T.H. Braid, A. De Volpi, C.L. Herzenberg, G.R. Ringo, G.S. Stanford
Laser Brightness Verification
*Science and Global Security,* 1990, Volume 2, No. 1, pp. 59-78

# ВЕРИФИКАЦИЯ ЯРКОСТИ ЛАЗЕРОВ

*Т.Х. Брэйд, А. Де Вольпи, К.Л.Герценберг, Дж.Р. Ринго, Дж.С. Стэнфорд*

Предельные значения яркости мощных лазеров позволяют однозначно сформулировать возможные соглашения по контролю над вооружениями. При достаточно высоких уровнях мощности и определенной степени сотрудничества между сторонами эти уровни могут быть верифицированы. Мы предполагаем использовать потенциальную яркость, определенную как произведение мощности пучка на квадрат диаметра пучка, деленное на квадрат длины волны излучения, как удобный контрольный параметр. Реальная яркость будет зависеть от состояния атмосферы. Обсуждаются проблемы использования для целей верификации мониторов, расположенных вблизи контролируемых установок, и верификации лазеров космического базирования.

Все авторы - это физики, работающие в Аргоннской национальной лаборатории, г. Аргонн, IL 60439, США. Выраженные в их статье мнения не обязательно совпадают с мнениями Аргоннской национальной лаборатории или Министерства энергетики США. Все вопросы, связанные с этой статьей, могут быть адресованы Дж.Р. Ринго.

Мощные лазеры наземного и космического базирования представляют собой один из классов оружия направленной энергии, которое разрабатывается для целей противокосмической (ПКО) и противоракетной обороны (ПРО). Так же, как и в случае других видов оружия направленной энергии, мощные лазеры могут в принципе использоваться для перехвата ракет или боеголовок на любом участке траектории их полета - активном, баллистическом или конечном. На конечном участке траектории наземные лазеры могут наводиться на боеголовки непосредственно, а для более ранних участков траектории пучки лазерного излучения должны наводиться на цель при помощи зеркал-ретрансляторов космического базирования. В обеих случаях пучок лазерного излучения должен будет проходить через атмосферу, что приведет к заметным (и непостоянным) ослаблению и расфокусировке пучка. Космическое базирование лазеров позволяет исключить влияние атмосферы, но и в этом случае при разработке таких систем могут понадобиться их испытания с прохождением пучка через атмосферу.

Имеются предложения соглашения об ограничении разработки и испытаний мощных лазеров с яркостью, превышающей определенный предел, заметно меньший уровней яркости, необходимых для целей ПКО и ПРО.[1] Для того, чтобы оценить технические и оперативные возможности верификации ограничений на яркость лазеров, мы сначала введем определение яркости и обсудим факторы, влияющие на роль яркости в оценке боевых возможностей лазерного оружия. Мы рассмотрим характеристики источников лазерного излучения, технические средства для слежения за мощными лазерами и проблемы, связанные с их использованием.

В проведенном анализе предполагалось, что могут быть согласованы количественные ограничения на яркость лазерных пучков, что для проверки соглашений могут быть использованы установленные на территории другой страны мониторы, что эти методы могут быть дополнены инспекциями на месте и информацией, получаемой при помощи национальных технических средств, и что может быть организована инспекция спутников перед их запуском. Однако, мы предполагаем, что достаточно подробная инспекция наземных лазеров может оказаться неприемлемой из-за опасности раскрытия нежелательных технических подробностей.

Мы считаем, что в ближайшем будущем средства космической разведки, другие национальные технические средства и агентурная разведка не позволят обеспечить полной уверенности в выполнении согласованных ограничений. Так, например, наблюдения со спутников в видимой области спектра могут оказаться невозможными из-за облачности. Несмотря на то, что облачность усложнить испытания методов фазовой компенсации и общих проблем переноса лазерных пучков, полезные испытания могут быть проведены и в нижних слоях атмосферы под облачным покровом, где в основном и проявляются физические процессы, определяющие перенос лазерных пучков.

Для того, чтобы сократить число установок, за которыми должно производиться постоянное слежение, договор следует дополнить специальными протоколами. Мы считаем, что нужно запретить создание всех лазерных установок с усредненной за одну секунду мощностью, превышающей согласованный предел. Рядом с исследовательскими установками и лазерами военного назначения с мощностью, превышающей другой согласованный предел (более низкий, чем первый), должны быть установлены станции слежения непрерывного действия.

Кроме того, надо предусмотреть возможность проведения внезапных инспекций необъявленных установок, на которых в принципе могут быть размещены мощные лазеры. В тех случаях, когда нельзя будет организовать инспекцию внутренних помещений, следует предусмотреть возможность размещения вблизи установки автоматических станций слежения (по запросу проверяющей стороны).

## ЯРКОСТЬ ЛАЗЕРОВ

Мы считаем, что ключевым параметром для идентификации лазера как боевого оружия является его яркость B, определяемая в этой статье как выражение $PD^2/(\pi\lambda^2)$, где P - мощность лазера, D - диаметр лазерного пучка вблизи источника, и $\lambda$ - длина волны лазерного излучения.[2] В используемой в этой статье системе СИ яркость выражается в ваттах на стерадиан. Далее станет понятно, что указанная характеристика является не столько реальной, сколько потенциально возможной яркостью. Реальная яркость меняется по сечению пучка и сильно зависит от разнообразных атмосферных эффектов.

Потенциальную яркость лазеров можно контролировать при помощи непрерывно действующих станций слежения, расположенных вблизи от испытываемых в атмосфере лазерных установок на расстоянии менее одного километра. Как будет показано ниже, предельная яркость лазеров в $10^{21}$ ватта на стерадиан не позволит использовать их для уничтожения ракет на больших расстояниях (более тысячи километров). Для того, чтобы предотвратить применение лазеров для повреждения спутников, надо установить значительно более жесткие ограничения.

Применение потенциальной яркости в качестве договорного критерия обладает одним недостатком - возможным ограничением на системы невоенного назначения, которым не нужна высокая когерентность излучения (иначе говоря, малая расходимость пучка). Если в отдаленном будущем такая проблема возникнет, то ее можно будет решить, дополнив договор о запрещении мощных лазеров специальным соглашением об исключениях.

**Повреждения от действия лазерного излучения.** Лазеры представляют интерес для противоракетной обороны (ПРО) прежде всего потому, что они (в принципе) могут генерировать пучки электромагнитного излучения, плотность мощности которых достаточно велика для того, чтобы повредить ракету на расстояниях в тысячу километров или даже больше.

