

УДК 523.64-35

Ю. В. Сизоненко

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
sizon@mao.kiev.ua

Явление, похожее на отрыв плазменного хвоста в комете C/2006M4 (SWAN)

Исследовано явление в плазменном хвосте кометы C/2006M4 (SWAN), похожее на отрыв хвоста, происшедшее 27 октября 2006 г. Описан комплекс явлений в хвосте кометы после вспышки блеска кометы 24.04 октября. Найдены характерные размеры структурных деталей хвоста, развившихся в результате плазменных неустойчивостей. Определены скорости и ускорение «оторванного» фрагмента хвоста, момент начала явления. Вероятной причиной наблюдаемого явления может быть встреча кометы с высокоскоростным потоком солнечного ветра.

ЯВИЩЕ, СХОЖЕ НА ВІДРИВ ПЛАЗМОВОГО ХВОСТА В КОМЕТІ C/2006M4 (SWAN), Сизоненко Ю. В. — Досліджено явище у плазмовому хвості C/2006 M4 (SWAN), схоже на відрив хвоста, що трапилося 27 жовтня 2006 р. Описано комплекс явищ у хвості комети після спалаху яскравості комети 24.04 жовтня. Знайдено характерні розміри структурних деталей хвоста, які розвинулися внаслідок плазмових збурень. Визначено швидкість та прискорення «відіраного» фрагменту хвоста та момент початку явища. Ймовірною причиною явища може бути зустріч комети з високошвидкісним потоком сонячного вітру.

DE-LIKE EVENT IN THE PLASMA TAIL OF COMET C/2006 M4 (SWAN), by Sizonenko Yu. V. — The DE-like event in the plasma tail of comet C/2006 M4 (SWAN) which occurred on 27 October 2006 is investigated. Some phenomena in the comet's plasma tail which appeared after the outburst of the comet brightness on 24.04 October are described. Typical sizes for the tail structure details evolving in consequence of plasma instabilities are determined. The velocity and acceleration of the disconnected fragment of the comet's tail as well as the time of the event

beginning are found. The DE-like event was likely caused by an encounter of the comet with a high-speed stream of solar wind.

ВВЕДЕНИЕ

Явление отрыва плазменного хвоста кометы (disconnection event) впечатляющее зрелище, постоянно привлекающее внимание, как астрономов, так и публики при просмотре изображений ярких комет. Следует отметить, что принятый в русском языке термин не передает физическую сущность явления, скорее нужно говорить о внезапной перестройке структуры хвоста, чем о его «отрыве» или «разъединении». Для явления характерно наличие в плазменном хвосте двух участков с весьма отличающейся структурой. При этом удаленный от ядра участок имеет клочковатую, «облачную» структуру без выраженных линейных элементов. Участок хвоста, близкий к ядру кометы, имеет подчеркнута линейную структуру, часто многолучевую. Явление отрыва хвоста наблюдается практически у любой яркой кометы, обладающей плазменным хвостом и находящейся на гелиоцентрическом расстоянии $r < 1$ а. е. Наиболее распространенное объяснение физической причины явления — пересоединение силовых линий магнитного поля кометы, т. е. исчезновение на некоторое время «берегов», в которых движется ионизированное вещество кометы.

Мы собрали коллекцию снимков кометы C/2006 M4, опубликованных в Интернете, охватывающую 48 дней наблюдений плазменного хвоста кометы. Эти снимки были использованы нами ранее в работе [5] для определения скорости солнечного ветра в высоких гелиографических широтах межпланетного пространства. В этой работе мы используем некоторые из снимков, опубликованных на сайтах: <http://kometen.fg-vds.de>; <http://cara.uai.it>; http://xoomer.virgilio.it/danilo_privato для того, чтобы исследовать явление внезапной перестройки структуры хвоста кометы C/2006M4 и сопутствующие ему явления.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

Из коллекции снимков мы отобрали снимки, полученные с 25 по 27 октября 2006 г., когда наблюдалась перестройка структуры хвоста. В таблице для отобранных изображений указаны присвоенный нами номер снимка, момент середины экспозиции, угловой масштаб изображения и имя наблюдателя. Из таблицы видно, что отобранные изображения получены с близким угловым масштабом, что позволяет сравнивать структуры хвоста кометы и анализировать их изменение со временем.

