

# Уничтожение космического мусора и объектов естественного происхождения лазерным излучением

В.В.Аполлонов

*Обсуждается применение наземных импульсно-периодических DF-лазерных комплексов с высокой частотой следования импульсов и расположенных в космосе лазерных комплексов на основе YAG: Nd-лазеров для уничтожения космического мусора и объектов естественного происхождения. Сделаны оценки уровня средней мощности таких комплексов, обеспечивающих гарантированное уничтожение космического мусора и подобных объектов.*

**Ключевые слова:** космический мусор, мощный лазер, космические аппараты, объекты естественного происхождения, окружающее космическое пространство.

## 1. Введение

Космическим мусором (КМ) считаются искусственные объекты и их фрагменты в космосе, не способные более служить никаким полезным целям, а также объекты естественного происхождения (ОЕП), такие как метеориты, астероиды и т.д. С позиции происхождения можно выделить несколько категорий КМ:

- отработавшие свой срок разгонные блоки ракет-носителей и отделившиеся ступени;
- вышедшие из строя спутники;
- продукты испытаний средств противоспутниковой обороны и обломки, образовавшиеся в результате столкновения спутников;
- объекты естественного происхождения.

Большую часть КМ составляют фрагменты малого размера (диаметром менее 10 см). Наиболее существенный вклад в «замусоривание» ближнего космоса внесли испытания рядом стран противоспутниковых ракет, уничтоживших отработавшие свой срок спутники, что привело к образованию новых обломков размером от сантиметра до нескольких метров. Взрывы и непреднамеренные столкновения в космосе – самые опасные источники КМ. К настоящему времени проблема защиты активно функционирующих космических аппаратов (КА) от столкновения с техногенным КМ и ОЕП приобрела критическую остроту из-за значительно возросшей плотности КМ в окружающем космическом пространстве (ОКП), особенно вблизи регулярных орбит КА. Практически весь техногенный КМ – это металлические фрагменты бывших КА, движущиеся по эллиптическим орбитам вокруг Земли. По размерам они делятся на четыре категории: малые (менее 1–10 мм), средние (1–10 см), крупные (более 10 см для низких орбит и более 1 м для геостационарных орбит), а также микрофрагменты (менее 1 мм). Распределение КМ по размерам и ущербу, а также способы борьбы с ним представлены в табл.1 [1, 2].

Крупные фрагменты КМ могут наблюдаться наземными средствами слежения, многие из них отслеживаются и внесены в соответствующие каталоги. Существование разных категорий КМ и методов воздействия на них с помощью различных лазерных комплексов (ЛК) позволяет выделить следующие отдельные самостоятельные задачи, различающиеся постановкой, критериями воздействия на КМ и соответственно средней мощностью и параметрами выходного импульсно-периодического излучения:

1. Предотвращение столкновений контролируемого КМ с КА.
2. Защита КА от столкновения с КМ при его подлёте к КА.
3. Очистка ОКП от объектов КМ.

Первые две задачи связаны непосредственно с защитой конкретного КА от КМ, третья является общей глобальной задачей очистки ОКП. Принцип удаления с помощью мощных импульсно-периодических ЛК весьма прост: под действием излучения ЛК происходит быстрый нагрев поверхности КМ и удаление части его материала

Табл.1.

Размеры фрагментов КМ	Количество элементов КМ (тыс. штук)	Последствия столкновения	Способы предотвращения столкновений
Большие	14 (находятся под наблюдением)	Потеря КА	Механическое удаление, маневры, лазерное удаление
Средние	300	Серьезные разрушения	Воздействие лазерным излучением мощностью до 500 кВт
Малые	$(70-80) \times 10^3$	Значительный ущерб	Архитектурная защита, упрочнение
Микрофрагменты	$(10-100) \times 10^9$	Эрозия поверхности	Нет необходимости

В.В.Аполлонов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: vapollo@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 30 января 2013 г., после доработки – 5 июня 2013 г.

