

УДК 523.64-35

Ю. В. Сизоненко

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

Эволюция хвостов кометы C/2006 M4 (SWAN)

Изучены изменения структуры плазменного и пылевого хвостов кометы C/2006 M4 (SWAN) на протяжении длительного периода наблюдений (сентябрь — декабрь 2006 г.). С помощью синхронно-синдинамного анализа изображений кометы найдены размеры пылинок, выброшенных кометой. Найдены скорости солнечного ветра для высоких гелиографических широт по вычислениям абберационного угла плазменного хвоста кометы. Быстрые изменения вычисленных значений скорости солнечного ветра вызваны переменной поперечной составляющей скорости.

ЕВОЛЮЦІЯ ХВОСТІВ КОМЕТИ C/2006 M4 (SWAN), Сизоненко Ю. В. — Вивчено зміни структури плазмового та пилового хвостів комети C/2006 M4 (SWAN) протягом тривалого періоду спостережень (вересень — грудень 2006 р.). За допомогою синхронно-синдинамного аналізу зображень комети знайдено розміри пилових часток, викинутих кометою. Знайдено швидкості сонячного вітру для високих геліографічних широт комети за обчисленнями абераційного кута плазмового хвоста комети. Швидкі зміни отриманих значень швидкості сонячного вітру спричинені змінною поперечною складовою швидкості.

THE EVOLUTION OF THE COMET C/2006 M4 (SWAN) TAILS, by Sizonenko Yu. V. — Structure variations in the plasma and dust tails of the comet C/2006 M4 (SWAN) are studied for a long period of observations, namely, from September to December 2006. The dimensions of grains emitted by the comet for all interval of the observations are obtained from the dynamical analysis of images of the comet. On the basis of calculation results for aberration angle of the cometary plasma tail, the radial component of solar wind velocity at high heliographic latitudes are derived. Fast changes in the calculated values of solar wind velocity are caused by its variable transversal component.

Введение. Комета C/ 2006 M4 (SWAN) была открыта на изображениях водородной короны Солнца, полученных с помощью инструмента SWAN, установленного на борту Солнечной и гелиосферной обсерватории (SOHO) в конце июня 2006 г. В сентябре, обогнув Солнце, комета стала доступна для наблюдений с Земли. В сентябре — декабре 2006 г. комету, имевшую значительную яркость, наблюдали многочисленные любители астрономии в северном полушарии Земли и получили множество снимков. Благодаря тому что большинство снимков были получены со светосильными камерами и цифровыми приемниками, они являются источником ценной информации об эволюции кометных хвостов, нестационарных явлениях в кометной атмосфере и окружающем межпланетном пространстве.

За два дня до максимального сближения с Землей (26.10.2006 г.), уже находясь на стадии уменьшения яркости, комета испытала вспышку блеска примерно на две звездные величины [5]. В течение последующих двух месяцев комета оставалась относительно яркой, продолжительное время у нее наблюдались плазменный и пылевой хвосты со сложной и изменяющейся структурой.

В течение периода наблюдений гелиоцентрическая эклиптическая широта кометы увеличивалась от 49° до 68° (13 октября), а затем уменьшалась до 39° (19 ноября). Наблюдения структуры плазменного хвоста кометы в этот период позволяют изучить скорость и строение потоков полярного солнечного ветра.

Используя снимки кометы, полученные любителями астрономии, мы попытались проанализировать изменения структуры хвостов кометы, происходящие как от движения кометы по орбите, так и от взаимодействия с потоками солнечного ветра. Особый интерес представляют события, происходящие в плазменном хвосте после вспышки блеска.

Наблюдательные данные. В прошлом для исследования структуры хвостов комет довольно широко практиковалось использование фотографических снимков, полученных несколькими наблюдателями [6]. Это позволяло проследить эволюцию хвоста кометы с достаточным временным разрешением, которое не доступно одному наблюдателю. Вместе с тем наблюдательный материал подвергался одинаковой обработке, что повышало точность полученных данных. Мы решили выполнить такую работу для кометы C/ 2006 M4 (SWAN).