На каждом из снимков мы отметили специальными метками интересные нас детали структуры, а именно: оси плазменных хвостов и

Снимки кометы C/2006 M4 (SWAN), использованные для исследований

| Номер снимка | Момент UT , 2006, октябрь | Угловой масштаб, сд/мм | Наблюдатели |
|--------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------|
| 10251745 | 25.739583 | 376 | М. Ягер, Г. Риман |
| 10261717 | 26.720139 | 516 | Д. Пивато |
| 10261745 | 26.739583 | 376 | М. Ягер, Г. Риман |
| 10261930 | 26.812500 | 430 | Т. Бьокель |
| 10270225 | 27.100694 | 389 | Т. Карико |
| 10271714 | 27.718055 | 516 | Д. Пивато |
| 10271755 | 27.746526 | 344 | Д. Бендер |
| 10271919 | 27.804861 | 382 | Р. Лигустри |

лучей, конденсации и волны в плазменных хвостах. Используя алгоритм, описанный в работе [3], мы превратили измеренные пиксельные координаты меток X , Y в сферические экваториальные координаты α , δ , а затем в кометоцентрические координаты x , y .

Таким образом, мы получили возможность исследовать движения деталей структуры хвоста кометы относительно друг друга, а также относительно ядра кометы. При этом исключаются перспективные искажения, возникшие из-за проектирования хвоста кометы на картинную плоскость.

Расчет кометоцентрических координат структур хвоста сопровождался контрольным расчетом сферических экваториальных координат двух звезд, проектирующихся на изображение кометы вблизи оси хвоста. Если рассчитанные координаты контрольных звезд отличались от каталожных более чем на 1 сд (секунд дуги), данные измерений координат уточнялись, а при повторной ошибке снимок отбрасывался.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ХВОСТА ВО ВРЕМЯ ЯВЛЕНИЯ

После прохождения кометой перигелия 28 сентября у кометы C/2006 M4 наблюдался длинный (до 3.8 млн км) плазменный хвост. Изменения крупномасштабной структуры хвоста были значительными, особенно 15—17 октября. Также существенно изменялся угол отклонения оси плазменного хвоста от продолженного радиуса-вектора кометы, что свидетельствует об изменении скорости и направления потока солнечного ветра [5]. По мере удаления кометы от Солнца плазменный хвост угасал, а интерес наблюдателей к комете уменьшался.

Однако после вспышки блеска кометы 24.04 октября было получено достаточное количество изображений плазменного хвоста кометы, чтобы проследить изменения его структуры до и во время отрыва. Подобранные нами снимки показывают, что «отрыв» плазменного хвоста кометы, вероятно, не связан с дополнительным выделением комет-

