



Лазер против космического мусора

Доктор физико-математических наук
В.В.Аполлонов,
 Институт общей физики
 им. А.М.Прохорова РАН

Выброшенные частицы мусора разлетятся веером, и, может быть, через десятилетия этот поток окажется на пути других кораблей. Это будет смертельный дождь метеоритов, занимающий тысячи миль пространства.

Джеймс Уайт. Смертоносный мусор

Мусор у нас над головой

Космический мусор бывает двух сортов: искусственный и естественный. Искусственный — это верхние ступени и разгонные блоки ракет-носителей, отработавшие свой срок, исчерпавшие ресурс и вышедшие из строя спутники, а также обломки — последствия столкновений спутников либо испытаний систем противоспутниковой обороны. Естественный мусор — это метеориты и астероиды. Взрывы и непреднамерен-



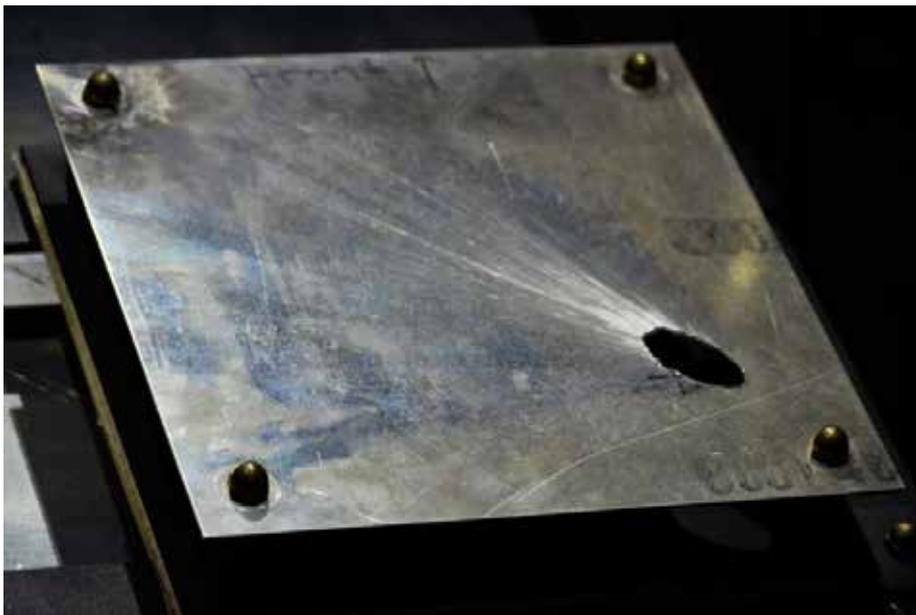
ные столкновения в космосе — самые опасные источники мусора. Больше всего загрязняют космос испытания противоспутниковых ракет — таким способом некоторые страны уничтожали свои отработавшие срок спутники. В результате образовались новые обломки размером от сантиметра до метров; большая часть — куски менее 10 см.

Проблема засорения околоземного космического пространства возникла в момент запуска первого искусственного спутника Земли в 1957

Слева — алюминиевый панцирь толщиной 102 мм, в который попал кусочек пластика на скорости 6795 м/с. Справа — 38-мм алюминиевая защита, в которой застрял болт после того, как он пробил стальной лист

Вверху — иллюминатор, толщина стекла 14 мм. Трещина — результат попадания песчинки на скорости 7152 м/с.

году, однако получила официальный международный статус лишь в конце 80-х годов прошлого века. Тогда Генеральная ассамблея ООН одобрила



Лист стали, который пробил болт 6x12 мм на скорости 6410 м/с (потом он застрял в алюминиевой защите)

главные принципы предупреждения образования космического мусора. А именно: разработку безотходных технологических процессов в космосе, увод исчерпавших ресурс космических аппаратов с орбиты, где столкновение высоковероятно, на так называемую орбиту захоронения и отказ от испытаний противоспутниковых средств обороны, при которых образуется много мусора. Заметим, что средства для борьбы с космическим мусором не являются противоспутниковыми средствами обороны — у них очевидно другие задачи. Эти меры необходимы, чтобы избежать эффекта (синдрома) Кесслера — достижения критической плотности мусора, при которой начинается цепная реакция фрагментации. Такой процесс способен разрушить в течение нескольких лет или месяцев все объекты на орбите и остановить на десятилетия освоение космоса человеком. По многим прогнозам, для самых загрязненных околоземных орбит, гелиосинхронных и геостационарных, критическая плотность может быть достигнута уже к середине текущего века.

