

УДК 523.64-853

С. А. Борисенко<sup>1</sup>, Ю. В. Сизоненко<sup>1</sup>, И. В. Лукьяник<sup>2</sup>,  
А. В. Иванова<sup>1</sup>, А. Д. Войцеховская<sup>1</sup>, Т. П. Сергеева<sup>1</sup>,  
А. В. Головин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета им. Тараса Шевченко  
04053 Киев-53, ул. Обсерваторная 3  
sizon@mao.kiev.ua

### Исследование физических условий в плазменном хвосте кометы C/1987 P1 Бредфильда

*Выполнена фотометрия фотографических изображений кометы C/1987 P1 Бредфильда с планшетным сканером, оборудованным слайд-модулем. Получены продольные и поперечные фотометрические разрезы плазменного хвоста кометы. С помощью диффузионной модели Шульмана и Назарчук (1968) сделаны оценки индукции магнитного поля и других физических характеристик плазменного хвоста кометы в ноябре 1987 г. Показана возможность использования сканированных изображений комет для получения физических характеристик хвостов комет.*

*ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ УМОВ У ПЛАЗМОВОМУ ХВОСТІ КОМЕТИ C/1987 P1 БРЕДФІЛЬДА, Борисенко С. А., Сизоненко Ю. В., Лук'яник І. В., Іванова О. В., Войцеховська А. Д., Сергєєва Т. П., Головін О. В. — Виконано фотометрію фотографічних зображень комети C/1987 P1 Бредфілда за допомогою планшетного сканера, обладнаного слайд-модулем. Отримано поздовжні та поперечні фотометричні розрізи плазмового хвоста комети. За допомогою дифузійної моделі Шульмана і Назарчук (1968) зроблено оцінки індукції магнітного поля та інших фізичних характеристик плазмового хвоста комети в листопаді 1987 р. Показано можливість використання сканованих зображень комети для отримання фізичних характеристик хвостів комет.*

*THE INVESTIGATION OF PHYSICAL CONDITIONS IN THE PLASMA TAIL OF THE COMET C/1987 P1 BRADFIELD, by Borysenko S. A., Sizonenko Yu. V., Luk'yanyk I. V., Ivanova O. V., Voitsekhovska A. D., Sergeeva T. P., Golovin A. V. — Photometrical measurements for photographic images of the comet C/1987 P1 Bradfield are carried out with a slide scanner. The longitudinal and transversal scans of the cometary plasma tail are derived. The magnetic field induction and some other physical characteristics of the cometary plasma tail in November 1987 are estimated with the use of the diffusion model for a cometary tail of Shulman and Nazarchuk (1968). The possibility to apply measurements with the slide scanner for photometrical studies is shown.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

В стеклотекке Главной астрономической обсерватории НАН Украины накопилось большое количество фотопластинок с изображениями и спектрами небесных объектов. Большинство снимков сделано много лет назад, однако информация, которая на них содержится, очень важна для исследования этих объектов. Данные, полученные при обработке снимков, позволяют не только исследовать эволюционные процессы, происходящие с объектами наблюдений, но и уточнить параметры физических моделей объектов, накопить информацию о координатах разных объектов на протяжении большого периода. Чтобы не утратить архивы данных на фотопластинках, создаются базы данных оцифрованных фотопластинок.

Основной целью данной работы является демонстрация возможности использования оцифрованных с помощью сканера изображений комет для решения задач физики комет. Одной из таких задач может быть исследование физических условий в плазменных хвостах по фотографическим изображениям.