На многих сайтах интернета авторы размещают свои снимки, не возражая против их дальнейшего использования в научных целях. Снимки кометы C/ 2006 M4 (SWAN), использованные в этой работе, получены с 24 сентября по 24 декабря 2006 г. европейскими астрономами и любителями астрономии Р. Лигустри, Д. Да Рио, Д. Пивато, М. Ягер, Г. Рима, Г. Микуц и др. [<http://kometen.fg-vds.de>; <http://www.observatorij.org>; <http://cara.uai.it>; http://xoomer.virgilio.it/danilo_pivato]. Из-за недостатка места мы не можем перечислить всех авторов снимков, а также использованные ими телескопы и ПЗС-камеры.

Всего мы отобрали 86 снимков кометы с интересующими нас деталями структуры хвостов кометы. Использовались снимки, полученные со светосильными телескопами (1:1.5 — 1:5.0) и ограниченные полем зрения от 0.5 до 3°. При этом отбирались снимки, не подвергавшиеся изменению масштаба и бинированию.

На каждом из снимков мы отметили специальными метками интересующие нас детали структуры, а именно: оси плазменных хвостов и лучей, конденсации и волны в плазменных хвостах, границы пылевых хвостов. Используя алгоритм, описанный в работе [2], мы превратили пиксельные координаты меток в кометоцентрические координаты (x, y) . Расчет кометоцентрических координат для каждого снимка сопровождался расчетом сферических экваториальных координат двух контрольных звезд. Если рассчитанные координаты контрольных звезд отличались от каталожных более чем на 1", данные измерений уточнялись, а при повторной ошибке снимок отбрасывался. Полученные кометоцентрические координаты использованы для дальнейшего анализа структур плазменного и пылевого хвостов.

Синхронно-синдинамный анализ очертаний пылевого хвоста. Пылевой хвост кометы C/ 2006 M4 (SWAN) наблюдался на протяжении всего периода с конца сентября по декабрь 2006 г. Хотя пылепродуктивность ядра кометы, кажется, была малой, высокая чувствительность новых приемников света позволила зафиксировать пылевой хвост на расстоянии до 15 млн км от ядра кометы. В разные периоды видимости наблюдались классический хвост II типа и/или более изогнутый, сильно отклоняющийся хвост III типа.

Метод синхроно-синдинамного анализа заключается в подборе синдинам (кривых, соединяющих положения частиц с одинаковыми эффективными ускорениями) и синхрон (кривых, соединяющих положения частиц с одинаковым временем выброса), совпадающих с выбранными деталями структуры пылевого хвоста. Мы нанесли на рассчитанную сетку синдинам и синхрон кометоцентрические координаты точек, отмечающих на снимках очертания пылевых хвостов. Интерполируя значения узловых значений сетки для эффективных ускорений и времени выброса пылевых частиц, мы смогли найти значения a и t для частиц, находящихся у видимых границ пылевого хвоста.

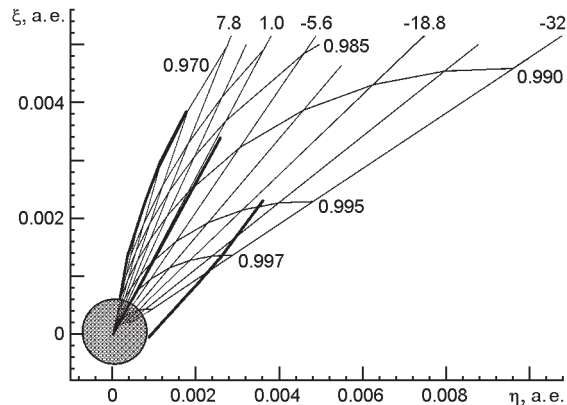
На рис. 1 показан пример синхронно-синдинамного анализа снимка кометы от 5.70972 ноября 2006 г.

Отметим, что в нашем анализе принято $\beta = T_{\text{obs}} - T_{\text{per}}, < 1$, а связь между размерами частиц и эффективным ускорением задана соотношением

$$a = 1 - \frac{C}{a},$$

где $C = 1.19478 \cdot 10^{-4} Q_{pr} \text{ г/см}^3$, а Q_{pr} — коэффициент эффективности лучевого давления, принимающий значения от 0.25 до 2.0 в зависимости от размера и сорта пылинки. Обычно полагают, что $Q_{pr} = 1$ для пылинки с диаметром больше 1 мкм.