Уровень повреждений зависит от плотности энергии, которая может быть доставлена к мишени за сравнительно короткое время $\Delta t$. Это время не должно превышать нескольких десятков секунд, но оптимальной величиной будет одна десятая доля секунды: при больших длительностях воздействия начнут действовать потери на охлаждение мишени, и для ее поражения потребуется большая энергия (но меньшая мощность), а при более коротких импульсах потребуется значительно большая мощность, при которой либо может быть повреждена сама установка, либо могут начаться нелинейные эффекты при распространении лазерного пучка в атмосфере, существенно ухудшающие его параметры.[3] Диффракционный предел интегрального потока энергии F (измеренный в джоулях на квадратный метр), который может обеспечен при использовании лазера мощностью P и зеркала диаметром D для фокусировки излучения на мишени, находящейся на расстоянии $R_T$, определяется следующим выражением:[4]

$$F = \frac{P\Delta t D^2}{\pi R_T^2 \lambda^2} \qquad (1)$$

Используя приведенные выше выражение для яркости лазера, можно получить, что

$$F = \frac{\Delta t}{R_T^2} B \qquad (2)$$

Поскольку параметры $\Delta t$ и $R_T^2$ в основном зависят от набора целей, основным параметром для оценки поражающих возможностей лазера является его яркость B. Например, при длительности воздействия $\Delta t$ = 0,1 сек, и характерном интервале интегрального потока энергии для поражения защищенных целей от 10 до 1000 МДж/м$^2$ (см. примечание[5]), необходимая для находящихся на расстоянии в 1000 км целей яркость лазера должна лежать в интервале от $10^{20}$ до $10^{22}$

Вт/стер.

Следует отметить, что разумным договорным критерием может быть и величина $B\Delta t$. Длительность генерации излучения измерить сравнительно легко, и, по-видимому, эта величина будет контролироваться тем же самым монитором. Во всяком случае, различие между яркостью и указанным параметром с точки зрения контроля ограничений невелико.

Важным параметром является рабочая длина волны лазера. Пропускание в атмосфере (см. рис.1), по-видимому, ограничивает нижнюю границу рабочего диапазона лазеров наземного базирования величиной около 0,4 микрона. Трудности изготовления силовых зеркал ограничат использование лазеров с рабочей длиной волны менее 0,2 микрона даже при космическом базировании. Поскольку размер сечения пучка пропорционален величине $\lambda^2/D^2$, то при увеличении рабочей длины волны резко возрастают требования к размерам зеркал. Поэтому длину волны в 20 микрон можно считать верхним пределом рабочего диапазона.[3]

В дальнейшем анализе мы будем считать, что диаметр пучка D измеряется на выходе пучка из лазера в атмосферу. В некоторых случаях существенен также диаметр космических зеркал-ретрансляторов, но для целей настоящей статьи это различие несущественно.

**Предельная яркость.** Из приведенных выше оценок следует, что величина яркости в $10^{21}$ Вт/стер будет ограничивать использование наземных лазеров для поражения защищенных ракет, находящихся на расстояниях больше тысячи километров (при длительности экспозиции в 0,1 секунды). Если будет принято решение ограничить и применение лазеров для дискриминации ложных целей от реальных боеголовок, то потребуется установить в сто раз меньший предельный уровень яркости, поскольку абляция поверхностного слоя, обеспечивающая дискриминацию ложных целей по баллистической отдаче, намного меньше той, которая характерна для поражаемых целей.

По сравнению с баллистическими ракетами спутники значительно более уязвимы, и, кроме того, их можно атаковать с расстояний около 150 километров. Можно считать, что порог поражения спутников будет примерно в 10 раз меньше, чем порог поражения ракет.[6] Если принять интегральный поток энергии поражения, равный 10 Мдж/м$^2$, то максимально допустимая средняя яркость импульсных наземных лазеров будет составлять в этом случае $10^{18}$ Вт/стер. Другой метод поражения спутников может быть основан на длительном воздействии излучения (в течение десятков секунд или более), которое может привести к общему перегреву спутника. Такие экспозиции легко реализовать, потому что траектории спутников предсказуемы с высокой степенью точности и отдельные спутники находятся на больших расстояниях друг от друга. В этом режиме для лазеров непрерывного действия предельная яркость должна быть ограничена величиной в $10^{16}$ Вт/стер. Для лазеров космического базирования предельную яркость установить невозможно, поскольку для этого необходимы дополнительные ог-

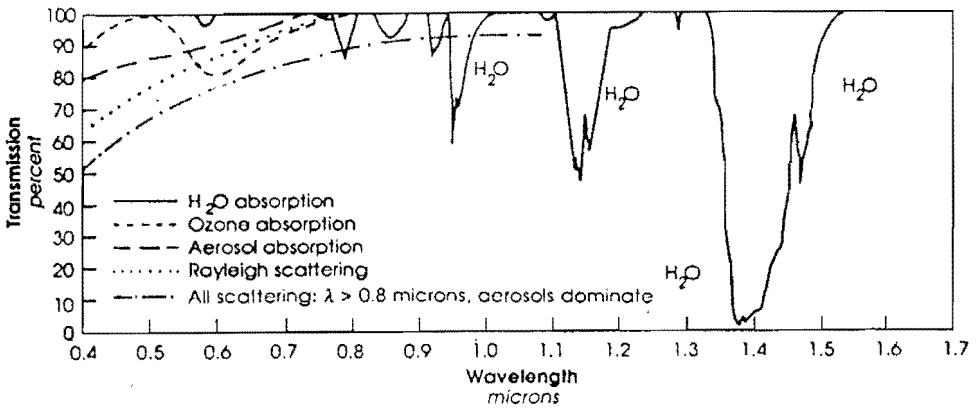


Рисунок 1

Пропускание атмосферы в ясную погоду (в процентах) в зависимости от длины волны (в микронах). На рисунке указаны доминирующие в поглощении компоненты атмосферы.

раничения на минимально допустимое расстояние сближения спутников.

В открытой литературе не имеется определенных данных о параметрах, использованных нами при оценках предельной яркости (в особенности это относится к порогам поражения), и поэтому наши оценки являются весьма приблизительными. Тем не менее, мы старались провести наш анализ слежения за испытаниями лазеров таким образом, чтобы учесть возможный разброс исходных параметров.