Количество космического мусора ежегодно увеличивается в геометрической прогрессии не только потому, что на орбитах становится все больше неработающих аппаратов, но и потому, что любое столкновение двух обломков приводит к появлению десятков, сотен и тысяч обломков меньшего диаметра. В 1996 году французский спутник столкнулся с фрагментом третьей ступени французской ракеты «Arian». В 2009 году — американский спутник связи «Iridium» с военным российским спутни-

ком связи «Космос-2251», запущенным в 1993 году и выведенным из эксплуатации в 1995 году, причем образовалось несколько сотен осколков. В 70—80-х годах США отправили на орбиту несколько килограммов отрезков медных проволок. Это была попытка создать вокруг Земли кольцо, отражающее радиосигнал, — для осуществления дальней радиосвязи; радиосвязь была установлена, но кольцо рассеялось, и проволочки сгорели в атмосфере. В 2007 году успешное испытание Китаем противоспутникового оружия — разрушение их собственного вышедшего из строя спутника связи — привело к появлению нескольких тысяч фрагментов.

Одним из первых пострадавших от космического мусора стал шаттл Challenger в 1983 году — произошло соударение с микроспесчинкой менее 1 мм в диаметре, появилась трещина на иллюминаторе. Позже эксперты пришли к выводу, что это была лишь микрочастица краски, отслоившаяся от какого-то аппарата. Сталкивалась с мусором и советская орбитальная станция «Салют-7». Не стала исключением и станция «Мир», солнечная батарея которой в 90-е годы была пробита куском мусора, после чего образовалось отверстие с рваными краями, диаметром более 10 см. Сейчас МКС маневрирует в среднем несколько раз в год, чтобы избежать возможных столкновений, однако за сохранность станции специалистам приходилось не раз поволноваться. Так, в 1999 году чуть не произошло столкновение с обломком разгонного блока от ракеты, давно блуждающего в космосе, а в 2001 году станция имела шанс столкнуться с семикилограммовым прибором, потерянным американскими астронавтами. Фотографии последствий столкновений с космическим



ТЕХНОЛОГИИ

мусором нетрудно найти в Интернете (см., например, <http://www.meteovesti.ru/news.n2?item=63579113117>).

Космический мусор небезопасен для жителей планеты Земля, потому что может свалиться на голову в буквальном смысле этого слова. Падение в 1979 году станции Skylab на территорию Австралии обошлось без человеческих жертв, но погибла корова. В 1991 году станция «Салют-7» распалась на фрагменты над Аргентиной. Особенную опасность представляют те космические аппараты, которые содержат радиоактивные материалы. Именно таким был советский спутник «Космос-594», упавший в 1978 году на севере Канады. В 1997 году обломок второй ступени ракеты-носителя Delta повредил женщине плечо.

Что делать?

Постепенно становится очевидным, что в ближайшем будущем проблему столкновения с космическим мусором придется учитывать при баллистическом проектировании любой миссии (пока это делают только для орбитальных станций и крупных спутников). Миниатюризация космических аппаратов и использование групп малых аппаратов вместо одного большого лишь ухудшают ситуацию.

К настоящему времени задача защиты аппаратов от попадания в них мусора стала критически важной, поэтому посмотрим к нему поподробнее. Принято делить частицы космического мусора на четыре группы, главным образом в зависимости от размера. От группы зависят и опасность, и возможности наблюдения, и меры защиты.

