

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
 ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 60, ВЫПУСК 7
 10 ОКТЯБРЯ, 1994

Письма в ЖЭТФ, том 60, вып.7, стр.481 - 485

© 1994г. 10 октября

СТОЛКНОВЕНИЕ КОМЕТЫ С ЮПИТЕРОМ: ВЗРЫВ В
НЕОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

А.В.Ивлев, Б.А.Клумов, В.Е.Фортос*

*Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий РАН
 127412, Москва, Россия*

** Институт динамики геосфер РАН
 117979, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 16 августа 1994 г.

В июле 1994 г. происходило столкновение кометы Шумейкер–Леви 9 с Юпитером. Для интерпретации первых наблюдательных данных о вспышках излучения в оптическом и ИК-диапазонах и всплесках радиоизлучения в декаметровом диапазоне, сопровождающих торможение фрагментов кометы в атмосфере Юпитера привлекается теория сильного взрыва в неоднородной атмосфере. Указанные наблюдательные данные могут являться первым экспериментальным подтверждением этой теории.

С 16 по 22 июля 1994 г происходила бомбардировка обратной стороны Юпитера осколками кометы Шумейкер–Леви 9. Торможение отдельного фрагмента в атмосфере сопровождалось высвобождением колоссальной энергии. При типичных параметрах фрагмента: плотность $\rho_i \simeq 1 \text{ г/см}^3$ (лед), диаметр $D_i \simeq 0,3\text{--}3 \text{ км}$, скорость входа $v_i \simeq 65 \text{ км/с}$ высвобождаемая энергия $E \sim 10^{27\text{--}30}$ эрг. Поскольку процесс столкновения происходил на обратной стороне Юпитера, сам процесс удара был недоступен для прямых наземных наблюдений. В связи с этим особый интерес вызывает восстановление картины происшедшего столкновения по немногочисленным косвенным данным: по видимым из-за лимба коротким вспышкам оптического и ИК излучения и наблюдаемым некоторыми станциями импульсам радиоизлучения декаметрового диапазона. На рис. 1 представлены фотоаграфии Юпитера в ИК диапазоне на длине волны 2,3 мкм в разные моменты времени после удара одного из фрагментов. Отчетливо видно формирование вспышки на краю лимба Юпитера, которая примерно через 20 мин. гаснет. Согласно предварительным данным,

столкновение фрагментов кометы Шумейкер–Леви с Юпитером в ряде случаев сопровождалось также усилением интенсивности декаметрового излучения Юпитера. В настоящей работе предлагается объяснение этих наблюдательных данных.

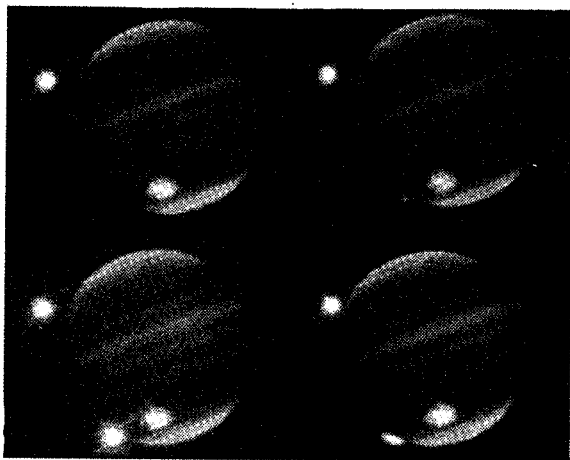


Рис. 1. Изображения Юпитера в ИК диапазоне ($\lambda = 2,3$ мкм) после столкновения с одним из фрагментов (фрагмент Н) кометы Шумейкер–Леви 9. Фотографии сделаны в обсерватории Calar Alto, Испания. Видно формирование вспышки ИК излучения на краю лимба Юпитера. Продолжительность вспышки примерно 30 мин. Интервал времени между последовательными кадрами – примерно 10 мин. Яркий источник в правом нижнем углу каждого кадра – спутник Юпитера. Большое яркое пятно на диске Юпитера – также след от взрывного торможения одного из крупных осколков кометы

