

УДК 523.64-853

С. А. Борисенко, Ю. В. Сизоненко

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

Определение физических характеристик плазменного хвоста кометы C/2009 R1 (McNaught)

Найдено распределение яркости плазменного хвоста кометы C/2009 R1 (McNaught) по наблюдениям кометы с малым рефлектором (200/1000) 9—12 июня 2010 г. Изображения кометы регистрировались с помощью КМОП-матрицы с непродолжительными экспозициями. Рассчитано модельное распределение яркости и найдены параметры диффузионной модели плазменного хвоста кометы. Найдены оценки индукции магнитного поля в хвосте кометы, а также оценки времени жизни светящихся частиц, коэффициентов продольной и поперечной диффузии ионов.

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОВОГО ХВОСТА КОМЕТИ C/2009 R1 (MCNAUGHT), Борисенко С. А., Сизоненко Ю. В. — Знайдено розподіл яскравості плазмового хвоста комети C/2009 R1 (McNaught) за спостереженнями комети з малим рефлектором (200/1000) 9—12 червня 2010 р. Зображення комети реєструвались за допомогою КМОП-матриці з короткочасними експозиціями. Розраховано модельний розподіл яскравості та знайдено параметри дифузійної моделі плазмового хвоста комети. Знайдено оцінки індукції магнітного поля у хвості комети, а також оцінки тривалості життя світних частинок, коефіцієнти поперечної дифузії іонів.

DETERMINATION OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE PLASMA TAIL FOR THE COMET C/2009 R1 (MCNAUGHT)), by Borysenko S. A., Sizonenko Yu. V. — The brightness distribution for the plasma tail of the comet C/2009 R1 (McNaught) is determined on the basis of photometric observations made with a small Newtonian reflector (200/1000) from 9 to

12 June 2010. Images of the comet were detected using the Canon CMOS APS-C camera with short exposures. Brightness distribution is simulated and diffusion model parameters for the plasma tail of the comet are calculated. The induction of magnetic field in the comet's plasma tail is estimated. Estimates for light particle lifetimes and for coefficients of lengthwise and transverse diffusion of ions are calculated.

ВВЕДЕНИЕ

Комета C/2009 R1 (McNaught) была открыта Робертом Макнотом 9 сентября 2009 г. в обсерватории Сайдинг-Спринг в Австралии с помощью автоматической системы поиска малых тел, установленной на 0.5-м Уппсальском телескопе Шмидта.

Перигелий комета прошла 2 июля 2010 г., а незадолго до этого достигла значительной яркости и была доступна для наблюдений с Земли. Однако в Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины (г. Киев) ее можно было наблюдать только вблизи нижней кульминации на фоне очень сильной засветки неба. Поэтому мы провели наблюдения за городом с малым телескопом-рефлектором (200/1000) и CMOS-камерой Canon. На снимках, полученных с 9 по 12 июня, видна голова кометы и два хвоста: пылевой и плазменный, разделенные пустым промежутком. Плазменный хвост на снимке можно проследить до 15 , или 1 млн км от ядра. После тщательной фотометрической обработки стало возможно использовать полученные изображения для исследования распределения яркости в плазменном хвосте.

Сопоставление наблюдаемого и рассчитанного согласно диффузионной модели распределения яркости в хвосте кометы успешно применяется для определения некоторых физических характеристик хвоста уже довольно давно. Методика применения диффузионной модели впервые была изложена в работе [7], а затем усовершенствована и дополнена в работе [6].

В этой работе мы определили физические параметры, характеризующие кометный хвост, взаимодействующий с солнечным ветром в высоких гелиографических широтах ($\delta = 48...53$). Возможно, эти данные помогут лучше понять как механизм взаимодействия, так и структуру межпланетного магнитного поля в этом секторе межпланетного пространства.

НАБЛЮДЕНИЯ И ФОТОМЕТРИЯ ПЛАЗМЕННОГО ХВОСТА КОМЕТЫ

Наблюдения производились в с. Головеньки Борзнянского района Черниговской области ($\delta = 32.6493$, $\alpha = 51.3827$) с помощью 20-см рефлектора Ньютона ($F = 1$ м) и CMOS-камеры Canon с матрицей