Первая группа — размер более 10 см для низких орбит и более 1 м для геостационарных орбит — геостационарные орбиты дальше, места там больше, и вероятность столкновения меньше. Все они, будем надеяться, наблюдаются, их около 14 тысяч, последствия при столкновении — гибель корабля. Эти фрагменты можно было бы удалять механически или лазером (об этом ниже), но пока что от них приходится уклоняться.

Вторая — от 1 см до 10 см, их сотни тысяч, последствия при столкновении — серьезные разрушения, удалять можно было бы лазером мощностью порядка 0,5 МВт.

Третья — от 1 мм до 1 см, их по оценкам десятки миллионов, и защищаться от них можно только конструктивными мерами, например экранами; в некоторых случаях так сейчас и делают.

Четвертая группа — размер менее 1 мм, этих, скорее всего, десятки триллионов, вызывают они эрозию поверхности, и от них (если это не сенсоры или зеркала телескопов) можно и не защищаться.

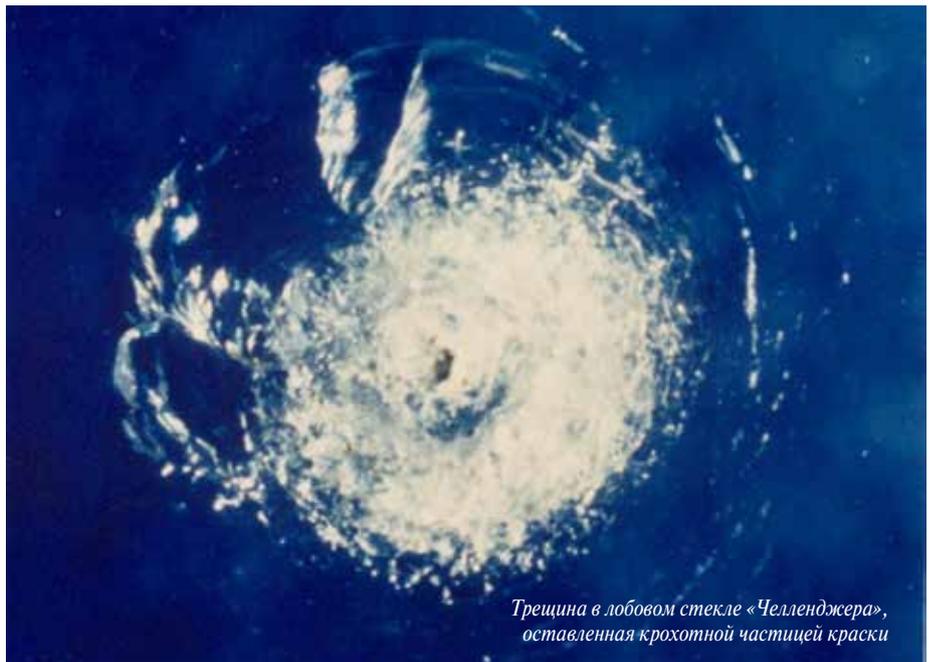
Задача возможна на трех этапах: упреждающая, за несколько витков, защита конкретного аппарата; защита при подлете — на «витке столкновения»; и, наконец, вообще очистка космического пространства — «уборка квартиры».

Те же и лазер

Лазерное излучение с высокой пиковой мощностью, обрушившись на фрагмент мусора, мгновенно нагревает его поверхность до температуры испарения материала и создает импульс отдачи, достаточный для изменения траектории. В результате воздействия может произойти и распад фрагмента на более мелкие и поэтому менее опасные куски. Кроме того, часть материала испаряется, что тоже уменьшает опасность.

Наиболее мощными на данный момент являются химические лазеры на фтороводороде (HF, длина волны 2,7 мкм) и фториде дейтерия (DF, длина волны 4 мкм). При размещении лазера на Земле излучение должно мало поглощаться в атмосфере, поэтому предпочтительнее DF-лазер. При размещении в космосе заметно преимущество твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой и длиной волны, близкой к 1 мкм. Лазер должен работать в высокочастотном импульсно-периодическом режиме — в этом случае пиковые значения интенсивности излучения возрастают на порядки по сравнению с непрерывным режимом. Время между импульсами определяется сменой активной среды в лазерной зоне химического лазера или восстановлением инверсной населенности среды в случае твердотельного лазера. В экспериментах, выполненных в ИОФ РАН, было показано, что для наибольшего энергосъема частота модуляции DF-лазера должна быть не менее 150 кГц, для твердотельного лазера — 50—100 кГц, длительность импульса — 10—100 нс.