**Фазовая компенсация.** Вообще говоря, атмосфера является плохой средой для распространения когерентного оптического излучения.[3] При разумных размерах установок наземных лазеров для поражения космических объектов в них, по-видимому, придется использовать адаптивную оптику. Эта методика была разработана в последнем десятилетии для компенсации фазовых искажений. Детальное описание процесса фазовой компенсации весьма сложно, но для наших целей достаточно отметить следующую важную особенность: для компенсации фазовых искажений в атмосфере необходим пробный пучок излучения, который должен проходить по пути, параллельному пути основного пучка, через каждые несколько миллисекунд, что позволит измерить влияние атмосферных неоднородностей на искажение фазы. Можно использовать различные источники опорных пучков: от рассеянного излучения натриевого лазера от облака паров натрия в верхней атмосфере[7] до специальных лазеров, установленных на спутниках рядом с боевыми космическими зеркалами-ретрансляторами. В результате проводимой в источнике пучка фазовой компенсации структура поражающего пучка может оказаться очень сложной. В плоскости, перпендикулярной к оси пучка, фаза может изменяться на величину порядка одного радиана на расстояниях порядка десяти сантиметров через каждые десять миллисекунд. Очевидно, что чем мощнее лазер, тем больше вероятность использования фазовой компенсации: как из-за теплового расплывания[3], которое при повышенной мощности становится основным источником генерации атмосферных неоднородностей, так и из-за того, что при увеличении размеров основной установки стоимость системы компенсации будет составлять малую часть от общей стоимости системы.

**Требования к мощности лазеров.** Как было показано ниже, при длительности освещения, равной 0,1 секунды, оценка требуемой яркости лазеров для ПРО составляет $10^{20}$ - $10^{22}$ Вт/стер. Если противник предпримет минимальные усилия для защиты наиболее уязвимых ракет, то границы интервала изменятся до $10^{21}$ - $10^{22}$ Вт/стер. Принимая в качестве примера, что яркость равна $3 \cdot 10^{21}$ Вт/стер, длина волны равна 1 микрону и диаметр зеркала равен 3 метрам, мы получим, что мощность лазера с фазовой компенсацией должна быть равна $10^9$ Вт, а энергия за интервал экспозиции должна быть равна $10^8$ Дж. Для сравнения можно упомянуть, что энергия в импульсе мощных лазеров "Нова", применяемых в Ливерморской национальной лаборатории для экспериментов по управляемому синтезу с инерциальным удержанием, составляет $10^4$ Дж. Требования к лазерам ПРО по мощности и по энергии существенно превышают возможности любых известных нам установок. Такие лазеры несомненно будут занимать очень большие помещения с объемом не менее нескольких тысяч кубометров; рядом с ними будут располагаться мощные системы энергоснабжения, а площадь сечения свободного выхода пучка в атмосферу для проведения испытаний в режиме ПРО должна будет превышать десяток квадратных метров.

Исходя из истории развития лазеров, мы можем сделать вывод, что лазерные установки с обсуждавшимися выше параметрами в принципе могут быть разработаны в течение нескольких лет. Наиболее интересной их разновидностью является лазер на свободных электронах, в котором можно достичь высокой эффективности и обеспечить контролируемое изменение рабочей длины волны. Непонятно, однако, насколько практичной будет установка лазера на свободных электронах на космический аппарат.

## КОНТРОЛЬ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

**Наземные лазеры для ПРО.** Мы считаем, что наиболее эффективным методом слежения за распространяющимся в атмосфере пучком лазерного излучения с наземных мониторов является регистрация излучения, рассеянного на постоянно присутствующих в атмосфере аэрозольных частицах. По интенсивности рассеянного излучения можно определить мощность пучка, и, при необходимости, его диаметр и рабочую длину волны. По этим параметрам можно рассчитать потенциальную яркость лазера. Альтернативная методика прямых измерений в пучке будет сталкиваться с проблемами секретности, безопасности и точности измерений. С аналогичными проблемами может столкнуться и инспекция на месте.

Мы предполагаем, что автономные станции слежения могут быть расположены на расстоянии около одного километра от инспектируемой установки и могут наблюдать