Рис. 1. Синхроно-синдинамный анализ снимка № 11051702 кометы C/ 2006 M4 (SWAN). Очертания пылевого хвоста нанесены на сетку синдинам и синхрон, рассчитанную для 5.70972 ноября 2006 г. Заштрихована область комы кометы. У синдинам указаны значения η , у синхрон — моменты выброса



Из нескольких эмпирических зависимостей, определяющих связь между плотностью и размером пылинки, мы выбрали зависимость [4]:

$$\frac{6}{2} \frac{0.8a}{a},$$

где ρ — в г/см³, размер пылинки a — в мкм. Также мы приняли, что источник пылевых частиц точечный и находится в ядре. В масштабе рассматриваемых явлений это допущение не вносит значительной погрешности.

Ниже в хронологическом порядке изложены наши результаты, позволяющие проследить историю образования и развития пылевого хвоста кометы.

Первые из отобранных снимков получены 24 сентября, за четыре дня до прохождения кометой перигелия. Резко очерченный ведомый край хвоста III типа указывает на то, что испускание пылевых частиц, составляющих хвост, началось примерно за 220 сут до прохождения перигелия, на расстоянии 3.2 а. е. от Солнца. Эффективное ускорение для частиц, находящихся на конце ограничивающей синхроны, $\eta = 0.9975$. В соответствии с принятыми нами соотношениями размер этих частиц $a = 568$ мкм. На снимках также виден очень слабый хвост II типа, состоящий из частиц, выброшенных в период от 65 до 42 сут до прохождения перигелия. Размеры частиц — от 50 до 114 мкм. Поскольку границы хвостов II и III типа образуют незаполненный промежуток на довольно большом расстоянии от ядра, можно сделать вывод об изменении гранулометрического состава частиц при приближении кометы к Солнцу. Это следует из факта отсутствия частиц с $\eta = 0.988$, которые были бы выброшены ранее, чем за 65 сут до перигелия.

На снимке, полученном в день прохождения перигелия 28 сентября, можно отметить увеличение яркости хвоста II типа, что вызвано увеличением числа частиц, выброшенных в период между $\eta_1 = -20^d$ и $\eta_2 = -36^d$. Размеры этих частиц — от 23 до 180 мкм.

На снимках, полученных после прохождения кометой перигелия, в течение длительного периода наблюдается весьма яркий хвост II ти-

па. Ведущая кромка хвоста ограничена синхронной, что свидетельствует о постоянном выбросе мелких частиц с разными размерами. Также виден очень слабый хвост III типа, состоящий из крупных частиц, движущихся практически вдоль орбиты кометы с эффективными ускорениями, близкими к $\kappa = 1$. На снимках 15 октября через 17 сут после перигелия, виден хвост II типа длиной около 0.015 а. е., ограниченный с ведущей стороны синхронной $\tau = 5.05^d$, а с ведомой — синхронной $\tau = -8.1^d$. Частицы хвоста имеют размеры от 2 до 43 мкм. Ограничение хвоста с ведомой стороны синхронной $\tau = -8.1^d$ свидетельствует о резком увеличении числа выброшенных пылинок указанных размеров с этого момента. На снимках также виден слабый хвост III типа, состоящий из частиц, выброшенных в период между $\tau_1 = -14.7^d$ и $\tau_2 = -75.0^d$. Размеры частиц — от 52 до 280 мкм.

Обычно самой яркой деталью в пылевом хвосте кометы с постоянной эмиссией пыли является ведущая кромка хвоста, что связано с характером пространственного распределения пылинок разных размеров под действием лучевого давления. Яркая полоса, ось которой совпадает с одной из синхрон и не является ведущей кромкой хвоста, появилась в пылевом хвосте на 32-й день после прохождения перигелия (29.7812 октября 2006 г.). Эта полоса видна на 12 снимках, полученных в последующий период. Мы определили среднее по 12 снимкам значение момента выброса частиц, находящихся на оси полосы. Оно оказалось равным $\tau = 0^d$, т. е. эта полоса образовалась за счет повышенного пылеобразования в ядре кометы при прохождении перигелия. Полоса не имеет четких границ, поэтому точно определить длительность периода повышенного пылеобразования невозможно. Вероятно, что этот период длился около 10 сут. Размеры пылинок, лежащих на этой синхроне, — от 24 до 200 мкм. На всех снимках, начиная с 27 октября и по 2 ноября, ведущая кромка пылевого хвоста совпадает с синхронной $\tau = 16.0^d$, что свидетельствует о прекращении или резком уменьшении эмиссии мелких частиц на 16 сут после прохождения перигелия. Размеры частиц, лежащих на этой синхроне от 8.6 до 66 мкм, а частиц, составляющих тело хвоста, — от 8.6 до 592 мкм.