Плазменные хвосты являются результатом взаимодействия солнечного ветра с кометными ионами [12]. Вектор направления оси плазменного хвоста является суммой вектора скорости солнечного ветра и антивектора орбитальной скорости кометы, и поэтому величина его отклонения от продолженного радиуса-вектора кометы может служить для определения скорости солнечного ветра в той области межпланетного пространства, где находится комета [4]. Характерной особенностью плазменных хвостов комет является их сложная структура. В хвостах часто наблюдаются плазменные конденсации, лучи, кольцевые структуры, возмущения хвоста в виде одного или нескольких изгибов, волновые структуры. Достаточно часто наблюдается полный или частичный отрыв плазменных кометных хвостов [13]. Все перечисленные явления, зафиксированные на фотопластинках, могут исследоваться для выяснения физических условий в кометной атмосфере и прилегающем межпланетном пространстве, создания моделей наблюдаемых явлений.

За последние 25 лет исследования физических условий в плазменных хвостах выполнялись многими космическими аппаратами. Исследованы магнитные поля и плазма кометных хвостов комет 21P/Джакобини — Циннера, 1P/Галлея, 26P/Грига — Скъеллерупа, 19P/Борелли. Эти исследования в основном подтвердили теоретические модели плазменных хвостов, построенные в 1970—1980-х гг., добавив много новой информации для усовершенствования моделей.

Физические условия и процессы в плазменных хвостах комет исследуются также и теоретически. Такие исследования позволяют моделировать наблюдаемые явления на основе численных методов, используя результаты наблюдений других комет, магнитосфер и ионосфер планет, достижения в иных областях физики и астрофизики. Так, теория крупномасштабной стратификации в плазменных кометных хвостах описывает развитие филаментационной неустойчивости потока солнечного ветра в плазме хвоста кометы, используя подходы и методы физики плазмы [18]. Следовательно, исследование архивных изображений комет совместно с использованием новых методов исследований может сделать весомый вклад в понимание процессов, происходящих в кометах и окружающем межпланетном пространстве. Исследования, выполненные в этой работе, используют диффузионную модель плазменного хвоста, разработанную Г. К. Назарчук и Л. М. Шульманом [7, 8], и доработанную впоследствии Н. Л. Шабас [11].

### ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ КОМЕТЫ

Для исследования физических характеристик плазменных хвостов комет в рамках нашей работы из стеклотеки были отобраны фотографические пленки с изображениями кометы C/1987 P1 Бредфильда, а также пленки со снимками, необходимыми для фотометрической калибровки изображений кометы. Использованные нами снимки были получены Г. Н. Кимеридзе в Абастуманской астрофизической обсерватории с камерой Шмидта ( $D = 36$  см,  $F = 0.65$  м) на астрофотопленке

Таблица 1. Условия наблюдений кометы C/1987 P1 Бредфильда

Номер снимка	UT, ноябрь 1987	2000.0	2000.0	$r$ , а. е.	$\delta$ , а. е.	град	$\delta$ , град
27669	15.704456	18 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> 24.5 <sup>s</sup>	+06 56 40	0.8827	0.9847	355.96	34.07
27670	15.712095	18 31 25.5	+06 56 49	0.8827	0.9847	355.97	34.07
27671	15.719502	18 31 27.8	+06 57 03	0.8827	0.9846	355.98	34.07
27687	19.690278	18 50 32.0	+09 07 29	0.8983	0.9488	3.83	33.96
27688	19.696181	18 50 33.8	+09 07 44	0.8984	0.9488	3.85	33.95
27689	19.701910	18 50 35.3	+09 07 55	0.8984	0.9487	3.86	33.95
27695	22.706944	19 05 57.8	+10 48 52	0.9138	0.9236	9.54	33.55

