

П И СЬ М А  
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ  
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 60, ВЫПУСК 6  
25 СЕНТЯБРЯ, 1994

Письма в ЖЭТФ, том 60, вып.6, стр.383 - 387

© 1994г. 25 сентября

ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В АТМОСФЕРЕ  
ЮПИТЕРА В РЕЗУЛЬТАТЕ ПАДЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ КОМЕТЫ  
"ШУМЕЙКЕРА – ЛЕВИ-9"

Ф.Ф.Каменец, А.М.Пухов, М.Ф.Иванов\*, В.Е.Фортов\*

Московский физико-технический институт  
141730 Долгопрудный, Московская обл., Россия

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

Поступила в редакцию 20 июля 1994 г.

После переработки 8 августа 1994 г.

Проведен анализ возможных возмущений в атмосфере Юпитера, вызванных падением фрагментов кометы "Шумейкера – Леви-9". Показано, что энерговыделение от разрушения в атмосфере наиболее крупных осколков достаточно для образования в ее верхних слоях долгоживущих вихревых структур. Основным механизмом образования крупномасштабных вихрей оказывается горизонтальная бароклинность. Полученные выводы подтверждаются астрономическими наблюдениями за столкновением кометы с Юпитером. Дан прогноз дальнейшей эволюции образующихся вихрей в модели двумерной бароклинной атмосферы Юпитера.

1. В июле 1994 г. произошло значительное астрономическое событие — падение массивной кометы "Шумейкер – Леви-9" на Юпитер. Наблюдения за кометой показали, что к моменту столкновения она представляла собой вытянутую вдоль траектории цепочку фрагментов размерами от нескольких сот метров до 1-2 км, приближающихся к Юпитеру со скоростью 65 км/с. Кинетическая энергия этих фрагментов соответственно оценивается от  $10^{29}$  до  $10^{31}$  эрг. При торможении и разрушении осколков кометы накопленная в них энергия (за вычетом порядка 10 %, затрачиваемых на вылет) передается окружающей атмосфере, что создает уникальную возможность исследовать в широком диапазоне сверхмощных энерговложений эволюцию атмосферных планетарных процессов.

Одним из наиболее интересных явлений, наблюдавшихся в атмосферах быстро врачающихся планет, таких как Юпитер, является существование долгоживущих вихревых образований — вихрей Россби. Завихренность в них меньше

угловой скорости вращения планеты  $\omega_0$ , что позволяет описывать эти вихри в квазигеострофическом приближении [1]. В настоящее время считается, что именно к числу вихрей Россби относятся такие хорошо известные структуры в атмосфере Юпитера, как Красное пятно, Белый и Коричневый овалы. В земных условиях аналогами таких вихрей являются циклоны и антициклоны в атмосфере, а также синоптические вихри, наблюдавшиеся в большом количестве в океане. Поперечный размер вихрей Россби во много раз превышает высоту атмосферы, давление соответствует гидростатическому приближению, а горизонтальный градиент давления удерживается силой Кориолиса. Это позволяет описывать их с высокой точностью в приближении мелкой воды [2, 3]. Характерным горизонтальным масштабом этих процессов в атмосфере планеты является радиус Россби-Обухова  $R_r = c_s / 2\omega_0 \sin \alpha$ , где  $c_s$  — скорость звука,  $\alpha$  — широта. Для Юпитера на широте падения кометы этот радиус оценивается в 6000 км. Фазовая скорость линейных волн Россби  $v_r$  для этой широты составляет  $\approx 40$  м/с, что позволяет оценить характерное время эволюции (вращения) вихрей как  $\tau = R_r / v_r \approx 30$  часов. Однако сильнонелинейные вихри могут эволюционировать существенно быстрее, а более крупные — медленнее.

Одной из наиболее сложных и сравнительно мало исследованных проблем является механизм образования вихрей. Предполагается, что одним из наиболее фундаментальных источников геострофической завихренности в атмосфере является бароклинность, а именно, неколлинеарность градиента давления и градиента температуры [4]. С этой точки зрения наблюдения за результатами падения кометы "Шумейкера-Леви-9" на Юпитер могут дать уникальный экспериментальный материал, представляющий реакцию атмосферы планеты на воздействие практически точечного мгновенного и очень мощного источника тепла.

