

О БОЛИДНЫХ ЯВЛЕНИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ СПУСК КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В. С. ГЕТМАН, М. Н. МАКСУМОВ

Для трех конкретных механизмов свечения при спуске КА: излучения ударной волны, свечения продуктов абляции и горения оценена яркость свечения, сопутствующего спуску космического аппарата (КА) на атмосферном участке.

Показано, что во всех случаях свечение сравнимо с болидным и метеорное свечение является наименее ярким.

Имеется небольшое количество специальных наблюдений свечения и ионизации, вызванных спускающимися КА [10, 11, 13].

1 декабря 1957 г. наблюдался яркий детонирующий болид, связываемый с распадом Спутника I [10]. Продолжительность полета оценивалась в 3–4 с, блеск между -14^m и -15^m . Болид давал искры вдоль пути и завершился яркой вспышкой.

В 1962 г. капсула американского корабля МА-6, пилотируемая Джоном Гленном, наблюдалась коротковолновой радиолокационной установкой [11]. Было зарегистрировано пять ионизированных следов: один, наибольший, от капсулы и четыре более коротких от фрагментов одной из систем корабля. Разрушение фрагментов произошло в течение одной секунды и сопровождалось яркими вспышками. След от капсулы имел максимальное поперечное сечение 10^6 м² и наблюдался 20 с. С. Лин [11] предполагает существование фотоионизационного гало вокруг капсулы, обусловленное ультрафиолетовым излучением носовой части ударной волны. Линейная электронная плотность следа в области, непосредственно примыкающей к телу, составляла $q \sim 10^{18}$ эл/см.

В 1964 г. с самолетов проводились спектральные наблюдения разрушения в атмосфере возвращаемого комплекса космического корабля «Аполлон» по проекту Fige I [7, 13]. Масса комплекса составляла 230 кг, скорость входа в атмосферу $v=11,5$ км/с.

На высотах от 92 до 32 км наблюдалось несколько искусственных болидов яркостью от -13^m до -21^m . В спектрах свечения в области длин волн 3700–8800 Å отождествлены 102 мультиплета 21 атома и системы полос 5 двухатомных молекул. С высоты 88 км начали светиться молекулярные полосы N₂ и CN. Затем появились линии AlI, OI, NI. С высоты 73 км появились линии NaI, CaI, CuI, MgI, CaII и другие, а также полосы C₂, AlO и BeO. Блеск на высотах 92–76 км колебался от -13^m до -14^m . С 64 км до 57 км наблюдалось полное разрушение одного из отсеков комплекса, и блеск превысил -21^m . В дальнейшем свечение сопровождалось большим количеством вспышек от -13^m до -19^m .

Свечение, сопутствующее спуску КА на атмосферном участке, состоит из компонент различной природы, так как обусловлено нагревом воздуха ударной волной, свечением испаряющегося теплозащитного слоя КА (такое свечение можно назвать «метеорным») и горением испаряющегося вещества и поверхности КА.

Последовательно оценим все указанные компоненты излучения.

Можно считать, что при скорости входа $v=11,5$ км/с сферы радиусом $R=1$ м на высотах $H \leq 90$ км газ, нагретый ударной волной до температуры $5000^\circ - 10\,000^\circ$ К, излучает как черное тело [9]. Плотность потока излучения, определяемая соотношением $J = \sigma T^4$, где σ – постоянная Стефана – Больцмана, T – температура, будет равна $J = 3,5 \cdot 10^{10} \div 5,7 \cdot 10^{11}$ эрг/см²с и поток излучения $I = 10^{15} \div 2 \cdot 10^{16}$ эрг/с. Вариация температуры вдоль фронта ударной волны понижает приведенные оценки потока излучения. Если считать эффективно излучающей часть фронта, ограниченную конусом с телесным углом в стерadian, то значение потока понижается на порядок [1, 5]. Переходя с помощью соотношения [14]

$$\lg I = 9.72 - 0.4 M \quad (1)$$

от потока излучения к абсолютной звездной величине M , получим $M = -10^m.7 \div -13^m.8$

Соударения испарившихся молекул и атомов с молекулами воздуха и между собой приводят к «метеорному» свечению газового облака, окружающего КА. По аналогии с физической теорией метеоров [3] будем исходить из предположения, что поток излучения I в данной точке выражается через кинетическую энергию, уносимую испарившимися молекулами и атомами

$$I = \tau \left(- \frac{dm}{dt} \right) \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