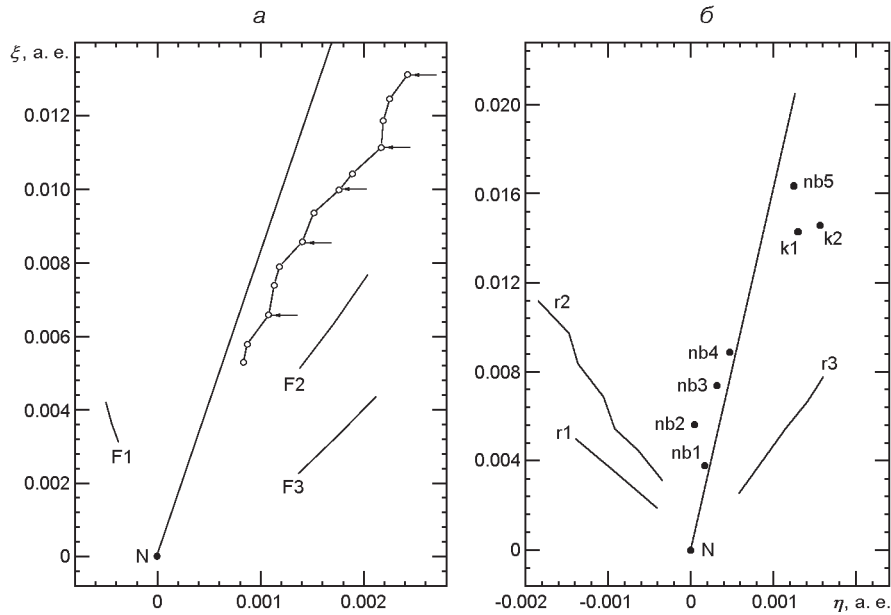


Рис. 1. Детали структуры плазменного хвоста кометы C/2006 M4 (SWAN): *a* — 25.739583 октября 2006 г. (N — ядро кометы, F1, F2, F3 — отдельные нитевидные структуры в хвосте), *б* — 26.739583 октября 2006 г. (r1 — r3 — лучи, nb1 — nb5 — облака, k1 и k2 — начало и конец рукава)

ного вещества во время вспышки. Вслед за увеличением яркости комы произошло увеличение яркости плазменного хвоста, в хвосте появилось много новых деталей структуры. В хвосте развились плазменные неустойчивости (филаментационная и пограничная), образовались облака и турбулентные структуры, но при этом сохранилось направление оси хвоста, не было признаков явления отрыва, описанных выше.

Мы смогли оценить толщину нескольких нитевидных структур в плазменном хвосте кометы на снимке от 25.7396 октября 2006 г. На рис. 1, *a* показано положение этих структур относительно ядра кометы в орбитальной плоскости. Видна также волновая структура, очерчивающая ведомую сторону плазменного хвоста. Стрелками показаны пучности плазменной волны, а сплошная линия показывает положение оси хвоста.

Мы получили оценки толщины d показанных на рис. 1, *a* нитевидных структур: 18 ± 1 Мм (мегаметров) для F1, 14 ± 0.8 Мм для F2, 16 ± 1 Мм для F3. Получены также оценки диаметра волновой структуры и длины волны: $D = 14 \pm 1.2$ Мм и $\lambda = 240 \pm 17$ Мм. Тогда значение параметра, описывающего волновую структуру, равно $\lambda/R = 34.2$. Отметим, что хотя для увеличения точности измерений мы определяли толщину нитевидных структур вне тела плазменного хвоста, порядок этой величины для нитевидных структур в основном потоке хвоста сохраняется.

Спустя сутки с тем же инструментом наблюдатели М. Ягер и Г. Риман получили снимок плазменного хвоста кометы, структура которого отображена на рис. 1, б. Основной поток хвоста окаймлен лучами r1, r2 и r3 с обеих сторон. При этом в луче r2, отделенном от основного потока узким темным промежутком, наблюдается нерегулярная волна, повторяющая изгибы волны на ведущей границе хвоста. Согласно [1] в результате развития филаментационной неустойчивости плазмы хвоста в фоновом потоке кометной плазмы образуются темные промежутки, не заполненные веществом.

Вблизи оси основного потока наблюдаются несколько образований повышенной яркости диаметром 30—40 Мм, которые согласно установившейся традиции мы будем называть облаками (отмечены как nb1, ..., nb5). На расстоянии 1.86 млн км от ядра основной поток разветвляется на два рукава, при этом правый рукав образует изгиб, начало и конец которого отмечены на рис. 1, б как k1 и k2. Часть из описанных выше деталей структуры мы смогли проследить еще на двух снимках, полученных 26 октября 2006 г. Это позволило определить скорости облаков nb1 — nb4: 38, 46, 62 и 99 км/с. Полагая движение каждого облака равноускоренным, а величину ускорения одинаковой на всей длине хвоста, мы нашли среднее значение ускорения $a = 0.29 \pm 0.07 \text{ м/с}^2$.

Несмотря на явно турбулентный характер структуры хвоста 26 октября нельзя сказать, что «отрыв» хвоста уже произошел, так как от начала до конца хвоста можно провести ось симметрии. Также не наблюдается появления части хвоста с измененной структурой, характерное для явления отрыва.

Для анализа явления «отрыва» хвоста мы использовали четыре снимка, полученных 27 октября на временном интервале около 17 ч.

