

07;12

## Метод регистрации бомбардировки поверхности космического аппарата высокоскоростными частицами

© Б.И. Полетаев, В.Д. Атамасов, В.Н. Баландин, А.В. Белянкин, М.М. Полуян,  
Д.Ю. Михайлов, А.В. Левандович

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,  
197082 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: vka112@front.ru

(Поступило в Редакцию 23 ноября 2007 г.  
В окончательной редакции 19 марта 2008 г.)

Рассматриваются процессы взаимодействия высокоскоростных малодисперсных частиц с поверхностью мишени, позволяющие обосновать наличие интенсивного свечения протуберанцев в УФ-диапазоне длин волн. Для регистрации факта бомбардировки космического аппарата малодисперсными частицами предлагается использовать УФ-аппаратуру.

PACS: 94.05.Bf

В процессе функционирования на орбите космический аппарат (КА) подвергается воздействию малодисперсных частиц (МДЧ) как естественного, так и искусственного происхождения, что может привести к нарушению нормального функционирования бортовых систем КА. В частности, могут загрязняться объективы аппаратуры для космического фотографирования, поверхности солнечных батарей, закорачиваться антенны радиотехнических устройств. Воздействие частиц на радиационные поверхности может также привести к нарушению теплового режима КА.

Для своевременного принятия решения о продолжении или прекращении функционирования КА целесообразно иметь информацию о фактах взаимодействия малодисперсных частиц с поверхностью КА.

В настоящей статье предлагается один из методов регистрации такого взаимодействия, основанный на эффектах плазменных преобразований и связанных с ними световых вспышках, появляющихся при соударении частиц с поверхностью КА. При этом предполагается, что световые вспышки имеют максимум плотности лучистой энергии в ультрафиолетовой области и легко могут быть зафиксированы с помощью УФ-аппаратуры.

Рассмотрим физическую картину процессов, происходящих при взаимодействии малодисперсных частиц с поверхностью КА. При встрече МДЧ с твердой поверхностью наблюдаются различные ударные эффекты. При относительных скоростях соударения, больших пороговой  $v_{10}$ , происходит плавление вещества в волне разгрузки за счет нагрева его ударной волной сжатия.  $v_{10}$  различна для разных веществ и лежит в диапазоне примерно 1–5 км/с. Эксперименты показывают, что при такой скорости через время  $\tau \approx 0.3 \mu\text{s}$  после соударения из образующегося кратера вылетает протуберанец, состоящий в основном из паробразной и жидкой фаз расплавленного металла частицы и мишени.

При более высоких скоростях, достигающих второй пороговой скорости  $v_{20} \approx 10\text{--}20 \text{ км/с}$ , разгруженное ве-

щество мишени интенсивно разлетается из кратера сначала в виде плазмоида, а затем, после высвечивания, он превращается в протуберанец. При еще более высоких скоростях соударения (порядка 20–80 км/с) основными становятся ионизационные процессы.

Среди эффектов, которые имеют место при ударе частицы в твердую поверхность, практически важным является свечение плазмоида.

В первый момент после удара ( $\tau \approx 10^{-10} \text{ с}$ ) плазмид состоит из сильно ионизованного вещества, выброшенного из образованного в мишени кратера в результате взрывного испарения вещества мишени и налетевшей частицы. При ударе, например, алюминиевой частицы в поверхность КА в месте удара создается давление  $P$ , значение которого можно оценить, используя уравнение ударной адиабаты [1]:

$$P = \rho_{\text{Al}} Dv, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{Al}}$  — плотность алюминия;  $D$  — скорость ударной волны;  $v$  — массовая скорость (скорость удара).

Поскольку малодисперсные частицы естественного или искусственного происхождения и космический аппарат, который представляет собой своеобразную мишень, движутся с относительными скоростями, значительно превышающими 1 км/с, то при скорости столкновения  $v = 10 \text{ км/с}$  алюминиевой частицы с поверхностью КА в области удара создается давление, равное примерно  $1.7 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ . Из этого следует, что давление во фронте ударной волны во много раз превышает предел текучести материала. В сгустке неравновесного твердого жидкого вещества при разгрузке сначала пойдет реакция ионизации, а затем его испарение. При этом можно предположить, что начальная температура в области удара может находиться в пределах  $10^4\text{--}10^5 \text{ К}$ .

Разгруженное вещество мишени интенсивно разлетается из образовавшегося кратера в виде плазмоида, вещество которого в первый момент времени ( $10^{-10} \text{ с}$ )

сильно ионизировано [2]. Снижение температуры плазмоида вследствие разгрузки за счет ионизации приводит к тому, что высокоэнергетический процесс ионизации прекращается, а дальнейшая разгрузка плазмоида, адиабатически расширяющегося в вакуум, идет за счет излучения. При этом отмечается возникновение световой вспышки, причем коэффициент преобразования кинетической энергии частицы в световое излучение составляет около  $10^{-2}\%$ .

