины от 100 кг до 1 кт, можно охарактеризовать как потенциально военно-значимый, но так же и как потенциально "тихий". Одним из типов деятельности в пределах этого диапазона - инерциальный термояд, для которого требуются микровзрывы с мощностью до 300 кг тротилового эквивалента - они могут проводиться в наземных реакторных камерах. При наличии договора о запрещении ядерных испытаний исследования по ИТ обеспечат экспериментальную базу для широкого изучения поведения материалов и окажутся ключевым фактором для создания кадров экспертов по термоядерной физике и диагностике - основам для проектирования оружия и гарантии его функционирования. Но микровзрывы ИТ могут служить также полезным исследовательским средством для изучения физики рентгеновского лазера, генерации микроволн и других явлений, относящихся к экзотическим вооружениям. При более высоких мощностях испытания становятся постепенно все более значимыми в военном смысле. Уже разработано, испытано и размещено тактическое ядерное оружие, как, например, фугасная боеголовка W54 с мощностью взрыва всего лишь в 10 т. Практический предел для взрывов, которые могут проводиться в сейсмически тихих камерах, составляет около 300 т. Ученые из Ливермора с 1981 года ведут разработку конструкции так называемой установки с большой плотностью энергии (HEDF, или УБПЭ). Она будет расположена на испытательном полигоне в Неваде и в ее состав войдет сейсмически тихая подземная камера, выдерживающая ядерные взрывы с мощностью до 0.3 кт. Это будет система многократного действия, на которой проводится примерно одно испытание в неделю¹⁷. Стоимость создания такой установки оценивается в несколько сотен миллионов долларов, что не кажется препятствующим фактором, если сравнивать с текущей программой подземных испытаний, где каждое отдельное испытание стоит от 10 до 70 миллионов долларов. Установки такого типа могут оказаться очень привлекательными для советских и американских констру-

Таблица 2

Пороги ядерных испытаний и их значимость

Режимы ядерных испытаний определяются мощностью. Для каждого порога приведены возможные виды активности в соответствии с их актуальностью для оружия первого и второго поколения и разработок систем третьего поколения. Неопределенности, связанные с устройствами, которые приведены для порогов выше и ниже 1 килотонны, обсуждаются в тексте.			
Порог ^а	Режим	Первое и второе поколение	Третье поколение
0,0	Неядерный	ПАЛ ^б ; проверка и переоборудование боеголовок	Моделирование для "оценки угрозы"
0,2 кг ^в	Гидроядерный	Испытания на безопасность Разработка основной конструкции	
100 кг - порог, использованный администрацией Картера для определения "полного запрещения"			
300 кг	Инерционный термояд	Изучение влияния на материалы Экспертиза термоядерных устройств	Физика явлений в системах третьего поколения
10 т	Тактический	Например: американская боеголовка W54 фугасного типа	ЯКО ? Микроволновые устройства ?
300 т	Тихий	Экспертиза оружия	Другие системы третьего поколения ?
1 кт	Сейсмическое детектирование (Высокая надежность)	Нейтронная боеголовка	Термоядерные кумулятивные заряды
10 кт	Форсирование	Новые атомные запалы	Компактные источники для систем третьего поколения
150 кт	Договор о порогах 1974 г.	Испытания на надежность Новые конструкции с мощностью до 1 Мт	(?) Рентгеновские лазеры (?)
Наземные испытания Запрещены Договором 1963 г.		Полномасштабные испытания (ЭМИ, образование кратеров, выпадение радиоактивных осадков и т.д.)	Распространение ЯОНПЭ Детальная оценка угрозы
Сокращения: ЭМИ - электромагнитный импульс. Примечания: (а) "Пороговая" мощность взрыва оценивается как наименьший испытательный предел, при котором еще можно осуществить указанные типы деятельности. (Приведенные для более высоких мощностей типы деятельности очень трудно или невозможно осуществить при более низких мощностях). (б) ПАЛ от сокращения PAL (Permissive Action Link) - это т.н. линия для разрешения действий, то-есть электромеханическое устройство, содержащееся в большинстве типов боеголовок для предупреждения случайного или несанкционированного нацеливания и подрыва. (в) Пороговые мощности выражаются в обычных единицах - эквивалентном весе взрывчатки, которая выделит столько же энергии, сколько ядерное устройство при взрыве. Таким образом, при "гидроядерном" взрыве выделяется ядерная энергия, эквивалентная только доле килограмма тринитротолуола, хотя при таких взрывах может использоваться гораздо большее количество самой взрывчатки.			

кторов оружия, если устройства с малой мощностью взрыва начнут выглядеть обещающими, а другие типы ядерных испытаний будут запрещены. Противники договора о всеобщем запрещении испытаний могут также проталкивать разработку УБПЭ во время длительного промежуточного договора о пороге на испытания в 1 кт, предшествующего договору о всеобщем запрещении испытаний, как одного из путей для уменьшения действенности последнего. Они могли бы даже использовать довод об оценке угрозы от оружия третьего поколения, вызываемой системами типа УБПЭ другой стороны. Однако ни одна из сверхдержав не может надеяться сохранить на очень долгое время в тайне наличие такой установки, особенно если в рамках договора о запрещении испытаний будут разрешены инспекции на местах. При мощности порядка 1 кт можно конструировать и испытывать новые типы термоядерного оружия и нейтронные бомбы с избыточным выходом излучения, как, например, восьмидюймовый артиллерийский снаряд W79 с мощностью 1 кт. Такие термоядерные устройства могут также конструироваться в видекумулятивных ядерных зарядов. Поэтому важные особенности режима между порогом для договора о "всеобщем" запрещении испытаний (около 100 кг) и "сейсмически недвусмысленным" порогом в 1 кт¹⁸ таковы. В нижней части этого диапазона станут доступными некоторые исследования по физике систем третьего поколения, как только начнет осуществляться программа ИТ. В средней части диапазона уже конструированы компактные ядерные боеголовки, которые могли бы послужить своеобразным запалом для оружия третьего поколения. Наконец, вблизи верхней границы становятся реальностью боеголовки с повышенным нейтронным выходом и термоядерные боеголовки. Возможность сейсмически тихой УБПЭ маскировать ядерные испытания вплоть до 0.3 кт и не осознанные до сих пор приложения субкилотонных боеголовок к ряду концепций третьего поколения (например, к ЯКО и микроволновым системам) затрудняют оценки важности этого диапазона. Можно лишь догадываться, что этот диапазон станет более противоречивым по мере развития технологий. Диапазон между 1 кт и 150 кт содержит большую часть ядерных испытаний, проведенных с момента подписания договора 1974 года о порогах на испытания. В пределах этого диапазона создание новых запалов в режиме форсированного деления, возможное уже при мощности около 1 кт, становится относительно простым, начиная с 10 кт¹⁹. Поскольку форсиро-

ванные запалы улучшают компактность и эффективность боеголовок, форсирование станет, по-видимому, столь же важным для систем третьего поколения, как и для современных типов оружия²⁰. Для гарантированного проектирования новых боеголовок с расчетной мощностью свыше 1 Мт явно достаточно проводить испытания на уровне 150 кт. (Так, бомба В-83, впервые развернутая в 1984 году, то-есть спустя 10 лет после договора 1974 года, имеет расчетную мощность в 1.1 Мт)²¹. Однако неясно, может ли такой подход применяться к проектированию систем третьего поколения. Ряд более сложных концепций (например, рентгеновские лазеры) может нуждаться в испытаниях при больших мощностях не только для того, чтобы создать эффективные устройства. Такие концепции могут также обладать законами подобия, запрещающими окончательную отработку изделий без полномасштабных испытаний. Наконец, может оказаться невозможным полностью спроектировать оружие третьего поколения или оценить угрозу от него без испытаний в атмосфере, на которые сейчас распространено действие договора 1963 года о запрещении испытаний в трех средах и поэтому их политически невозможно возобновить. Значительную часть эффектов от вооружений первого и второго поколений можно, в принципе, оценить на основе известных характеристик взрыва, излучения и тепловыделения, а также (до некоторой степени) по материалам исследования ЭМИ на больших высотах и наземных взрывов, проведенных до заключения договора 1963 года. Но многие концепции оружия с направленной передачей энергии критичны к точному наведению и к эффектам распространения узких пучков частиц или энергии на большие расстояния. Другие, как, например, супер-ЭМИ оружие, могут зависеть от сложного механизма взаимодействия с атмосферой. Более того, грубые оценки эффективности вооружений третьего поколения могут оказаться резко обесцененными, если не принимать во внимание непредсказуемые обстоятельства, определяемые окружающей обстановкой в военный период. Вибрации от ядерного взрыва, турбулентные газы на пути пучка, радиоактивность или порожденные взрывом возмущения в атмосфере - все это может внести вклад в подобную неопределенность. Из-за значительного числа неизвестных вещей большая часть всех усилий, связанных с системами третьего поколения (будь то оценка угрозы или разработка самого оружия), может оказаться бесполезной в отсутствии испытаний в атмосфере и в космосе.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛАЗЕРЫ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ТЕХНОЛОГИИ

Из трех обсуждавшихся вспомогательных технологий ИТ²² может обладать наибольшим потенциалом воздействия на разработку оружия следующего поколения. В течение следующего десятилетия термоядерные микровзрывы, создаваемые благодаря ИТ, могли бы дать ученым возможность лучше понять физику боеголовок, включая образование рентгеновских лучей, динамику взрыва и неустойчивости, но только в том случае, когда произойдет поджиг реальных "таблеток". Поскольку наиболее мощные лазеры и пучки частиц, доступные сейчас для исследований по ИТ, еще не могут обеспечить более 100 кДж и 1 МДж, соответственно, в течение необходимой длительности импульса, поджиг таблеток остается труднопреодолимой задачей²³. А без возможности поджечь хотя бы одну-две таблетки проектирование более эффективных таблеток остается недоступным. Однако в докладе Комитета палаты представителей по науке и технологии в связи с 1987-м финансовым годом было раскрыто, что взрывы на испытательном полигоне в Неваде дают информацию для программы лазерного синтеза²⁴. В рамках программы "Соль центуриона" интенсивное излучение от подземного ядерного взрыва, по-видимому, было использовано, чтобы попытаться поджечь типичные для ИТ мишени и в конечном итоге оказать помощь в конструировании таблеток, которые могли бы поджечься доступными в настоящее время средствами разгона. Таким образом можно было бы обойти потребность в короткоимпульсных лазерах следующего поколения со стоимостью почти в миллиард долларов²⁵. Связь между ИТ и проектированием оружия распространяется и на оружие третьего поколения. В обзоре Национальной академии наук следующим образом описывается потенциал ИТ для принесения пользы при конструировании оружия²⁶:

"Удобный лабораторный источник термоядерных взрывов с энерговыделением 1000 МДж стал бы удивительным инструментом для изучения физики термоядерного оружия. Некоторые представления о том, как использовать ядерное оружие в качестве источников для рентгеновских лазеров или микроволновых пучков с направленной энергией, можно было бы проверить на лабораторных установках быстро и в режиме взаимодействия... На установках для ИТ можно было бы провести широкий круг экспериментов, которые оказались бы слишком дорогими при подземных испытаниях".