при испарении. В результате в зависимости от поглощённой энергии и времени воздействия может произойти распад КМ на более мелкие фрагменты, не угрожающие КА, либо вылет части материала КМ, создающий импульс отдачи, достаточный для изменения траектории движения КМ и предотвращающий столкновение с КА. Возможно даже полное испарение мелких фрагментов КМ. В случае ЛК с низкой частотой следования импульсов и недостаточного воздействия на объект необходимо его вновь занести в каталог (с новыми параметрами орбиты) и повторить воздействие через некоторый промежуток времени. Значительное увеличение частоты следования импульсов излучения ЛК может упростить задачу и позволить каждый раз ограничиваться лишь одной серией импульсов, вычеркивая объект КМ из каталога. Таким образом, целью данной статьи является оценка перспектив использования высокочастотных импульсно-периодических ЛК для эффективного уничтожения КМ.

## 2. Наземный и космический лазерные комплексы

Наиболее подходящими для решения поставленной задачи с помощью стационарных комплексов на данный момент являются химические ЛК на молекуле DF [3–5]. При прохождении пучка через атмосферу предпочтительно использование DF-ЛК (длина волны  $\lambda_{DF} \sim 3.8 \times 10^{-4}$  см). Необходимым требованием к ЛК является высокое качество выходного излучения, обеспечивающее расходимость излучения, близкую к дифракционной. При размещении лазерной установки в космосе заметно преимущество твердотельного ЛК с полупроводниковой накачкой ( $\lambda_{YAG:Nd} \sim 1.06 \times 10^{-4}$  см). Для наиболее эффективного воздействия на КМ предлагается использовать мощные высокочастотные импульсно-периодические DF-ЛК и твердотельный ЛК. В этом случае пиковые значения интенсивности падающего на КМ излучения возрастают на порядки по сравнению с непрерывным режимом. Время между импульсами определяется сменой активной среды или восстановлением инверсной населенности среды (в случае твердотельного лазера). В исследованиях, выполненных в ИОФ РАН, было показано, что оптимальная с точки зрения наибольшего энергосъёма и эффективного преодоления плазменного экрана частота модуляции составляет  $\sim 100$  кГц, а превышение пиковой мощности над средней составляет 2–3 порядка [6, 7]. Длительность импульсов в обоих случаях находится в диапазоне  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  с. Определение отношения мощностей DF-ЛК в непрерывном и импульсно-периодическом режимах проводилось с учётом колебательной кинетики. Излучение на различных колебательно-вращательных переходах в этом режиме рассчитывалось из уравнений свободной генерации при включении добротности резонатора. При малых длительностях импульса (менее 100 нс) учитывалось неравновесное распределение излучающих молекул по вращательным уровням в процессе генерации.

Для решения поставленных задач могут использоваться ЛК с наземным или космическим размещением энергоустановки: стационарный ЛК наземного базирования, включающий в себя системы фокусировки и наведения пучка на КМ, и автономный ЛК космического базирования, также снабженный необходимыми системами фокусировки и наведения пучка на КМ. В настоящее время объекты КМ, представляющие угрозу КА, и время

возможного столкновения чаще всего известны. Для снятия угрозы столкновения необходимо так изменить траекторию КМ, что столкновение КА и КМ не произойдёт либо угроза столкновения с этим КМ отложится на неопределённое время. Поскольку предупреждение об угрозе столкновения поступает заблаговременно, это даёт возможность воздействовать на КМ за много витков до столкновения. Для решения этой задачи в систематическом режиме предлагается использовать наземные DF-ЛК, воздействующие на КМ с горы высотой 2.5–3.5 км. Представляется также возможным использование мобильных установок воздушного базирования, которые можно транспортировать в нужную точку к нужному моменту времени [8, 9]. Однако данный подход в сравнении с первыми двумя представляется менее эффективным.

