

УДК 523.64-35

Ю. В. Сизоненко¹, Н. Л. Шабас²

¹ Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03650 Киев, ул. Академика Заболотного 27

² Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченка
04053 Киев, ул. Обсерваторная 3

Моделирование распределения яркости плазменного хвоста кометы C/1976 R1 (Веста)

Выполнена поверхностная фотометрия снимков хвоста кометы C/1976 R1 (Веста), полученных во время максимального развития хвоста. Распределение яркости в основных потоках плазменного хвоста кометы сравнено с модельными расчетами. Для расчетов применена диффузионная модель плазменного хвоста. Найдены верхние оценки для времени жизни светящихся частиц и индукции магнитного поля в хвосте кометы, а также нижние оценки коэффициентов продольной и поперечной диффузии ионов.

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ЯСКРАВОСТІ ПЛАЗМОВОГО ХВОСТА КОМЕТИ C/1976 R1 (ВЕСТА), Сизоненко Ю. В., Шабас Н. Л. — Виконано поверхневу фотометрію знімків хвоста комети C/1976 R1 (Веста), отриманих під час максимального розвитку хвоста. Розподіл яскравості в основних потоках плазмового хвоста було порівняно з модельними розрахунками. Для розрахунків застосовано дифузійну модель плазмового хвоста. Знайдено верхні оцінки для часу існування світних частинок та індукції магнітного поля в хвості комети, а також нижні оцінки коефіцієнтів поздовжньої та поперечної дифузії.

NUMERICAL SIMULATION OF SURFACE BRIGHTNESS DISTRIBUTION IN THE ION TAIL OF THE COMET C/1976 R1 (WEST), by Sizonenko Yu. V., Schabas N. L. — Surface photometry of the comet C/1976 R1 (West) plates was carried out. The surface brightness distribution in the streams in the ion tail of the comet is compared to model calculations. The diffusion model of ion tails was used in the calculations. The upper limits of the lifetime of luminous particles and the magnetic field induction in the tail and the lower limits of the diffusion coefficients are estimated.

ВВЕДЕНИЕ

Комета C/1976 R1 (Веста) — одна из ярчайших комет XX века, наблюдалась в ее появлении 1975—1976 гг. многими астрономами, профессионалами и любителями. После прохождения перигелия комета продемонстрировала два хвоста: плазменный, состоящий из нескольких потоков и лучей, и пылевой хвост с концевыми синхронами. Результаты наблюдений пылевой

составляющей атмосферы кометы многократно интерпретировались [12—15], что позволило значительно расширить знания о кометном веществе. В тоже время исследованиям плазменного хвоста кометы посвящена всего две работы [7, 16], в которых рассмотрены особенности структуры хвоста. Ниже мы применим метод исследования распределения яркости в плазменном хвосте, для того чтобы получить некоторые характеристики ионной составляющей кометной атмосферы, а также индукцию магнитного поля хвоста кометы Веста.

НАБЛЮДЕНИЯ

Снимки кометы C/1976 R1 (Веста) получены Ю. В. Сизоненко 9 и 12 марта 1976 г. на пике Терскол с помощью фотографической камеры АФУ-75. Использовалась фотопленка «Изопанхром» типа 15-800 без фильтра; экспозиция составляла 3 мин. Для фотометрической обработки отобраны снимки № 5019а, № 5019в от 9 марта 1976 г. и № 5074 от 12 марта 1976 г. В табл. 1 приведены некоторые обстоятельства наблюдений кометы: УТ-моменты начала экспозиции, координаты ядра кометы, фазовый угол φ кометы, кометоцентрическая широта λ Земли, характеризующая положение картинной плоскости снимка относительно плоскости орбиты кометы; угол γ между проекциями вектора скорости кометы и продолженного радиуса-вектора кометы на картинную плоскость снимка.

Таблица 1. Обстоятельства наблюдений кометы Веста 1976 VI

Номер снимка	УТ, 1976, март	α_{1976}	δ_{1976}	φ , град	λ , град	γ , град
5019а	9.073746	21 ^h 33 ^m 13.0 ^s	8°16'46"	87.7	10.5	223.9
5019в	9.080404	21 33 11.0	8 16 57	87.6	10.5	223.9
5074	12.083876	21 23 15.0	9 25 48	79.5	11.5	219.0

На снимках видны изображения кометных хвостов I и II типов длиной около 6°. Хвост I типа состоит из нескольких лучей разной длины и двух основных потоков. Ранее структура хвостов кометы исследовалась Ю. В. Сизоненко по контрастным фотокопиям снимков кометы [7]. Проектирование основных структурных деталей хвостов кометы на орбитальную плоскость кометы позволило найти углы между продолженным радиусом-вектором кометы и проекциями осей структурных деталей хвостов. Оказалось, что ось хвоста I типа весьма близка к продолженному радиусу-вектору, что свидетельствует о значительных отталкивательных ускорениях вещества хвоста, характерных для заряженных частиц [2]. О взаимодействии заряженных частиц хвоста с межпланетным магнитным полем свидетельствует и то, что в двух основных потоках хвоста I типа на наших снимках были обнаружены волновые структуры. Следовательно, даже не располагая никакой дополнительной информацией, можно сделать вывод о плазменной природе вещества хвоста.