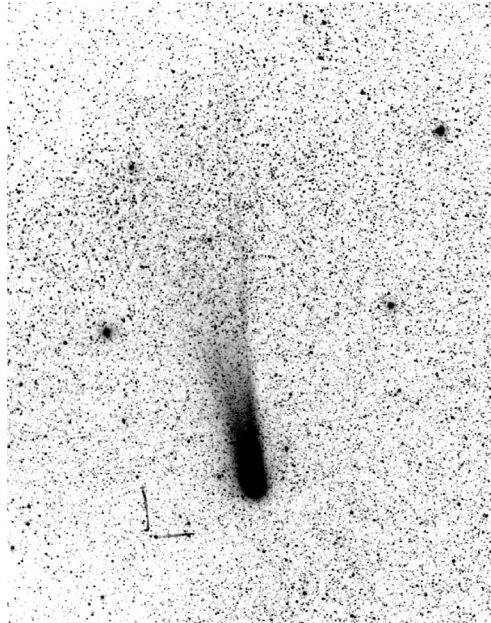


Рис. 1. Комета C/1987 P1 Бредфильда (1987, ноябрь 15.719502)

A-600 с экспозициями 5 мин. Для обработки использовалась серия наблюдений за ноябрь 1987 г. В табл. 1 приведены серийный номер фотоснимка, момент всемирного времени, отмечающего начало экспозиции, экваториальные координаты  $\alpha$ ,  $\delta$  кометы, ее гелио- и геоцентрические расстояния  $r$ ,  $R$ , эклиптические гелиоцентрические координаты  $\lambda$ ,  $b$ .

На снимках заметны два частично перекрывающихся хвоста: плазменный и пылевой, длиной около  $1.5^\circ$  (рис. 1). В нашей работе по выбранным снимкам выполнено исследование физических условий в плазменном хвосте кометы.

#### СКАНИРОВАНИЕ ФОТОПЛОНОК И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Сканирование фотопленок осуществлялось на планшетном сканере Microtek Scan Maker 9800XL со слайд-модулем TMA-1600. Планшетные сканеры, оборудованные слайд-модулями большого формата (A3) уже использовались для сканирования астронегативов [10, 17]. Данные, полученные сканированием изображений, использовались для разных научных задач: оценки координат объектов, их блеска, поиска вспышек переменных звезд, поиска астероидов.

Как и большинство сканеров этого типа, Microtek Scan Maker 9800XL имеет систематические погрешности определения координат и денситометрии. Однако методика обработки измерений, предложенная в работе [2], позволяет определить координаты с точностью  $0.1$ — $0.3$  и произвести фотометрию звезд с ошибкой  $0.15^m$ — $0.20^m$ . При сканировании задавались параметры: разрешающая способность

472 пкл/см (размер пикселя 20 мкм), режим денситометрии — Grayscale, 16 бит на отсчет. При формировании изображения не применялись фильтры, не выполнялись коррекции динамического диапазона, яркости и контрастности. Результирующий файл, записанный в TIFF-формате, конвертировался затем в FITS-формат. Вместе со снимками Г. Н. Кимеридзе получил внефокальные изображения фотометрического стандарта Nova Her [5] и снимки марок трубчатого фотометра. Это позволило использовать для калибровки и стандартизации снимков стандартную методику [6]. В результате процедуры калибровки отсчеты сканера были преобразованы в значения яркости в звездных величинах с квадратной секунды изображения кометы.

Поправка за светораспределение телескопа была рассчитана с помощью эмпирической формулы

$$B_0 \quad B(r) \quad 0.009545r \quad 0.001152r^2 \quad 0.000007r^3,$$

где  $B(r)$  — измеренная яркость,  $r$  — расстояние от фотометрического центра кадра.

Поправка за фон неба и дифференциальную экстинкцию рассчитывалась согласно [6], средний коэффициент прозрачности для спектральной полосы наблюдений взят из работы [1].