Стационарный наземный ЛК применим для поражения КМ, движущегося по невысокой орбите при его прохождении над ЛК. Воздействие пучка эффективно в секторе с полным углом раскрытия  $\sim 30^\circ$  относительно вертикали, область воздействия на высоте 300 км – окружность диаметром  $\sim 160$  км. При пролёте над Землёй КМ оставляет спиральный «след» с шириной полосы 160 км, совершая 16 витков в сутки, витки отстоят друг от друга на расстояние  $\sim 2.5$  тыс. км, так что за сутки покрывается  $\sim 5200$  км окружности Земли, а вся окружность Земли покрывается в среднем за 8 суток. Таким образом, стационарный ЛК не всегда может использоваться для решения задачи о снятии объявленной угрозы от КМ, а только при очень раннем предупреждении и при нахождении в нужной точке на Земле. Однако в случае высокочастотного импульсно-периодического режима можно добиться ситуации, когда необходимое количество движения будет сообщено КМ за один сеанс пролёта над наземным ЛК.

В результате воздействия пучка должно произойти пространственное рассогласование КА и КМ в момент предполагаемого столкновения на размер области взаимодействия. В случае некомпланарных орбит эта область имеет размеры порядка габаритов КА, а в случае орбит, близких к компланарным, область взаимодействия значительно больше, и на ее границах орбиты находятся на расстоянии, равном габаритам КА. Для оценок рассмотрим следующий пример. Пусть КА с характерными габаритами  $L_{SV} \sim 100$  м движется по круговой орбите на высоте  $H = 300$  км со скоростью  $v = \sqrt{\gamma M / (R_E + H)} \sim 7.73 \times 10^5$  см/с (где  $\gamma$  – гравитационная постоянная;  $M$ ,  $R_E$  – масса и радиус Земли) и периодом обращения  $T = 2\pi(R_E + H)/v \sim 5.42 \times 10^3$  с  $\approx 90$  мин. Пусть КМ движется по такой же траектории. Будем считать воздействие лазерного импульса на КМ мгновенным, увеличивающим его скорость на  $\Delta v$ . Тогда несложно получить, что период обращения изменится на  $\Delta T = 3T\Delta v/v$ . За один виток пройденное КМ расстояние изменится на  $\Delta S = 3T\Delta v$ . Для достижения  $\Delta S > L_{SV}$  необходимо изменить скорость КМ на  $\Delta v > L_{SV}/3T = 6$  мм/с. Если воздействие осуществляется за  $N$  витков до столкновения, то необходимое изменение скорости уменьшается в  $N$  раз. Например, при воздействии за 100 витков пространственная рассинхронизация КА и КМ в 100 м достигается при  $\Delta v \sim 0.06$  мм/с. Таким образом, для обеспечения выхода КМ из области опасного взаимодействия с КА необходимо подобрать количество витков до первого воздействия, импульс отдачи и количество воздействий [1–5].

Рассмотрим механизм воздействия излучения на металлический КМ. Металлы являются хорошими погло-

телями излучения в среднем ИК диапазоне. Известно, что поглощение в металлах происходит в скин-слое. В процессе поглощения излучения на глубине 0.05–0.1 мкм локализуется зона расплавления и испарения. При этом вследствие резкого расширения металла в зоне воздействия часть расплава удаляется в виде капелек. В невесомости этот эффект проявляется наиболее ярко: капли жидкости быстро разрушаются при нагревании, внутреннее давление преодолевает силы поверхностного натяжения еще до начала процесса интенсивного испарения и расплав невозможно удержать на поверхности. Таким образом, задача сводится к обеспечению условий достаточно интенсивного испарения материала КМ. Для этого с помощью серии последовательных импульсов необходимой энергии следует «закачать» в тонкий поверхностный объём до начала теплового расплавления по всему объёму материала, что обеспечит разрушение поверхности КМ и придаст ему механический импульс [10, 11].