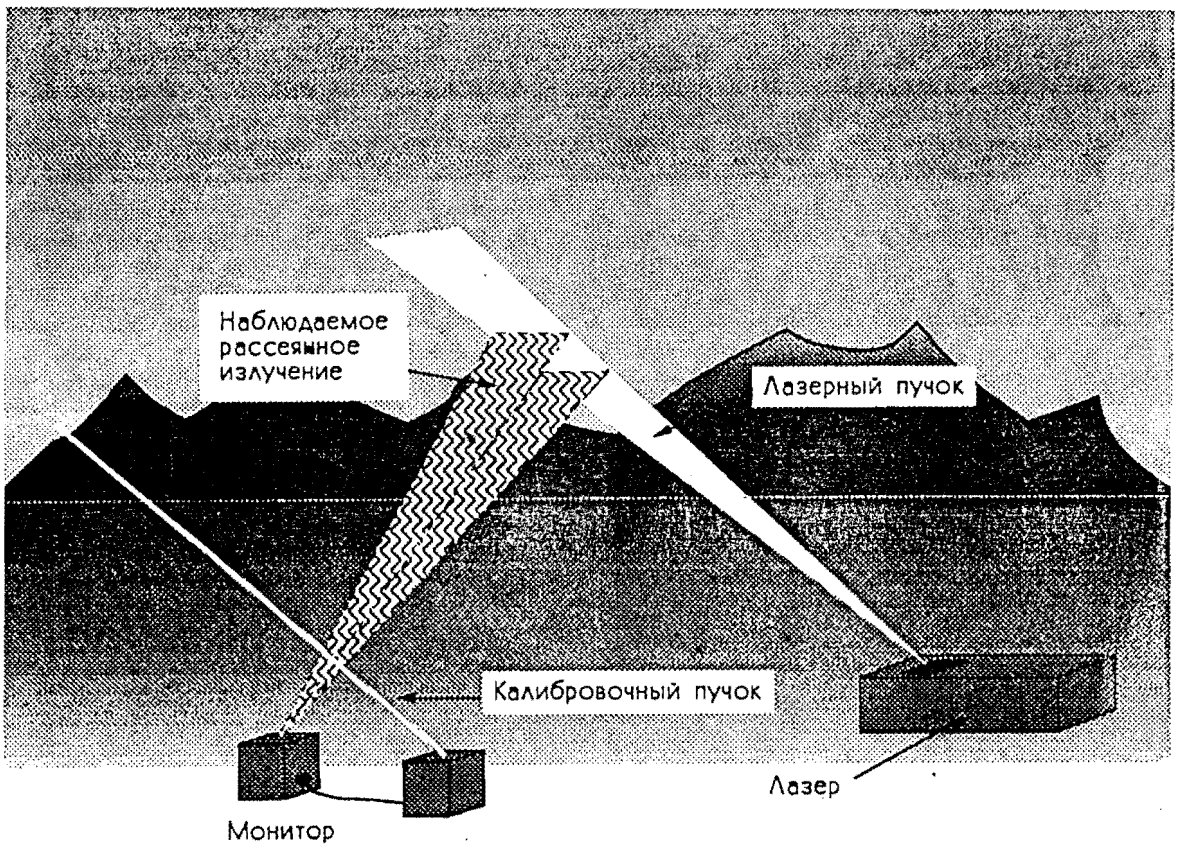


Рисунок 2
Схема расположения монитора вблизи большой лазерной установки.

распространение пучка на фоне неба (см. рис.2). Угол рассеяния не является критическим параметром и может лежать в приблизительных пределах от 55° до 180° к направлению пучка. Предполагается, что проверяющая сторона не будет оповещаться о рабочей длине волны, направлении пучка и времени проведения испытаний. Конечно, это предположение является пессимистическим и, может быть, даже невероятным (учитывая, что проверяемая сторона уже идет на сотрудничество, давая согласие на размещение вблизи своего большого лазера постоянно действующей (и, возможно, обслуживаемой) станции слежения). Тем не менее, как показано ниже, отсутствие предварительного знания рабочей длины волны или направления пучка не влияет катастрофическим образом на возможность проведения инспекции.

Мы считаем, что измерения рассеянного на атмосферных аэрозолях излучения лазерного пучка являются непосредственным, хотя и не тривиальным методом измерения мощности этого пучка. Для того, чтобы подтвердить это заявление количественно, мы будем опираться на обсуждавшиеся ниже требования к лазерам для ПРО. Яркость лазера будет равна $3 \cdot 10^{21}$ Вт/стер, мощность - $10^9$ Вт, энергия в импульсе - $10^8$ Дж. Обозначим через S долю энергии пучка, которая будет рассеяна в телесный угол в 1 стерадиан при прохождении пучком пути в 1 метр атмосферного воздуха. Эта величина зависит от угла рассеяния, но в рассматриваемом нами интервале от 55° до 180° ее изменение невелико (как правило, меньше двух раз) и для простоты оценок мы будем

считать эту величины постоянной.[8,9] Плотность потока рассеянного излучения от участка длиной в один метр вблизи монитора будет равна:

$$I_{MB} = \frac{P_B S}{R^2} \qquad (3)$$

где $P_B$ - мощность лазера и R - расстояние от области рассеивания до монитора. Разумная минимальная оценка величины S по порядку величины составляет $10^{-7}$ $м^{-1}$ [8-10] Считая, что площадь входной апертуры монитора равна $10^{-3}$ $м^2$, мы получим, что на расстоянии одного километра от пучка принимаемый сигнал будет равен $10^{-7}$ Вт, или $6 \cdot 10^{11}$ фотона в секунду (при рабочей длине волны в 1 микрон). При невысоком уровне фона зарегистрировать такой сигнал особого труда не составит.

Чем определяется уровень фона? Наиболее опасным следует считать рассеянное солнечное излучение. Для оценок мы будем считать, что величина S для лазерного излучения и для солнечного света одинакова. В этом случае излучение Солнца, рассеянное в одном кубическом метре воздуха, будет равно $I_N S$, где $I_N$ - плотность потока солнечного излучения, измеренная в $Вт/м^2$. Соответствующий поток излучения вблизи монитора будет равен $I_N S/r^2$, где r - расстояние от рассеивающего объема воздуха до монитора. Общая интенсивность фона может быть рассчитана интегрированием этого выражения по конусу с телесным углом $\Omega$, вершина которого находится у монитора. Величина телесного угла определяется шириной пучка w (поскольку размер в перпендикулярном направлении, согласно принятой методике расчета, следует считать равным одному метру). В этом случае телесный угол будет равен $\Omega = w/R^2$. Реальное интегрирование по атмосферному распределению переменной плотности довольно сложно, и поэтому для оценок будет разумно применить модель атмосферного слоя с постоянной плотностью и ограниченными размерами. В этом случае поток энергии рассеянного излучения вблизи монитора будет равен:

$$I_{MS} = I_N S \Omega L = \frac{I_N S w L}{R^2} \qquad (4)$$

где L - длина пути в атмосфере вдоль луча зрения монитора. Если оптическая ось монитора направлена в зенит, то величина L будет равна 8 километрам. При более вероятном наклонном направлении (при угле с горизонталью, равном 20°) величина L составит около 23 километров. Отношение сигналов от пучка и от рассеянного солнечного излучения будет определяться выражением:

$$\frac{I_{MB}}{I_{MS}} = \frac{P_B}{I_N w L} \qquad (5)$$

Для рассматриваемого лазера w равно 3 метрам, поток солнечного излучения равен $I_N$ = 1 300 $Вт/м^2$ и при L = 23 км отношение потоков полезного сигнала и шума равно 11, что выглядит вполне приемлемо. Тем не менее, в этой внешне простой картине имеются некоторые сложные моменты. Прежде всего, мы предполагали, что излучение Солнца рассеивается под углом не менее 45°. Если направление просмотра будет ближе к Солнцу, то интенсивность рассеянного солнечного излучения заметно возрастет. На небе могут находиться более яркие рассеивающие облака. И, что наиболее важно, мы хотим следить за лазерами, мощность которых значительно ниже $10^9$ Вт. Поэтому в следующих разделах мы рассмотрим возможные методы повышения чувствительности измерений и повышения отношения сигнала к шуму.

**Наземные лазеры для ПКО.** Слежение за лазерами, которые могут быть использованы в целях ПКО (иначе говоря, противоспутниковой обороны), представляет собой более сложную проблему из-за того, что яркость (или мощность) таких лазеров может быть в тысячу раз меньше, чем у лазера для ПРО. Мы отдельно рассмотрим два варианта слежения - за импульсными лазерами и за лазерами непрерывного действия.