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ХВОСТА КОМЕТЫ

Для оценки физических характеристик плазменного хвоста кометы использовалась диффузионная модель Г. К. Назарчук и Л. М. Шульмана [7, 8]. Эта модель позволяет получить информацию о физических условиях в плазменном хвосте кометы путем моделирования распределения яркости и подбора параметров модели, обеспечивающих наилучшее совпадение модельного и наблюдаемого распределения яркости в хвосте кометы. Модель неоднократно использовалась для исследования плазменных хвостов комет. Диффузионная модель основана на нескольких предположениях. Предполагается, что кометное ядро с прилегающей областью является точечным источником вещества. Это оправданно благодаря малым размерам кометного ядра по сравнению с кометным хвостом. Также считается, что центр тяжести каждого одноmomentно выброшенного пакета частиц движется равноускоренно вдоль оси хвоста кометы, причем вытекание вещества началось бесконечно давно, и мощность источника постоянна. Кометный ион приобретает случайные импульсы со стороны пролетающих сквозь хвост самосогласованных полей. Другими словами, процесс взаимодействия кометных ионов с солнечным ветром принимается макроскопически стохастическим, в этом случае движение кометного иона представляет собой суперпозицию диффузии и сноса в хвост.

Совпадения наблюдаемого распределения яркости в плазменном хвосте кометы с соответствующими профилями яркости, рассчитан-



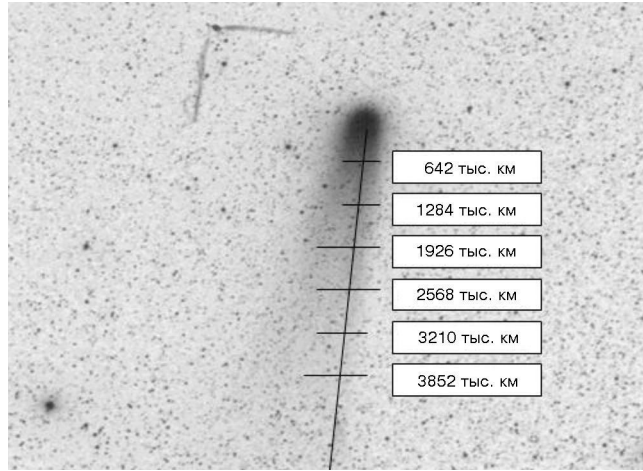


Рис. 2. Поперечные и продольные разрезы плазменного хвоста кометы C/1987 P1 Бредфильда (1987, ноябрь 15.719502)

ными согласно диффузионной модели, добиваются подбором модельных параметров, входящих в выражение для яркости.

Учет фотометрических редукиций, выполненный на этапе фотометрической обработки снимков, позволил устранить искажения распределения яркости за счет разницы атмосферного поглощения вдоль хвоста, посторонней засветки и виньетирования поля телескопа. Поскольку модель рассчитывает яркость хвоста, находящегося в плоскости орбиты, необходимо также учесть искажение перспективы, возникающее из-за того, что наблюдения получены в картинной плоскости снимка. В приведенных ниже выражениях для модельных параметров и физических характеристик хвоста кометы введены тригонометрические функции угла в между картинной и орбитальной плоскостями для того, чтобы учесть это искажение.

На рис. 2 представлен снимок кометы C/1987 P1 Бредфильда с двумя хвостами: пылевым и плазменным. Мы построили фотометрический разрез вдоль оси плазменного хвоста и несколько разрезов в перпендикулярном направлении (рис. 2). Для каждого поперечного фотометрического разреза на рис. 2 указано расстояние  $X$  от ядра кометы.

Модельное распределение яркости, используемое для сравнения с наблюдаемым в хвосте кометы, можно представить в виде

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

где  $a \sqrt{{}^3 D_1^{-1} \cos \theta}$  — безразмерный параметр, связывающий физические характеристики плазменного хвоста,  $X$  и  $Y$  — безразмерные координаты точки разреза, связанные с координатами, измеренными в плоскости снимка, соотношением

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

**Таблица 2.** Параметры диффузионной модели плазменного хвоста кометы C/1987 P1 Бредфильда

Дата, ноябрь 1987 г.		$L_l, 10^{11}$ см	$L_{lg}, 10^{10}$ см
15	14.0	$3.35 \pm 0.10$	$5.01 \pm 0.56$
19	8.5	$3.62 \pm 0.12$	$4.64 \pm 0.58$
22	9.0	4.05	$5.18 \pm 0.59$