Позже, с 4 по 15 ноября, ведущая кромка хвоста ограничена линией, совпадающей с одной из синдинам. Средняя по семи снимкам величина эффективного ускорения для этой синдинамы равна $\kappa = 0.97$, что соответствует размеру 42 мкм. Этот факт также свидетельствует о прекращении эмиссии частиц меньшего размера.

Начиная с 19 ноября и до конца наблюдений 24 декабря в пылевом хвосте видна яркая полоса, ось которой совпадает с одной из синхрон. Для этой синхроны среднее по четырем снимкам значение $\tau = 26.2^d$, что соответствует моменту 24.9 октября 2006 г. Связь между вспышкой блеска кометы, начавшейся 24.04 октября 2006 г. [5], и возросшей пылепроизводительностью ядра очевидна. Последние снимки кометы снова показывают характерный хвост III типа, границы которого не совпадают с какой-либо из синхрон или синдинам. Возможно, очерта-

ния пылевого хвоста искажены коротким газовым хвостом, изображение которого наложилось на пылевой хвост.

Следует отметить, что в последнее время синхронно-синдинамный метод анализа используется редко из-за его невысокой точности, связанной с субъективной оценкой положений деталей структуры хвоста. В нашей работе повышению точности способствовало усреднение результатов, полученных для одной детали структуры хвоста по нескольким снимкам, а также повышение контраста изображения при обработке.

Солнечный ветер и ориентация плазменного хвоста. Все время, пока наблюдался плазменный хвост, комета находилась в высоких гелиографических широтах (45—68°) межпланетного пространства на гелиоцентрическом расстоянии, близком к 1 а. е. (от 0.79 до 1.1 а. е.). Снимки плазменного хвоста можно использовать для определения изменений скорости солнечного ветра в этой части межпланетного пространства.

Известно несколько методов определения скорости солнечного ветра по углу отклонения оси плазменного хвоста от продолженного радиуса-вектора. Расчет радиальной составляющей скорости солнечного ветра выполнен согласно выражению [7]

$$w_{r0} = v_t \frac{|\epsilon| \operatorname{tg} \frac{\epsilon}{2}}{\operatorname{tg} \left(\frac{\epsilon}{2} \right)} = v_r, \quad (1)$$

где w_{r0} — радиальная скорость солнечного ветра, полученная в предположении, что поперечная составляющая скорости нулевая, ϵ , ϵ , ϵ — кометоцентрические координаты Земли, r — геоцентрическое расстояние кометы, v_r , v_t — радиальная и поперечная составляющие орбитальной скорости кометы, θ — угол отклонения оси плазменного хвоста от продолженного радиуса-вектора кометы. Составляющие орбитальной скорости кометы заданы выражениями [6]

$$v_t = v_p \frac{q}{r},$$

$$v_r = v_p \frac{q}{r} \sqrt{\frac{r}{q} \left(1 - \frac{1}{q} \right) \frac{r e}{q e} \left(1 - \frac{1}{q} \right)},$$

$$v_p = 29.78 \sqrt{(1 - e)/q},$$

где r — гелиоцентрическое расстояние кометы на момент наблюдения, выраженное в а. е., e и q — орбитальные элементы кометы.

На рис. 2 представлены оценки радиальной составляющей скорости солнечного ветра по снимкам плазменного хвоста кометы. Сплошная кривая на графике соединяет точки, соответствующие средней оценке скорости солнечного ветра по одному снимку.

Пунктирная кривая показывает изменение гелиографической широты кометы за период наблюдений. Значения гелиографической широты отложены на правой оси Y .