Световая вспышка является тормозным излучением горячей плазмы высокого давления, из которой в первоначальный момент времени состоит плазмод. Оставив пока в стороне вопрос о том, является эта плазма высокотемпературной или нет, можно с уверенностью сказать, что наряду с излучением видимого диапазона (ВД) можно ожидать интенсивного излучения ультрафиолетового (УФ) и даже, возможно, рентгеновского диапазона спектра.

Согласно закону излучения Планка, объемная плотность излучения  $q_{\lambda,T}$  (энергия излучения в единице объема)

$$q_{\lambda,T} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}. \quad (2)$$

Тогда отношение объемных плотностей излучения в ультрафиолетовом  $q_{\lambda,UV}$  и видимом  $q_{\lambda,VB}$  диапазонах

$$\frac{q_{\lambda,UV}}{q_{\lambda,VB}} = \frac{\lambda_{VB}^5 \exp(\frac{hc}{\lambda_{VB}kT}) - 1}{\lambda_{UV}^5 \exp(\frac{hc}{\lambda_{UV}kT}) - 1}, \quad (3)$$

при  $T = 10^4$  К для  $\lambda_{UV} = 2.5 \cdot 10^{-7}$  м и  $\lambda_{VB} = (4-7.6) \cdot 10^{-7}$  м

$$\frac{q_{\lambda,UV}}{q_{\lambda,VB}} \approx 1.2-32; \quad (4)$$

при  $T = 10^5$  К для  $\lambda_{UV} = 2.5 \cdot 10^{-7}$  и  $\lambda_{VB} = (4-7.6) \cdot 10^{-7}$  м

$$\frac{q_{\lambda,UV}}{q_{\lambda,VB}} \approx 6-70; \quad (5)$$

при  $T = 10^6$  К для  $\lambda_{UV} = 2.5 \cdot 10^{-7}$  м и  $\lambda_{VB} = (4-7.6) \cdot 10^{-7}$  м

$$\frac{q_{\lambda,UV}}{q_{\lambda,VB}} \approx 6.5-83. \quad (6)$$

При  $T = 10^5$  К для границы вакуумного УФ по отношению к желто-зеленому диапазону спектра, т.е. для  $\lambda_{UV} = 2 \cdot 10^{-7}$  м и  $\lambda_{VB} = 5 \cdot 10^{-7}$  м

$$\frac{q_{\lambda,UV}}{q_{\lambda,VB}} \approx 33. \quad (7)$$

Таким образом, можно ожидать, что интенсивность излучения плазмоида в УФ-диапазоне ( $\lambda_{UV} = 2000-3000 \text{ \AA}$ ) в десятки раз превышает интенсивность излучения в ВД-диапазоне ( $\lambda_{VB} = 4000-7600 \text{ \AA}$ ).

Энергия вспышки  $W_{fl}$ , представляющей собой излучение плазмоида, распространяется в телесный угол  $4\pi$ . На расстоянии  $r$  от плазмоида плотность потока лучистой энергии составляет

$$J = \frac{W_{fl}}{S_{sf}\tau_{fl}}, \quad (8)$$

где  $S_{sf} = 4\pi r^2$ ,  $\tau_{fl}$  — время вспышки.

Через  $0.3 \mu\text{s}$  после соударения из кратера вылетает протуберанец. Стадия образования и разлета плазмоида, предшествующая вылету протуберанца, длится примерно такое же время, т.е.  $\tau \approx 0.3 \mu\text{s}$ .

Для микронных алюминиевых частиц, налетающих на стенку со скоростью  $v$ , коэффициент преобразования кинетической энергии в световое излучение  $K_{VB}$  составляет примерно  $10^{-2}\%$ , и энергия УФ-излучения для  $d \approx 1-10 \mu\text{m}$  и  $v \approx 10 \text{ km/s}$ ;  $\rho_{Al} \approx 2700 \text{ kg/m}^3$  составит

$$\begin{aligned} W_{fUV} &\approx K_{VB} \frac{mv^2}{2} \frac{q_{\lambda,UV}}{q_{\lambda,VB}} \approx K_{VB} \frac{\pi d^3 \rho_{Al} v^2}{12} \frac{q_{\lambda,UV}}{q_{\lambda,VB}} \\ &= 10^{-10}-10^{-7} \text{ J}, \end{aligned} \quad (9)$$

а интенсивность УФ-излучения на расстоянии  $r \approx 1$  м

$$J_{UV} \approx \frac{W_{fUV}}{4\pi r^2 \tau_{fl}} \approx 10^{-5}-10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \quad (10)$$

Таким образом, вспышку единичной микронной частицы при ее ударе о твердую поверхность можно наблюдать с помощью датчика УФ-излучения с чувствительностью порядка  $10^{-6}-10^{-3} \text{ W/m}^2$ . Яркость такой вспышки

$$B_{UV} = \frac{J_{UV}}{4\pi} \approx 10^{-6}-10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}. \quad (11)$$

Для рассматриваемого диапазона  $0.2-0.3 \mu\text{m}$  спектральная яркость источника УФ-излучения на расстоянии 1 м от мишени составит

$$B_{\lambda,UV}(r) = \frac{B_{UV}}{\Delta\lambda} \approx 10^{-5}-10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}}. \quad (12)$$

