

О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ ЮПИТЕРА, ВЫЗВАННЫХ ПАДЕНИЕМ ФРАГМЕНТОВ КОМЕТЫ ШУМЕЙКЕР – ЛЕВИ 9

М.Ф.Иванов, В.А.Гальбурт, В.Е.Фортков

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

Поступила в редакцию 28 марта 1996 г.

После переработки 18 апреля 1996 г.

Предложен механизм, позволяющий объяснить размеры и структуру крупномасштабных возмущений в атмосфере Юпитера, вызванных падением осколков кометы Шумейкер – Леви.

PACS: 47.32.Cc, 96.30.Kf

Произошедшее в июле 1994 г. столкновение кометы Шумейкер–Леви с Юпитером дало уникальную возможность проследить развитие физических процессов планетарного масштаба, вызванных мощным природным катаклизмом. В результате взаимодействия с гравитационным полем Юпитера комета задолго до столкновения разделилась более чем на 20 фрагментов размером от нескольких сот метров до двух километров, которые, растянувшись в цепочку, последовательно вошли в атмосферу планеты при скорости сближения около 65 км/с. В результате сложилась удачная ситуация, позволившая наблюдать отклик атмосферы на мощные локализованные возмущения при различном уровне энерговыделения (от менее 10^{28} до более 10^{30} эрг).

Многие из зарегистрированных событий (выход в верхние слои атмосферы мощной ударной волны, сильные ионосферные возмущения, образование долгоживущих вихревых структур и т.д.) были предсказаны еще до падения кометы [1, 2] и получили в дальнейшем свое подтверждение [3]. Таким образом, к настоящему времени была построена достаточно стройная картина воздействия осколков кометы на планетарную атмосферу от момента торможения и "взрыва" осколка в плотных слоях атмосферы (ниже облачного покрова) до дальнейшей эволюции возникшего в верхних слоях атмосферы следа под действием силы Кориолиса и зональных ветров.

Построенная картина, однако, не объяснила интересного факта, связанного с чрезвычайно большими размерами и структурой начального возмущения в атмосфере планеты, наблюдаемого в первые часы после падения каждого из крупных фрагментов кометы. Согласно наблюдениям, проведенным с помощью телескопа Хаббла [3], все следы, соответствующие наиболее крупным осколкам, обладают ярко выраженными общими чертами, устойчиво проявляющимися как в видимом (336, 555 нм), так и в инфракрасном (ИК) (889 нм) диапазонах спектра. В первом случае на изображениях выделяется темное однородное пятно в центре, окруженное эксцентрично расположенным к нему кольцом, которое является внутренней границей кольцеобразной возмущенной области, внешний край которой выражен менее отчетливо. В ИК диапазоне центральное пятно имеет светлый тон и контрастно выделяется на общем темном фоне. Приведенные в [3] пространственные размеры характерных образований

в зоне падения крупных осколков практически совпадают для всех зарегистрированных событий. Так, независимо от конкретного соударения, через полтора часа после падения осколка радиус темного кольца достигает примерно 3000 км, а скорость его расширения составляет 454 ± 20 м/с и постоянна за все время процесса. Внешний край возмущенной области отстоит от центра внутреннего пятна на расстояние 12000 км. Описанная структура возмущений наблюдалась на протяжении нескольких часов после падения соответствующих крупных осколков. С течением времени тонкая структура стала неразличимой, а в районах падения остались темные пятна, постепенно вытягивающиеся вдоль соответствующей широты.