2. С целью прогноза результатов воздействия падения осколков кометы на динамику атмосферы Юпитера были проведены расчеты процесса на основе двумерной модели бароклинной динамики атмосферы [4]. В этой модели делается основное предположение о малости вертикальных характерных масштабов процесса по сравнению с горизонтальными и проводится интегрирование уравнений гидродинамики на вращающейся сфере по вертикальной координате. Движение среды рассматривается на  $\beta$ -плоскости, что вполне допустимо в случае, когда характерные масштабы процесса много меньше радиуса планеты.

Основное отличие модели [4] от хорошо известных баротропных моделей, как, например, модель Чарни-Обухова [1, 5], заключается в сохранении так называемой горизонтальной бароклинности атмосферы. Физически это означает допущение изменения удельной энтропии в горизонтальной плоскости. Это позволяет корректно описать бароклинный механизм генерации завихренности. Безразмерные уравнения бароклинной атмосферы [4] имеют вид:

$$\partial_t q + \mathbf{V}_g \nabla q = \mathbf{V}_g \nabla \Theta; \quad (1)$$

$$\partial_t \Theta + \mathbf{V}_g \nabla \Theta = 0. \quad (2)$$

$$q = \nabla_{\perp}^2 P - P + \beta y;$$

$$\nabla_{\perp}^2 = \partial_x^2 + \partial_y^2;$$

$$\mathbf{V}_g = \mathbf{e}_z \times \nabla P;$$

где  $\Theta = P^{\frac{1}{\gamma}}/\rho$  — потенциальная температура, являющаяся однозначной функцией энтропии,  $P$  — давление,  $\rho$  — плотность,  $q$  — обобщенная завихренность,  $V_g$  — геострофическая скорость, координата  $X$  направлена вдоль широты, а координата  $Y$  — вдоль меридиана. Образмеривание в уравнениях (1)–(2) было проведено следующим образом [4]:

$$\begin{aligned}x, y &\rightarrow R_r x, R_r y; \\t &\rightarrow t R_f / c_s; \\\rho &\rightarrow \rho \rho_0 R_r / R_f; \\P &\rightarrow P P_0 R_r / R_f; \\\Theta &\rightarrow \Theta \Theta_0 R_r / r_f,\end{aligned}\quad (3)$$

где  $R_f \approx 70\ 000$  км — характерный масштаб изменения параметра Кориолиса,  $P_0$ ,  $\rho_0$ ,  $\Theta_0$  — характерные фоновые параметры атмосферы Юпитера для наблюдаемого слоя облачности, содержащего основную часть тепловой энергии. По данным космического зондирования этот слой соответствует, ориентировочно, уровню давления 3 бар и температуре около 200 К.

Численные расчеты по модели (1)–(2) были проведены для широтного пояса Юпитера с координатой  $45^\circ$  ю.ш., что близко к предсказываемой широте падения кометы. При этом в расчетах учитывался зональный перенос массы в атмосфере с характерными для данного пояса скоростями от -5 м/с до 5 м/с.

Оценки воздействия фрагментов кометы на атмосферу Юпитера на первой стадии процесса, включающей торможение осколка, его разрушение, образование и последующее всплытие термики, позволяет предположить, что примерно в течение земного часа в атмосфере планеты образуется возмущение с характерными размерами порядка сотен километров и превышением температуры над окружающей средой  $\Delta T \approx 5$  К для осколков размерами в несколько сотен метров, что соответствует энерговыделению  $\sim 10^{29}$  эрг (нижняя граница энергии воздействия) и с характерными размерами в тысячу километров и превышением температуры  $\Delta T \approx 30$  К для осколков в 1-2 км, что соответствует верхней границе энерговыделения в  $\sim 10^{31}$  эрг. Разброс в оценках начальных возмущений для данной энергии взаимодействия определяется тем, что различные модели начальной стадии процесса дают несколько различающиеся результаты, кроме того, до конца не ясен состав кометы и плотность осколков. Возмущения с параметрами, лежащими в этом диапазоне, и были выбраны в качестве исходных при проведении расчетов вихреобразования.