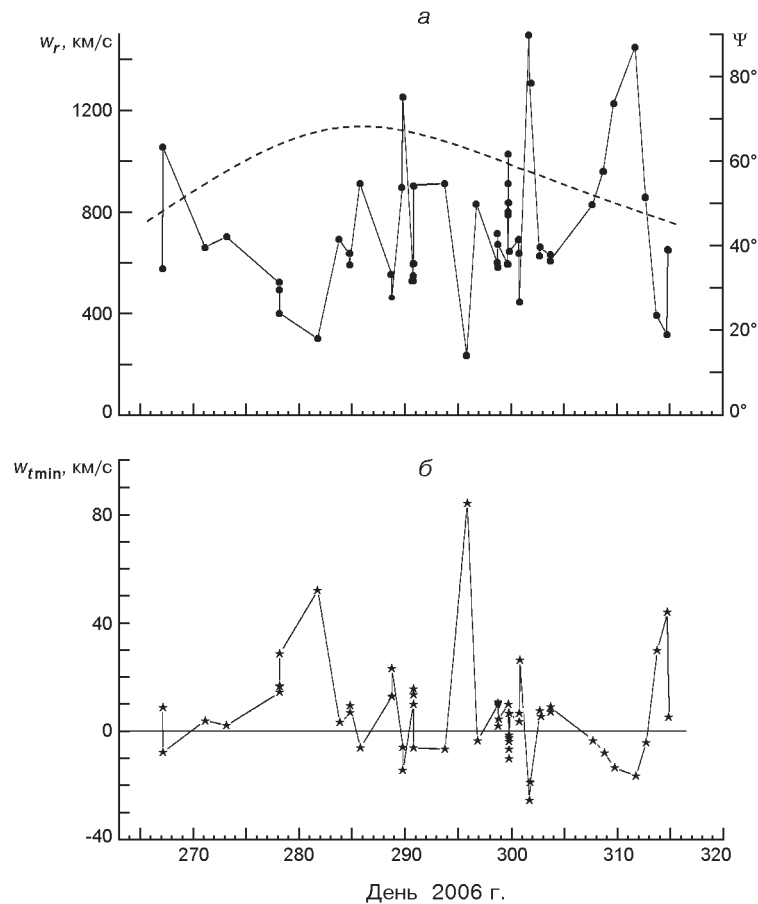


Рис. 2. Оценки радиальной (а) и поперечной (б) составляющих скорости солнечного ветра (точки) и изменение гелиографической широты (пунктирная кривая) по наблюдениям плазменного хвоста кометы C/2006 M4 (SWAN)

Вычисленная радиальная составляющая скорости солнечного ветра за период наблюдений в 48 сут изменяется в очень широких пределах: от 237 до 1498 км/с. Согласно прямым измерениям [8] в высоких гелиографических широтах радиальная скорость солнечного ветра постоянно высокая (около 750 км/с) и изменяется мало. Возможной причиной расхождения наших вычислений с прямыми измерениями скорости солнечного ветра может быть наличие поперечной составляющей солнечного ветра, влияющей на положение вектора хвоста. Проверим это предположение.

Оценим значения поперечной составляющей скорости, необходимые для наблюдаемых изменений. Предположим, что скорость солнечного ветра в радиальном направлении постоянна и равна 750 км/с. Воспользуемся выражением, полученным в [7] для составляющей скорости солнечного ветра, перпендикулярной к радиальному направлению от Солнца

$$w_{t \min} = \frac{\operatorname{tg} [(w_r - v_r) \left(\frac{v_e^2 - v_t^2}{v_e^2} \right) - v_e v_t]}{[(v_e \operatorname{tg} \mp \alpha)^2 + (v_e \operatorname{tg} \alpha)^2]^{1/2}}, \quad (2)$$

где $w_{t \min}$ — минимальное значение поперечной составляющей скорости солнечного ветра, w_r — принятая величина радиальной составляющей солнечного ветра. Остальные обозначения совпадают с обозначениями (1). В выражении (2) верхний знак следует применять, когда векторы, направленные из ядра кометы к Земле, вдоль хвоста и от Солнца, образуют право-ориентированную тройку векторов, нижний — в противном случае.

Результаты вычислений поперечной составляющей скорости солнечного ветра по выражению (2) отображены на рис. 2, б для каждого из обработанных снимков. Видно, что большинство значений поперечной составляющей скорости солнечного ветра находятся в интервале ± 10 км/с, что хорошо соответствует оценке ее средней величины [1] по наблюдениям более 600 комет. Однако на протяжении 48 сут наблюдения плазменного хвоста кометы случилось по меньшей мере шесть значительных отклонений этой величины от среднего значения. Очевидно, эти отклонения вызваны изменениями структуры солнечного ветра, какими-то ее неоднородностями. Особенный интерес представляют оценки радиальной и поперечной составляющих скорости солнечного ветра на интервале от 295 до 299 дня 2006 г. На этом интервале случилась вспышка блеска кометы [5], а также явление, похожее на отрыв плазменного хвоста.