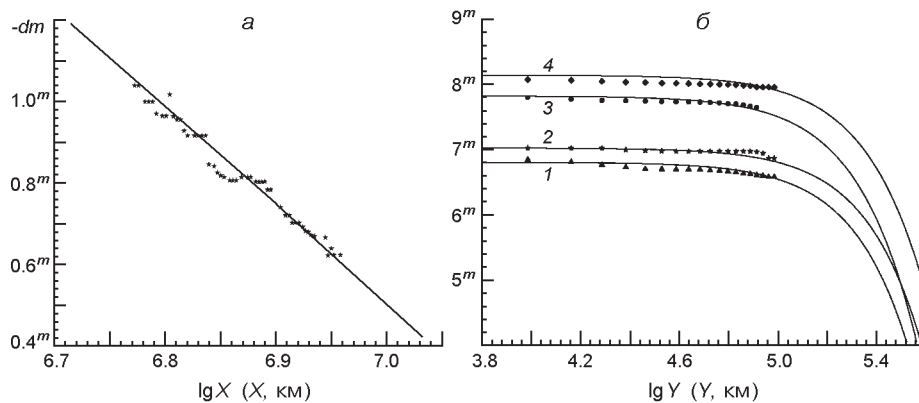


Рис. 3. Фотометрические разрезы плазменного хвоста кометы C/1987 P1 Бредфильда за 15.7044567 ноября 1987 г.: *a* — продольный разрез, *б* — поперечные (разрез 1 — на расстоянии  $1.93 \cdot 10^6$  км от ядра, 2 —  $2.17 \cdot 10^6$  км, 3 —  $2.89 \cdot 10^6$  км, 4 —  $3.11 \cdot 10^6$  км). Точки — наблюдения, непрерывные кривые — модельные расчеты

Изменяя значения модельных параметров  $L_l$ , мы добились наилучшего совпадения модельных профилей с продольными разрезами, полученными из наблюдений. Перебор модельных параметров продолжался до тех пор, пока не была достигнута наименьшая сумма отклонений рассчитанных значений яркости от наблюдаемых значений. Затем, зафиксировав значения двух найденных модельных параметров, мы нашли значение третьего параметра  $L_{lg}$ , используя для этого поперечные разрезы плазменного хвоста. Значения подобранных модельных параметров, усредненные для даты наблюдения, приведены в табл. 2. Усреднение выполнено ввиду незначительного интервала между экспозициями в пределах одной даты.

Продольный разрез плазменного хвоста кометы C/1987 P1 Бредфильда за 15.704457 ноября 1987 г., совместно с подобранным модельным профилем распределения яркости приведен на рис. 3, *a*. На рис. 3, *б* приведены поперечные фотометрические разрезы плазменного хвоста кометы и соответствующие модельные профили распределения яркости. Из-за частичного перекрытия пылевого и плазменного хвостов кометы пришлось отказаться от использования части поперечных разрезов, выполненных слишком близко к ядру кометы.

Физические характеристики плазменного хвоста были рассчитаны согласно формулам работы [11]:

$$= \sqrt{L_{\parallel} / (2a \cos \theta)}, \quad D_{\perp} = \sqrt{\frac{aL_{\perp}^3}{8 \cos^3 \theta}} [1 - (L_{\text{tg}} \sin \theta / L_{\perp})^2],$$

$$D_{\text{tg}} = L_{\text{tg}}^2 \sqrt{\frac{a \cos \theta}{8 L_{\perp}}}, \quad B = 2 \cdot 10^{11} \frac{T_i}{D_{\perp} L_{\text{tg}} \cos \theta}, \quad a = M_s (1 - \dots) / r^2,$$