Заметное торможение при входе фрагмента кометы в атмосферу начинается тогда, когда вытесненная фрагментом масса атмосферного газа сопоставима с массой фрагмента. В экспоненциальной атмосфере (шкала высот Δ атмосферы Юпитера сильно зависит от высоты h , отсчитываемой от уровня, на котором давление p окружающего газа 1 бар; в частности на высотах, где $p > 1$ бар $\Delta \approx 75$ км, для $p \leq 1$ бар $\Delta \approx 25$ км) заметное торможение начинается в плотных слоях, где плотность газа

$$\rho_s \approx \frac{\rho_i D_i \cos \theta}{3\Delta}, \quad (1)$$

здесь θ - угол входа осколка (по отношению к местной вертикали). Полагая $\rho_i \approx 1$ г/см³, $D_i \approx 1$ км, $\theta \approx 45^\circ$, $\Delta \approx 75$ км, получим, что фрагмент кометы будет испытывать основное торможение при плотности окружающей среды $\rho_s \approx 2 \cdot 10^{-3}$ г/см³ и давлении $p_s \approx 35$ бар. Это соответствует высоте $h_s \approx -160$ км юпитерианской атмосферы. Отметим, что детальные расчеты [1-3], учитывающие процессы разрушения кометного вещества и изменение его формы в процессе торможения, могут дать некоторое увеличение высоты взрыва, что однако не меняет последующих качественных выводов.

Поскольку основное энерговыделение происходит за время $\tau_s \sim \Delta/v_i \approx 1$ с, то процесс торможения фрагмента кометы Шумейкер–Леви в атмосфере Юпи-

тера можно рассматривать как взрыв. Действительно, используя точное решение задачи о сильном взрыве [4,5], легко показать, что время τ_{sw} существования сильной ударной волны (УВ) (когда давление за фронтом УВ много больше давления перед фронтом) значительно превышает характерное время τ_s энерговыделения: $\tau_{sw}/\tau_s \geq 10^3$. При указанных параметрах энерговыделения характерный масштаб задачи $(E/p_s)^{1/2} \gg \Delta$, поэтому влияние неоднородности атмосферы Юпитера на распространение УВ, вызванной взрывом фрагмента, становится определяющим [6]. Поскольку основное торможение и взрыв фрагмента происходят на масштабе $\simeq \Delta$, а основные процессы, связанные с неоднородностью атмосферы, проявляются на масштабах много больших, чем Δ , взрыв фрагмента можно считать точечным. Отметим, что дополнительным фактором, приводящим к локальности энерговыделения, может являться быстрое разрушение фрагмента, приводящее к резкому росту сопротивления в процессе торможения фрагмента.

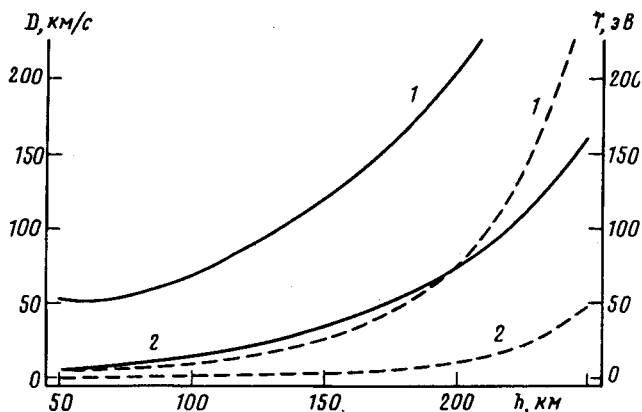


Рис. 2. Зависимость скорости D ударной волны (непрерывная линия) и температуры T за фронтом УВ (штриховая линия) от высоты h над уровнем 1 бар в атмосфере Юпитера. Цифра 1 соответствует взрыву фрагмента на высоте $h_s = 0$ км ($p_s \simeq 1$ бар), 2 соответствует взрыву фрагмента на высоте $h_s = -200$ км ($p_s \simeq 60$ бар). Энергия взрыва 10^{29} эрг

В соответствии с решением задачи о распространении УВ, вызванной сильным точечным взрывом в неоднородной (экспоненциальной) атмосфере [6], верхняя часть фронта УВ ускоряется при распространении в сторону вертикального уменьшения плотности согласно

$$D \simeq \sqrt{\frac{3(\gamma + 1)^2 E}{8\pi \rho_s R^3} \exp^{R/2\Delta}}, \quad (2)$$