Какие есть варианты наземного размещения? Можно установить лазер на высоте 2,5—3,5 км для уменьшения влияния атмосферы, но лучше исполь-



Трещина в лобовом стекле «Челленджера», оставленная крохотной частицей краски



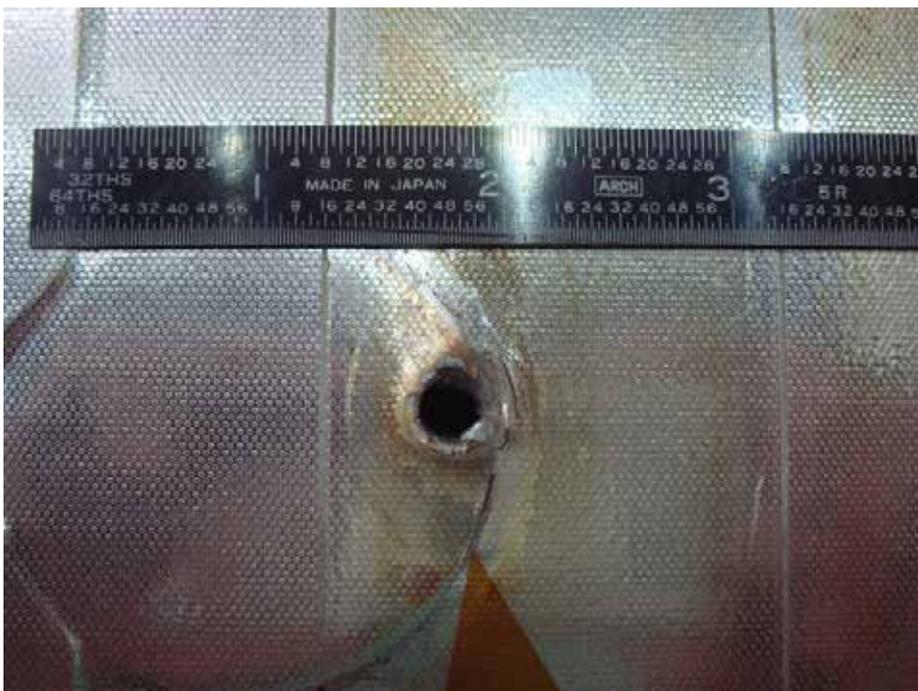
Защиту российского модуля МКС «Звезда» пробил алюминиевый болт на скорости 6800 м/с

зовать, как говорят профи, «воздушное базирование» на высоте 20 км. При этом уменьшится влияние атмосферы и увеличится радиус воздействия на объект. Кроме того, это позволит доставить лазер в любой район, чтобы повторить облучение через небольшой промежуток времени (менее суток), переместившись в ближайшую точку повторного прохождения цели.

Стационарный лазер можно применить для поражения мусора, но воздействие луча эффективно в секторе с полным углом раскрытия 30° относительно вертикали, область воздействия на высоте 300 км — круг диаметром 160 км. Стало быть, зона поражения — это спиральный след шириной 160 км, и, совершая 16 витков в сутки, мишень придет в ту же область поверхности Земли примерно через

неделю. Использование лазера с малой частотой повторения импульсов требует многократного воздействия на тот же объект, однако при высокочастотном режиме можно добиться того, что необходимое воздействие будет произведено за один пролет.

Проделанный нами и опубликованный в специальных изданиях расчет показывает, что уничтожить космический мусор может как автономный твердотельный лазерный комплекс космического базирования, так и стационарный высокочастотный импульсно-периодический комплекс на основе DF-лазера с системой фокусировки и наведения луча.