Анализ результатов расчетов показал, что в вариантах с  $\Delta T \approx 5$  К в независимости от скорости зонального потока возбуждение долгоживущего вихря не происходит, а все воздействие на атмосферу сводится к возбуждению быстро исчезающих из-за дисперсии волновых пакетов, которые, тем не менее, могут приводить к заметному возмущению зонального потока в течение времени порядка земных суток. Характерный расчет для параметра  $\Delta T = 5$  К и скорости зонального течения -3 м/с приведен на рис. 1. Система координат связана с зональным течением. Видно, что возмущения давления недостаточно для возникновения замкнутых линий тока, то есть образование вихря не происходит.

В то же время для вариантов с  $\Delta T \approx 30$  К, что соответствует возмущению безразмерной потенциальной температуры  $\Theta$  на величину порядка единицы,

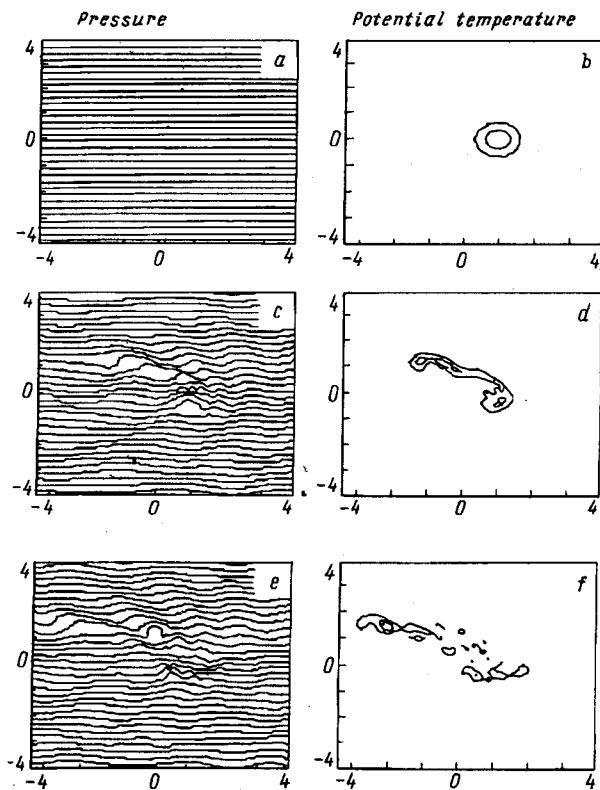


Рис.1. Возмущения давления в зональном потоке со скоростью  $-3 \text{ м/с}$  (*a, c, e*) и изолинии потенциальной температуры вихре (*b, d, f*), генерируемые падением осколка размежом порядка  $100 \text{ м}$  ( $\Delta T = 5\text{K}$ ); *a, b* —  $t = 2$  земных суток, *c, d* —  $t = 4$  земных суток, *e, f* —  $t = 6$  земных суток. Верхняя граница рисунков соответствует направлению на полюс, нижняя — на экватор. Расстояния указаны в радиусах Россби

наблюдается ярко выраженное формирование вихревой структуры с характерными размерами на начальной стадии, длящейся несколько земных суток, порядка  $15\ 000 - 20\ 000 \text{ км}$  (в зависимости от интенсивности исходного возмущения и скорости зонального потока). Расчет для параметров  $\Delta T = 30\text{K}$  и скорости зонального течения  $-3 \text{ м/с}$  приведен на рис. 2. Сходный вихрь обнаружен астрономами 18 июля в атмосфере Юпитера после падения первого из крупных осколков кометы. Это подтверждает, по-видимому, разумность выбранной теоретической модели и результатов численного анализа. Дальнейшая временная эволюция вихря, прослеживаемая на численном эксперименте, выявляет его явный дипольный характер на начальной стадии эволюции, что хорошо видно на рис. 2*c, d*. При этом, как показали более длительные расчеты, наблюдается тенденция к усилению вихря антициклонического типа (левый участок вихревой структуры на рис. 2*c, d*) и деградация вихря циклонического типа.