где  $\tau$  — время жизни светящихся частиц,  $D_{\perp}, D_{\text{tg}}$  — продольный и поперечный коэффициенты диффузии,  $B$  — индукция магнитного поля хвоста кометы,  $a$  — гравитационная постоянная,  $M_s$  — масса Солнца,  $r$  — гелиоцентрическое расстояние кометы,  $\theta$  — эффективное ускорение частиц,  $T_i$  — температура кометных ионов. Чтобы использовать эти соотношения, необходимо задать две неизвестные величины  $\tau$  и  $T_i$ , встречающиеся в правой части соотношений. Эффективное ускорение частиц плазменного хвоста мы определили, исследовав движение облака в хвосте кометы на снимках от 15 ноября. В работе [9] приведен алгоритм вычисления  $\tau$  по трем наблюдениям облака в хвосте I типа, который до сих пор считается самым надежным и простым. Воспользовавшись этим алгоритмом, мы нашли  $\tau = 79$  для плазменного хвоста кометы Бредфильда. Используя это значение эффективного ускорения, мы получили оценки значения ускорения кометных ионов  $a$  для наблюдений на разных гелиоцентрических расстояниях. Затем, применив найденные модельные параметры  $\tau, L_{\perp}, L_{\text{tg}}$ , мы нашли время жизни ионов  $\tau$ , значения продольного и поперечного коэффициентов диффузии  $D_{\perp}$  и  $D_{\text{tg}}$ , а также минимальную и максимальную оценки значений индукции магнитного поля кометы. Согласно [11] значения температуры кометных ионов находятся в пределах  $5 \cdot 10^5 < T_i < 2 \cdot 10^6$  К. Минимальная и максимальная оценки индукции магнитного поля соответствуют принятым минимальному и максимальному значениям температуры ионов. Физические характеристики плазменного хвоста кометы C/1987 P1 Бредфильда приведены в табл. 3.

Анализ результатов моделирования распределения яркости в плазменном хвосте кометы C/1987 P1 позволил сделать следующие выводы.

**Таблица 3. Физические характеристики плазменного хвоста кометы C/1987 P1 Бредфильда в ноябре 1987 г.**

Дата, ноябрь 1987 г.	$a, \text{ см/с}^2$	$\tau, \text{ мкс}$	$D_{\perp}, 10^{18} \text{ см}^2/\text{с}$	$D_{\text{tg}}, 10^{15} \text{ см}^2/\text{с}$	$B, \text{ нТл}$
15	60.1	34.8	0.76±0.06	1.84±0.17	2.7—10.8
19	58.0	29.8	1.21±0.11	1.81±0.05	2.2—8.6
22	56.1	34.0	1.51	1.97	1.8—7.4



1. Среднее квадратичное отклонение параметров моделирования и физических характеристик плазменного хвоста составляет 10 %. Такие значения отклонений соответствуют средней точности фотографической фотометрии (8 %).

2. На протяжении всего периода наблюдений как продольный, так и поперечный коэффициенты диффузии медленно увеличивались, а индукция магнитного поля уменьшалась.

Наблюдатели кометы C/1987 P1 Бредфильда отметили два случая отрыва плазменного хвоста 19—20 октября 1987 г. [14] и 20 декабря 1987 г. [15]. Согласно работе [3] в 1975—2000 г. двухсекторная структура ММП вращалась с периодом 26.86 сут. Учитывая орбитальное движение кометы, можно было ожидать встречи кометы с секторной границей ММП во время наблюдений. Такая встреча обычно сопровождается явлением отрыва хвоста и падением индукции магнитного поля кометы до нулевых значений. Мы не зафиксировали этих явлений для периода 15—22 ноября 1987 г. Возможно, это связано с высокой гелиоцентрической широтой кометы в период наблюдений (+34°) [16].