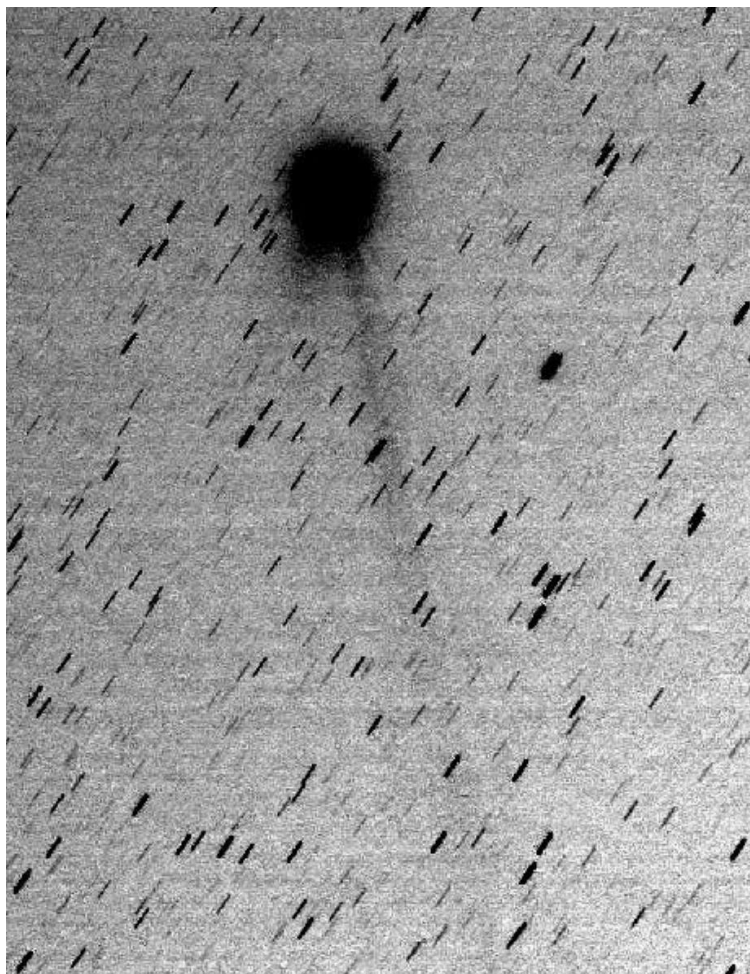


Рис. 1. Изображение кометы C/2009 R1 (McNaught) 9.9710 июня 2010 г. (суммарная экспозиция 300 с)

APS-C (14.8 – 22.2 мм). Изображения получены за три ночи (9, 11, 12 июня) сериями кратковременных экспозиций, что связано с особенностями параллактической монтировки телескопа и неохлаждаемого приемника света. Кадры серий были суммированы с помощью программ компьютерной обработки таким образом, чтобы получить по пять изображений кометы за каждую ночь. Длительность суммарной экспозиции во всех случаях — 300 с. 12 июня были получены изображения фотометрического стандарта (Per).

На рис. 1 показано одно из суммированных изображений кометы C/2009 R1 (McNaught), полученное 9 июня 2010 г.

В табл. 1 приведены обстоятельства наблюдений кометы: момент всемирного времени, отнесенного к середине серии экспозиций, позже суммированных как один снимок, на этот момент времени, видимые сферические координаты кометы α , δ , эклиптические гелиографические координаты h , h кометы, позиционный угол θ продолжен-

Таблица 1. Условия наблюдений кометы C/2009 R1(McNaught)

UT, июнь 2010 г.	2010	2010	h , Град	h , Град	, град	, град
09.9243	02 ^h 41 ^m 33.6 ^s	+43 55 20	337.2	47.6	291.7	49.7
09.9394	02 41 40.6	43 55 54	337.2	47.6	291.8	49.7
09.9557	02 41 54.5	43 57 03	337.2	47.7	291.9	49.7
09.9710	02 42 01.5	43 57 37	337.3	47.7	291.9	49.7
09.9838	02 42 08.4	43 58 11	337.3	47.7	291.9	49.7
11.8895	03 04 53.2	45 34 14	339.2	51.1	297.8	50.1
11.9057	03 04 37.9	45 35 12	339.2	51.1	297.8	50.1
11.9210	03 04 45.5	45 35 40	339.2	51.1	297.8	50.1
11.9357	03 05 00.0	45 36 38	339.2	51.1	297.9	50.1
11.9587	03 05 16.1	45 37 35	339.2	51.2	297.9	50.1
12.8773	03 16 41.8	46 17 09	340.4	52.9	301.0	50.5
12.8994	03 16 57.8	46 17 59	340.4	52.9	301.1	50.5
12.9156	03 17 13.8	46 18 50	340.4	53.0	301.1	50.5
12.9316	03 17 21.7	46 19 56	340.4	53.0	301.1	50.5
12.9460	03 17 37.7	46 20 06	340.4	53.0	301.2	50.5

ного радиуса-вектора, угол между орбитальной и картинной плоскостями (угол Бесселя). Последние четыре параметра вычислены с помощью интернет-ресурса HORIZON, предоставляемого JPL NASA.