Смысл сказанного в том, что как только ИТ-установка начнет работать, она сможет стать решающим исследовательским инструментом для таких вещей как рентгеновский лазер и оружие с микроволновыми пучками, поскольку она может оказаться единственным источником испытаний, позволяющим проводить нужное их количество. Но и без ИТ передовые исследования по физике рентгеновского лазера развиваются быстро. В лабораторных условиях был продемонстрирован лазерный эффект для мягкого рентгена от селеновой фольги при оптической накачке лазером "Новетта"²⁷. Хотя эти эксперименты остаются далекими от того, чтобы раскрыть тайну готовой конструкции лазера с накачкой от бомбы (и фактически выполнены на более длинных и, следовательно, несущих меньше энергии волнах - разница больше, чем в 10 раз, по сравнению с тем, что ожидается для варианта с ядерной накачкой²⁸), они пересекли драматический порог в процессе проектирования. В них получено физическое явление стимулированного излучения от рабочего устройства, где все можно измерить, что позволяет ученым усовершенствовать программы компьютерного моделирования, которые, в конце концов, оказываются ключами к проектированию реальных устройств²⁹. Более того, используемые в ядерных рентгеновских лазерах стержни из рабочего тела могут для более эффективного сжатия иметь такие же сложные конфигурации, где перемежаются слои материалов с малыми и большими атомными номерами, а также веществ с малой плотностью³⁰, какие используются при проектировании таблеток для ИТ. Например, не является сюрпризом, что "конструкция мишени с взрывающейся фольгой (для лабораторного рентгеновского лазера) основана на опытах с плазмой, образующейся в исследованиях по ИТ..."³¹. Тесная взаимосвязь ИТ с ядерными испытаниями и исследованиями по рентгеновскому лазеру схематически изображена на рис. 1. Другой технологией, представляющей особую важность для исследований по рентгеновскому лазеру и недавно разработанной в Ливерморе, является ионная ловушка внутри электронного пучка (ИЛЭП) - уникальное устройство, использующее электронный пучок для удержания многократно ионизованных ионов различных металлов. В ИЛЭП происходит обдирание электронов для получения нужного зарядового состояния атома и этим доказана ее "жизненная важность для определения кинетики горячей плазмы"³². Ионы могут удерживаться в течение нескольких часов и за это время можно провести тщательные измерения сечений рекомбинации и столкновений для возбужденных со-

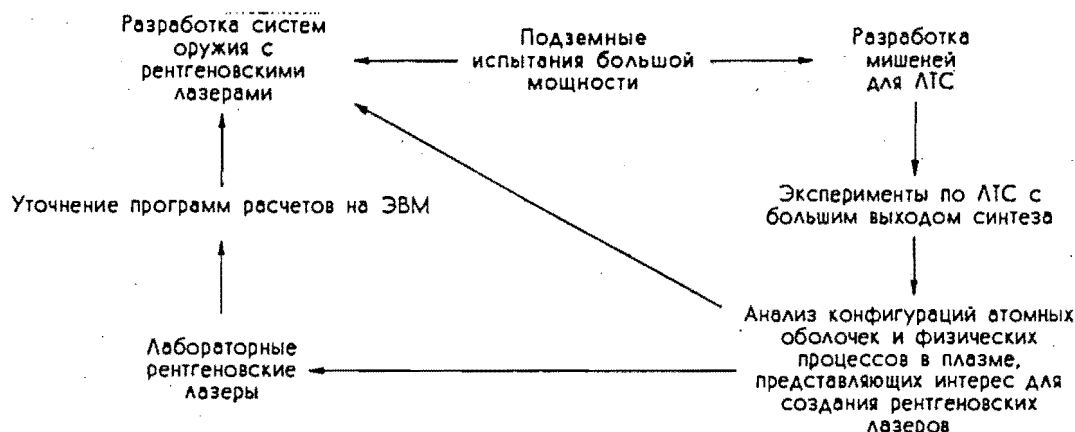


Рисунок 1

Два направления разработки рентгеновских лазеров при подземных испытаниях.

стояний, а также энергий рентгеновских переходов. Эти данные, уже демонстрирующие исключительно "чистые" рентгеновские спектры с энергией вплоть до 10 кэВ и даже выше, оказываются критичными для понимания инверсной заселенности и переходов в рабочих телах для рентгеновских лазеров. Один из уже изученных атомов - это неоноподобное (то-есть 69 раз ионизованное) золото, которое, как обнаружилось, испускает очень острые рентгеновские пики с энергиями 9.5 и 10.5 кэВ. Однако все же только ядерные испытания (и возможно даже испытания с высокой мощностью) в конечном счете определяют судьбу программы рентгеновских лазеров для военного использования. Не только подземные взрывы для проектирования ИТ-таблеток, вероятно, потребуют мощностей существенно выше 1 кт³³, но и сам рентгеновский лазер может нуждаться во взрывах большой мощности для своего запала, особенно если тот должен излучать киловольтные рентгеновские лучи. Потребность в столь больших источниках энергии вытекает из исключительно высокой мощности накачки, требуемой для ионизации внутренних электронов атома со скоростью, сравнимой со скоростью спонтанного излучения рентгеновских фотонов³⁴. Это требование в сочетании с низкой эффективностью накачиваемых тонких стержней и с тем фактом, что требуемые для накачки рентгеновские лучи (имеющие энергию выше десятка кэВ) могут образоваться лишь при температурах, достигаемых в ядерном взрыве с относительно высокой удельной мощностью (в расчете на единицу массы боеголовки), означает, что для накачки рентгеновского лазера в варианте оружия скорее всего понадобятся взрывы с большой мощностью, значительно превышающей 10 кт³⁵. Концепция рентгеновского лазера ограничена не только физикой, операционными неопре-

деленностями и инженерными компромиссами, но также и договором 1967 года о принципах использования и исследования космического пространства, запрещающим ядерное оружие в космосе³⁶. Тем не менее, уже финансируются исследования, направленные на оценку поиска целей, слежения за ними и наведения для оружия типа рентгеновского лазера³⁷. Хотя до сих пор нет никакой уверенности, что такое устройство можно будет когда-либо создать, в докладе Американского физического общества по оружию направленной энергии делается вывод о том, что:³⁸

"рентгеновский лазер, если его разработка окажется успешной, окажет исключительно серьезную угрозу для космических элементов системы ПРО".

Для некоторых людей мечта о разработке исключительно мощного рентгеновского лазера продолжает оставаться основной причиной, почему они не поддерживают договор о запрещении ядерных испытаний.

ТЕРМОЯДЕРНАЯ ВЗРЫВЧАТКА НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Другое устройство, изучаемое как создателями СОВ, так и конструкторами оружия, представляет собой нечто "похожее на ядерный дробовик с небольшими пулями"³⁹ и носящее название "Прометей". В соответствии с материалами Конгресса, весьма пессимистичными относительно СОВ во всех других отношениях, система "Прометей" "могла бы применяться для различия боеголовок и ложных целей"⁴⁰ (на баллистическом участке траектории ракеты) скорее, чем пучки нейтральных частиц, которые считались основным кандидатом на эту роль. Вдохновленные уже проведенными экспериментами официальные представители программы СОВ потребовали в 1987 году ускорения проекта

"Прометей" для "подтверждения концепции" с использованием средств из числа 500 млн. долларов, затребованных в том году на вспомогательные работы для СОВ. Один из инженеров-исследователей, знакомый с проектом, описывал устройство как очень напоминающее по действию винтовку, где внутри "дула" находится полистироловая пластинка, а снаружи - "похожий на порох" ядерный заряд направленного действия. После того, как импульс от взрыва генерирует сильную ударную волну, пластинка раздробляется на миллионы крошечных частиц. Конечно, при наличии прямого контакта с бомбой они испарятся, но в описанной выше геометрии дробинки, как сообщается, достигали скоростей порядка 100 км/с, не успев испариться⁴¹. Кумулятивные термоядерные заряды, одна из наиболее хорошо понятых концепций третьего поколения⁴², имеют много общего с обычными взрывчатыми веществами направленного действия, которые интенсивно используются в прикладных военных и коммерческих целях. Как в обычных, так и в термоядерных кумулятивных зарядах взрывная волна горения программируется таким образом, чтобы детонационный фронт выделял энергию вдоль заранее определенного пути. В обоих случаях могут образовываться струи расплавленного металла со скоростями, значительно превышающими скорость детонации⁴³. Для термоядерного топлива (например, смеси дейтерия и трития) можно создать направленность волны горения, если помещать пустоты или инертные твердые тела на пути детонационного фронта, чтобы изменить его скорость. Конечно, чтобы поджечь термоядерное топливо в боеголовке, требуется ядерный запал, обеспечивающий необходимые сжатие и температуру (около 100 миллионов К), но даже с таким ненаправленным запалом общая направленность термоядерного кумулятивного заряда может быть еще значительной⁴⁴. Достигаемые термоядерными кумулятивными зарядами скорости впечатляют. В отличие от образуемых обычными кумулятивными зарядами расплавленных струй, скорости которых ограничены, примерно, величиной 10 км/с (что в почти в четыре раза выше скоростей газов, возникающих при химических взрывах), термоядерные кумулятивные заряды способны, в принципе, приводить в движение вещество более, чем на два порядка величины быстрее. Поскольку термоядерные температуры достигают 100 миллионов К, детонационный фронт термоядерной взрывчатки движется со скоростями выше 1000 км/с. При использовании сходящейся конической термоядерной волны сгорания и подходящего лайнера можно теоретически создать струю, летящую со скоростью

10000 км/с, что составляет 3% от скорости света⁴⁵. Как сообщается, до 5% энергии небольшого ядерного устройства может быть преобразовано в кинетическую энергию метаемых тел, по-видимому, путем использования некой комбинации профилированной взрывной волны и конструкции типа "ружейного дула" - при этом достигаются скорости порядка 100 км/с при угле расходимости около 10^{-3} радиана⁴⁶. (Как сообщается, при испытании под названием "Чамита" 17 августа 1985 года вольфрамово-молибденовая пластинка была ускорена до 70 км/с⁴⁷). Если захотеть запитывать от одного взрыва 10 пучков, поражающих цели на расстоянии 2000 км при энергии поражения 40 кДж на каждую дробинку (одна дробинка на м²), то для такого устройства потребуется взрыв с мощностью 8 кт, причем на эффект поражения не окажет влияния случайное ускорение мишеней до значений 0.5 g (5 м/с²)⁴⁸. Начальный снаряд для каждого пучка в таком устройстве типа "Касаба" весил бы всего 32 кг, но ему суждено раздробиться на крошечные частички, чтобы стать эффективным оружием - четырьмя миллионами равномерно распределенных в пространстве дробин, образующих на расстоянии 2000 километров поток 1 м⁻². Если бы такие дробинки можно было создавать одинаковыми, что весьма спорно, то каждая из них весила бы 8 мг, обладала энергией 40 кДж (это энергия, получаемая от 10 г взрывчатки) и проходила 2000 км за 20 с. Такие сверхскоростные фрагменты легко могут протыкать и испарять тонкие металлические пластины, а также вызывать структурные повреждения в больших "мягких" мишенях - спутниках и датчиках космического базирования, но у них малая вероятность попадания в меньшие по размерам боеголовки или выведения их из строя даже в том случае, когда соударение произошло⁴⁹. В лучшем случае, такое восьмиклотонное устройство с 10 пучками сможет повредить 10 мягких целей, а в худшем - оно выбросит в пространство 10 облаков дробин с небольшими шансами повредить хоть что-нибудь. Реальное отличие от двух предельных случаев будет зависеть от точности наведения, однородности пространственного распределения 4-х миллионов дробин и наличия своевременной информации о самих целях - все это накладывает ряд трудностей на систему оружия. Взрыв сотен таких устройств в космосе может также помешать работе наблюдательных и связных спутников, что наносит вред критическим функциям систем управления боем. Однако для такой ядерной пушки активно рассматривается задача "чистки" на баллистическом участке траектории ракеты, чтобы оказать помощь в