*Импульсные лазеры.* В этом случае мы снова предположим, что ни рабочая длина волны лазера, ни направление его пучка заранее не известны. Средние мощность и яркость лазера будут примерно в тысячу раз меньше, чем в предыдущем случае. Мы будем рассматривать мозаичный детектор излучения размеров в 200 × 200 чувствительных элементов. Первая координата мозаичного детектора будет использоваться для развертки в одном пространственном направлении, причем ширина наблюдаемой полосы будет равна примерно 50w метров. Вторая координата мозаичного детектора будет использоваться для развертки по рабочей длине волны, обеспечиваемой диспергирующим элементом (например, призмой). Диапазон спектральной развертки следует сделать как можно более узким, обеспечив при этом

попадание рабочей длины волны лазера в этот диапазон. Если никаких сведений о возможной рабочей длине лазера нет, то придется использовать несколько мозаичных детекторов (в одном детекторе практически невозможно перекрыть диапазон с отношением максимальной и минимальной длин волн, большим двух; в этом случае отношение сигнала к шуму резко уменьшится).

Распределение сигналов с элементов мозаичного детектора будет иметь резкий максимум в точке строки развертки, соответствующей рабочей длине лазера, которая находится на пересечении с положением пучка. Значение фона будет определяться автоматически по показаниям соседних элементов детектора (для этой цели могут быть использованы элементы, положение которых вдоль строки пространственной развертки соответствует положению пучка, находящиеся на соседних строках, соответствующих ближайшим длинам волн; см. рис. 3). Комбинация спектральной дисперсии и вычитания фонового сигнала позволят улучшить отношение сигнала к шуму в тысячи раз, что вполне достаточно для компенсации уменьшения мощности наблюдаемого лазера. Аппаратура, которая должна использоваться для обработки данных измерений, аналогична современным многоканальным оптическим анализаторам.[11]

*Лазеры непрерывного действия.* Как отмечалось выше, лазеры ПКО могут использоваться для поражения спутников в альтернативном режиме, в котором производится длительный (в течение десятка секунд или более) нагрев спутника лазером меньшей мощности. Этот метод возможен потому, что спутник, движущийся по низкой орбите, будет находиться в поле зрения лазерной установки достаточно большое время, и потому, что других мишеней, которые надо поразить почти одновременно с первой, скорее всего, не будет. В этом случае критическим параметром будет не интегральная энергия излучения, а поток энергии. Мы будем считать, что характерное значение поражающего потока будет равно потоку теплового излучения от плавящегося алюминия (около 0,2 МДж/м$^2$). Такая величина будет соответствовать яркости в $10^{16}$ Вт/стер, мощности в 100 киловатт (при рабочей длине в 10 микрон и диаметре зеркала в 3 метра)[12] и расстоянию до спутника в 200 километров. Используя методику предыдущих разделов, можно получить, что поток рассеянного излучения в чистом воздухе (при визуальной дальности в 100 километров) составит 0,003 Вт/м$^2$. Фоновое излучение земной поверхности на длине волны 10 микрон (наихудший случай) составляет примерно 10 Вт/м$^2$ в полосе длин волн шириной 10 микрон. Очевидно, что в этом случае для регистрации рассеянного излучения необходимо применять спектральную селе-

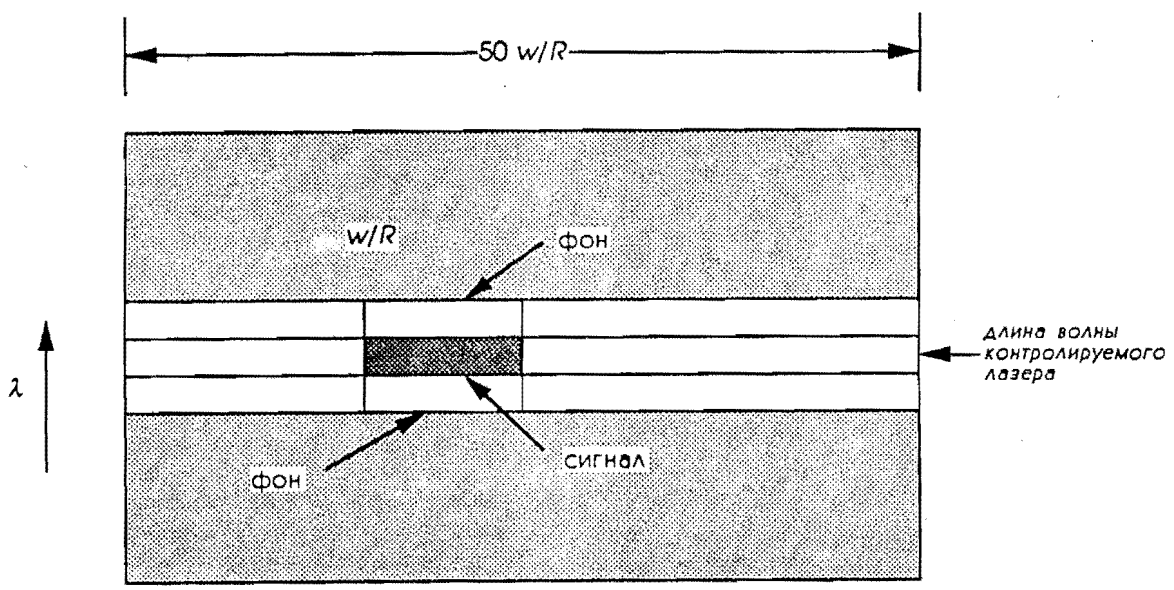


Рисунок 3
Схема повышения отношения сигнала к шуму для измерения яркости лазеров средней мощности

кцию в узком диапазоне и избегать наблюдения рассеянного излучения на фоне земной поверхности. Однако, излучение облаков может обладать сравнимой интенсивностью, и этого избежать довольно трудно (однако, сильная облачность может помешать и проведению самих испытаний).

Если рабочая длина волны известна с точностью до нескольких процентов, то возможно (но не с полной степенью уверенности), что описанная в предыдущем разделе методика двумерной пространственно-спектральной развертки (см. рис. 3) вместе с применением спектрального прибора высокого разрешения (например, диффракционной решетки) позволит добиться обнаружения. Другой метод, который может оказаться полезным, связан с требующим длительных измерений способом фурье-спектрометрии очень высокого разрешения.[13] Такой способ позволит добиться разрешения порядка $10^5$ с соответствующим подавлением фона, который также может быть надежно измерен и вычтен для выделения из данных измерений полезного сигнала. Однако, в этом случае будет потеряно пространственное разрешение, что приведет к ухудшению отношения сигнала к шуму примерно в 30 раз.