где D – скорость УВ, R – расстояние между фронтом УВ и точкой взрыва, γ – показатель адиабаты. При этом практически вся масса газа, сжатого УВ, сосредоточена в тонком слое δ за фронтом УВ и движется с массовой скоростью, близкой к скорости УВ. Температура газа T за фронтом УВ в указанном слое в пределе больших скоростей УВ пропорциональна D^2 . На рис. 2. приведены зависимости $D(h)$ и $T(h)$ в атмосфере Юпитера (85% H_2 , 15% He) для взрыва с энергией $E \sim 10^{29}$ эрг, произошедшего на высоте $h_s = -200$ км. Видно, что, начиная с высот ~ 175 км температура газа T за фронтом УВ ≥ 2 эВ, и газ за фронтом является сильноионизированным. Таким образом, при взрыве кометного фрагмента значительная часть газа, сосредоточенная в ударно-сжатом слое, будет ионизирована вязким скачком уплотнения и поэтому способна излучать в оптическом и радио диапазонах.

По мере движения вверх УВ попадет в область более низкой плотности, где гидродинамическое приближение неприменимо. Это происходит на высотах $h \sim 500$ км, а ударно-сжатый слой продолжает инерционное движение со средней массовой скоростью ~ 50 км/с. К этому моменту параметры в ударно-сжатом слое таковы: характерная толщина, в которой сосредоточена основная масса ионизированного газа, $\delta \simeq 10$ км, характерный диаметр $\simeq 2\pi\Delta \sim 500$ км, средняя по слою температура $\langle T \rangle \simeq 4$ эВ, средняя плотность $\langle \rho \rangle \simeq 5 \cdot 10^{-7}$ г/см³, средняя электронная концентрация $\langle n_e \rangle \simeq 10^{17}$ см⁻³. Таким образом, разгоняющаяся в атмосфере с быстро падающей плотностью УВ может являться эффективным генератором ударно-сжатой и разогретой плазмы на высотах в сотни километров, то есть начиная с тех высот, когда излучение этой плазмы становится доступным прямому наблюдению с Земли.

Размеры и плотность фрагментов могут сильно варьироваться ($D_i \simeq 0,3$ – 3 км, $\rho_i \simeq 0,3$ – 3 г/см³), поэтому высота взрыва также может меняться (по предварительным наблюдательным данным глубина проникновения фрагментов кометы в атмосферу Юпитера лежит в пределах от -200 км до 25 км). Повышение точки взрыва, как это видно на графике (рис. 2), приводит к тому, что УВ достигает скорости порядка 50 км/с (достаточной для возникновения сильной ионизации за фронтом волны), проходя меньшие перепады высот, и в результате масса ионизированного газа, выброшенного в верхний слой атмосферы, увеличивается. Более быстрый рост скорости УВ в этом случае объясняется тем, что она обратно пропорциональна корню из плотности атмосферы на уровне взрыва, которая экспоненциально убывает с увеличением высоты. Следовательно, относительно мелкие фрагменты кометы Шумейкер–Леви ($D_i \sim 300$ м), торможение и взрыв которых происходит на больших высотах, могут являться более эффективными с точки зрения наблюдательных последствий, чем крупные фрагменты.

Выброшенный слой нагретого газа в начальный момент времени является эффективным излучателем в оптическом и ИК диапазонах: отношение δ/l_λ , где l_λ – длина пробега фотонов с длиной волны λ , равно $\simeq 5 \cdot 10^3$ и $\simeq 25$ для фотонов с длиной волны 3 мкм и $0,3$ мкм соответственно. По мере расширения газа параметр δ/l_λ уменьшается: $\delta/l_\lambda \simeq 1$ примерно через 5 мин для $\lambda=0,3$ мкм и через 30 мин для $\lambda=3$ мкм. Эти времена определяют длительность периода, в течение которого рассматриваемый слой излучает с максимальной яркостью на данной длине волны. Геометрия столкновения фрагментов кометы с Юпитером такова, что время вылета ударно-сжатого слоя на лимб (когда выброшенный газ станет доступным для наземных наблюдений) лежит в пределах от 10 до 30 с, поэтому на Земле действительно может наблюдаться продолжительная вспышка излучения в ИК диапазоне, а вспышка излучения в оптическом диапазоне может быть как наблюдаема, так и нет. Судя по фотографии, представленной на рис.1, характерный размер области, излучающей в ИК диапазоне, составляет несколько тысяч км. Исходный сжатый слой газа, расширяясь в пустоту, достигнет таких размеров через ~ 100 с, оставаясь при этом эффективным излучателем в ИК диапазоне. Таким образом, оценки времен расширения слоя и его эффективной светимости находятся в хорошем соответствии с наблюдаемой длительностью вспышки.