## ВЫВОДЫ

Оцифрованные с помощью сканера изображения комет подходят для фотометрической обработки с последующим использованием результатов фотометрии для сравнения с модельным распределением яркости в плазменном хвосте кометы. Для кометы C/1987 P1 Бредфильда получены значения ускорений, времени жизни, коэффициентов диффузии и индукции магнитного поля плазменного хвоста кометы, которые соответствуют значениям, полученным для других комет. Отклонения от средних значений модельных параметров и физических характеристик не превышают ожидаемых для средней точности фотографической фотометрии.

Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований в виде Гранта Президента Украины для молодых ученых.

1. *Абуладзе О. П.* Результаты исследования атмосферной экстинкции в Абастумани в 1968—1973 гг. // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1980.—№ 53.—С. 35—53.
2. *Андрук В. Н., Иванов Г. А., Погорельцев М. Т., Яценко А. И.* Об использовании сканера для определения координат и фотометрии звезд на пластинках программы ФОН // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—**21**, № 5.—С. 396—400.
3. *Васильева В. В., Макаров В. И., Глатов А. Г.* Циклы вращения магнитного поля Солнца и его активности // Солнце в эпоху смены знака магнитного поля Солнца. — С.-Пб.: Изд-во ГАО РАН, 2001.—С. 79—87.

4. *Брандт Дж.* Солнечный ветер. Введение в проблему. — М.: Мир, 1973.—207 с.
5. *Казанасмас М. С., Завершнева Л. А., Томак Л. Ф.* Атлас и каталог звездных величин фотоэлектрических стандартов. — Киев: Наук. думка, 1981.—217 с.
6. *Коноплева В. П., Назарчук Г. К., Шульман Л. М.* Поверхностная фотометрия комет. — Киев: Наук. думка, 1977.—268 с.
7. *Назарчук Г. К.* Анализ распределения поверхностной яркости в хвосте кометы 1956h // Астрометрия и астрофизика.—1969.—Вып. 4.—С. 77—99.
8. *Назарчук Г. К., Шульман Л. М.* Диффузионная модель хвоста кометы // Проблемы космической физики.—1968.—Вып. 6.—С. 11—24.
9. *Орлов А. Я.* Избранные труды. — Киев: Изд-во АН УССР, 1961.—Т. 2.—318 с.
10. *Сергеев А. В.* Измерение астрофотографий: от ИАНИ «ПАРСЕК» к «Звездочету» // Роль наземной астрометрии в «Post-Hipparcos» период: Тез. доп., Николаїв, 9—12 вересня 1996 р. — Николаїв, 1996.—С. 34—35.
11. *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. 269—276.
12. *Biermann L.* Kometenschweife und solar Korpuscularstrahlung // *Z. Astrophys.*—1951.—**29**.—P. 279—286.
13. *Brandt J. C.* Observations and dynamics of plasma tails // *Comets.* — Arizona: Univ. press, 1982.—P. 519—537.
14. *Cimati A.* Plasma tail of comet Bradfield 1987 s during 1987 October 19—20 // *Earth, Moon and Planets.*—1989.—**47**.—P. 91—103.
15. *Cremonese G., Fulle M.* A disconnection event in the ion tail of Comet Bradfield 1987s // *Astron. and Astrophys.*—1988.—**202**.—P. L. 13—L. 15.
16. *Kubachek D., Pittich E. M., Zvolankova J., et al.* Aberration angles of comet Bradfield 1987 XXIX plasma tail // *Contrib. Astron. Obs. Skalnat Pleso.*—1995.—**25**.—P. 83—89.
17. *Tsvetkov M. K., Stavrev K. Y., Tsvetkova K. P., et al.* The wide-field plate database: new development and applications // *Newsletter.*—1998.—**10**, N 1.—P. 10—16.
18. *Verkhoglyadova O. P., Kotsarenko N. Ya., Pas'ko V. P., Churyumov K. I.* Theory of large-scale stratification in cometary plasma tails // *Astron. Lett.*—1993.—**19**, N 5.—P. 335—352.

Поступила в редакцию 10.08.09