Полученные суммированием изображения кометы оставались слишком слабыми и зашумленными для фотометрии, поэтому они были подвергнуты бинированию (2 2). На бинированном снимке размер пикселя изображения 12.8 мкм, а угловой масштаб — 2.64 /пкл.

Мы выполнили обычные для обработки цифровых изображений редукции: вычитание байаса и темнового тока, а также деление на плоское поле. После этого мы выделили часть изображения с кометой в фотометрический массив меньшего размера для удобства обработки. Для уменьшения уровня шумов мы подвергли выделенный фотометрический массив фильтрации двумерным медианным фильтром с малой апертурой (5 5). Такой прием, как показано в работе [3], позволяет уменьшить уровень шумов, не нарушая распределение яркости протяженного объекта.

Использование неохлаждаемого приемника света на базе CMOS-матрицы APS-C вызывает закономерный вопрос о достоверности результатов фотометрии. Мы провели дополнительное исследование стабильности отсчетов матрицы. Оказалось, что средние по кадру отсчеты темнового тока по двум снимкам, полученным перед и после наблюдений кометы (через 3^h03^m) составляют 256.5 и 257.4 соответственно, т. е. уровень шума практически не изменился, а его дисперсия увеличилась незначительно. Поэтому для учета уровня шу-

ма достаточно двух кадров темнового тока, полученных в начале и в конце наблюдений.

Необходимо убедиться в стабильности чувствительности пикселей приемника света на протяжении суммарной экспозиции 300 с. Для этого мы сравнили три снимка рассветного неба, полученные 12 июня 2010 г. в течение 10 мин. Отсчеты всех трех снимков были нормированы, а затем из второго кадра были вычтены первый и третий. Две полученные матрицы разницы отсчетов будут характеризовать нестабильность отклика приемника на одинаковый сигнал. Средняя по кадру погрешность отсчетов составила 0.237 % для первого случая и 0.119 % для второго. Очевидно, что такой точности фотометрических измерений достаточно для нашей работы.

Следующим шагом фотометрической обработки изображения кометы были калибровка отсчетов матрицы и учет фотометрических редуций. Чтобы получить распределение яркости, необходимо перевести отсчеты цифрового приемника света в единицы яркости. Для этого мы воспользовались полученными 12 июня снимками фотометрического стандарта Рег. Отобрав изображения звезд, спектральный класс которых близок к A0, мы построили калибровочную прямую. При этом мы руководствовались следующими соображениями. Изображения звезд на поверхности фотоприемника не являются точечными из-за аббераций оптики и атмосферных флуктуаций. Мы приняли за диаметр изображения звезды эквивалентную полуширину гауссианы, огибающей усредненный фотометрический разрез звезды. Тогда средний отсчет пикселей внутри круга с этим диаметром будет соответствовать реакции фотоприемника на поток от звезды внутри телесного угла, определяемого диаметром изображения звезды, т. е. на определенную яркость звезды. Взяв из каталога [4] звездные величины отобранных звезд, мы получили яркости для калибровочной прямой.

Известны три фотометрические редуции, которые необходимо учитывать при определении яркости протяженного небесного объекта [5]. Это светораспределение в фокальной плоскости телескопа, фон неба и дифференциальная экстинкция. Первая редуция автоматически учитывается при делении на плоское поле при условии, что положение оптического центра не изменялось, за время прошедшее от съемки плоского поля до съемки изображения кометы. Две другие редуции учтены по стандартной методике, изложенной в работе [5].

Для коэффициента экстинкции было взято значение, характерное для Киева [1]. Возможная ошибка при этом минимальна, поскольку нашей целью было изучение относительного распределения яркости вдоль хвоста. На рис. 2 показано распределение яркости кометы на изображении, полученном 11.921 июня 2010 г. Показаны также направления и протяженность фотометрических разрезов, использованных для сравнения с модельными профилями яркости.