дискриминации легких ложных целей от боеголовок. В табл. 3 сравниваются требования к "чистильщику" и к противоспутниковому устройству. В одном из исследований архитектуры системы СОИ предусматривалось размещение в космосе, начиная с конца 90-х годов, от 500 до 2000 подобных устройств "Прометей" в качестве "очень выгодного технологического варианта, требуемого для очень далеких и не столь далеких задач"⁵⁰. Некоторые аналитики предполагают, что подобное устройство могло бы быть также объединено с субкилотонным ядерным устройством, достаточно легким для того, чтобы разворачиваться в режиме ожидания для быстрого выведения в космос и тем самым избежать нарушения договора о принципах исследования и использования космического пространства. "Чистильщик" типа "Прометей" будет использовать силу ядерного взрыва для приведения в движение больших пылевых облаков на расстоянии в тысячи км в космическом пространстве, чтобы попытаться дискриминировать ложные цели от боеголовок. Пыль изменит импульс объекта из-за ударного взаимодействия с его поверхностью. Затем доплеровские радары будут отличать легкие объекты от тяжелых благодаря изменениям их скоростей. В качестве конкретного примера рассмотрим изменение скорости на 0.2 м/с, легко обнаружимое на базе современной технологии доплеровских радаров⁵¹. Если предположить, что эффективность составляет 5%, пучок с угловой расходимостью 10^{-3} радиана распространяется со скоростью 100 км/с, то 10-ти килотонная боеголовка покрывает площадь 20 км² на расстоянии 5000 км, используя 400 кг пыли. Требуемое изменение скорости на 0.2 м/с будет достигнуто для ложных целей с массой не более 5 кг и с поперечным сечением, равным, по крайней мере, 0.5 м²⁵². При наличии радаров слежения и компьютеров системы управления боем, а также при условии, что устройства "Прометей" не подвергаются прямой атаке, такая система теоретически могла бы провести некоторую дискриминацию на баллистическом участке траектории. Однако коридор, в пределах которого могут быть запущены боеголовки и ложные цели, оказывается огромным. Если допустить навесные и настильные траектории, то объекты могут заполнять площадь шириной 5000 км (ширина США) и высотой несколько сот км. Чтобы очистить эту площадь полностью (всего один раз), потребуется 50000 десятикилотонных устройств "Прометей" и это число нельзя уменьшить простым расширением пучка. Если же, напротив, выделить всего по одному "Прометею" на каждую вражескую ракету, ему придется действовать достаточно быс-

тро, чтобы успеть прочистить все боеголовки и ложные цели еще до того момента, как они отойдут от последней ступени больше, чем на несколько км. Добиться такого времени реакции будет трудно. В режиме запуска по тревоге устройства "Прометей", находящиеся на подлодках, должны быть расположены где-то на 2000 км от каждого ракетного старта противника, чтобы облако боеголовок и ложных целей имело размер не более 5 км в диаметре к моменту появления пылевого сгустка⁵³. Это будет невозможным с учетом того, что большинство МБР расположено территориально гораздо глубже. В другом случае, при предварительном размещении "Прометеев" в космосе из-за "коэффициента отсутствия" окажется, что на орбите следует иметь, по крайней мере, на порядок больше таких устройств, нежели число ракет, на которые они нацелены. Таким образом, возможность обеспечения полного и надежного покрытия всех траекторий на баллистическом участке остается огромной проблемой, даже если бы сверхмасштабное разворачивание этих ядерных пушек производилось по мгновенной тревоге. Существуют также фундаментальные проблемы как для концепции "Касаба", так и для концепции "Прометей", которые становятся важными при более высоких мощностях ядерного взрыва. Несмотря на упоминавшийся успех в обращении пяти процентов энергии небольшого ядерного взрыва на летящие осколки, все же не забудем, что значительная доля оставшейся энергии неизбежно принимает вид чернотельного излучения, которое быстро догоняет дробинки. Даже при мощности 1 кт и оптимистических предположениях это связано с опасностью испарения или даже ионизации большинства частиц, что делает их неэффективными⁵⁴. Таким образом, концепция ЯКО такова, что для ее реализации могут потребоваться субкилотонные взрывчатки. А если ее реализация будет также зависеть от применения кумулятивных термоядерных зарядов, помогающих более эффективно выбирать направление дробинки или пыли, то эта концепция еще больше отягощается трудностями проектирования термоядерных устройств с мощностью ниже 1 кт. В любом случае ясно, что демонстрация быстрого движения сверхскоростных дробинки в результате ядерного взрыва (хотя, возможно, и впечатляющая) ни в коем случае не может гарантировать, что из этой концепции когда-либо получится полезное оружие.

УСТРОЙСТВА С ПОВЫШЕННЫМ МИКРОВОЛНОВЫМ ВЫХОДОМ

Ядерное оружие, спроектированное для

Таблица 3

Оценки значений параметров, относящихся к гипотетическому
10-ти килотонному ядерному кинетическому оружию

	Как противоспутниковое оружие	Как чистильщик
Число пучков	10	1
Масса снаряда	32 кг	400 кг
Механизм	50 кДж на дробинку Поражение при ударе	Изменение скорости на 0.2 м/с, придаваемое цели для последующей дискримина- ции радаром
Предположения	$4 \cdot 10^6$ частиц на пучок, поток 1 м^{-2} на расстоянии 2000 км	Ложные цели легче 5 кг при поперечном сечении более 0.5 м^2
Расстояние	2000 км	5000 км
Покрывтие ^а	Цели со случайным ускоре- нием до 5 м/с^2	20 км^2 пространства
Необходимое число	Много	Один на каждую МБР - до 50000 для очистки коридора пуска
а) В предположении, что скорость частиц равна 100 км/с, а расходимость - 1/1000 ра- диана. Сравнение двух этих миссий основано на трудах семинара, организованного фирмой "Спа- рта" - консультантом программы СОИ⁵².		

получения больших импульсов микроволно-
вой энергии (с длинами волн от миллиметра
до метра), - это еще одна важная концепция
третьего поколения⁵⁵. Хотя его можно от-
нести к ЭМИ-оружию с повышенным выходом
и к радиочастотному, или микроволновому
оружию, детали этих устройств засекречены,
так что из открытой литературы неизвестны
данные о степени изготовления или испыта-
ний конкретных систем. Предполагается, что
"в области передовых технологий есть место
для направленного варианта ЭМИ, использу-
ющего микроволновые пучки с исключитель-
но высокой пиковой мощностью,"⁵⁶ и что рас-
сматриваются как направленное ЭМИ-ору-
жие, так и ненаправленное⁵⁷. В дальнейшем
изучаются два типа устройств с направлен-
ными микроволновыми пучками, причем по-
казано, что первое из них весьма неэффек-
тивно. Но следует заметить, что микроволны
могут генерироваться при ядерном взрыве
различными способами, так что не изучались
другие устройства, для которых могла бы

потребоваться закрытая информация.

ПЕРВЫЙ ТИП: Электронный плазменный осциллятор

Один тип устройств с направленным ми-
кроволновым пучком большой мощности мог
бы использовать принципы системно генери-
руемого ЭМИ, когда рентгеновские и гамма-
лучи ядерного взрыва вызывают электронные
токи и быстро меняющиеся напряжения в
расположенных поблизости структурах⁵⁸.
Для проектирования такого устройства сле-
дует, по-видимому, прежде всего увеличить
интенсивность мгновенного гамма-излуче-
ния на основе соответствующей геометрии и
выбора материалов внутри ядерной взрывча-
тки и вне ее. Например, можно максимизиро-
вать поток гамма-лучей, возникающих при
неупругом рассеянии термоядерных нейтро-
нов высокой энергии (14 МэВ)⁵⁹. Затем уст-
ройство можно окружить цилиндрической
волноводной структурой, скорее всего сле-

ланной в виде многих концентрических металлических цилиндров, чтобы удовлетворить трем целям:

(1) цилиндры могут функционировать как отражательные диоды, испускающие интенсивный импульс электронов в результате комптоновского рассеяния и фотоэффекта;

(2) они могли бы образовать резонаторную структуру, в которой поля при резонансных частотах "завьют";

(3) они могли бы служить микроволновой рупорной антенной для придания направленности пучку.

Поскольку такая диодно-волноводно-антенная структура будет оставаться в покое только на очень короткое время до того, как она разлетится по сторонам, ей придется использовать почти световые скорости гамма-лучей, электронов и микроволн, чтобы успеть быстро генерировать микроволновый пучок. Насколько мощным может оказаться микроволновый пучок от такого устройства? Благодаря дифракции интенсивность пучка зависит не только от величины полученной энергии, но и от частоты, которая является функцией плотности электронной плазмы. Частоту можно оценить следующим образом. Во-первых, обычно предполагается, что мгновенные гамма-лучи ядерного взрыва уносят 0.1-0.3 % всей энергии⁶⁰. С помощью не кажущихся фантастическими устройств интенсивность мгновенных гамма-квантов, пригодных для генерации микроволн, может быть увеличена примерно до 1% от полного энергетического выхода⁶¹. Во-вторых, поскольку коэффициент поглощения (произведение длины поглощения на плотность) для гамма-квантов с энергией 1 МэВ составляет около 40 г/см²⁶², всего лишь нескольких сантиметров металла в виде концентрических цилиндров будет достаточно для извлечения большей части энергии гамма-лучей. Для образования одного электрона с энергией около 0.5 МэВ требуется примерно 1000 гамма-фотонов⁶³. С учетом доли энергии взрыва, уносимой гамма-лучами, и коэффициентом преобразования их в электроны можно оценить плотность электронной плазмы, частота колебаний которой установит тогда верхний предел на достижимую частоту микроволн⁶⁴. В то время как 10-наносекундный фронт гамма-импульса сам по себе может генерировать частоты не выше 100 МГц (а главная часть этой энергии, как для высотного ЭМИ, будет лежать в интервале от 0.1 до 10 МГц), основная частота колебаний плотной электронной плазмы лежит на несколько порядков величины выше⁶⁵. Могут потребоваться значительные ухищрения, чтобы извлечь очень много когерентного излучения из такой импульсной спорадической