Следует также отметить, что вместе с разогретой ионизированной плазмой (в случае, если взрыв происходит на высоте ниже уровня 1 бар) в ударно-сжатом слое в верхнюю атмосферу Юпитера будет выброшена большая масса

газа, образующего облачный покров и имеющего температуру ≤ 1000 К (поскольку облака находятся на уровне, где давление окружающей атмосферы ~ 1 бар, а скорость УВ на этих высотах, как видно из графика на рис.2, еще невелика). В газе с указанной температурой эффективно возбуждаются колебательные уровни молекул, образующих облачный покров (аммиак, метан и другие углеводороды), поэтому при расширении выброшенного газа возможно и их излучение в ИК диапазоне.

В моменты падений некоторых фрагментов кометы наблюдались возмущения радиоизлучения в декаметровом диапазоне. Согласно предварительным данным (РАТАН-600 (Россия), ряд обсерваторий США, Японии, Франции и др.) были зарегистрированы всплески интенсивности радиоизлучения на частотах 15-30 МГц (превышение 10 - 50% над фоном) длительностью несколько минут. Источником наблюдаемых усилений в интенсивности декаметрового излучения может являться нагретая до высоких температур плазма ударно-сжатого слоя. Такая плазма, находясь в магнитном поле Юпитера на больших высотах и будучи замагниченной, может генерировать циклотронное излучение на частотах, близких к наблюдаемым.

Таким образом, в настоящей работе развиты представления, согласно которым источником наблюдаемых вспышек в ИК и декаметровом диапазонах, сопровождающих падение отдельных фрагментов, является ударно-сжатый слой нагретого ионизированного газа, выброшенный в верхние слои атмосферы ударной волной, образовавшейся при взрыве фрагмента кометы в атмосфере Юпитера. Необходимо отметить, что значительное ускорение УВ в процессе распространения, вызванное сильной (экспоненциальной) неоднородностью атмосферы, и связанные с этим явления возможные эффекты в ионосфере и магнитосфере начинают проявляться лишь тогда, когда УВ проходит расстояния, превышающие несколько Δ , поэтому в земных условиях эти эффекты никогда не наблюдались, поскольку они реализуются только при взрывах очень большой мощности ($E \geq 10^{26}$ эрг $\approx 2 \times 10^3$ Мт), которые на Земле, к счастью, никогда не проводились. Действительно, энергия самого мощного взрыва, когда-либо проводившегося на Земле (испытания на Новой Земле) составляла 50 Мт. Отметим, что мощность взрыва широко известного Тунгусского метеорита по оценкам также близка к 50 Мт. Следовательно, наблюдательные данные о столкновении кометы Шумейкер-Леви с Юпитером могут являться первым косвенным подтверждением теории сильного взрыва в неоднородной атмосфере.

Авторы благодарны Ю.Н.Парийскому и Ю.Ю.Балеге за предоставленные данные радионаблюдений Юпитера, а также В.К.Грязнову и А.Е.Кузнецову за помощь в проведении расчетов.

-
1. D.A.Crawford, M.A.Boslough, T.G.Trucano et all, *Geophys. Res. Lett.*(1994), in press.
 2. B.A.Ivanov and H.J.Melosh, *Lunar and Planet. Sci.* **25**, 597 (1994).
 3. Б.А.Клумов, В.И.Кондауров, А.В.Конюхов и др., *УФН*, **6**, 617 (1994).
 4. Л.И.Седов, *Методы размерности и подобия в механике*, М.: Гостехиздат, (1957).
 5. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*, М.: (1963).
 6. А.С.Компанеев, *ДАН СССР* **130**, 1001 (1960).