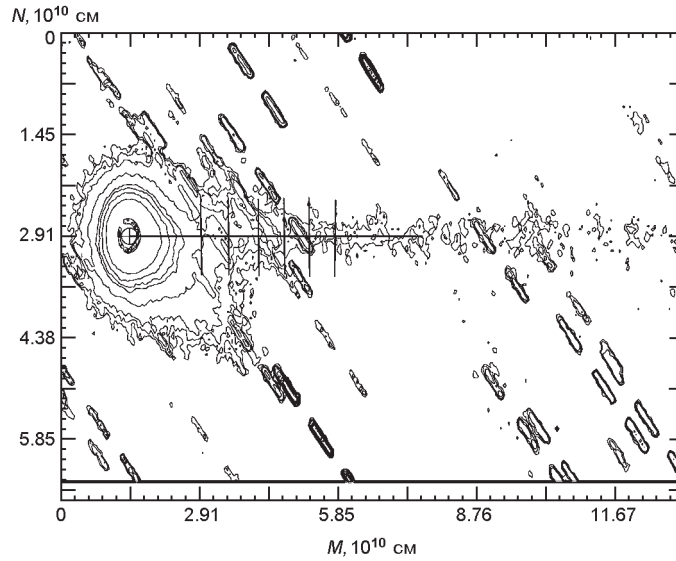


Рис. 2. Распределение яркости в хвостах кометы C/2009 R1 11.921 июня 2010 г. Прямыми линиями показано положение продольного и поперечных фотометрических разрезов, использованных для сравнения с модельными профилями яркости. Изофоты (начиная с внешней) соответствуют яркостям 19.73, 19.64, 19.52, 19.13, 18.10, 17.00, 16.00, 15.00^m/сд² (сд — секунды дуги)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ

Основные положения диффузионной модели плазменного хвоста комет изложены в работах [5, 7], а модернизированная методика модельных расчетов описана в работе [6]. Модель имеет ограничения на применение при нестационарном истечении вещества из источника. Эти ограничения, по-видимому, не действуют в случае кометы C/2009 R1, которая не показывала колебаний блеска в описываемый период. Поэтому, не останавливаясь на описании и улучшении модели, перейдем к изложению результатов сопоставления распределения яркости, полученного из наблюдений, с модельным распределением яркости.

Для представления распределения яркости в плазменном хвосте мы получили один продольный разрез и шесть поперечных, располагающихся вдоль хвоста с равными интервалами для всех используемых снимков. Направления из этих разрезов на снимке, полученном 11.921 июня, показаны на рис. 2. Полученные фотометрические разрезы использованы для сопоставления с модельными профилями яркости.

Согласно диффузионной модели рассчитанное значение яркости в точке с координатами X, Y можно представить в виде

$$2.5 \lg I = \text{const} - 2.5 \lg (X, Y, \dots)$$

где $a\sqrt{{}^3D_l^{-1}}$ — безразмерный параметр, связывающий физические характеристики плазменного хвоста, X и Y — безразмерные координаты точки модельного профиля яркости, связанные с координатами, измеренными в плоскости снимка, соотношением

$$X = x/L_l, \quad Y = y/L_{lg}.$$

Изменяя значения модельных параметров Γ , L_l , L_{lg} , мы добились наилучшего совпадения модельного профиля с разрезом измеренного распределения яркости. Процесс подбора параметров считается законченным, когда достигнута минимальная сумма квадратичных отклонений модельных значений яркости от наблюдаемых. Подбор модельных параметров выполняется в два этапа: параметры подбираются с использованием продольного разреза хвоста, затем при фиксированных Γ и L_l находится среднее значение параметра L_{lg} по поперечным разрезам хвоста. На рис. 3 для снимка от 11.921 июня показан наблюдаемый продольный разрез хвоста (точки) и наилучший модельный профиль яркости. На рис. 4 показаны шесть наблюдаемых и модельных распределений яркости поперек хвоста на разных расстояниях от ядра.

Усредненные для каждой даты наблюдений значения модельных параметров приведены в табл. 2.

Параметры моделирования, представленные в табл. 2, показывают сравнительно небольшой разброс относительно средних величин. При этом наблюдения, послужившие для их определения, получены в течение небольшого отрезка времени. Поэтому мы использовали эти средние величины для вычисления физических характеристик плазменного хвоста кометы.