плазмы, хотя устройство типа осциллятора с виртуальным катодом (виркатор), например, могло бы создавать очень интенсивные микроволновые импульсы с частотами в десятки ГГц или выше⁶⁶. Микроволны с высокими частотами (и, следовательно, с короткими длинами волн) исключительно желательны для ряда военных приложений, потому что они могут проникать через трещины и совсем небольшие каналы в металлических структурах. Это окажется исключительно важным при нацеливании на ракеты с подвижным стартом или на командные пункты воздушного или наземного базирования, где электроника большей частью защищается экранами. Более того, поскольку радиоволны с частотой ниже 10 МГц отражаются ионосферой (максимум которой лежит в районе 300 км, а сама она простирается от 100 до 1000 км), также потребуются более высокие частоты для нацеливания на спутники с поверхности Земли, а также для прохождения микроволнового пучка из космоса вниз через ионосферу. Для повреждения на рабочей частоте большинства военных радаров и спутников связи также потребуются частоты в диапазоне 1-100 ГГц. И, наконец, самый сильный аргумент в пользу более высоких частот - это, по-видимому, именно то, что при них станут возможными более узкие пучки (для заданного размера антенны) и таким образом на цели может выделяться более интенсивный микроволновый поток. Однако поскольку можно подсчитать, что не больше, чем, примерно, 10^{-5} энергии взрыва, может быть преобразовано в микроволновый пучок устройством такого типа, взрыв с мощностью 1 кт теоретически может дать не более нескольких десятков мегаджоулей радиочастотной энергии⁶⁷. Если принять 30 ГГц в качестве типичной выходной частоты и предположить, что поперечный размер оптического устройства (антенны) $D = 3$ м, то дифракционный угол микроволнового пучка составит около $1.22 \lambda/D = 0.004$ радиана. Конечная интенсивность ее цели не превысит $300/R^2$ Дж/см², где расстояние до цели R выражено в км. Поскольку электроника может быть повреждена субмикросекундным микроволновым импульсом с интенсивностью порядка 10^{-5} - 10^{-1} Дж/см² и полной энергией от 10^{-6} Дж (например, микроволновые диоды) до 10^{-3} Дж (мощные транзисторы и реле)⁶⁸, генератор микроволн с килотонным ядерным запалом окажется относительно бесполезным оружием для расстояний, превышающих 300-1000 км, даже если его можно заставить работать в том виде, как это только что было описано - в лучшем случае он мог бы повредить лишь чувствительную электронику или схемы на входе антенны на расстояниях менее 1000

км. Более того, даже это относительно малое количество энергии может оказаться все еще слишком интенсивным, чтобы его можно было сфокусировать передающей антенной или пропустить через атмосферу, из-за электронной эмиссии с поверхности антенны или микроволнового пробоя в воздухе. Электронная эмиссия начинается при полях порядка 30 МВ/м ($1.2 \cdot 10^{12}$ Вт/м²)⁶⁹, что более, чем на два порядка величины ниже интенсивности 40 МДж/(10^{-8} с $\cdot 10$ м²) = $4 \cdot 10^{14}$ Вт/м², которые пришлось бы фокусировать антенне. Атмосферный пробой на радиочастотах происходит при интенсивностях порядка 10^9 - 10^{10} Вт/м² через несколько нс после начала импульса. Поэтому если микроволновое устройство нацеливается в атмосферу с высоты менее 200 км, то через нее пройдет всего только небольшая передняя часть 10-ти наносекундного импульса, несущего микроволновую энергию.

ВТОРОЙ ТИП: Сжатие магнитного потока

Однако, другое устройство может оказаться более обещающим. Уже с 1983 года в проводившихся Сандийской национальной лабораторией исследованиях по "взрывному сжатию магнитного потока" с помощью обычных источников энергии получались импульсы магнитной энергии с пиковой мощностью до 0.2 ТВт при полной энергии 2 МДж. Затем полная энергия импульса выросла до 18 МДж. Такие уровни энергии были достигнуты на основе успешного последовательного включения трех взрывных генераторов, каждый из которых служил сильноточным источником для следующего. В каждом из генераторов подрывалась взрывчатка, находившаяся внутри металлического цилиндра, окруженного жестким токонесущим соленоидом (см. рис. 2). Магнитный поток в щели между цилиндром и соленоидом сжимается при расширении цилиндра от взрыва и производит при этом работу против установившегося (и возрастающего) магнитного давления. Поэтому часть энергии взрыва преобразуется в быстро нарастающий импульс тока (его амплитуда обратно пропорциональна площади, вмещающей магнитный поток), которым можно запитать антенну и образовать интенсивный электромагнитный импульс⁷⁰. Ядерный вариант такого устройства мог бы оказаться способным создавать токовые импульсы с гораздо более короткой длительностью фронта и с огромной пиковой мощностью⁷¹. Даже при обычных источниках энергии достигались экспоненциально нарастающие импульсы тока с амплитудой до 10 МА и длительностью фронта 10 мкс; было показано, что эффективность преобразования энергии соста-

вляла 10-20 %. Соответствующие временные масштабы для сжатия потока ядерным взрывом окажутся в наносекундном диапазоне⁷², что приведет к чрезвычайно узким токовым импульсам. Если бы удалось придумать подходящую конструкцию токовых подводов к соленоиду и антенне⁷³, можно представить себе легкий генератор, у которого самыми крупными компонентами могли бы оказаться батареи для подпитки током соленоида и сама антенна. Последняя могла бы иметь вид длинной линии, как в обычных устройствах, или же состоять из набора отдельных элементов для увеличения направленности. Полагается, что эффективность такого микроволнового устройства может быть значительно выше, чем у другого ядерного устройства, которое рассматривалось в предыдущем разделе. Если удастся преобразовать 5 процентов полной мощности небольшого ядерного взрыва в кинетическую энергию расширяющейся цилиндрической арматуры (аналогично заявленной эффективности устройства "Прометей") и если структура соленоида не будет повреждена достаточно долгое время, чтобы успеть трансформировать значительную часть (возможно, несколько процентов) этой энергии в импульс тока, тогда могла бы оказаться возможной полная эффективность (от мощности взрыва до электромагнитной энергии) порядка 10^{-3} ⁷⁴. Это следует сравнивать с эффективностью 10^{-5} для другого гипотетического микроволнового устройства с ядерной накачкой, обсуждавшегося в предыдущем разделе. Более того, если удастся получить фронты меньше нс, то можно будет в значительной степени предотвратить атмосферный пробой. Но остается трудная проблема проектирования антенны, которая эффективно преобразует такой интенсивный токовый импульс в пучок микроволн. Даже при использовании набора полуволновых дипольных антенн остается дифракционное ограничение на расходимость пучка порядка $2\pi ct/D$, где c - скорость света, t - ширина пучка в секундах, а D - полный размер антенной системы. Если только не удастся достигнуть импульсов шириной гораздо меньше наносекунды, для образующихся длин волн порядка десятков см потребуются огромные структуры (сотни метров), чтобы получить расходимость порядка миллирадиана. Для запускаемых по команде тревоги типов оружия или для тех типов, которые предстоит использовать в атмосфере, такие размеры окажутся неприемлемыми. По сравнению с другими микроволновыми устройствами эта конструкция может потерять в направленности то, что она выиграла в эффективности, и в результате у нее не окажется возможности для гарантированного поражения на больших

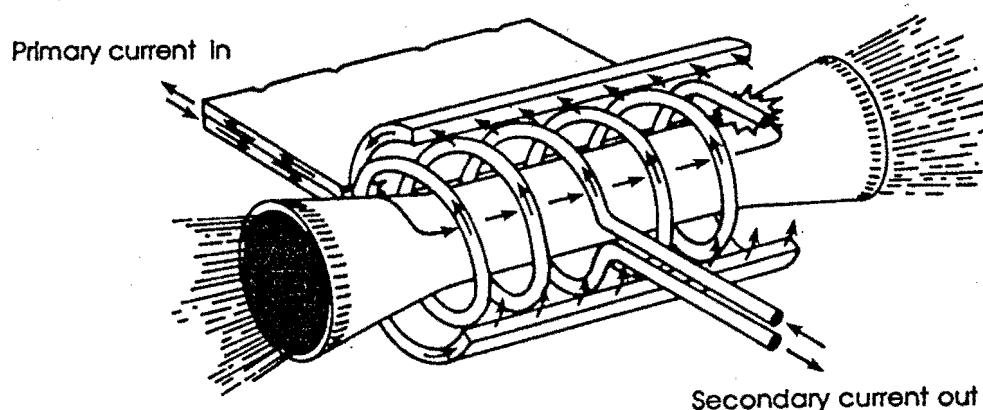


Рисунок 2

Схема компрессора магнитного потока с обычной накачкой
При расширении цилиндра в окружающей его катушке
генерируется импульс тока (E.C.Cnare et al., p.102).

расстояниях.

ОБСУЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ МИССИЙ

Тем не менее, для некоторых может показаться привлекательным использовать микроволновый пучок, генерируемый килотонным ядерным устройством на высоте 200 км, для поражения, по крайней мере, незащищенной электроники на площади в несколько квадратных километров⁷⁵. Как подытожено в табл. 4, электромагнитный поток над заданной областью от любого из двух этих устройств может быть на несколько порядков величины выше, чем от высотного ЭМИ с использованием в тысячу раз более мощного взрыва. Может показаться, что при "ограниченной" ядерной войне это дало бы возможность выборочного выведения из строя основных систем управления ракетными стартами без причинения значительных косвенных повреждений или гибели гражданских лиц⁷⁶. Например, одна из наиболее часто упоминающихся задач для микроволнового оружия состоит в том, чтобы "удерживать" способные к перемещению объекты в состоянии страха⁷⁷. Так как почти 50% всех ракет и 25% боеголовок советских стратегических ракетных сил могут к середине 90-х годов быть развернуты на подвижных установках СС-24 и СС-25⁷⁸, новые пути для угроз таким целям (особенно если речь идет о мгновенном действии) продолжают интересовать разработчиков контросиловых операций. Хотя экономия в весе по сравнению с большим типом микроволнового оружия, использующих обычные источники энергии, может оказаться значительной, варианты

обычного типа существуют, в частности, для близко расположенных целей, например, корабельных или самолетных радаров и электроники. Уже существуют клистроны, гиротроны и виркаторы, генерирующие импульсные микроволновые пучки с частотами от долей до десятков гигагерц, с мощностью от нескольких мегаватт в непрерывном режиме до десятков гигаватт у импульсных устройств⁷⁹. Хотя ни одно из этих устройств не может выделить более 10 кДж за импульс (на несколько порядков величины меньше, чем у описанных выше гипотетических ядерных устройств), большая их часть может повторять импульсы в быстрой последовательности без разрушения в процессе деятельности⁸⁰. Тем не менее, трудно представить себе какую-либо миссию, для которой возможности "мягкого убийства" микроволновых генераторов соответствовали бы военным подходам. Прежде всего, поражение электроники по самой своей природе трудно наблюдать. Для защиты военных целей от опасных электромагнитных импульсов США (и, вероятно, СССР) уже разработали методику экранировки и схемы отключения наводок, а также волоконную оптику и специально упрочненные полупроводниковые материалы для критических цепей связи и линий команд и контроля. Хотя стоимость внедрения таких методик может временами быть высокой, выживаемость важных схем может быть увеличена на много порядков величины и затем проверена на обычных имитаторах ЭМИ - и все это в тайне от другой стороны. Миссии с более далекой перспективой, например, защита от баллистических ракет, фактически исключаются из-за неустранимой дифракции на ми-