Анализ динамики кольцевых структур, видимых в следах от падения больших осколков кометы, проведенный в работе [4], показал, что расширение области, охваченной возмущением, не связано с переносом частиц кометного вещества в верхних слоях атмосферы, а носит волновой характер, причем сопоставление светимости образовавшихся структур в различных спектральных диапазонах позволяет считать, что они являются результатом модуляции верхней кромки облаков. Возбуждаемые в атмосфере при мощном энерговыделении волновые процессы (ударные, акустические и гравитационно-инерционные волны) не объясняют достаточно убедительно механизма формирования наблюдаемых возмущений облачного покрова. Так, скорость распространения ударных и акустических волн не может быть меньше скорости звука, которая для атмосферы Юпитера превосходит 770 м/с (минимальная скорость звука, относящаяся к области тропопаузы). Это существенно превышает максимальную зафиксированную скорость распространения возмущений. Скорость, близкую к наблюдаемой, имеют гравитационно-инерционные волны, наиболее корректный расчет которых был проведен в [4], однако в этой же работе указано, что распространение этих волн на значительные расстояния от области возбуждения возможно только при определенных предположениях о составе и структуре юпитерианской атмосферы, противоречащих известным ранее представлениям [5] и не нашедших подтверждения в полученных в самое последнее время данных [6]. Более того, анализ перечисленных выше механизмов показывает, что энергетические затраты на генерацию ими возмущений, подобных наблюдаемым, чрезвычайно велики и существенно превышают энерговыделение даже от самых крупных осколков. Таким образом, для объяснения наблюдаемой картины необходимо учесть дополнительный канал энерговыделения.

Дополнительным источником энергии может служить энергия конвективных потоков, накопленная в атмосфере Юпитера, если принять гипотезу о "тайфунной" природе наблюдаемых следов. Предположим, что воздействие ударной волны, сопровождающей подъем огненного шара от взрыва осколка, играет роль только спускового механизма в развитии вихревых процессов в атмосфере Юпитера, аналогичных тайфунам в атмосфере Земли. При этом, следуя развитой в работе [7] теории, предположим, что основным источником энергии, порождающим мощный вихрь, является вертикальная тепловая конвекция, значительная интенсивность которой характерна для Юпитера [8]. Распределение температуры по высоте атмосферы указывает на то, что наиболее интенсивный конвективный перенос приходится на область тропосферы, лежащей ниже тропопаузы ($p \sim 0.1$ атм) и простирающейся от глубинных слоев до верхней кромки облаков. Характерный вертикальный масштаб конвективных ячеек при этом имеет порядок $h \sim 100 - 150$ км [9].

Выделим в поле течений, вызванных воздействием термика на окружающую атмосферу, квазирегулярные крупномасштабные структуры с характерными скоростями $\langle V \rangle$ и возмущения меньших масштабов, включающие турбулентные конвективные ячейки. Тогда усредненное по мелкомасштабным течениям уравнение для средней завихренности $w = \text{rot}\langle V \rangle$ можно записать в виде (в приближении Буссинеска) [7]

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{rot}(\alpha w) + \nu \Delta w, \quad (1)$$

где ν - коэффициент турбулентной вязкости, $\alpha \approx \frac{\tau}{3} \langle v \text{rot} v \rangle \approx 2\Omega l \sin \phi$ - коэффициент, характеризующий спиральность поля турбулентной конвекции (v - поле турбулентных конвективных скоростей, Ω - угловая скорость вращения планеты, l - характерный масштаб конвективной ячейки, ϕ - географическая широта). Угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций поля v .

Под действием силы Кориолиса конвективные ячейки закручиваются вокруг вертикальной оси, что обеспечивает ненулевое значение коэффициента α . В этом случае уравнение (1) определяет связь между развитием горизонтальных крупномасштабных вихрей и циркуляцией в ячейках.

Анализируя ведущие физические факторы, определяющие формирование и эволюцию следа, выделим три стадии его развития. На начальной стадии формирования крупномасштабных структур в области падения большого осколка кометы основным возмущающим фактором является интенсивный вихрь в атмосфере, возникший в результате захвата и закручивания окружающей атмосферы поднимающимся огненным шаром. Дальнейшая эволюция этого центрального возмущения связана с его дальнейшим усилением за счет приобретения дополнительной энергии от конвективных потоков в атмосфере. Заключительная стадия формирования следа в атмосфере определяется воздействием изменяющейся по меридиану силы Кориолиса на атмосферный вихрь, достигший к этому времени размеров, сравнимых с радиусом Россби, а также воздействием на этот вихрь горизонтальных ветровых течений, размывающих образовавшееся в атмосфере возмущение.

