

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]:

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

где ρ_{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} 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 4π . На расстоянии r от плазмоида плотность потока лучистой энергии составляет

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

где $S_{sf} = 4\pi r^2$, τ_{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/m² или 8.6 p/(m² · 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, ρ_0 — плотность материала частиц, число соударений составит

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

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 μm , 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.