Таблица 4

Сравнение гипотетических микроволновых устройств с ЭМИ^а

	Микроволновое устройство ^б 1 килотонна		Обычный ЭМИ 1 мегатонна
Частота	Тип 1 Десятки ГГц (?)	Тип 2 Один импульс в гигагерцовом диапа- зоне	Один импульс в мегагерцовом диапа- зоне
Эффективность (от мощности взрыва)	$< 10^{-5}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-3}$
Направленность (в радианах)	$10^{-3}-10^{-1}$	$\sim 10^{-1}$	Касательная к зем- ной атмосфере на высоте 30 км
Покрывание цели (диаметр в км)	0,1-10	~ 10	2000 (1/3 территории США)
Поток энергии в Дж/см ² на по- верхности Земли	$5 \cdot 10^{-1}-5 \cdot 10^{-5}$	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}
а) Предполагается, что каждая система подрывается на высоте 100 км. б) Тип 1 - это гипотетическое устройство с электронной плазмой, образуемой гамма-лучами, - в чем-то оно похоже на осциллятор с виртуальным катодом. Тип 2 включает в себя взрывной генератор токового импульса, основанный на сжатии магнитного потока. Автор дает оценки характеристик двух гипотетических микроволновых устройств тех типов, которые обсуждаются в статье. Перспективные микроволновые выходы от килотонных устройств, подорванных на высоте 100 км, сравниваются с ЭМИ от мегатонного взрыва на той же высоте. Если удастся добиться требуемого развития исследований, то килотонные устройства смогли бы выделить значительно больше энергии в ограниченной области, нежели ненаправленный мегатонный взрыв. Но остаются серьезные вопросы относительно конструкции таких систем и характеристик распространения микроволн.			

кроволновых длинах волн, а роль противоспутникового оружия гораздо легче может быть выполнена запускаемыми с Земли самонаводящимися ракетами или даже лазерами с подпиткой от обычных источников энергии. Для использования на поле боя или для задач ПВО недостатки микроволновых устройств с ядерной накачкой те же, что и у нейтронной бомбы: несмотря на вероятную высокую степень поражения входных приемных схем и связного оборудования на расстояниях в десятки километров, существует опасность побочных разрушений от взрыва и даже эска-

лации к тотальной ядерной войне после передачи контроля над такими видами ядерного оружия командованию на поле боя. Более того, в качестве первого акта войны, когда поражение электроники было бы наиболее эффективным, ядерные взрывы микроволнового оружия послужат сильным поводом для эскалации. Таким образом, уничтожение объектов микроволнами от ядерной накачки чревато такими неожиданностями, что микроволновое ядерное оружие никогда не может рассматриваться как надежное средство для выполнения военных целей, особенно

тех, роль которых в балансе ядерной войны велика. Но несмотря на отсутствие реалистичных миссий, привлекательность микроволновых генераторов с точки зрения передовой технологии еще может оказаться достаточной для сохранения финансирования на некоторое время. Хотя основополагающие принципы в ряде случаев могут оказаться столь же сложными, как и для лазеров на свободных электронах, которым уже были посвящены тысячи человеко-лет исследовательских усилий, отдельные устройства могут оказаться совсем простыми, как, например, разобранные выше устройства второго типа. Более того, предварительные исследования могут оказаться возможными с доступными уже сейчас неядерными генераторами или же на основе ИТ, если им можно будет воспользоваться. Как только будут поняты основные принципы, можно будет даже испытывать прототипы при мощностях ядерного взрыва ниже 1 кт. С другой стороны, обширные испытания могут дать несколько более того, чем просто обнаружить принципиальные трудности использования таких концепций для конструирования действительного оружия, как это было в случае с рентгеновским лазером. Поэтому микроволновые устройства с ядерной накачкой могут в конечном итоге продолжаться изучаться больше из-за их привлекательности, нежели по какой-либо серьезной стратегической причине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ПОРОГИ И СРОКИ РЕЖИМОВ ЗАПРЕЩЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

При близком изучении найдено, что большая часть концепций третьего поколения обременена техническими неопределенностями и операционным риском, что сильно уменьшает шансы на какое-либо военное использование. Несмотря на наличие новаторских идей, например, передвижение массивных пылевых облаков в пространстве или генерация интенсивных пучков микроволн и рентгеновских лучей, возможности подобных устройств вряд ли будут столь угрожающими, чтобы служить основанием либо для страха, либо для желания добиться недоступного. Различия между концепциями третьего поколения и пригодными для использования вооружениями третьего поколения безмерно. Тем не менее существует серьезная возможность того, что "устройствами" третьего поколения будут продолжать заниматься. В США это обосновывается желанием получить оценки советской уг озы или же технологическим импульсом, порожденным программой СОИ. Вытекающая отсюда опасность связана с гонкой вооружений, которая может осуществить подкоп не только под возможность запреща-

ния ядерных испытаний, но и под другие важные меры по контролю над вооружениями, в частности, по ограничениям на дестабилизирующее противоспутниковое оружие и на развертывание противоракетной обороны. Пока что, похоже, развитие оружия третьего поколения ограничилось увеличением выхода излучения, присутствующего при ядерных взрывах (как было сделано для нейтронной бомбы), несколькими ядерными испытаниями, где был показан потенциал для генерации когерентного рентгеновского излучения в плазме с ядерной накачкой, раздроблением и приведением в движение снарядов в рамках концепции ЯКО, а также рядом идей и, возможно, испытаний, где известные принципы (например, системно генерируемый ЭМИ или взрывной магнитный генератор) применялись для проектирования направленных микроволновых пучков. Время от времени обсуждались и другие идеи, например, подземные лаборатории, где ядерные взрывы будут использоваться для создания запасов компонентов радиологической войны⁸¹, или "чистое" оружие, основанное только на термоядерном синтезе, и ядерные "минибомбы", но эти концепции получали очень слабую поддержку⁸², если не считать небольшого числа энтузиастов. Наиболее благоприятные обстоятельства для переговоров о запрещении ядерных испытаний существуют тогда, когда разработка новых вооружений кажется либо неинтересной, либо преждевременной, либо той и другой. К счастью, несмотря на миллиард долларов, потраченных в США на программу ЯОПЭ за последние несколько лет, пока еще не продемонстрированы прорывы в области оружия третьего поколения и оно не обеспечило широкого энтузиазма, необходимого для того, чтобы необратимо попасть в политическую повестку дня. Тем не менее, такое состояние дел вряд ли продлится вечно, особенно если принять во внимание заманчивость экспериментального использования ИТ, установок в ЛМИ, разработок компьютерных программ и лабораторных рентгеновских лазеров, а также дополнительных технологий (типа ИЛЭП в Ливерморе) для ускорения разработок новых концепций. Несмотря на то, что часто преувеличивается важность разработок каждой стороной новых концепций ядерного оружия, эти преувеличения имели большой успех в подрыве переговоров по запрещению ядерных испытаний. Подобные аргументы по отношению к запрещению испытаний с малой мощностью и к оружию третьего поколения со временем могут становиться более эмоциональными. Поэтому сроки режимов запрещения испытаний оказываются, по-видимому, гораздо более важными, нежели абсолютно надежная

верификация с самого начала. При низком пороге на испытания (даже в случае небольшой квоты на испытания с большей мощностью) просто не существует реальных шансов на быстрые или эффектные технические прорывы, приводящие к значительной военной угрозе. Скорее всего, как рентгеновские лазеры с ядерной накачкой, так и разработка таблеток для ИТ будут продолжать нуждаться какое-то время в испытаниях с мощностью выше 10 кт. У других концепций даже при более низкой мощности могут появиться трудности, например, испарение частиц для ЯКО или атмосферный пробой для интенсивного микроволнового пучка. Многие из них настолько сложны, что могут потребоваться годы исследований и десятки испытаний, чтобы добиться в конце концов заметного успеха. Примером могло бы стать микроволновое устройство, использующее усиленный поток гамма-лучей и когерентные плазменные колебания. Используемые здесь явления так же сложны, как и те, какие используются и в нейтронной бомбе, и в лазерах на свободных электронах. Их нельзя применить для создания оружия без длительного периода интенсивных разработок. Тем не менее, если финансирование будет продолжено, через 5-10 лет можно ожидать запуска ИТ в лабораторных условиях, разработку устройства типа "Прометей" и даже элементарного микроволнового устройства, в процессе конструирования которого одним из рабочих "инструментов", возможно, стал бы ИТ. Рентгеновские лазеры (даже для самых первых противоспутниковых миссий), а также система типа УБПЭ и большинство других концепций третьего поколения скорее всего потребуют 10-20 лет или более. Однако задолго до этого могут возникнуть опасения проиграть гонку вооружений третьего поколения, питаемые предварительными демонстрациями подтверждения принципов работы. Вскоре могут последовать обвинения в "микроволновом окне уязвимости" или других окнах третьего поколения. Если немедленно ввести в действие порог на испытания в 1 кт, то технологии типа "Прометей", микроволновых устройств и ИТ, вероятно, будут задержаны, по крайней мере, на 5-10 лет, а разработки рентгеновских лазеров и других концепций третьего поколения могут быть успешно прекращены или сведены до уровня компьютерных моделирований, неядерных физических экспериментов или теоретических исследований. Но при длительном запрете с порогом в 1 кт УБПЭ могла бы оказаться более привлекательной для тех, кто хотел бы сохранить в секрете полное число испытаний с малой мощностью, или тех, кто хотел бы показать, что другая сторона могла бы испо-

льзовать эту технологию для обмана в случае будущего полного запрещения испытаний. В рамках всеобщего запрещения испытаний программа ИТ будет, возможно, обсуждаться как путь для сохранения кадров специалистов по физике вооружений, а также как средство для испытаний воздействия ядерного оружия. Но без подземных испытаний с большой мощностью одного лишь ИТ будет недостаточно для разработок систем третьего поколения. Тогда через 20 лет (скажем, к 2010 году) стратегическая перспектива, основанная на том, что испытания с порогом 150 кт продолжались в течение 90-х годов, а соглашение о пороге в 1 кт было достигнуто в 2000 году, может выглядеть совсем непохожей на такую, когда соглашение о всеобщем запрещении испытаний было достигнуто в 1990 году. Если испытания с порогом 150 кт будут продолжаться в 90-е годы, то несомненно будет иметь место соперничество между улучшением сейсмической верификации и разработкой важных военных новинок при низких мощностях, причем победителя пока нельзя определить. Дальнейший прогресс вспомогательных технологий типа ЛМИ, исследований лабораторного рентгеновского лазера (включая ИЛЭП), УБПЭ и ИТ (первые две уже значительно продвинуты, а две последние будут в пределах досягаемости в 90-х годах) также скорее всего ускорит разработку оружия, усилит аргументацию против верификации всеобщего запрещения испытаний и понизит уверенность в эффективности любого режима запрещения испытаний по предупреждению появления новых типов оружия. Более того, может продолжать расширяться аргументация в пользу новых технологий, включая как противостояние ракетам с подвижным стартом, дискриминацию на баллистическом участке траектории для задач ПРО, так и противоспутниковый потенциал. С порогом на испытания в 150 кт оружие третьего поколения может так переплестись в 90-х годах с гонкой ядерных вооружений, что этот узел окажется трудно развязать. Но если быстро ввести в действие договор о пороге на испытания в 1 кт или договор о всеобщем запрещении испытаний, будут подорваны побудительные мотивы и технические возможности для разработки систем третьего поколения. С другой стороны, похоже, что возможность обнаружения испытаний с малой мощностью будет продолжать улучшаться, особенно если учесть существующие возможности размещать аппаратуру на территории другой стороны и проводить инспекцию на местах. Хотя раннее запрещение испытаний может оказаться несовершенным средством, но это, по-видимому, лучшее предупреждающее ле-