При плотности мощности  $I > 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> и высокочастотном (свыше  $10^4$  Гц) лазерном воздействии происходит достаточно интенсивный процесс испарения вещества КМ. Для легкоплавких материалов пороговое значение интенсивности ниже. Такое воздействие на КМ можно назвать «мягким». Поскольку импульс отдачи каждого отдельного импульса достаточно мал, то сложение импульсов при большой частоте импульсно-периодического режима приводит к значительному механическому воздействию [12–14]. Нами проведены оценки для ЛК на основе DF-лазера. Для обсуждаемой высоты орбиты при диаметре выходного зеркала телескопа  $D = 3$  м,  $I_{th} = 100$  кВт/см<sup>2</sup> и диаметре пятна на цели  $d = 2.8$  м средние мощности  $P_{av}$  для DF-ЛК при длительностях импульсов  $\tau = 10$  и 100 нс и частотах их следования  $f = 10$  и 100 кГц таковы:  $P_{av} = 120$  МВт ( $\tau = 100$  нс,  $f = 100$  кГц), 25 МВт (100 нс, 10 кГц), 25 МВт (10 нс, 100 кГц) и 6 МВт (10 нс, 10 кГц).

При необходимых мощностях расходимость пучка в три дифракционных предела на выходе лазера,  $\Delta\theta \sim 3\theta_d$ , представляется достаточной для решения задачи. Кроме того, распространение в атмосфере вносит дополнительное искажение пучка, а также потери на поглощение. При круглой форме светового пятна расходимость (в полном угле)  $\Delta\theta$  составит  $\sim 3\theta_d \approx 2.44\lambda_{DF}/D \approx 9 \times 10^{-6}$  рад, при фокусировке лазерного излучения на мишени, находящейся на расстоянии  $H = 300$  км, диаметр пятна  $d = H\Delta\theta \approx 2.8$  м. Поэтому, чтобы обеспечить на мишени интенсивность излучения  $I_{peak} = 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, необходимо иметь на выходном зеркале телескопа (без учёта потерь при транспортировке луча) пиковую импульсную мощность  $P_{peak} = 10^5 \pi d^2/4 \approx 6 \times 10^9$  Вт. Оценим теперь, какой при этом должна быть ожидаемая средняя по времени мощность DF-ЛК при длительности импульса  $\sim 100$  нс. Так как характерное время накопления энергии в активной среде составляет  $\sim 10$  мкс, то при характерном времени импульса  $\sim 100$  нс (скважность 100) средняя мощность DF-ЛК в импульсно-периодическом режиме должна быть равна 60 МВт. Однако из-за сильной релаксации в среде в моменты отсутствия излучения переход от непрерывного режима к импульсно-периодическому сопровождается заметными энергетическими потерями, максимум которых составляет  $\sim 50\%$  от средней мощности. Поэтому при длительности импульса  $\sim 100$  нс и расходимости  $3\theta_d$  необходима средняя мощность  $\sim 120$  МВт. При  $\tau \sim 10$  нс и  $f = 100$  кГц пиковая мощность лазера в импульсе может превышать среднюю мощность ЛК в импульсно-периодическом режиме уже прак-

тически в  $10^3$  раз. Однако в отсутствие вращательного равновесия ансамбля излучающих молекул мощность ЛК относительно равновесного случая снижается дополнительно. Необходимый уровень средней мощности лазера в импульсно-периодическом режиме уменьшится с учётом вращательной неравновесности примерно в три-четыре раза относительно лазера в непрерывном режиме и при расходимости  $3\theta_d$  составит  $\sim 25$  МВт.

Для сравнения нами выполнены оценки средней мощности лазера при частоте следования импульсов 10 кГц для двух длительностей импульсов излучения – 100 и 10 нс. Однако величины средней мощности ЛК и в этих случаях (25 и 6 МВт соответственно) оказываются за пределами разумного. Рассмотрение режимов воздействия при более высоких частотах следования в данном случае не имеет смысла, т.к. требуемые значения средней мощности оказываются значительно большими.