Для оценки характерных горизонтальных масштабов возмущения, образовавшегося на первой стадии процесса, воспользуемся приведенным в [7] асимптотическим решением уравнения (1) вблизи центра развивающейся вихревой структуры

$$w = \frac{w_0}{L_\alpha} \left\{ 0, \sin \frac{R_\alpha r}{2L_\alpha}, \cos \frac{R_\alpha r}{2L_\alpha} \right\} \exp \left\{ \gamma_0 t - \frac{R_\alpha r^2}{4L_\alpha^2} \right\}. \quad (2)$$

Решение дано в цилиндрических координатах $\{r, \phi, z\}$, L_α - характерный масштаб изменения средней спиральности, $R_\alpha = \alpha_0 L_\alpha / \nu$ - безразмерный параметр, α_0 - экстремальное значение α на оси $r = 0$, γ_0 - инкремент нарастания вихревого течения:

$$\gamma_0 \approx \frac{\alpha_0^2}{4\nu} \left(1 - \frac{4}{R_\alpha} \right). \quad (3)$$

В атмосфере Юпитера выделяются две широтные зоны, определяемые качественно различным характером тепловой конвекции [8]: экваториальная ($0^\circ < \phi \leq 40^\circ$) и среднеширотная ($40^\circ < \phi \leq 60^\circ$). Протяженность среднеширотной зоны, к которой принадлежит район падения кометы, составляет

примерно 20° по широте или ~ 24000 км. Представляется естественным именно этот масштаб выбрать для оценки L_α . В [9] на основе анализа сдвиговых и конвективных течений в атмосфере Юпитера дана оценка коэффициента горизонтальной турбулентной вязкости $\nu \sim 10^{10}$ см²/с. Максимум коэффициента спиральности при $r \rightarrow 0$ отнесем к начальному мелкомасштабному вихрю, порожденному проходящим сквозь слой облаков термиком. Тогда из вычислительного эксперимента по всплытию термика [1] имеем $l \sim 100$ км. Используя выбранные таким образом характерные значения l, L_α и ν , получаем количественную оценку для коэффициентов, входящих в (2), (3): $\alpha_0 \sim 24.4$ м/с, $R_\alpha \sim 59.5$.

Как следует из (3), вихрь может расти только при условии $R_\alpha > R_\alpha^{cr} = 4$. В данном случае это условие выполняется, из чего можно заключить, что возбужденное термиком вихревое движение в атмосфере будет нарастать.

Область нарастания вихревого возмущения ограничена условием $r \leq [\nu(R_\alpha - R_\alpha^{cr})t]^{1/2}$ и на момент времени $t \sim 2$ ч после падения фрагмента кометы, по нашим оценкам, захватывает площадь радиусом $r_0 \sim 2000$ км. Эта область соответствует "глазу" тайфуна в земных условиях, а на снимках следов на поверхности Юпитера ее естественно отождествить с центральным темным рингом, радиус которого на соответствующий момент времени для различных фрагментов падавших осколков лежит, согласно [3], в интервале 1788–2260 км. Для более ранних моментов времени рассчитанные по приведенной выше формуле значения радиуса ринга находятся в пределах ошибки измерений [3], что позволяет считать зависимость, даваемую этой формулой, не менее точной, чем предлагаемая авторами работы [3].

Играющий роль "глаза" тайфуна центральный ринг имеет наибольшую светимость в области спектра, соответствующей светимости метана. Это позволяет интерпретировать его как зону, характеризующуюся выносом глубинных слоев атмосферы на поверхность облачного покрова. Такая интерпретация подтверждается также и красно-коричневой окраской этой области, наблюдаемой на снимках следов, сделанных в естественных цветах [3]. Как известно [10], верхние слои облаков Юпитера состоят из аммиака и выглядят светлыми, содержащими ярко-белые кристаллы этого соединения. Расположенные глубже слои облаков содержат в своем составе гидросульфит аммония, кристаллы которого имеют красно-коричневый цвет. Вынос этих слоев на верхние горизонты будет создавать области красно-коричневой окраски на фоне аммиачных облаков.

Для оценки глобальных размеров вихревого возмущения на более поздних временах асимптотическое решение (3) становится неприменимым. Однако эту оценку можно получить теперь из анализа решения для крупномасштабного вихря, развивающегося на фоне турбулентных ячеек с постоянным коэффициентом спиральности α [7]. В этом случае характерный радиус возмущения дается соотношением $r_1 = 0,5L_\alpha/x_0$, где x_0 – первый корень функции Бесселя нулевого порядка. Для выбранного нами значения L_α $r_1 \sim 4800$ км, что хорошо согласуется с наблюдаемым максимальным радиусом контрастной кольцевой структуры, присутствующей на снимках следов от крупных фрагментов кометы (максимальное из наблюдаемых значений этого радиуса 4649 км [3]).