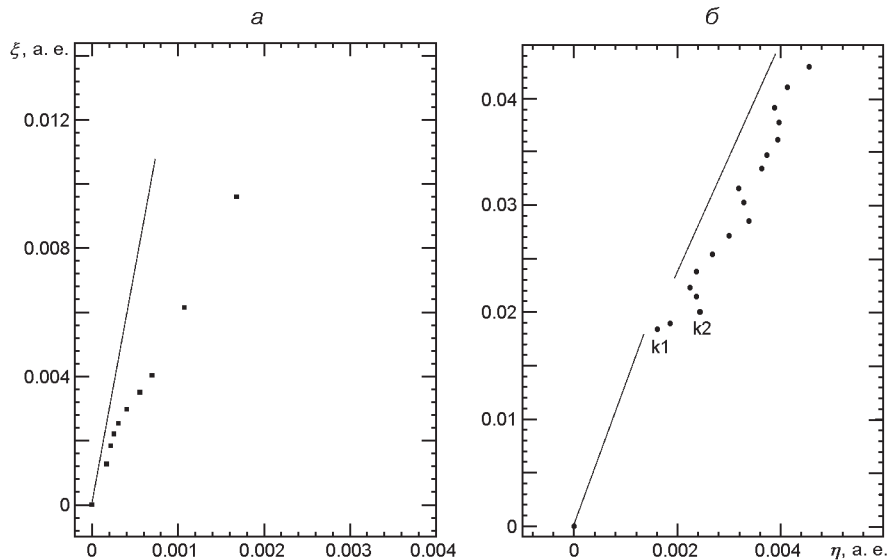


Рис. 2. Структурные схемы явления «отрыва» хвоста кометы C/2006 M4 27 октября 2006 г. по первому (а) и последнему (б) снимкам

На рис. 2 отображены структурные схемы явления, выполненные по первому (а) и последнему (б) снимкам. Сплошной прямой показаны измеренные положения оси хвоста до и после «отрыва», точками — ведомой границы хвоста.

Характерные особенности структуры на всех снимках — наличие изгиба ведомой границы хвоста. Изгиб начинается практически на оси хвоста и составляет с ней угол около 40° . Изгиб разделяет хвост на две части: старую, с турбулентной структурой и расплывчатыми очертаниями, и новую, с линейной структурой и состоящую из основного потока и двух лучей. При этом изгиб движется как целое в сторону, противоположную ядру. По четырем снимкам, полученным 27 октября 2006 г. за 17 ч, найдена скорость движения изгиба на 27.81 октября: $V = 57$ км/с. Полагая движение равноускоренным, мы нашли ускорение $a = 0.28$ м/с².

Решив уравнение равноускоренного движения, мы получили момент «отрыва» $UT = 26.968$ октября 2006 г. Отметим, что изгиб движется с таким же ускорением, какое мы нашли для движения облаков. Можно предположить, что параметры солнечного ветра как среды, ускоряющей кометную плазму, не изменились за прошлые сутки для этой части пространства.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ЯВЛЕНИЯ

Причины явления «отрыва» хвоста обсуждались неоднократно [7, 9, 10]. Наибольшей поддержкой пользуется механизм, предложенный в работе [7], согласно которому «отрыв» хвоста наступает при исчезновении магнитного поля солнечного ветра в окрестностях кометы. Выполнение этого условия на расстоянии от Солнца порядка 1 а. е. возможно только при пересечении гелиосферного токового слоя (ГТС), разделяющего доли поля с противоположным знаком. Положение ГТС относительно солнечного экватора изменяется вместе с фазой солнечной активности. Во время максимума наклон плоскости ГТС к плоскости солнечного экватора может достигать 80° , а в годы минимума он не превышает 20° [7]. В 2006 г. наклон плоскости ГТС уменьшился до 20° [2]. Гелиографическая широта кометы во время наблюдения отрыва составляла 59° , что исключает возможность пересечения кометой ГТС, а следовательно, и объяснение явления «отрыва» хвоста моделью [7].