карство против гонки вооружений третьего поколения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор хотел бы поблагодарить Эштона Картера, Стива Феттера, Ричарда Гарвина, Майкла Мея, Ричарда Руквиста и Фрэнка фон Хиппеля за многие полезные замечания при чтении рукописи. Финансирование работы частично было обеспечено стипендией от фонда Слоана.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Ответы на вопросы сенатора Марка Хэтфилда на слушании в подкомитете сенатского комитета по ассигнованиям, "Hearings on Energy and Water Appropriations for FY 1987", part 2, 99th Congress, 2nd Session, p.642 (1986).
2. Заявление "Предложения запретить ядерные испытания", подготовленное для слушаний в подкомитете по контролю над вооружениями, международной безопасности и науке комитета палаты представителей по иностранным делам, 18 мая 1985 г., стр.93.
3. Отличное обсуждение этих вопросов приводится, например, в следующих работах: S.Fetter "Stockpile Confidence Under a Nuclear Test Ban", International Security, 12, 3 (Winter 1987-1988), pp.132-167; John D. Immele, Paul S. Brown, and Steve Fetter, "An Exchange on Stockpile Confidence", International Security, 13, 1 (Summer 1988), pp.196-215; and Steve Fetter, Towards a Comprehensive Test Ban (Cambridge, Massachusetts: Ballinger, 1988).
4. Такова была общая точка зрения подавляющего большинства технических и политических экспертов - участников Бельмонской конференции, прошедшей 29 сентября - 1 октября 1988 года под Вашингтоном. Среди ее участников Ричард Гарвин, Рэй Киддер, Кристофер Пейн, Линн Сайкс, автор данной статьи и еще более двадцати специалистов. Belmont Conference on Nuclear Test Ban Policy, "Phasing Out Nuclear Weapons Tests; A Report to the President and Congress", (Washington DC: National Resources Defense Council, 1989).
5. Seismic Verification of Nuclear Testing Treaties, OTA-ISC-362 (Washington DC: US Government Printing Office, May 1988). См. также следующие статьи: J.R.Evernden, C.B.Archambeau, and E.Cranswick, Reviews of Geophysics, 24, 2 (May 1986), p.149, and W.J.Hannon, Science, 227, 4684 (18 January 1985), p.251.
6. Лучше всего характеризовать оружие третьего поколения тем, каким образом оно выделяет энергию на цели после взрыва, а не средствами его доставки - ракетой, самолетом или спутником. Благодаря возможности усиления степени поражения на больших расстояниях путем создания направленности для некоторых форм энергии в виде узкого пучка возник значительный интерес к потенциалу маломощных взрывов для накачки таких устройств. Смотрите следующие статьи: T.B.Taylor, "Nuclear Testing is a Pandora's Box", FAS Public Interest Report, 39, 10 (December 1986), p.9; "Third Generation Nuclear Weapons", Scientific American, 256, 4 (April 1987), p.30.
7. Для целей этой статьи понятие "всеобщее" запрещение испытаний относится ко всем ядерным взрывам за исключением таких настолько слабых, что их можно проводить в наземных камерах, расположенных среди постоянно действующих исследовательских установок.
8. В то время как эту аргументацию пытаются противопоставить утверждениям, что СОИ стремится разработать вооружения третьего поколения в своих интересах, она практически не уменьшает опасений, что такая деятельность может на самом деле стать началом новой гонки вооружений с СССР. "Исследовательское" опровержение этих программ приобретает смысл, если только сами исследования доказывают абсолютную бесполезность концепций - это такое заключение, к которому редко можно прийти (если вообще это возможно) на основе ограниченного объема научно-исследовательских работ.
9. Материалы комитета по ассигнованиям палаты представителей США: "Energy and Water Appropriations for 1987", part 6, p.1394. См. статью S.Aftergood, "Nuclear Aspects of the SDI", представленную на симпозиум Американского физического общества "Физика и общество", стр.3 (Арлингтон, Вирджиния, 21 апреля 1987 г.).
10. Материалы комитета по ассигнованиям палаты представителей США: "Energy and Water Appropriations for 1987", part 5, p.614. Единственно известное испытание ЯКО (с мощностью менее 20 кт) произошло 17 августа 1985 года и ему присвоено название "Чамита".
11. M.D.Lemonick, "A Third Generation of Nukes", Time, 25 May 1987, p.36; "SDI's Nuclear Shotgun on Pentagon Fast Track", Washington Times, 22 April 1987, p.1A, and T.Taylor, "Third Generation Nuclear

- Weapons" [6], pp.30-39.
12. Richard D. Hahn, заявление, процитированное в статье "Strategic Connections in Space", Air Force Magazine, August 1987, pp.78-84.
 13. "Particle Beams and Laser Weapons, Part 1", Aviation Week and Space Technology, 28 July 1980, p.34. Практически нет сомнений, что рассматривалась ядерная накачка эксимерного лазера, но детали засекречены. По-видимому, ядерная детонация не будет достаточно эффективной для накачки эксимерных лазеров из-за слишком быстрого выделения энергии, что приведет (с учетом характерного времени 0.5-1 мкс для эксимеров) к очень быстрому перенасыщению накачки рабочего газа. См. также "Report to the APS of the Study Group on Science and Technology of Directed Energy Weapons", Reviews of Modern Physics, 59, 3, part 2 (July 1987), pp.S47-S54.
 14. См., например, статьи: Ray E. Kidder, "Military Significant Nuclear Explosions Yields", FAS Public Interest Report, 38, 7 (September 1985), p.2; and W.J.Broad, "Seismic Data Show 117 Secret US Atom Tests", New York Times, 17 January 1988, p.1.
 15. Испытания оружия первого и второго поколения в этом диапазоне мощностей взрыва состоят в конструировании большинства типов блокировочных устройств (т.н. PAL) и периодической разборке, инспекции и повторной сборке подпорченных боеголовок. Основные атомные бомбы для артиллерийских снарядов можно надежно сконструировать и без ядерных испытаний, как это произошло с бомбой, сброшенной на Хиросиму. Кроме того может быть использована процедура, называемая гидроядерным испытанием, для испытания боеголовок на побочную безопасность. Эта методика предусматривает проведение целой серии взрывов, причем каждый раз содержание ядерных материалов слегка увеличивается до тех пор, пока не будет достигнута небольшая мощность ядерного взрыва. За период моратория на ядерные испытания в 1958-1961 гг. было проведено свыше 35 гидроядерных испытаний, каждое из которых обладало мощностью ядерного взрыва, эквивалентной взрыву динамита с массой гораздо менее 1 кг. R.N.Thorn and D.R. Westerveldt, "Hydronuclear Experiments", Los Alamos Report LA-10902-MS, February 1987, p.6.
 16. Sandia National Laboratory News Release, 21 April 1983; and "SNL Radiation Facilities", third edition, SAND83-0598, December 1985. В ЛМИ как электронный ускоритель Гермес-3, так и ускоритель Сатурн (который является разновидностью ускорителя пучков частиц для термоядерного синтеза PFBA-I, первоначально использовавшегося для эксперимента по ИТ) генерируют пучки с мощностью в 20 ТВт ($2 \cdot 10^{13}$ Вт) в импульсе длительностью 30 нс - больше 0.5 МДж в каждом выстреле. Они могут произвести несколько выстрелов в день и генерируют, соответственно, гамма- и рентгеновские спектры. Кроме того, накоплено более 100 тысяч кюри цезия-137 (и столько же кобальта-60) для проведения радиационных гамма-испытаний с энергиями порядка МэВ.
 17. R.Kidder [14], p.2.
 18. Порог в 1 кт - это всего лишь произвольная величина, лежащая внутри диапазона 0.1-10 кт и требующая сейсмических станций на территории инспектируемой стороны. Для надежного детектирования и идентификации ядерных взрывов с декаплингом, по-видимому, потребуются пороги порядка 5-10 кт, в то время как взрывы без декаплинга могут быть, по крайней мере, детектированы при более низких (0.1-0.5 кт) порогах. Смотрите Seismic Verification of Nuclear Testing, [5], pp.9-14.
 19. Frank von Hippel, Harold A. Feiveson, and Christopher E. Paine, "A Low-Threshold Nuclear Test Ban", International Security, 12, 2 (Fall 1987), pp.135-151. Форсирование связано с помещением небольшого количества (всего несколько грамм) дейтерия и трития внутрь первичного ядерного запала. В тех условиях, которые возникают при взрыве, термоядерное топливо может "поджечься" и испустить много нейтронов, что резко повышает эффективность процесса деления.
 20. Поскольку в больших термоядерных боеголовках ответственность за надежность всей системы ложится, в основном, на ядерный запал, можно поддерживать уверенность в боеспособности большей части существующего арсенала. Можно даже проектировать новые запалы (например, более безопасные с не столь чувствительной взрывчаткой) на основе испытаний с порогом неже 10 кт.
 21. Nuclear Weapon Databook, volume 1, p.2-00.
 22. R. Stephen Craxton et al., "Progress in Laser Fusion", Scientific American, 255, 2 (August 1986), pp.68-79; and Thomas H. Johnson, "Inertial Confinement Fusion: Review and Perspective", Proceedings of the IEEE, 72, 5 (May 1984), pp.548-594.