Образование стабильных вихревых структур, вызванных падением наиболее крупных фрагментов кометы, наблюдается в расчетах для всех выбранных скоростей зональных течений. При этом с увеличением скорости течений отмечается интенсификация процесса вихреобразования, что легко понятно из модели (1) — (2). Полученные в расчетах размеры вихревых структур близки или несколько превосходят радиус Россби, что позволяет считать их долгоживущими с характерным временем жизни несколько земных суток.

3. Следует отметить, что в принятой нами модели из-за неопределенности параметров турбулентной вязкости в атмосфере Юпитера учитывалась только

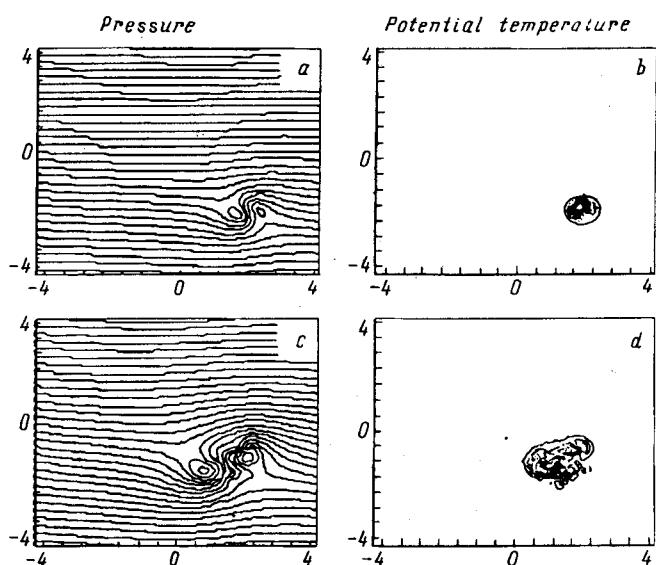


Рис.2. Возмущения давления в зональном потоке со скоростью  $-3 \text{ м/с}$  (a,b) и изолинии потенциальной температуры в вихре (c,d), генерируемые падением крупного осколка размером порядка 1 км ( $\Delta T = 30\text{K}$ ); a,b —  $t = 3$  земных суток, c,d —  $t = 6$  земных суток. Верхняя граница рисунков соответствует направлению на полюс, нижняя — на экватор. Расстояния указаны в радиусах Россби

диссипация, связанная со слабым теплообменом вихря с окружающей средой. Не учтенный в модели механизм турбулентного обмена, однако, может иметь двоякую направленность. Так, наряду с процессом диссипации энергии в вихре, возможен и обратный процесс передачи от малых атмосферных вихрей к более крупному вихрю [6], что приведет к увеличению времени жизни последнего. Имеющиеся к настоящему времени наблюдения за крупномасштабными вихрями в атмосферах Юпитера и Сатурна обнаруживают весьма значительное время их жизни. Так, Коричневые овалы на Юпитере, имеющие циклонический характер и размеры, близкие к вихрям от падения осколков кометы, существуют в течение порядка 30 лет. Это позволяет не ограничивать априори прогнозируемое время жизни образующихся вихрей указанным выше характерным временем. Открывшаяся в настоящее время возможность прямого наблюдения порожденных осколками кометы вихрей на Юпитере безусловно должна дать важную информацию для дальнейшего уточнения теории нелинейного взаимодействия вихревых структур с атмосферной микротурбулентностью.

Авторы выражают благодарность В.Е.Захарову за полезные обсуждения.

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства науки РФ.

- 
1. Дж.Педлоски. Геофизическая гидродинамика. М.: Мир, 1984, Т.1.
  2. В.И.Петвиашвили, О.А.Похотовов. Уединенные волны в плазме и атмосфере. М.:Энергоатомиздат, 1989, 200с.
  3. М.В.Незлин, Е.Н.Снежкин. Вихри Россби и спиральные структуры. М.:Наука, 1990, с.238.
  4. Ф.Ф.Каменец, В.И.Петвиашвили, А.М.Пухов, Изв. АН Физика атмосферы и океана, **29**, 457 (1993).
  5. J.G.Charney, Geophysical Publ. **17**, 17 (1947).
  6. A.Muhm, A.M.Pukhov, K.H.Spatchek, and V.Tsytovich, Phys. Fluids B **4**, 336 (1992).