Сквозное отверстие в радиаторной панели шатла «Индевор», пробитое космическим мусором

Для ускорения падения фрагмента мусора в атмосферу необходимо затормозить его и перевести на более низкую орбиту с меньшим временем жизни. Известно, что время нахождения объектов на орбите сильно зависит от ее высоты: оно составляет около 2000 лет на высоте 1000 км, на 600 км — 25—30 лет, на 200 км — около недели. В диапазоне 100—1000 км время жизни фрагмента мусора чрезвычайно сильно зависит от высоты над Землей (примерно как седьмая степень этой высоты), и даже небольшое торможение и снижение орбиты полезно: понизив орбиту с 300 км до 200 км, мы уменьшим время существования мишени с четырех месяцев до шести дней.

Расчеты показывают, что в случае космического базирования достаточно мощности порядка несколько десятков киловатт, чтобы существенно снизить время жизни небольшого фрагмента космического мусора. Дальнейшее увеличение мощности лазерного комплекса еще более снижает это время, то есть увеличивает эффективность падения уничтожаемого фрагмента в атмосферу, поэтому для быстрой очистки космического пространства необходим автономный комплекс с мощностью порядка нескольких сотен киловатт. Частота лазерных серий выстрелов будет определяться частотой попадания космического мусора в область действия лазера и временем энергетической дозаправки в космосе.

Возможен комбинированный вариант — установка наземная, а приемное зеркало размещено в космосе. В этом

случае потери энергии при прохождении излучения в атмосфере и на приемном зеркале потребуют существенно более мощной установки — уровня нескольких мегаватт. Частота пусков определяется частотой прохождения зеркала над стационарным лазерным комплексом (в среднем не чаще раза в неделю) и вероятностью попадания космического мусора в эти периоды в область действия лазера.

Лазерный комплекс на твердом теле с полупроводниковой накачкой видится более компактным и легким для транспортировки в космическом пространстве. Опытный образец такого лазера мощностью чуть более 100 кВт недавно был создан в США. Высокочастотный импульсно-периодический режим работы в случае данного технологического решения также возможен. Комплекс на основе твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой мощностью 200 кВт с дифракционной расходимостью излучения, работающий в высокочастотном импульсно-периодическом режиме с длительностью импульсов 10—100 нс, обеспечит необходимое воздействие с расстояния 100 км. Размер светового пятна на объекте на таком расстоянии составит несколько сантиметров.

Выводы

Итак, импульсно-периодические лазерные системы с большой частотой повторения импульсов могут решить проблему уничтожения космического мусора и объектов естественного происхождения или увода их на безопасные орбиты. Для заблаговременной



защиты от космического мусора наиболее пригодны высокочастотные импульсно-периодические лазерные комплексы наземного базирования на основе DF-лазера. При длительности импульсов 10 нс и частоте 10 кГц требуется лазерный комплекс мощностью до 2,5 МВт. Такие уровни средней мощности уже достигнуты на практике.

Для защиты космического аппарата от столкновения с мусором или метеоритными частицами лучше всего подходит автономный высокочастотный импульсно-периодический лазерный комплекс. Сделать его нужно на основе твердотельного лазера и разместить на самом космическом аппарате. Средняя мощность 200 кВт и длительность импульсов 10 нс обеспечат защиту от типичного космического мусора размером до 10 см. Оценки показывают, что при уже достигнутом уровне развития твердотельных лазерных систем (5 кг/кВт) можно строить легкие и компактные бортовые лазерные комплексы для защиты космических аппаратов.

Очевидна необходимость в налаживании международного сотрудничества в данном вопросе. Космические просторы велики, но в космосе, как и у себя дома, нужно наводить порядок и иногда избавляться от старых вещей. На сегодня проблема космического мусора — одна из самых острых, и ее не может решить ни одна отдельно взятая страна. И политики, и ученые космической отрасли едины во мнении: контроль мусора необходим для обеспечения безопасной деятельности в космическом пространстве сегодня и в будущем. Этот шаг представляется важным также и для перехода к следующему этапу международного сотрудничества — противостоянию угрозам со стороны астероидов и комет, время от времени проверяющих уровень научно-технического развития на планете Земля.