Альтернативные причины явления предложены в работе [10], где рассматриваются три возможных механизма явления: взаимодействие с высокоскоростным потоком солнечного ветра (СВ), взаимодействие с областью повышенной плотности СВ и взаимодействие с межпланетной ударной волной. Характерным признаком взаимодействия плазменного хвоста с высокоскоростным потоком является образование в хвосте изгиба (кинка) в виде перемычки, соединяющей старый и

новый хвосты, оси которых не совпадают по направлению [10]. Этому признаку вполне удовлетворяет исследованное нами явление, что можно легко видеть на рис. 2. Два других механизма «отрыва» плазменного хвоста под действием возмущений в СВ, исследованные в [10], не приводят к образованию кинка. Поэтому мы считаем наиболее вероятной причиной наблюдаемого явления встречу кометы с высокоскоростным потоком солнечного ветра 26.968 октября 2006 г. Дополнительным аргументом в пользу такого утверждения может быть увеличение напряженности магнитного поля в области головы кометы 26.67 октября более чем в два раза, найденное в работе [6]. Согласно [8] высокоскоростной поток СВ сопровождается усилением напряженности магнитного поля примерно в два раза.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По опубликованным в интернете изображениям кометы C/2006 M4 (SWAN) мы смогли проследить явление «отрыва» плазменного хвоста на протяжении 17 ч. Явление, начавшееся 26.968 октября 2006 г., вероятно, было вызвано взаимодействием хвоста с высокоскоростным потоком солнечного ветра. Это предположение базируется на наличии в хвосте перемычки, соединяющей старый и новый хвост, оси которых имеют разный наклон к продолженному радиусу-вектору кометы. В пользу этого предположения также свидетельствует оценка напряженности магнитного поля, полученная 26.67 октября в окрестностях головы кометы. Напряженность поля увеличилась более чем в два раза по сравнению с удаленной частью хвоста, что может быть признаком встречи головы кометы с высокоскоростным потоком солнечного ветра. Находившаяся в высоких географических широтах комета не могла пересечь гелиосферный токовый слой в момент «отрыва» хвоста. Этот факт не позволяет принять в качестве причины явления гипотезу Брандта [7].

Вспышка блеска кометы, случившаяся 24.04 октября, привела к увеличению яркости плазменного хвоста. В хвосте кометы после вспышки развились плазменные неоднородности, которые, возможно, были причиной образования новой лучевой структуры в хвосте. Оценка параметров этих неоднородностей с точностью до порядка соответствует теоретическим оценкам, полученным в работах [1, 4]. Вместе с тем очевидно, что вспышка блеска кометы не привела к «отрыву» хвоста.

Автор благодарит наблюдателей, результатами работы которых он воспользовался для этого исследования.

1. *Верхоглядова О. П., Коцаренко Н. Я., Пасько В. П., Чурюмов К. И.* Теория крупномасштабной лучевой структуры в плазменных хвостах комет // Письма в Астрон. журн.—1993.—19, № 9.—С. 823—868.

2. *Веселовский И. С.* Завершение миссии АМС УЛИСС: четырехмерная гелиосфера // *Земля и Вселенная.*—2009.—№ 5.—С.13—25.
3. *Коноплева В. П., Розенбуш В. К.* Перспективное проектирование изображений комет на плоскость орбиты // *Астрометрия и астрофизика.*—1974.—Вып. 22.—С. 61—68.
4. *Коцаренко Н. Я., Лизунов Г. В., Чурюмов К. И.* Распространение волновых структур в плазменных хвостах комет // *Письма в Астрон. журн.*—1990.—**16**, № 3.—С. 264—269.
5. *Сизоненко Ю. В.* Эволюция хвостов кометы C/2006M4 (SWAN) // *Кинематика и физика небес. тел.*—2012.—**28**, № 1.—С. 36—43.
6. *Сизоненко Ю. В., Корсун П. П.* Физические характеристики плазменного хвоста кометы C/2006M4 (SWAN) // *Кинематика и физика небес. тел.*—2009.—**25**, № 5.—С. 364—372.
7. *Brandt J. C., Snow M.* Heliospheric latitude variation of properties of cometary plasma tails: A test of the Ulysses comet watch paradigm // *Icarus.*—2000.—**148**, N 1.—P. 52—64.
8. *Gosling J. T., Asbridge J. R., Bame S. J., Feldman W. C.* Solar wind stream interfaces // *J. Geophys. Res.*—1978.—**83**, N 4.—P. 1401—1412.
9. *Wang S.* A mechanism for the formation of knots, kinks and disconnection event in the plasma tail of comets // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**243**.—P. 521—530.
10. *Wegmann R.* The effect of some solar wind disturbances on the plasma tail of a comet: models and observations // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**358**.—P. 759—755.

Поступила в редакцию 05.12.11