Наблюдаемый радиус всей области, охваченной возмущениями в первые часы формирования следа, составляет $r_2 \sim 12000$ км, что совпадает с характерным радиусом зоны среднширотной конвекции, выбранным нами из независимого анализа типов тепловой конвекции в атмосфере Юпитера. Та-

ким образом, можно считать, что вихревое возмущение, создаваемое падением и взрывом большого фрагмента кометы, быстро захватывает всю область однотипных конвективных течений. Характерный вертикальный масштаб тайфунного вихря H на момент его установления, согласно [7], определяется из соотношения $H \sim h/\pi$, что в нашем случае соответствует 30–50 км. Из полученных оценок следует, что толщина слоя атмосферы, захваченного вихревым движением, уже на начальной стадии процесса, определяемой несколькими часами, становится сравнимой с толщиной облачного покрова, а горизонтальная протяженность его более чем на два порядка превосходит вертикальный масштаб возмущений. Это должно приводить к интенсивному вертикальному перемешиванию, выравниванию скоростей и температуры на горизонтах и разрушению квазистационарных турбулентных конвективных ячеек, в результате чего регулярная энергетическая подпитка образовавшегося крупномасштабного вихря, по-видимому, должна нарушаться уже к концу первых суток после его возникновения в отличие от ситуации с тайфунами на Земле, получающими длительное время энергию от подстилающей поверхности океана.

Заметим, что порог возбуждения крупномасштабного вихря определяется соотношением [7] $\alpha H/\nu > \pi$. Так как согласно полученной ранее оценке $H \sim 30$ км, из приведенного неравенства следует, что коэффициент спиральности должен быть $\alpha > 1000$ м/с. Учитывая связь α с характерным горизонтальным размером турбулентных ячеек l , получаем условие на характерные размеры этих ячеек, при которых обеспечивается рост крупномасштабных возмущений: $l \geq 400$ км. Полученная оценка вполне реалистична для атмосферы Юпитера и подтверждается полученной независимым путем оценкой для турбулентной вязкости [9].

Выравнивание со временем вихревых течений по вертикали и значительное превышение горизонтальных масштабов образовавшегося вихря над вертикальными позволяет далее рассматривать эволюцию следа на заключительном этапе только в горизонтальной β -плоскости. Крупномасштабный вихрь к этому времени достигает размеров, сравнимых с радиусом Россби–Обухова, и на дальнейшую эволюцию вихря решающее влияние начинает оказывать изменение силы Кориолиса вдоль меридиана. В результате в атмосфере возникает достаточно устойчивый вихрь Россби, постепенно размываемый зональными течениями. Эта стадия процесса была предсказана одним из авторов в работе [2] и подтвердилась в дальнейшем наблюдениями за следами от осколков кометы.

-
1. Б.А.Клумов, В.А.Кондауров, А.В.Конюхов и др., УФН **164**, 617 (1994).
 2. Ф.Ф.Каменец, А.М.Пухов, М.Ф.Иванов, В.Е.Фортов, Письма в ЖЭТФ **60**, 383 (1994).
 3. H.V.Hammel, R.F.Beebe, A.P.Ingersoll et al., Science **267**, 1288 (1995).
 4. F.P.Ingersoll and H.Kanamori, Nature **374**, 706 (1995).
 5. Сб. Юпитер, под ред. Т.Герельса, т.1–3, М.: Мир, 1979.
 6. D.Isbel and D.Morse, НТР: JTP.NASA.GAV./GALILEO.
 7. С.С.Моисеев, Р.З.Сагдеев, А.В.Тур и др., Докл. АН СССР **273**, 549 (1983).
 8. Дж.Чемберген, Теория планетарных атмосфер, М.: Мир, 1981.
 9. Б.С.Келлер, И.М.Яворская, в сб. Аэромеханика и газовая динамика, М.: Наука, 1976.
 10. М.Я.Миров, А.В.Колисниченко, Введение в планетарную астрономию, М.: Наука, 1987.