Чувствительность УФ-телескопа „Спика“ (астрономическая многоцелевая система „Астрон“, например, составляет  $10^{-14} \text{ W/(m}^2 \mu\text{m} \cdot \text{sr)}$ , что эквивалентно излучению звезды солнечного класса +12 звездной величины в рассматриваемом диапазоне. Таким образом, данная вспышка соответствует источнику солнечного спектрального класса примерно  $-12$  —  $-18$  звездной величины. Такие источники могут быть зарегистрированы небольшим телескопическим датчиком-фотометром с диаметром зеркала порядка  $0.2$  м и чувствительным фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), а также с помощью соответствующих ПЗС-матриц.

Основную часть метеорной материи в космосе составляют микрометеорные частицы с массой  $10^{-17}-10^{-9} \text{ kg}$  [3]; в пересчете на алюминиевые частицы их диаметры составляют  $2 \cdot 10^{-7}-10^{-4}$  м. Диапазон

скоростей этих частиц относительно Земли составляет 0–72 km/s. Поскольку плазмоид может образовываться при скоростях соударения порядка 10 km/s, то регистрировать микрометеорные частицы по свечению плазмоида в УФ-диапазоне можно при относительных скоростях  $v \approx 10\text{--}80$  km/s. Здесь число 80 получено в результате суммирования  $(72 + v_{II})$  km/s, где  $v_{II}$  — вторая космическая скорость, с которой могут находиться на орбите искусственного спутника Земли объекты, подвергаемые ударам микрометеоров. При этом спектральная яркость УФ-излучения

$$B_{\lambda UV}(r = 1 \text{ m}) \approx 10^{-7} - 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}}.$$

Как видно, минимум соответствует источнику –3 звездной величины.

Для регистрации источника УФ-излучения +14 – +11 звездной величины требуется достаточно сложная аппаратура, но источники ярче +11 звездной величины могут быть зарегистрированы с помощью относительно простых средств УФ-диапазона. Усложнение аппаратуры регистрации соответственно расширяет возможности метода. Здесь уместно заметить, что наиболее вероятными являются встречи с частицами, имеющими массу более  $10^{-15}$  kg и скорость более 10 km/s, т.е. для регистрации попаданий микрометеорных частиц в элементы конструкции КА указанным методом в большинстве случаев не требуется сложной УФ-аппаратуры.

Так как плотность микрометеорной материи в околоземном пространстве составляет  $j \approx 10^{-4}$  p/m<sup>2</sup> или 8.6 p/(m<sup>2</sup> · d), то установка УФ-датчиков для непрерывной регистрации соударения КА с микрометеорными частицами космического мусора антропогенного происхождения имеет практическое, прикладное значение.

При взаимодействии мишени с облаком малодисперсных частиц, имеющих параметры:  $D_0$  — диаметр облака,  $M$  — масса облака,  $d$  — диаметр частицы,  $\rho_0$  — плотность материала частиц, число соударений составит

$$N = S_m D_0 n = \frac{S_m D_0 m}{V m} = \frac{6 S_m M}{\pi D_0^2 m} = \frac{36 S_m M}{\pi^2 D_0^2 d^3 \rho_0}, \quad (13)$$

где  $S_m$  — площадь мишени,  $n$  — концентрация частиц облака,  $m$  — масса частиц,  $V$  — объем облака.

При  $S_m = \frac{\pi l^2}{4}$ , где  $l$  — диаметр мишени,

$$N = \frac{9 l^2 M}{\pi D_0^2 d^3 \rho_0}. \quad (14)$$

Если  $S_m = 10 \text{ m}^2$ ,  $D_0 = 10^3 \text{ m}$ ,  $M = 100 \text{ kg}$ ,  $d = 10^{-5} \text{ m}$ ,  $\rho_0 = \rho_{Al} = 2700 \text{ kg/m}^3$ , то  $N \approx 10^9$ . Суммарная спектральная яркость УФ-излучения  $B_{\lambda UV}$ , без учета рассеяния в облаке, может составить при скорости соударения  $v = 10^4 \text{ m/s}$  для УФ-датчика диапазона 0.2–0.3  $\mu\text{m}$ , расположенного на расстоянии  $r = 100 \text{ km}$  от КА, величину, примерно равную  $10^{-7} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$ , т.е. –3 звездной величины.

Таким образом, существует возможность наблюдения процесса взаимодействия КА с облаком МДЧ не только с помощью телеметрических датчиков, установленных непосредственно на КА, но и с достаточно большого расстояния.

## Список литературы

- [1] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
- [2] Малама Ю.Г. Исследование явлений, возникающих при столкновении с различными поверхностями твердых частиц, обладающих большими скоростями. Препринт ИКИ АН СССР. Пр-642. 1981.
- [3] Иванов В.И., Меньщиков В.А., Пчелинцев А.А., Лебедев В.В. Космический мусор. Проблема и пути ее решения. М.: Патриот. 1996. Т. 1. 360 с.