ПОВЕРХНОСТНАЯ ФОТОМЕТРИЯ СНИМКОВ КОМЕТЫ

Фотометрия снимков кометы Веста выполнена на двухкоординатном автоматическом фотометре АЦМФ-ХУ ГАО НАН Украины. Фотометрировалась часть снимка размером 116.7'×46.7', отображающая хвост I типа. Сканирование выполнялось с шагом 50 мкм по обеим координатам с прямоугольной диафрагмой 50×50 мкм, что соответствует разрешению 0.23'×0.23'. При

обработке результатов поверхностной фотометрии мы применили методику калибровки и стандартизации снимков, описанную в работе [8]. Так как эмиссии хвоста I типа находятся в коротковолновой части спектра, а постоянная контраста фотопленки «Изопанхром» типа 15-800 зависит от длины волны, то для калибровки снимков использованы марки синего радиолумinesцентного эталона яркости (в работе [9] для такой калибровки были использованы марки зеленого эталона). При стандартизации снимков учтено поглощение света объективом АФУ-75 и среднее для сезона наблюдений атмосферное поглощение света. Обработка результатов фотометрии включала в себя фильтрацию массива фотометрических отсчетов двумерным медианным фильтром с окном 5×5 пиксел, что позволило избавиться от части изображений звезд, а также улучшить отношение сигнал/шум для фотометрических отсчетов. Для того чтобы получить реальное распределение яркости, мы учли фотометрическую ошибку поля, неравномерность фона неба и разницу атмосферного поглощения вдоль хвоста кометы, следуя методике учета редуций поверхностной фотометрии, описанной в работе [4]. После завершения обработки мы построили фотометрическую карту распределения поверхностной яркости в плазменном хвосте кометы Веста. Ось M этой карты ориентирована вдоль проекции продолженного радиуса-вектора кометы на картинную плоскость, а ось N направлена в сторону увеличения абберационного угла хвоста. Для интерпретации результатов поверхностной фотометрии с помощью диффузионной модели плазменного хвоста [6] результаты фотометрии необходимо представить в виде продоль-