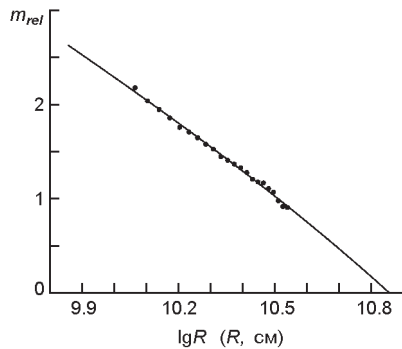


Рис. 3. Наблюдаемый продольный фотометрический разрез плазменного хвоста кометы на снимке 11.921 июня 2010 г. (точки) и рассчитанный профиль яркости (линия)

Таблица 2. Параметры диффузионной модели плазменного хвоста кометы C/2009 R1(McNaught) в июне 2010 г.

Дата наблюдений, июнь 2010 г.	Γ	$L_l, 10^{10}$ см	$L_{lg}, 10^{10}$ см
09.95	10.6±0.14	5.85±0.04	1.74 ± 0.06
11.92	10.6±0.13	7.18±0.06	1.86 ± 0.05
12.91	21.3±0.08	4.44±0.10	1.83 ± 0.04

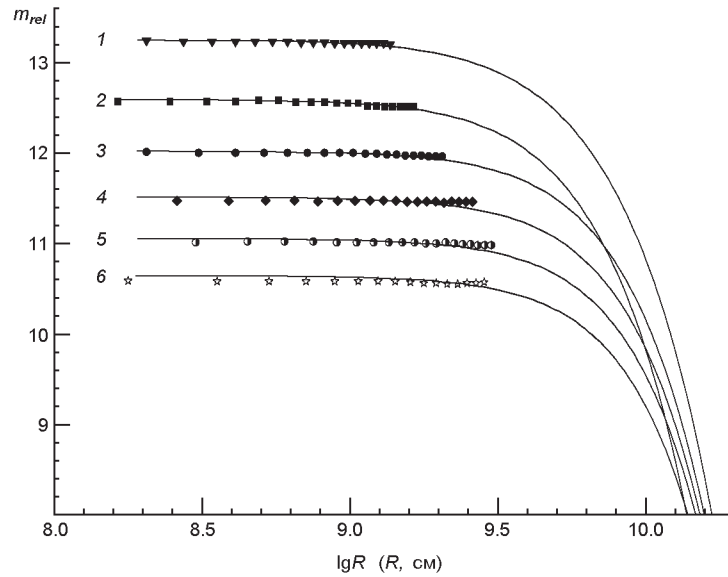


Рис. 4. Наблюдаемые поперечные фотометрические разрезы плазменного хвоста кометы на снимке 11.921 июня 2010 г. и соответствующие модельные профили яркости на разных расстояниях от ядра: 1 — $1.6 \cdot 10^{10}$ см, 2 — $2.1 \cdot 10^{10}$ см, 3 — $2.7 \cdot 10^{10}$ см, 4 — $3.2 \cdot 10^{10}$ см, 5 — $3.8 \cdot 10^{10}$ см, 6 — $4.3 \cdot 10^{10}$ см

Физические характеристики плазменного хвоста были рассчитаны согласно работе [8], дающей связь между параметрами диффузионной модели и физическими характеристиками хвоста:

$$D_l = \sqrt{\frac{aL_l^3}{8 \cos^2}} \left(1 - \frac{L_{tg} \sin^2}{L_l} \right),$$

$$D_{tg} = L_{tg}^2 \sqrt{\frac{a \cos}{8 L_l}},$$

$$B = 2 \cdot 10^{11} \frac{T_i L_l}{D_l L_{tg} \cos},$$

$$a = M_s (1 - \dots) / r^2,$$

где τ — время жизни светящихся частиц, a — ускорение ионов, D_l, D_{tg} — продольный и поперечный коэффициенты диффузии, B — индукция магнитного поля хвоста кометы, G — гравитационная постоянная, M_s — масса Солнца, r — гелиоцентрическое расстояние кометы, μ — эффективное ускорение частиц, T_i — температура кометных ионов, θ — угол между картинной плоскостью и плоскостью орбиты кометы.