В принципе можно было бы попытаться сократить длительность импульса излучения ЛК вплоть до 1 нс. При прочих равных условиях это дало бы нам возможность снизить уровень средней мощности DF-ЛК еще на один порядок, что при расходимости  $3\theta_d$  составит  $\sim 2.5$  МВт. Однако следует иметь в виду, что получить при таких коротких импульсах расходимость излучения, близкую к дифракционной, практически невозможно (за такие малые времена модовая структура поля излучения в резонаторе просто не успевает сформироваться – время прохода луча в резонаторе равно  $\sim 10^{-8}$  с при времени существования импульса  $\sim 10^{-9}$  с). Решение проблемы путём укорочения импульса задающего генератора лимитируется пороговым условием генерации. Кроме того, малая мощность задающего генератора потребует значительного удлинения активной среды усилителя, что ещё больше усложнит решение проблем, связанных с подавлением усиленного спонтанного излучения.

Полученные выше цифры соответствуют достижению минимально необходимого импульса отдачи при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью тугоплавкой мишени. Предполагается, что этого достаточно при соответствующем выборе момента начала воздействия для увода КМ из области взаимодействия орбит КА и КМ. Для более легкоплавких материалов требования к средней мощности лазера снижаются. Понятно, что увеличение средней мощности лазерного источника упрощает решение задачи, позволяя уменьшить количество сеансов воздействия, и снимает необходимость ведения каталога КМ.

### 3. Защита космического аппарата от столкновения с космическим мусором

Задача защиты КА от столкновения с КМ или ОЕП возникает в случае внезапной угрозы КА со стороны неконтролируемых объектов КМ и метеорных частиц либо в случае контролируемых объектов КМ на витке столкновения, не удалённых заблаговременно, при их подлёте к КА. В этом случае воздействовать на КМ можно с помощью автономного ЛК космического базирования на основе твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой, установленного непосредственно на защищаемый КА или запущенного на эту же орбиту рядом с ним [13]. Для постоянной работы такого ЛК на орбите необходимо его обеспечение достаточным электрическим питанием. Эффективное воздействие ЛК на КМ возможно, если время его обнаружения незначительно превышает

сумму времен установления сопровождения цели соответствующими средствами, подготовки к пуску, наведения пучка и длительности серии импульсов ЛК. Для снятия угрозы столкновения необходимо передать объекту воздействия такое количество движения, чтобы он в результате торможения начал отставать от КА или его траектория изменилась настолько сильно, что КМ прошел бы мимо КА. Понятно, что суммарное воздействие на мишень по сравнению со стационарной задачей должно быть гораздо более мощным. При этом происходит интенсивное испарение материала КМ и возможны даже ионизация испарённых молекул и образование плазмы.