Несмотря на то, что в настоящее время оба предлагаемых метода успешно используются для других целей, в нашем случае потребуются характеристики приборов, близкие к предельным. Возможность их использования должна быть подтверждена испытаниями в условиях, близких к реальным.

Если проверяющей стороне будет известна дополнительная информация, схема мониторов может значительно упроститься. Так, например, если будет известно точное значение рабочей длины волны лазера, то в приборе можно будет использовать обычные интерференционные фильтры с шириной полосы пропускания около $10^{-3}$ микрона. Прибор с такими фильтрами будет намного проще и дешевле, чем приборы с матричными детекторами, которые обсуждались выше.

Еще большего выигрыша в чувствительности можно добиться в том случае, если станция слежения будет размещена намного ближе к лазерной установке (например, в пятидесяти метрах от выходного зеркала), что позволило бы проводить наблюдения в режиме обратного рассеяния (например, при угле рассеяния примерно в 175°). Эта схема обладает двумя преимуществами. Во-первых, отношение сигнала к шуму будет значительно выше, и, во-вторых, путь рассеянного излучения в атмосфере будет близок к тому, по которому распространяется пучок лазерного излучения. Кроме того, при обсуждении лазеров непрерывного действия следует иметь в виду, что мы могли сильно преувеличить уязвимость спутников (особенно тех, которые еще не выведены на орбиту). Так, например, длительная экспозиция дает спутнику время на принятие мер противодействия (в частности, повернуться к лазерному пучку наименее уязвимой стороной).

**Калибровка мониторов.** Поскольку рассеяние лазерного излучения почти полностью связано с аэрозолями, распределение которых может меняться во времени (с характерным временем порядка часа, а, может быть, и меньшим), то для надежной интерпертации результатов измерений их надо дополнить калибровочными наблюдениями. Эти наблюдения должны проводиться сразу же после обнаружения испытаний мощного лазера при помощи лазера малой мощности (в несколько ватт), расположенного на расстоянии в один-два метра от монитора с пучком, посылаемым в том же направлении по отношению к монитору, что и пучок мощного лазера. Для того, чтобы обнаружить рассеянное излучение слабого лазера, наблюдения должны проводиться в течение примерно одной минуты; для подавления фона необходимо использовать узкополосный фильтр (что не представляет проблем при точно известной длине волны калибровочного лазера). Измерения могут оказаться полезными даже в том случае, если длина волны при калибровке будет отличной от длины волны проверяемого лазера, потому что, как правило, эффективность рассеяния на аэрозолях зависит от длины волны не очень сильно.[10] Это не относится к отдельным областям спектра вблизи 10 микрон, где для получения точности оценки в 10% может оказаться необходимым обеспечить отклонение длины волны не более, чем в 1%.

Для оценок яркости надо знать (или оценить) ширину пучка и расстояние до монитора (которое определяется при его установке). Монитор может измерить и угловую ширину пучка, но это потребует проведения развертки по крайней мере в одном направлении (которое может оказаться необходимым в любом случае). Расстояние и угловая ширина определяют физическую ширину пучка w. Во многих случаях просто определить и длительность лазерного импульса. Однако, для импульсных лазеров умеренной мощности эта проблема может оказаться достаточно сложной, в особенности, если время испытания на станции не известно. В этом случае опрос прибора и обработка данных должны проводиться с частотой около сотни герц, и результаты

измерений должны запоминаться только в том случае, если будет обнаружен лазерный импульс (для определения длительности импульса надо будет запомнить и несколько последующих кадров информации). Для современных систем обработки информации такая задача возможна, но ее реализация приведет к увеличению стоимости прибора.

Поскольку калибровочный лазер будет расположен на расстоянии около километра от контролируемой зоны, было бы желательно иметь информацию о распределении аэрозолей в этой области. Это может быть сделано с помощью лазерного локатора. Такие системы имеются, но их применение также увеличит сложность и стоимость станции слежения. Применение лазерного локатора оправдано в том случае, если измерения проводится во время небольшой пыльной бури (во время сильной пылевой бури испытания мощных лазеров, скорее всего, проводиться не будут).

Обсуждаемая схема измерений может оказаться более сложной, если лазер окажется настолько мощным, что его излучение вызовет испарение части аэрозоля, что, в свою очередь, приведет к эффективному уменьшению рассеяния по сравнению с менее мощным пучком. Эту проблему надо исследовать дополнительно. Если она окажется серьезной, то можно будет рассмотреть особую схему калибровки, в которой калибровочный пучок должен будет фокусироваться для определения характеристик рассеяния из области с высокой плотностью излучения. Лазер с мощностью в 1 ватт способен обеспечить в фокальном пятне плотность потока в 100 Гвт/см$^2$. Изменяя фокальное расстояние, можно обеспечить при калибровке плотность энергии, сравнимую с плотностью энергии проверяемого пучка. Можно будет также совместить временные характеристики калибровочного и проверяемого пучков. Эта проблема может оказаться не очень важной в сухом климате полигонов, расположенных в пустыне (предпочтительных для испытания наземных лазеров), поскольку аэрозольная составляющая в пустынных местностях, скорее всего, будет нелетучей.

**Установка и эксплуатация мониторов.** Станции слежения на территории контролируемой стороны должны устанавливаться не в непосредственной близости к контролируемой установке, а в некотором удалении от нее, на расстоянии до нескольких километров. Она должна работать в режиме постоянного ожидания и обзора большого участка небесной сферы, не ограничиваясь наблюдениями в фиксированном направлении. Рядом с ней, на расстоянии нескольких метров, должен быть установлен небольшой калибровочный лазер. Все оборудование станции может состоять из имеющихся в продаже систем и больших специальных разработок не потребуется.