Чтобы воспользоваться приведенными выше соотношениями для оценки физических характеристик хвоста, необходимо знать эффек-

тивное ускорение частиц хвоста и температуру кометных ионов T_i . Значение получено нами из определения скорости движения облачных образований вдоль хвоста. Два таких облака заметны на снимках, полученных 6 июня 2010 г. любителями астрономии и помещенных на сайте <http://kometen.fg-vds.de>. Определив кометоцентрические координаты центров этих облаков, мы вычислили их скорости, а затем и ускорения, предположив равноускоренное движение облаков совместно с потоком кометных ионов. Оценки температуры кометных ионов мы взяли из измерений космического аппарата в плазменном хвосте кометы [8], а также из работы [10], где температура была получена из спектральных наблюдений кометных ионов. Получив таким образом значение ускорения $a = 48.3$ и значения температуры ионов $T_i^{\max} = 80000$ К, $T_i^{\min} = 20000$ К, мы определили физические характеристики хвоста. Оценки этих характеристик приведены в табл. 3, где даны: ускорение a светящихся частиц, время жизни кометных ионов, значения D_l и D_{fg} продольного и поперечного коэффициентов диффузии ионов, а также верхняя и нижняя оценки B_{\max} и B_{\min} индукции магнитного поля для плазменного хвоста.

Таблица 3. Физические характеристики плазменного хвоста кометы C/2009 R1 (McNaught) в июне 2010 г.

Дата, июнь 2010 г.	a , см/с ²	τ , 10 ⁴ с	D_l , 10 ¹⁶ см ² /с	D_{fg} , 10 ¹⁶ см ² /с	B_{\min} , нТл	B_{\max} , нТл
09.95	57.6	8.37	1.66	0.09	1.05	4.20
11.92	64.0	8.81	2.43	0.10	0.83	3.32
12.91	67.8	9.57	0.83	0.09	1.54	6.16

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на более чем скромные характеристики астрономического инструмента и цифрового фотоприемника, использованных для получения изображений кометы C/2009 R1 (McNaught), нам удалось получить распределение яркости в плазменном хвосте кометы. Сравнив фотометрические разрезы с модельными профилями яркости, рассчитанными с помощью диффузионной модели плазменного хвоста (Назарчук, Шульман) мы получили физические параметры кометного хвоста в июне месяце 2010 г.

Анализ полученных физических параметров хвоста показывает относительную стабильность напряженности межпланетного магнитного поля вблизи кометы во время наших наблюдений. Просмотр изображений кометы, помещенных на сайте <http://kometen.fg-vds.de>, подтверждает этот вывод. После относительной активности кометного хвоста 6—8 июня (облачные образования, волны, лучи) течение плазменного хвоста 9—15 июня было практически ламинарным. По-

лученные оценки напряженности магнитного поля хвоста кометы в высоких гелиографических широтах по абсолютной величине не отличаются от его оценок в более низких широтах [2].

1. Аврамчук В. В., Семенюк Т. П. Определение спектрального пропускания земной атмосферы на пике Терскол в октябре — ноябре 1973 года // Астрометрия и астрофизика.—1973.—Вып. 26.—С. 113—116.
2. Борисенко С. А., Сизоненко Ю. В., Лукьяник И. В. и др. Исследование физических условий в плазменном хвосте кометы С/1987 Р1 (Бредфильд) // Кинематика и физика небес. тел.—2011.—27, № 3.—С. 1—10.
3. Варданян Р. А., Мирзоян М. С., Сизоненко Ю. В. Применение предварительной цифровой фильтрации для фотометрии комет // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 6.—С. 88—90.
4. Казанасмас М. С., Завершнева Л. А., Томак Л. Ф. Атлас и каталог звездных величин фотоэлектрических стандартов. — Киев: Наук. думка, 1981.—217 с.
5. Коноплева В. П., Назарчук Г. К., Шульман Л. М. Поверхностная фотометрия комет. — Киев: Наук. думка, 1977.—268 с.
6. Назарчук Г. К. Анализ распределения поверхностной яркости в хвосте кометы 1956 h // Астрометрия и астрофизика.—1969.—Вып. 4.—С. 77—99.
7. Назарчук Г. К., Шульман Л. М. Диффузионная модель хвоста кометы // Пробл. космич. физ.—1968.—Вып. 3.—С. 11—24.
8. Чурюмов К. И., Шабас Н. Л. Физические условия в плазменном хвосте кометы Галлея в период его отрыва 6—8 января 1986 г. // Астрон. вестник.—1998.—32, № 3.—С. 43—50.
9. Slavin J. A., Smith E. J., Tsurutani B. T., et al. Giacobini — Zinner magnetotail — ICE magnetic field observation // GeoRL.—1986.—13.—P. 283—286.
10. Spinrad H., Brown M. E., Johns C. M. Kinematics of the ion tail of comet P/Swift — Tuttle // Astron. J.—1994.—108, N 4.—P. 1420—1462.

Поступила в редакцию 11.10.11