Для оценки эффекта торможения существует полуэмпирическая формула, которая показывает, что под действием лазерного импульса вследствие разлета образующейся плазмы происходит изменение скорости  $\Delta v$  фрагмента КМ, связанное с поглощённой энергией импульса:  $\Delta v = C_m E/m$ , где  $E$  – поглощённая энергия;  $m$  – масса мишени;  $C_m$  – коэффициент, определяющий эффективность использования энергии излучения для испарения и в сильной мере зависящий от типа материала мишени, от интенсивности излучения  $I_{\text{peak}}$  и от длительности импульса  $\tau$  [8]. Ниже приведены экспериментальные данные по оптимальной (при максимуме  $C_m$ ) величине  $I_{\text{peak}}$  в зависимости от  $\tau$ . Так, при  $\tau = 100$  нс  $I_{\text{peak}} = 2 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, а при  $\tau = 10$  нс  $I_{\text{peak}} = 6 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, т.е.  $I_{\text{peak}} \sim 1/\sqrt{\tau}$ . При отклонении интенсивности от оптимального значения воздействие быстро ослабевает, поэтому далее будем предполагать, что пиковая интенсивность равна оптимальной. Хорошо известно, что плотность мощности  $\sim 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> широко используется для лазерного сверления и резки материалов в режиме возгонки или абляции. Такое воздействие на КМ в сравнении с рассмотренным ранее можно назвать «жестким». В промежутке между двумя последовательными импульсами, следующими с частотой  $\sim 100$  кГц, плазма при разлете в вакуум успевает пройти достаточное расстояние, чтобы исключить поглощение энергии следующего лазерного импульса вдали от мишени. Оценка влияния молекулярного поглощения на эффективность прохождения лазерного излучения через атмосферу показывает приоритет излучения DF-ЛК над излучением ЛК на основе YAG:Nd-лазера. Коэффициент интегрального ослабления в случае DF-лазера в два раза меньше, чем у YAG:Nd-лазера. Средние мощности  $P_{\text{av}}$  твердотельного лазера с зеркалом диаметром  $D = 3$  м, работающего в импульсно-периодическом режиме при  $f = 100$  и  $10$  кГц, в случае оптимального воздействия на КМ при расстоянии до объекта  $L = 100$  км и расходимости  $\theta_d$  для длительностей импульсов  $\tau = 100$  и  $10$  нс таковы: в «жестком» режиме ( $D = 3$  м,  $I_{\text{th}} = 1$  ГВт/см<sup>2</sup>,  $d = 0.08$  м)  $P_{\text{av}} = 1200$  МВт ( $\tau = 100$  нс,  $f = 100$  кГц),  $120$  МВт ( $100$  нс,  $10$  кГц),  $120$  МВт ( $10$  нс,  $100$  кГц) и  $12$  МВт ( $10$  нс,  $10$  кГц); в «мягком» режиме ( $D = 3$  м,  $I_{\text{th}} = 10$  МВт/см<sup>2</sup>,  $d = 0.08$  м)  $P_{\text{av}} = 12$  МВт ( $100$  нс,  $100$  кГц),  $1.2$  МВт ( $100$  нс,  $10$  кГц),  $1.2$  МВт ( $10$  нс,  $100$  кГц) и  $120$  кВт ( $10$  нс,  $10$  кГц).

Таким образом, ЛК космического базирования на основе твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой мощностью  $100$ – $1000$  кВт и дифракционной расходимостью излучения, работающий в импульсно-периодическом режиме с  $\tau \sim 10$ – $100$  нс, в «мягком» режиме обеспечит необходимое воздействие на КМ с прицельного расстояния  $100$  км. Размер светового пятна на объекте на таком расстоянии не будет превышать  $8$  см.

Использование для защиты КА наземных DF-ЛК возможно в случае установки на КА приёмного зеркала, однако этот вариант годится только при нахождении предполагаемой точки столкновения КА и КМ в области воздействия наземного ЛК, что маловероятно. Тем не менее отметим, что в этом случае приёмное зеркало на КА должно быть достаточного размера, чтобы перехватить весь пучок излучения. Как показывают оценки, в зависимости от расходимости пучка необходимый диаметр приёмного зеркала должен составлять несколько метров. Использование же полностью наземного варианта ЛК для «жесткого» воздействия на КМ, попавший в зону действия DF-ЛК, потребовало бы создания ЛК с высокими средними мощностями.

В «жестком» режиме ( $D = 30$  м,  $I_{\text{th}} = 10$  МВт/см<sup>2</sup>,  $d = 0.28$  м, DF-лазер, расходимость излучения  $3\theta_d$ ) мощность  $P_{\text{av}} = 60$  МВт ( $\tau = 100$  нс,  $f = 100$  кГц),  $24$  МВт ( $100$  нс,  $10$  кГц),  $6$  МВт ( $10$  нс,  $100$  кГц) и  $2.4$  МВт ( $10$  нс,  $10$  кГц); в «мягком» режиме ( $D = 30$  м,  $I_{\text{th}} = 100$  кВт/см<sup>2</sup>,  $d = 0.28$  м, DF-лазер, расходимость излучения  $3\theta_d$ )  $P_{\text{av}} = 600$  кВт ( $\tau = 100$  нс,  $f = 100$  кГц),  $250$  кВт ( $100$  нс,  $10$  кГц),  $60$  кВт ( $10$  нс,  $100$  кГц) и  $25$  кВт ( $10$  нс,  $10$  кГц).