23. Хотя для поджига ИТ-таблеток не требуется столь много энергии, как для поджига термоядерных реакций в боеголовках (где нужны запалы, по крайней мере, в 0.1-1 кт, или около 10^{12} Дж), все еще считается, что ИТ требует почти 10 МДж для достижения температур и давлений, необходимых для синтеза. Более того, эта энергия должна быть за несколько нс вложена в сферу миллиметрового диаметра. Сейчас в распоряжении имеется пара основных наносекундных запускающих устройств для ИТ - это лазер "Нова" в Ливерморе стоимостью около 200 млн. долларов и усовершенствованный ускоритель пучков частиц (легких ионов) для синтеза (PFBA II), стоящий около 50 млн. долларов.
24. US Department of Energy, "Civil Energy Programs Authorization Act for FY 1987", House of Representatives Report 99-719, part I.
25. Mark Crawford, "Underground Tests Used in Laser Fusion", Science, 233, 19 September 1986, p. 1256; and National Academy of Sciences, "Review of the Department of Energy's Inertial Confinement Fusion Program", W. Harper Jr., chairman, (Washington DC: National Academy Press, March 1986), p. 47, 55. Программа "Соль центуриона" проводилась совместно Ливерморской и Лос-Аламосской национальными лабораториями. Хотя ее детали засекречены, сообщается, что в программе (характеризуемой как "вполне успешной") было осуществлено теоретическое и экспериментальное сотрудничество конструкторов оружия и ученых-специалистов по ИТ.
26. NAS "Review of ICF Program" [25], p. 35.
27. M.D. Rosen et al., "Exploding Foil Technique for Achieving Soft X-Ray Laser", pp. 106-109; and D.L. Matthews et al., "Demonstration of a Soft X-Ray Amplifier", pp. 110-113, Physical Review Letters, 54 (14 January 1985).
28. Различия между лабораторным рентгеновским лазером в мягком рентгене или жестком ультрафиолете и ядерным вариантом не столь уж незначительны. Кроме того, что выходные длины волн и мощности различаются на несколько порядков величины, накачка активной рентгеновской среды видимым светом резко отличается от накачки тепловым рентгеном ядерного взрыва. Еще в 1981 году сообщалось о когерентном излучении от взрывного варианта (Clarence A. Robinson, Jr., "Advance Made on X-Ray Laser", Aviation Week & Space Technology, 23 February 1981) и с тех пор за последние шесть лет было проведено по крайней мере пять подземных испытаний. Тем не менее, оценки полного числа испытаний, требуемых для завершения исследовательской программы по рентгеновскому лазеру, колеблются от 30-50 (Ганс Бете, Корнелл) до 100-300 (Боб Селдон, Лос Аламос). См., например, следующие статьи: FAS Public Interest Report (December 1986), p. 5-6; and Thomas B. Cochran, et al., Nuclear Weapon Databook, Volume 2, Cambridge, Massachusetts: Ballinger, 1987), p. 24.
29. Две такие программы "были использованы с большим успехом" (Rosen et al., "Exploding Foil Technique", [27], p. 106). Это LASNEX, моделирующая взаимодействие лазера с фольгой, включая поглощение излучения, прожигание дырки и гидродинамическое движение плазмы, а также XRASER, которая моделирует лазерный процесс с использованием подробных данных об атомных спектрах.
30. George Chaplin and Lowell Wood, "X-Ray Lasers", Physics Today, June 1975, p. 43, figure 3.
31. Matthews et al., "Demonstration of Soft X-Ray Amplifier", [27], p. 110.
32. "The Electron Beam Ion Trap", Energy & Technology Review, August 1988, p. 84.
33. Поджиг ИТ-таблеток таким методом требует, по-видимому, взрывов с большой мощностью, поскольку очень трудно сфокусировать заметную часть излучения бомбы на таблетку диаметром не более нескольких миллиметров, особенно когда эксперимент приходится проводить на таких расстояниях от места взрыва, чтобы диагностическая аппаратура оставалась неповрежденной продуктами взрыва по крайней мере в течение нескольких десятков нс.
34. См. ссылку 30, p. 42. Время t для спонтанных разрешенных переходов между энергетическими электронными уровнями приблизительно равно $t = 10^{-15} \lambda^2$ с, где длина волны λ выражена в ангстремах. Чтобы конкурировать с переходами на длине волны 1 ангстрем (10 кэВ), требуется накачка со скоростью 10 кэВ за 10^{-15} с, или примерно 1 Вт на атом. Это огромный поток энергии, но его можно достигнуть при ядерных взрывах. Например, при взрыве с мощностью 100 кт в виде рентгеновских лучей выделяется $4 \cdot 10^{23}$ Вт за 10^{-9} с. Поскольку типичная плотность твердого тела составляет примерно $5 \cdot 10^{22}$ атомов в см^3 , эта мощность выделит около 1 Вт на каждый атом, если она будет равномерно поглощена в 8 см^3 твердого активного тела. Например, объем цилиндра длиной 65 см, диаметром 20

- см и толщиной 20 микрон составит 8 см^3 .
35. См., например, техническое обсуждение в статье Косты Циписа (Costa Tsipis), "Third-Generation Nuclear Weapons", SIPRI Yearbook of World Armaments and Disarmaments 1985 (Oxford: Oxford University Press, 1985), pp.97, 103-106.
 36. Стратегические и операционные недостатки рентгеновских лазеров обсуждаются в ряде публикаций и к ним мы больше обращаться не будем. Один из примеров: Ashton B. Carter, Directed Energy Missile Defense in Space - A Background Paper, (Washington DC: US Congress, Office of Technology Assessment, OTA-BP-ISC-26, April 1984), pp.24-28, 45-52; and [35], pp.94-98.
 37. Theresa M. Foley, "Martin Marietta Selected to Design Potential Nuclear SDI Systems", Aviation Week & Space Technology, 10 August 1987, p.113. Фирме "Мартин Мариетта" был предложен контракт на 20 млн. долларов для изучения основных параметров рентгеновских лазеров, а также 11 млн. долларов на концепцию "Прометей" - каждый из них сроком на три года.
 38. APS Report, "Directed Energy Weapons", ссылка 13, p.89.
 39. Заявление бывшего директора Организации СОВ генерал-лейтенанта Джеймса Эбрахамсона, процитированное в статье Lemonick, "Third Generation of Nukes", [11], p.36.
 40. D.C.Waller, and J.T.Bruce, "SDI Progress and Challenges, Part II", Office of Senators William Proxmire and J. Bennet Johnston, 19 March 1987, pp.25, 39.
 41. Несекретные материалы семинара по интерактивной дискриминации в фирме SPARTA, Inc, 1986. Скорость 100 км/с - это среднее между той целью в 50 км/с, которая ставилась в 60-х годах (и эта задача была решена лишь частично), и скоростями порядка 1000 км/с, возможными в концепции плазменной гаубицы. Последняя, как сообщается, работает с эффективностью 10% вплоть до мощности взрыва в 1 Мт, хотя направленность пучка невелика - всего лишь 10^{-2} радиана. Скорости порядка 1000 км/с неизбежно сопровождаются ионизацией, а поскольку заряженные частицы искривляются в геомагнитном поле, они не годятся для использования на больших расстояниях. Однако, как предполагается, при скоростях до 200 км/с ионизации не будет.
 42. Детально ядерные кумулятивные заряды анализируются, например, в статье R. Shall, "Detonation Physics" in P. Caldirola and H. Knoepfel, eds., Physics of High Energy Density, (New York: Academic Press, 1971), pp.230-244.
 43. Friedwardt Winterberg, The Physical Principles of Thermonuclear Explosive Devices, New York: Fusion Energy Foundation, 1981), p.117. Обычные кумулятивные заряды использовались для взрывчатых веществ, противолодочного оружия и новых противотанковых снарядов (все эти применения продолжают разрабатываться в Ливерморе), а также для поджига атомного запала в термоядерных боеголовках. См. Energy & Technology Review, LLNL, (June-July 1986), pp.14-15.
 44. Устройствами, основанными на этих принципах, занимались в 60-х годах. Проект "Орион" исследовал их потенциал для использования в качестве источника тяги в космосе. Проекты с военными приложениями носили названия "Касаба" и "ядерная гаубица".
 45. Скорость ударной волны детонационного фронта составляет $(32 \text{ кТ}/3\text{М})^{1/2}$, где М - средняя масса иона термоядерного топлива. При подходящей геометрии вещество может двигаться во много раз быстрее этой скорости. В конусной геометрии скорость струи равна $v/\sin q$, где v - скорость детонационного фронта, а q - половина угла конуса. Практический минимум для q , как сообщается, был найден при $q \approx 0.1$. См. книгу Winterberg, [43], pp.41, 122.
 46. Семинар фирмы SPARTA, [41]. Такой уровень эффективности сохраняется, по-видимому, примерно до 50 кт, но из-за чернотельного рентгеновского излучения он уменьшается до 1% при больших мощностях взрыва.
 47. R.S. Norris, T.B. Cochran, and W.M. Arkin, "Known U.S. Nuclear Tests July 1945 to 31 December 1987", Nuclear Weapons Data-book Working Paper NWD 86-2, NRDC, September 1988.
 48. Интегральный поток энергии в каждом пучке E (Дж/м²) примерно равен $nY/(N_b R^2 q^2)$, где n - часть полной энергии, перешедшая в энергию дробинки, Y - мощность взрыва (1 кт эквивалентна $4.2 \cdot 10^{12}$ Дж), N_b - число независимых пучков, подпитываемых одной бомбой, R - расстояние до цели, а q - угол расходимости отдельного пучка. Маневрирующая цель может выйти из области, перекрываемой пучком, если $a_m R/v_f^2 > q$, где a_m - величина среднего ускорения цели, v_f - скорость частицы, а $t = R/v_f$ - время вылета частицы. (Для сравнения отметим, что среднее ускорение МБР близко к 40 м/с^2). Для выделения такой энергии требуется полная масса на пучок порядка

$$M_b = 2E(Rq)^2/v_f^2.$$

49. Например, при покрытии боеголовки алюминием (самым летучим веществом, какой только можно представить) результирующий импульс от испарения оболочки сможет только сбить боеголовку массой в 350 кг с курса всего лишь на 15 м за 20 минут воздействия (это почти в пять раз больше, чем для случая без аблативного покрытия), что не ухудшит значительно точность современной МБР (около 150 м). Конечно, если столкновение приведет к кувырканию боеголовки при входе в атмосферу, результаты окажутся менее предсказуемыми.
 50. Несекретный материал фирмы SPARTA, Inc, "SDI Graceful Evolution Architecture Study", 1986. В этой схеме устройства "Прометей" подлежит развертыванию на третьем (из семи) этапов ввода в строй полной системы.
 51. APS Report, "Directed Energy Weapons", ссылка 13, p.S157.
 52. Реальная динамика столкновений пылинок, обладающих большой скоростью, с тонкостенными ложными целями или тяжелыми боеголовками достаточно сложна. Передаваемый импульс может возрасти в несколько раз, если пыль вызывает значительное взрывное испарение, или же он может уменьшиться, если пыль прилипает к объекту или проходит через него. Предположим, что импульс пыли передается непосредственно ложной цели, а $m_{dust}V_{dust} = M_{decoy}\Delta v$, где m_{dust} - масса пыли, ударяющей по цели. Тогда можно получить следующее соотношение:
- $$Y\eta = (A_{cov}/A_{decoy})M_{decoy}\Delta vV_{dust}/2,$$
- где Y и η - снова обозначают мощность взрыва и эффективность образования пылевой струи, A_{cov} - полная площадь, покрываемая пылевым пучком и равная примерно $(Rq)^2$, а Δv - изменение скорости ложной цели, вызванное налетающей пылью. Тогда полная масса пылевого облака составит $2Y/V_{dust}^2$.
53. При этом предполагается, что устройства "Прометей" не будут подорваны до тех пор, пока не станет очевидным, что боеголовки покинули последнюю ступень и отделяются со скоростью не более 0.25 км/с (если столкновение произойдет через 20 минут, то они разойдутся на 300 км). Предполагается также, что в этом случае расходимость пучка будет выше - 2.5 мрад вместо 1 мрад.
 54. Даже в предположении (как это сделано разработчиками фирмы SPARTA), что ча-