Этим явлениям предшествовало резкое изменение поперечной составляющей скорости солнечного ветра (увеличение от -6 до 84 км/с и уменьшение до -3 км/с), закончившееся за сутки до зарегистрированной вспышки кометы.

Обсуждение результатов. Благодаря применению новых приемников света и высокой культуре наблюдений многие любители астрономии получают качественные снимки комет, пригодные для обработки с целью получения научного результата. Воспользовавшись такими снимками, мы смогли проследить на протяжении 3 мес эволюцию пылевого и плазменного хвостов кометы C/2006 M4 (SWAN).

Синхроно-синдинамный анализ очертаний пылевого хвоста позволил проследить изменения гранулометрического состава пылинок с момента образования хвоста за 220 сут до прохождения перигелия и до окончания наблюдений через два с половиной месяца после перигелия. Отмечено увеличение эмиссии мелкой пыли в течение 10 сут вблизи перигелия, а также практически полное ее прекращение через 16 сут после перигелия. Синхрона, наблюдаемая в пылевом хвосте в декабре, связана с выбросом пыли при вспышке яркости кометы 24.04 октября 2006 г.

Коллекция снимков плазменного хвоста позволила выявить многочисленные возмущения в структуре хвоста (облака, изгибы, волновые структуры, отрыв хвоста). При этом комета находилась в высоких гелиографических широтах (45 — 68 N) весь период наблюдений.

Как возмущенный характер плазменного хвоста, так и факт наблюдения возможного отрыва плазменного хвоста 24—26 октября, не соответствуют широтной модели поведения плазменного хвоста [3]. Измерив абберрационный угол оси плазменного хвоста на всех доступных нам снимках с 24 сентября по 10 ноября, мы получили значения радиальной скорости солнечного ветра в предположении нулевой поперечной составляющей. На протяжении периода наблюдений полученные значения изменяются в широких пределах (от 237 до 1498 км/с). Мы предположили наличие существенной поперечной составляющей скорости солнечного ветра, влияющей на положение оси хвоста. В этом случае измерения абберрационного угла можно согласовать с прямыми измерениями скорости солнечного ветра в высоких гелиографических широтах межпланетного пространства. Положив радиальную составляющую скорости солнечного ветра постоянной и равной 750 км/с, мы получили значения поперечной составляющей скорости для всех измеренных снимков. За период наблюдений случилось шесть значительных отклонений этих значений от интервала ± 10 км/с, соответствующего средним значениям, определенным по наблюдениям многих плазменных хвостов комет. Признав реальность этих отклонений, мы должны предположить наличие значительных неоднородностей в радиальной структуре полярного солнечного ветра.

Автор искренне благодарит авторов снимков кометы C/2006 M4 (SWAN), разместивших свои снимки на сайтах <http://kometen.fg-vds.de>; <http://www.observatorij.org>; <http://cara.uai.it>; http://xoomer.virgilio.it/danilo_privato, за возможность воспользоваться результатами их труда.

1. Брандт Дж. Солнечный ветер. Введение в проблему. — М.: Мир, 1973.—207 с.
2. Коноплева В. П., Розенбуш В. К. Перспективное проектирование изображений комет на плоскость орбиты // Астрометрия и астрофизика.—1974.—Вып. 22.—С. 61—68.
3. 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**. P. 52—64.
4. Devine N., Fechtig H., Combsi T. I., et al. The comet Halley dust and gas environment // *Space Sci. Rev.*—1986.—**45**.—P. 1—15.
5. Green D. W. E. Comet 2006 M4 (SWAN) // *IAU Circular*.—2006.—N 8766.—P. 1.
6. Jockers K. The ion tail of comet Kohoutek 1973 XII during 17 days of solar wind gusts // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1985.—**62**.—P. 791—838.
7. Jockers K., Lust R. The kinematics behavior of the plasma tail of comet Tago — Sato — Kosaka 1969 IX // *Astron. and Astrophys.*—1972.—**21**.—P. 199—207.
8. Phillips J. L., Bame S. J., Barnes A., et al. Ulysses solar wind plasma observations from pole to pole // *Geophys. Res. Lett.*—1995.—**22**.—P. 3301—3304.

Поступила в редакцию 25.11.10