Из приведенных оценок становится очевидно, что эффективное воздействие на КМ вполне возможно, т.к. требуемый уровень средней мощности химического лазера уже достигнут и задача сводится лишь к его переводу в импульсно-периодический режим с минимальной мощностью средней мощности системы.

#### 4. Очистка околоземного космического пространства от космического мусора

Решить проблему очистки ОКП от КМ путем лазерного воздействия можно также с помощью автономного ЛК космического базирования на основе DF-лазера с системами фокусировки и наведения пучка на КМ. Для ускорения падения КМ в атмосферу необходимо произвести его торможение и перевод на более низкую орбиту, с меньшим временем «жизни» КМ. Известно, что время нахождения на орбите (время «жизни») объектов КМ очень сильно зависит от ее высоты. По имеющимся в литературе данным время «жизни» КМ на высоте  $1000$  км составляет  $\sim 2000$  лет, на высоте  $600$  км – около  $25$ – $30$  лет, на высоте  $\sim 200$  км – примерно неделю. В диапазоне высот  $100$ – $1000$  км зависимость времени «жизни» КМ от высоты над Землёй по этим данным можно аппроксимировать как  $t \sim h^7$ . При такой сильной зависимости даже небольшое торможение и снижение орбиты приводит к заметному уменьшению времени «жизни» КМ. Так, при снижении орбиты с  $300$  до  $200$  км оно уменьшается со  $120$  до  $6$  дней.

Для точных оценок эффективности уничтожения КМ необходимы специальное моделирование и проведение расчётов для каждой конкретной орбиты КМ и его типа. Теоретически во всём диапазоне воздействия лазерного излучения – от «мягкого» до «жесткого» – происходит ускорение процесса падения КМ на Землю. Как следует из оценок, при «жестком» воздействии серией импульсов мощного лазера в течение одного прохода над стационарным ЛК можно снизить орбиту КМ до требуемого уровня. Если при этом объект торможения попадёт в верхние слои атмосферы ( $h \sim 100$  км), то затормозится и сгорит в ней за  $1$ – $2$  витка, т.е. задача будет решена. Однако такая постановка задачи представляется избыточ-

ной: достаточно лишь снизить орбиту КМ так, чтобы она проходила ниже рассматриваемого КА.

Основываясь на имеющихся литературных данных, можно утверждать, что для ЛК космического базирования мощность порядка несколько десятков киловатт достаточна для существенного уменьшения времени «жизни» небольшого фрагмента КМ. Естественно, дальнейшее увеличение мощности ЛК ещё более уменьшает это время, т.е. увеличивает вероятность падения КМ в атмосферу, поэтому для быстрой очистки ОКП от КМ необходим автономный ЛК космического базирования с мощностью порядка нескольких сотен киловатт. Частота пусков ЛК будет определяться частотой попадания КМ в зону его действия и временем энергетической дозаправки ЛК в космосе.

При использовании наземной установки с размещённым в космосе приёмным зеркалом энергетические потери при прохождении излучения в атмосфере и потери на зеркале потребуют существенно более мощной установки (несколько мегаватт). Частота пусков будет определяться частотой прохождения зеркала над ЛК наземного базирования (в среднем не чаще одного раза за 8 суток) и вероятностью попадания КМ в эти периоды в область действия ЛК. В этом случае частота пусков должна быть гораздо меньшей, чем при использовании автономного ЛК космического базирования. Однако возможен и вариант одновременного обслуживания многих объектов КМ, но тогда задача усложняется необходимостью постоянного ведения каталога таких объектов.