- стички можно защитить от излучения взрыва на первые 100 мкс (после пролета 10 м при скорости 100 км/с, набранной в частично заэкранированном "ружейном дуле") и что 10% энергии взрыва бомбы в 1 кт испускается в виде излучения в интервале между первыми 100 мкс и, скажем, 1 мс, то за этот интервал на дробинки попадет излучение с общей интенсивностью до 3 кДж/см². Если масса частички порядка 10 мг, а плотность - 4 г/см³, то для падающего излучения эффективная толщина частички составит 0.4 г/см², то-есть при полном поглощении энерговыделение составит 7 кДж/г. Так как для стали, алюминия и многих других металлов к испарению приводит поглощение 8-15 кДж/г, похоже, что испарение окажется очень серьезной проблемой при мощностях взрыва выше 1 кт.
55. Микроволновое оружие с накачкой от обычных источников энергии продолжает вызывать интерес в военных кругах. Этой проблеме были посвящены несколько крупных секретных конференций (см. раздел "Объявления о конференциях" в журнале Aviation Week & Space Technology, 3 November 1986, p.151).
 56. Nuclear Weapons Databook, volume I.
 57. Не обладающие направленностью типы микроволнового оружия называются "ЭМИ-оружием с повышенным выходом". Скорее всего, в них используется взаимодействие части излучения ядерного взрыва с атмосферой или ионосферой, причем делается попытка расширить область этого взаимодействия за пределы зоны прямой видимости. Однако благодаря договору о запрещении ядерных испытаний в трех средах такие устройства нельзя ни легально, ни тайно испытывать, так что больше они обсуждаться не будут.
 58. L.W. Ricketts, J.E. Bridges, and J. Miletts, EMP Radiation and Protective Techniques, (New York: Wiley, 1976), pp.28-29. Гамма-лучи и рентгеновские лучи высокой энергии вызывают излучение электронов, направленное как вперед, так и назад. Этот процесс благодаря появлению т.н. комптоновского объемного заряда может привести к появлению внутренних полей в спутниках с напряженностью порядка 1 МВ/м. Смотрите, например, книгу S. Glasstone and P.J. Dolan, The Effect of Nuclear Weapons, (Washington DC: US Government Printing Office, 1977), pp.521-523.
 59. При ядерном взрыве многие продукты деления образуются в возбужденном состоянии, которое снимается мгновенным излучением гамма-квантов. Нейтроны с

высокой энергией от реакции синтеза также могут образовывать гамма-кванты или при поглощении нерасщепляющихся ядрами (например, азотом), либо при неупругом рассеянии на ядрах более тяжелых элементов. Результирующий гамма-импульс достигает максимума через несколько десятков нс после начала взрыва и длится всего лишь примерно 10 нс.

60. Glasstone and Dolan, ссылка 58, pp.326-327, 340-343. Мгновенное нейтронное и гамма-излучение, возникающие в продуктах взрыва за первые несколько десятков нс, уносят по несколько процентов от полной энергии обычного ядерного взрыва (в термоядерных устройствах нейтронный выход значительно выше). Поскольку гамма-лучи в основном снова поглощаются плотными разлетающимися осколками, только несколько процентов первичных гамма-лучей выходят из области взрыва. Но мгновенные нейтроны частично компенсируют этот эффект, образуя дополнительные мгновенные гамма-кванты за счет реакций поглощения и рассеяния.
61. Одно из преимуществ использования гамма-лучей, а не рентгена, для получения электронных токов в микроволновых генераторах состоит в том, что в отличие от рентгена, имеющего тепловое происхождение, гамма-кванты образуются в ядерных процессах даже при меньших удельных мощностях боеголовок с малой мощностью взрыва.
62. Conrad L. Longmire, "On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosions", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-26, 1 (January 1978), p.4.
63. D.F. Higgins, K.S.H. Lee, and L. Martin, "System Generated EMP", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-26, 1 (January 1978), p.15. Поскольку пробег электронов в веществе обычно гораздо короче пробега гамма-кванта, комптоновские электроны, выходящие из металла, образуются около поверхности металла и обладают типичным коэффициентом обратного рассеяния около $5 \cdot 10^{-4}$ для алюминия и $2 \cdot 10^{-3}$ для золота (для квантов с энергией 1 МэВ).
64. Электронная плазменная частота f_p примерно равна $8,98 n^{1/2} \text{ с}^{-1}$, где электронная плотность n выражена в единицах см^3 .
65. Если допустить, что на каждые 1000 гамма-квантов образуется 1 электрон, то фотоны с энергией 1 МэВ, уносящие 1% энергии килотонного взрыва, образуют максимально $3 \cdot 10^{20}$ электронов. Если распределить эти электроны по волноводу объемом несколько м^3 , их плотность была бы около 10^{14} см^3 , а основная частота плазменных колебаний - около 100 ГГц.
66. В виркаторах используется собственное электрическое поле интенсивного электронного пучка с характерным током в десятки кА для модуляции электронной плотности и образования колеблющегося "виртуального катода". Они работают только в импульсном режиме, но обладают широкополосностью и способностью к настройке. В отличие от гиротронов, лазеров на свободных электронах и других микроволновых устройств виркаторы не нуждаются ни в громоздких магнитах, ни в пучках высокого качества. Получены мощности до 20 ГВт на частоте 1 ГГц и частоты до 40 ГГц. Один высокоомощный виркатор с названием "Джипси" использовался ВВС США для моделирования ЭМИ. См., например, статью "Air Force Examines Effects of Microwaves on Electronic Systems", Aviation Week & Space Technology, 7 December 1987, p.85.
67. В предположении, что 1% энергии взрыва получается в виде мгновенных гамма-квантов ($1 \text{ кт} = 4.2 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$), 10^{-3} этих квантов образуют электроны, а эти электроны излучают всю свою энергию - это верхний предел. Обратите внимание, что только 10^{-6} - 10^{-5} энергии высотного взрыва обычно переходит в ЭМИ в атмосфере, [62].
68. Компьютерные чипы попадают куда-то в середину этого диапазона. При импульсах короче примерно 100 нс модель повреждений Вунша предсказывает нарушение контактов при некоем уровне энергии (но не мощности), поскольку за такое короткое время тепло не может диссипировать. Микроволновый нагрев тканей и поверхностные ожоги происходят при гораздо больших флюенсах, в диапазоне 20-100 Дж/см², а для плавления или раскалывания металла требуются столь большие флюенсы, как 1-10 кДж/см². См. [58], p.76 и статью R.J. Antinone, "How to Prevent Circuit Zapping", IEEE Spectrum, April 1987, p.37.
69. Для синусоидальной электромагнитной волны, электрическое поле которой равно E , средняя интенсивность I (в единицах Вт/м²) дается выражением $I = E^2/2\zeta$, где $\zeta = (c\epsilon_0)^{-1} = 377 \text{ ом}$.
70. E.C. Cnare, J. Kaye, and M. Cowan, "A 2 MJ Staged Explosive Generator", in M.F. Rose and T.H. Artin, eds., Proceedings of the 4th IEEE Pulse Power Conference, Albuquerque, NM, 6-8 June 1983, pp.102-

104. Полный объем устройства не превышает нескольких м³, включая источник питания и антенную структуру.
71. При релятивистских скоростях лайнера, возможных при ядерных взрывах, теоретически достаточно эффективным может оказаться прямое преобразование магнитного потока в электромагнитные волны, "бьющие струей" с торцов соленоида. Для этого потребуется кумулятивный заряд, чтобы сжатие соленоида началось с одного конца. Как полагают, можно думать о полях вплоть до 10^{11} гаусс. См. работы: H.E. Wilhelm, "Initial-Boundary-Value Problems for Magnetic Flux Compression", [70], p.112; and Winterberg, [43], p.123.
 72. Фронты термоядерного взрыва, имеющие скорость 1000 км/с или более, предположительно могли бы сжать лайнер магнитного потока на последние миллиметры за время короче 10 нс.
 73. В обычных устройствах используется хитроумная система обмоток соленоида, чтобы плотность тока на виток оставалась примерно постоянной во время взрыва и соответствующего возрастания полного тока, [70], p.102. Ограничения ядерного варианта могут также определяться механической прочностью обмотки, выдерживающей нарастающее давление магнитного поля (оно равно $B^2/8\pi$ в СГС-системе единиц, или $B^2/2\mu_0$ в МКС-системе). Но поскольку наносекундные времена настолько короче "скин-эффектного" времени $t = d^2\mu_0\sigma/2$, равного около 40 мкс для 1 мм меди с проводимостью $\sigma = 5.8 \times 10^{10}$ си-менс/м, можно считать, что поток будет почти полностью захвачен в течение того времени, пока соленоид остается в покое.
 74. Эффективность ядерного варианта взрывного генератора тока оценивается здесь как почти на два порядка величины более низкая, чем у обычного варианта по следующим причинам: более высокие температуры ядерных взрывов служат причиной появления чернотельного излучения, что понижает эффективность преобразования в чистую кинетическую энергию, а механическая прочность структуры соленоида ограничивает в предельном случае величину кинетической энергии, которую можно преобразовать в ток. Но отсюда следует, что ядерная эффективность может значительно вырасти при уменьшении мощности взрыва.
 75. Наоборот, усредненная интенсивность обычного ЭМИ от мегатонного взрыва на высоте 200 км составит всего лишь 10^{-7} - 10^{-6} Дж/см² на территории, близкой по площади половине США, причем случайные сигналы могут резко меняться от района к району хаотическим образом. Это вряд ли соответствует описанию тщательно подготовленного, или т.н. "хирургического", ядерного удара.
 76. Широкий круг взглядов на желательность, стратегию и последствия т.н. "ограниченной ядерной войны" можно найти в следующих статьях: C.S. Gray and K. Payne, "Victory is Possible", Foreign Policy, Summer 1980, pp.14-27; A.B. Carter, J.D. Steinbruner, and C.A. Zraket, eds., Managing Nuclear Operations, (Washington DC: Brookings Institution, 1987), pp.3-4, 11, 151-152, 198-204; and W. Daugherty, B. Levy, and F. von Hippel, "Consequences of 'Limited' Nuclear Attacks on the USA", International Security, 10, 4 (Spring 1986), pp.3-45.
 77. Energy and Technology Review, September 1986, p.4.
 78. Soviet Military Power 1989, US Dept. of Defense, (Washington DC: UD Government Printing Office, 1989), p.45.
 79. H.K. Florig, "The Future Battlefield: A Blast of Gigawatts?", IEEE Spectrum, 25, 3 (March 1988), p.52.
 80. Например, V.L. Grantstein, "High Power and High Peak Power Gyrotrons: Present and Future Prospects", International Journal of Electronics, 57, 6 (June 1986), pp.787-799.
 81. W.R. van Cleave and S.T. Cohen, Nuclear Weapons, Politics, and the Test-Ban Issue (New York: Praeger, 1986), p.72.
 82. Эдвард Теллер более двадцати пяти лет тому назад превозносил достоинства тактических вооружений, свободных от радиоактивных осадков и обладающих очень малой мощностью взрыва, но их никогда не демонстрировали. См. его статью "The Case for Continuing Nuclear Tests", опубликованную впервые в 1961 году и затем перепечатанную в виде приложения 64 к Test-Ban Hearings of 1985, "Proposals to Ban Nuclear Testing", pp.3-31-336.