Здесь m и v — соответственно масса и скорость КА, τ — коэффициент светимости, характеризующий долю кинетической энергии вещества, перешедшую в излучение в видимой области спектра, t — время. Полагая $dm/dt \approx 1 \div 100$ кг/с, $v \approx 8 \div 11.5$ км/с, и, учитывая, что $\tau = 10^{-2} \div 10^{-3}$ [3, 12] по формуле (2) определим

$$I = 3.2 \cdot 10^{11} \div 6.6 \cdot 10^{14} \text{ эрг/с.}$$

Переходя с помощью (1) к абсолютной звездной величине M , получим

$$M = -4^m.45 \div -12^m.75$$

Чтобы сделать более определенной оценку «метеорной» части блеска, оценим соответствующую линейную электронную плотность q , созданную абляцией оболочки КА. Для скоростей $v \sim 10$ км/с по формуле [4, 14] $M = 38.0 - 2.5 \lg q$ находим $q = 10^{18}$ эл/см при $M = -8^m$. Такое значение q хорошо согласуется с данными работы [11], относящимися к области, непосредственно примыкающей к телу. Поэтому правильно считать темп абляции оболочки более умеренным, чем сотни килограммов в секунду, а «метеорную» компоненту блеска не превосходящей значений $M = -10^m$.

В заключение, учитывая специфические свойства теплозащитного слоя КА, рассмотрим механизм горения. На высотах ниже 90 км, т. е. в области траекторий спуска, земная атмосфера состоит в основном из O_2 и N_2 [5]. При горении защитного слоя температура составляет $3000^\circ \div 5000^\circ$ К [6], что обеспечивает $I = 1.5 \cdot 10^{14} \div 10^{15}$ эрг/с и соответственно $M = -12^m.3 \div -13^m.2$. Разрушение металлической оболочки КА может сопровождаться взрывным горением, когда вследствие внезапного перехода металла в газообразное состояние достигается высокая плотность энергии и температура возрастает до $20\,000^\circ - 30\,000^\circ$ К [2, 8]. В этом случае $I = 2.8 \cdot 10^{17} \div 1.4 \cdot 10^{18}$ эрг/с, $M = -19^m.3 \div -21^m.1$.

Преобладание в начале свечения молекулярных полос и атомарных линий атмосферного происхождения в спектре Fire I указывает на то, что свечение обусловлено нагревом воздуха ударной волной, излучение которой близко к равновесному. Затем это свечение начинает поддерживаться также и горением. «Метеорное» свечение, вероятно, не является преимущественным, давая блеск всего $\sim -8^m \div -10^m$. Наличие в спектре полос окислов подтверждает то, что блеск порядка $-19^m \div -21^m$ может обеспечиваться взрывным горением металла.

Институт астрофизики
АН ТаджССР

Поступила в редакцию
22 августа 1977 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Бронштэн. Проблемы движения в атмосфере крупных метеоритных тел. Изд-во АН СССР, 1963.
2. В. П. Глушко. Путь в ракетной технике. Машиностроение, М., 1977.
3. Б. Ю. Левин. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе. Изд-во АН СССР, 1956.
4. Д. Мак-Кинли. Методы метеорной астрономии. Изд-во «Мир», М., 1964.
5. Дж. Мартин. Вход в атмосферу. Изд-во «Мир», М., 1969.
6. Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. Тепловая защита. Энергия, М., 1976.
7. В. А. Смирнов. Спектры метеоров. Историко-астрономические исследования. вып. 13, изд-во «Наука», М., 1977.
8. Физика взрыва. Изд. 2-е, изд-во «Наука», М., 1975.
9. М. А. Цикулин, Е. Г. Попов. Излучательные свойства ударных волн в газах. Изд-во «Наука», М., 1977.
10. J. V. Hodges. The Rouleau fireball and an assessment of a date collecting system. J. Roy. Astron. Soc. Canada, 56, No 5, 212-213, 1962.
11. S. C. Lin. Radio echoes from a manned satellite during reentry. J. Geophys. Res., 67, No 10, 3851-3870, 1962.
12. R. E. McCrosky and R. K. Soberman. Results from an artificial iron meteoroid at 10 km/sec. Smith. Contrib. Astrophys., 7, 199-208, 1963.
13. P. M. Millman. Spectroscopy of Project Fire I, April 14, 1964. Evolutionary and physical properties of meteoroids, IAU Colloquium, 13, 161-167, 1973.
14. E. J. Opik. Physics of meteor flight in the atmosphere. New York, 1958.

из-за возрастания температуры поверхности светится
се как
у звезд
шаров!