В заключение отметим, что для более детального исследования представленной задачи, в частности влияния на поражение КМ частоты следования и длительности импульсов, относительных скоростей объектов, мощностей лазеров и др., необходимо проводить более точное моделирование генерационных процессов в высокочастотном импульсно-периодическом лазере, детально исследовать распространение излучения в ОКП на различных высотах, получать необходимые данные об эффективности высокочастотного импульсно-периодического лазерного воздействия на КМ различного происхождения и т.д. Рассмотренные в настоящей статье варианты ЛК могут найти применение не только в задачах, связанных с КМ, но и в других исследовательских проектах. В частности их применение целесообразно в разработке и создании лазерного ракетного двигателя, в беспроводной передаче энергии на большие расстояния, в очистке водной поверхности от нефтесодержащих продуктов, в очистке протяженных и сложных поверхностей от загрязнений, в защите особо ценных и экологически опасных объектов от ударов молний, а также в ряде специальных задач.

## 5. Выводы

1. Импульсно-периодические лазерные системы с большой частотой следования импульсов являются важным инструментом в решении проблемы эффективного уничтожения КМ и ОЕП непосредственно в ОКП или их увода на безопасные орбиты.

2. Для решения задачи заблаговременной защиты от КМ наиболее пригодными являются высокочастотные ЛК наземного базирования на основе импульсно-периодического DF-лазера, воздействующие на КМ непосредственно с Земли в «жестком» режиме при диаметре зеркала телескопа 30 м. При  $\tau \sim 10$  нс и  $f = 10$  кГц требуется лазерный комплекс мощностью  $\sim 2.4$  МВт. В «мягком» режиме средняя мощность ЛК снижается до существенно меньших значений – не более 600 кВт.

3. Для решения задачи защиты КА от столкновения с КМ или метеоритными частицами наиболее эффективен автономный высокочастотный ЛК космического базирования на основе высокочастотного импульсно-периодического твердотельного лазера, размещенный на КА или вблизи него. В «мягком» режиме защита КА обеспечивается с расстояния  $\sim 100$  км. При диаметре зеркала телескопа 3 м средняя мощность ЛК на основе YAG: Nd-лазера оказывается в пределах 100 кВт – 1 МВт (в зависимости от длительности и частоты следования импульсов).

1. Phipps C.R., Michaelis M.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3092**, 728 (1997).
2. Campbell I.W. *Project «ORION//NASA: Techn. Memorandum»*, 108522 (1996).
3. Аполлонов В.В., Вагин Ю.С. Патент РФ № 2400005 с приоритетом от 20 мая 2009 г.
4. Apollonov V.V., Alcock A.J., Baldis H.A. *Opt. Lett.*, **5**, 333 (1980).
5. Аполлонов В.В., Кийко В.В., Кислов В.И., Суздальцев А.Г. *Квантовая электроника*, **33** (9), 753 (2003).
6. Башкин А.С., Гуров Л.В., Каторгин Б.И. *Квантовая электроника*, **38** (5), 429 (2008).
7. Apollonov V.V., Pletnev N.V. *Progr. Symp. ISBEP-7* (Ludwigsburg, Germany, 2012, p. 17).
8. Phipps C.R., Luke J.R., Funk D.J., Moore D.S., Glowina J., Lippert T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5448**, 1201 (2004).
9. Кузнецов Л.И., Савичев В.Ю., Тихонов Н.Н. *Квантовая электроника*, **25** (4), 372 (1998).
10. Apollonov V.V., Kijko V.V., Kislov V.I., Tischenko V.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5777**, 1011 (2005).
11. Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **34** (10), 941 (2004).
12. Apollonov V.V., Kijko V.V., Kislov V.I. *Progr. Symp. HPLS@A-2012* (Istanbul, 2012, p. 25).
13. Apollonov V.V. *Laser Phys. J.*, **23**, 1 (2013).
14. Apollonov V.V. *Chinese Opt.*, **1**, 1 (2013).