В принципе такая станция должна быть полностью автономной, работать без обслуживания и передавать результаты измерений по каналу спутниковой связи во все страны-участницы договора.[14,15] Дополнительные проверки могут проводиться группами инспекторов, посещающих станции слежения для их обслуживания. В этот период времени проверяемая сторона может внести свой вклад в повышение надежности процесса верификации, проводя испытания с уровнем яркости ниже согласованного порога, но достаточно большим для возможности их наблюдений. Тем не менее, автономные станции недостаточно устойчивы по отношению к сравнительно простым мерам противодействия (например, дымовым завесам или другим простым средствам прерывания оптического пути от монитора до пучка). Такие меры противодействия не всегда могут быть обнаружены национальными техническими средствами, поскольку связанные с ними испытания могут проводиться под облачным покровом. Необходимо рассмотреть применение дополнительной аппаратуры и процедур, которые могут быть использованы против наиболее вероятных сценариев противодействия контролю за испытаниями.

В качестве мер по укреплению доверия можно будет провести демонстрацию потенциальных возможностей предлагаемого метода в экспериментах по измерению яркости наземных лазеров со стандартным оборудованием.

**Космические лазеры.** Лазеры космического базирования представляют собой очень серьезную проблему для верификации соглашений по ограничению их мощности. Самая главная проблема связана с тем, что для контроля будет нужен специальный космический аппарат, способный приближаться к проверяемому спутнику на расстояние до нескольких километров. Если такой аппарат есть, то контроль организовать можно.

Для иллюстрации мы рассмотрим лазер на орбите высотой в 200 километров. Концентрация молекул на такой высоте равна $7{,}1\cdot10^{15}$ молекул на кубометр, а сечение рассеяния на каждой молекуле равно примерно $3\cdot10^{-24}$ м$^{-2}$ (см. примечание[16]). Лазерный импульс с энергией в $10^8$ Дж будет сопровождаться рассеянием примерно $2\cdot10^{14}$ фотонов на километр пути пучка. На телескоп с площадью входной апертуры в

один квадратный метр, расположенный на расстоянии в три километра от пучка, попадет около $2 \cdot 10^6$ фотонов. От света звезд в телесном угле, занимаемом полосой шириной в 10 метров на 1 километр, на этот телескоп попадет примерно $10^{10}$ фотонов за 0,1 секунды, из чего следует, что для надежного выделения излучения лазера на фоне звездного света необходимо обеспечить спектральную фильтрацию с эффективностью около $10^4$. Таким образом, если точно знать направление пучка и рабочую длину волны лазера, то оценка яркости не вызовет больших трудностей.

Строгие ограничения на возможность подобных измерений, наряду с тем обстоятельством, что подъем орбиты на каких-то 50 километров сделает наблюдения рассеянного излучения практически невозможными, делает подобную методику измерений малопривлекательной. Осмотр полезной нагрузки спутника перед запуском в принципе позволит оценить размеры и массу космических лазеров, однако, следует учесть, что быстрое развитие лазерной и космической техники может привести к существенным ошибкам в таких оценках. С другой стороны, можно определить довольно строгие ограничения на массу допустимых приборов с космическими лазерами (например, в 100 килограммов), и допустить индивидуальный подход с отдельным проектам гражданского назначения, в которых должны использоваться мощные лазеры (в настоящее время такие проекты авторам неизвестны).

**Другие ограничения на лазеры для ПКО.** Система контроля за противоспутниковым оружием, предложенная в работах Дерча[17] и Гарвина[18], предусматривала запрещение испытаний этого оружия в космосе. Мы согласны с тем, что запрещение испытаний, связанных с прямым направлением пучка от лазера наземного или космического базирования на космическую мишень, если и не остановит, то затруднит развитие лазерного оружия для целей ПКО и ПРО. Такие испытания в принципе могли бы быть обнаружены при регистрации излучения, рассеянного на спутнике-мишени. Такое слежение могло бы оказать сильное сдерживающее влияние на сторону, собирающуюся проводить испытания, поскольку убедиться в том, что противная сторона не имеет спутника, способного обнаружить рассеянное от мишени излучение, практически невозможно. Кроме того, традиционные методы разведки позволяют получить дополнительную информацию о возможном времени и месте проведения испытаний.

По-видимому, можно скрыть испытания, проводящиеся на малых уровнях мощности со специальным спутником, но практическая ценность таких испытаний весьма сомнительна. Трудно рассчитывать, что свойства системы не изменятся при переходе к уровням мощности, в миллион раз большим.

Другое ограничение на применение лазеров в ПКО и ПРО может быть связано с возможным ограничением районов строительства мощных лазеров областями с повышенным уровнем облачности. Вероятность того, что любое правительство пойдет на финансовые затраты на системы оружия, которые могут быть небоеспособными в течение недель, является очень малой.[19]

## ВЫВОДЫ

Лазеры большой мощности, установленные на известных наземных полигонах, относятся к тем областям техники, на развитие которых могут быть наложены договорные ограничения (перечень наиболее мощных действующих, или работавших ранее, лазеров приведен в таблице 1). Наша задача заключалась в изучении возможности проверки таких соглашений, в основном, связанной с установкой рядом с проверяемым сооружением станций слежения. Несмотря на то, что прямые измерения реальной яркости очень трудны, при помощи наземного оборудования мы можем определить потенциальную яркость. Поскольку эта величина определяет верхний предел плотности энергии на мишени, она может быть положена в основу договорных ограничений.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Мы весьма признательны за помощь, полученную при подготовке статьи от Уильяма Чайлдса, Майкла Диллона, Ричарда Гарвина, Дэвида Хафемейстера, Рут Хоуэс, Тома Муга, Рональда Руби и Фрэнка фон Хиппеля.

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. J. Pike. "New Threshold Limits to Clarify the ABM Treaty". Federation of American Scientists FAS Public Interest Report, September 1987, pp. 8-11.
2. Ричард Гарвин указал нам, что эта формула занижает реальную яркость в важной центральной области пучка примерно в два ($\pi^2/4$) раза (это справедливо при идельных условиях распространения). Мы согласны с Гарвином, но приведенная в статье формула уже стала неофициальным стандартом после того, как она была использована в отчете Американского физического обще-

Таблица 1
Мощные лазеры, обсуждавшиеся в открытой литературе

| Разработчик | Яркость (Вт/стер) | Мощность (МВт) | Тип | Дата пуска |
|---|---|---|---|---|
| Авиабаза Кертлэнд[20] | | 0,2 | $CO_2$ | 1972 |
| Лаборатория Avco Everett[20,21] | | 0,04 | $CO_2$ | 1975 |
| Rockwell International[20] | | 0,1 | Химический (RACHL) | 1977 |
| TRW и BMC[20,21] | | 0,4 | DF (MIRACL) | 1978 |
| Hughes Aircraft и BMC[20,21] | | | Химический (NACL) | 1978 |
| ВВС (проект ALL)[20,22] | $10^{15}$ | | $CO_2$ (газодинамич.) | 1981 |
| BMC и DARPA[22,23] | $10^{13}$ | | XeCl (связь с ПЛ) | 1983 |
| TRW и ССОИ[20,22,24] | $10^{17}$ | 2,2 | DF (MIRACL) | 1986 |
| LLNL[25] | | 15 кДж | Неодимовый (Nova) | 1986 |
| TRW и DARPA[22,26] | $10^{18}$ | 5,0 | HF (Alpha) | 1989 |
| Авиабаза Кертлэнд[27] | | 0,01 | Иодный (COIL) | 1989 |
| LANL[28] | | 1,3 кДж | KrF | 1989 |
| LANL, Boeing и ССОИ[29] | | 0,002 | FEL (10 МВт в имп.) | 1990 |
| СССР (Сары-Шаган)[30] | | 0,02 | $CO_2$ | 1982 |
| СССР (Душанбе)[22] | $10^{17}$ ? | | | ? |
| СССР (Троицк)[31] | | 1,0 | $CO_2$ | 1989 |

ства по оружию направленного действия (см. ссылку 3). Эта формула представляет среднюю яркость в области до первой диффракционной темной полосы и поэтому мы считаем, что она может служить приемлемой (хотя и несколько произвольной) основой для определения потенциальной яркости лазерных систем в договоре.

3. The American Physical Society Study Group, "Science and Technology of Directed Energy Weapons", Reviews of Modern Physics, v. 59, pp. S1 - S201 (1987).
4. Ссылка 3, стр. S34.
5. Например, интегральный поток энергии в 100 МДж/м$^2$ расплавит лист алюминия толщиной в 1 мм даже в том случае, если отражается 99% падающего излучения(см. ссылку 3; это справедливо, если длительность экспозиции не превысит одну секунду).
6. Вообще говоря, у спутников могут быть особо уязвимые элементы. Однако, мы не считаем, что установленные на спутниках оптические приборы легко "ослепить", направляя на них параллельное их оптическим осям лазерное излучение; направление оптических осей приборов невозможно определить из дистанционных наблюдений спутника и оно является непредсказуемым.
7. E.K. Hege, "A Means to Sharper Images", Nature, v. 328, p. 198 (1987).
8. R.H. Zerull, R.H. Giesse, S. Schwill, K. Weiss, "Light Scattering by Irregularly Shaped Particles", New York, Plenum Press, 1979.
9. О.Ф.Прилуцкий, М.Н. Фоменкова, "Рассеяние лазерного пучка в атмосфере", Наука и всеобщая безопасность, т.2, вып.1, стр.17 (1992) (следующая статья).
10. W.L. Wolfe, G.J. Zissis, "The Infrared Handbook", Washington, DC, Office of Naval Research, Department of the Navy, pp. 4 - 47, 1985.
11. J.W. Lewis, G.G. Yee, D.S. Kliger, Rev. Sci. Instr., v. 58, p. 939 (1987).
12. Из этого следует, что размеры пятна лазерного излучения на спутнике будут равны примерно одному метру при точности наведения около одной секунды дуги. Это не так просто сделать, но требуемая величина лежит в пределах допустимого, накладываемых атмосферной турбулентностью.
13. R.J. Bell, in Kosta Tsipis, David W. Hafemeister, Penny Janeway, eds, "Arms Control Verification", Washington, DC, Pergamon-Brassey's, 1986, глава 13.
14. Paul A. Stokes, "The National Seismic Station", SAND-81-2134, Albuquerque, New Mexico, Sandia National Laboratory, June 1982.
15. Paul A. Stokes, in Kosta Tsipis, David W.

Hafemeister, Penny Janeway, eds, "Arms Control Verification", Washington, DC, Pergamon-Brassey's, 1986.

16. Среднее сечение рассеяния может быть определено из соотношения, связывающего его с показателем преломления разреженного газа n:

$$n = 1 + 0{,}159\lambda^2 N_m b$$

где b - амплитуда рассеяния (сечение рассеяния равно $2\pi b^2$). На уровне моря показатель преломления воздуха на длине волны в 1 микрон равен $n = 1 + 2{,}67 \cdot 10^{-4}$.

17. W.J. Durch, in W.C. Potter, ed., "Verification and Arms Control", Lexington, Massachusetts, Lexington Books, 1985, глава 5.
18. R.L. Garwin, "The Militarisation of Space", выступление на подкомиссии по контролю над вооружениями комиссии Сената США по иностранным делам, 20 сентября 1982 года, стр. 56 - 60.
19. H. Lee Buchanan (частное сообщение).
20. Jeff Hecht, "Beam Weapons - The Next Arms Race", New York, Plenum Press, 1985.
21. P.S. Klass, "Laser Destroys Missile in Test", Aviation Week and Space Technology, 7 August 1978, pp. 14 - 16.
22. J. Pike, "New Threshold Limits to Clarify The ABM Treaty", Federation of the American Scientists FAS Public Interest Report, September 1987, pp. 8 - 11.
23. J.B. Schulz, "Navy, DARPA Evaluate Blue-Green Lasers as Communication Link with Submarines", Defense Electronics, November 1983, pp. 50 - 60.
24. P. Bedard, "Future Looks Good For Missile-Killing Laser", New Technology Week, 23 November 1987, p. 5.
25. "Zenith Star Competes for Funding", Military Space, 24 April 1989, p. 6.
26. "Nova Laser Results", Energy and Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, July 1987, p. 38.
27. Bill Keller, "USAF Demonstrates Techniques for Brighter Laser Beam", Aviation Week and Space Technology, 15 May 1989, p. 58.
28. Jeff Hecht, "Aurora Laser Puts 100 TW/cm$^2$ On Target", Lasers and Optronics, November 1989, p. 20.
29. "Funding Cuts Could Imperil FEL Program", Military Space, 16 July 1990, p. 6.
30. Jeff Hecht, "20-kW Laser is Biggest Laser at Soviet Sary Shagan Base", Lasers and Optronics, September 1989, p. 19.
31. Jeff Hecht, "House Delegation Sees Soviet 1-MW Laser", Lasers and Optronics, October 1989, p. 19.