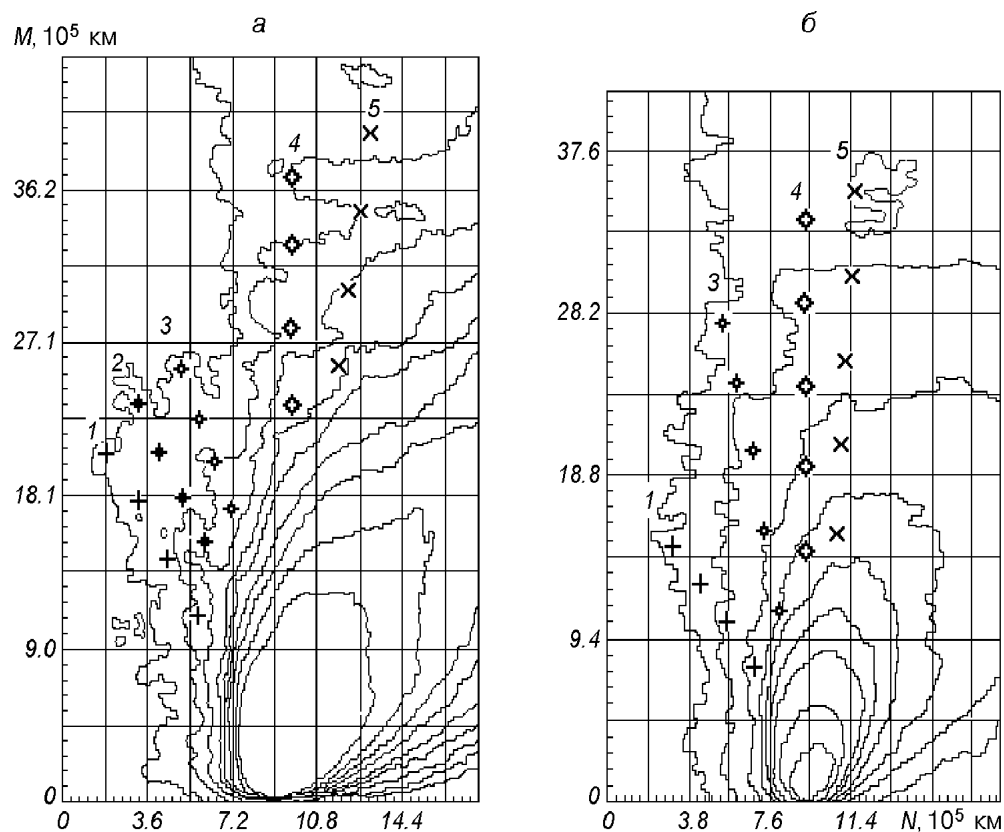


Рис. 1. Системы изофот для плазменного хвоста кометы Веста C/1975 R1: а — снимок № 5019а от 09.03.76 г., б — снимок № 5074 от 12.03.76 г. Специальными значками (1—5) указаны направления продольных фотометрических разрезов хвоста. Уровни изофот заданы в абсолютных энергетических единицах яркости и близки для обеих систем изофот

ных и поперечных разрезов основных потоков хвоста. Получить такие разрезы, располагая фотометрической картой распределения яркости, не представляет особого труда.

На рис. 1 показаны системы изофот, отображающие распределение яркости в плазменном хвосте кометы Веста на снимке № 5019а от 09.03.76 г. и снимке № 5074 от 12.03.76 г. На рис. 1 специальными значками нанесены направления продольных фотометрических разрезов хвоста. Продольные разрезы начинаются на таком расстоянии от головы кометы, где вклад излучения хвоста II типа пренебрежимо мал. На снимках 9 марта выделено пять продольных фотометрических разрезов, на снимке 12 марта — четыре. Из работ [7, 16] известно, что углы между структурными деталями хвоста I типа и проекцией продолженного радиуса-вектора с 9 по 12 марта практически не изменяются, за исключением луча 3 (рис. 1), который исчез 12 марта. Поэтому можно считать, что полученные фотометрические разрезы на снимках 9 и 12 марта относятся к одним и тем же структурным образованиям плазменного хвоста кометы Веста.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ ПЛАЗМЕННОГО ХВОСТА

Для анализа распределения поверхностной яркости использована диффузионная модель плазменного хвоста [6]. Эта модель была проверена при исследовании плазменных хвостов нескольких комет [5, 10]. Основные предположения модели таковы. Считается, что истечение кометного вещества, двигающегося в плазменном хвосте, началось бесконечно давно и может быть описано функцией Грина для мгновенного источника. Мощность C точечного (по сравнению с хвостом) источника постоянна. Движение центра тяжести каждого мгновенно испущенного облака частиц вдоль оси хвоста равноускоренное, а процесс взаимодействия отдельных кометных ионов с солнечным ветром считается макроскопически стохастическим. Тогда движение отдельного иона можно представить суперпозицией диффузии и сноса в хвост. Химический состав светящихся частиц (ионов) принят однородным и постоянным вдоль хвоста, что позволяет считать поверхностную яркость пропорциональной поверхностной плотности светящихся частиц $I = kn(x, y)$. Число светящихся частиц в мгновенно испущенном облаке экспоненциально уменьшается с возрастом в результате ионизации и диссоциации.

Исходя из этих предположений, запишем выражение для распределения поверхностной яркости, вывод которого можно найти в работах [6, 4]:

$$I(X, Y) = k \frac{C}{4\pi\sqrt{D_{\parallel}^* D_{\perp}}} \int_0^{\infty} \exp \left[-\frac{(X - \Gamma\theta)^2 + Y^2}{\theta} - \theta \right] \frac{d\theta}{\theta}. \quad (1)$$

Поверхностная яркость плазменного хвоста зависит от одного безразмерного параметра $\Gamma = a\sqrt{\tau^3}/D_{\parallel}^* \cos\beta$, связанного с ускорением ионов a , и трех масштабных множителей $L_{\parallel} = 2\sqrt{D_{\parallel}^* \tau}$, $L_{\perp} = 2\sqrt{D_{\perp} \tau}$ и $K = k \frac{C}{4\pi\sqrt{D_{\parallel}^* D_{\perp}}}$.

В приведенных выше выражениях координаты точек плазменного хвоста на картинной плоскости x , y и переменная интегрирования t для удобства преобразованы к безразмерному виду $X = x/L_{\parallel}$, $Y = y/L_{\perp}$, $\theta = t/(2\tau)$; τ — среднее время жизни светящихся частиц, $D_{\parallel}^* = D_{\parallel} \cos^2\beta + D_{\perp} \sin^2\beta$ — коэффициент диффузии вдоль оси хвоста, отнесенный к картинной плоскости, D_{\perp} , D_{\parallel} — поперечный и продольный коэффициенты диффузии; β — угол между осью хвоста в пространстве и ее проекцией на картинную плоскость.

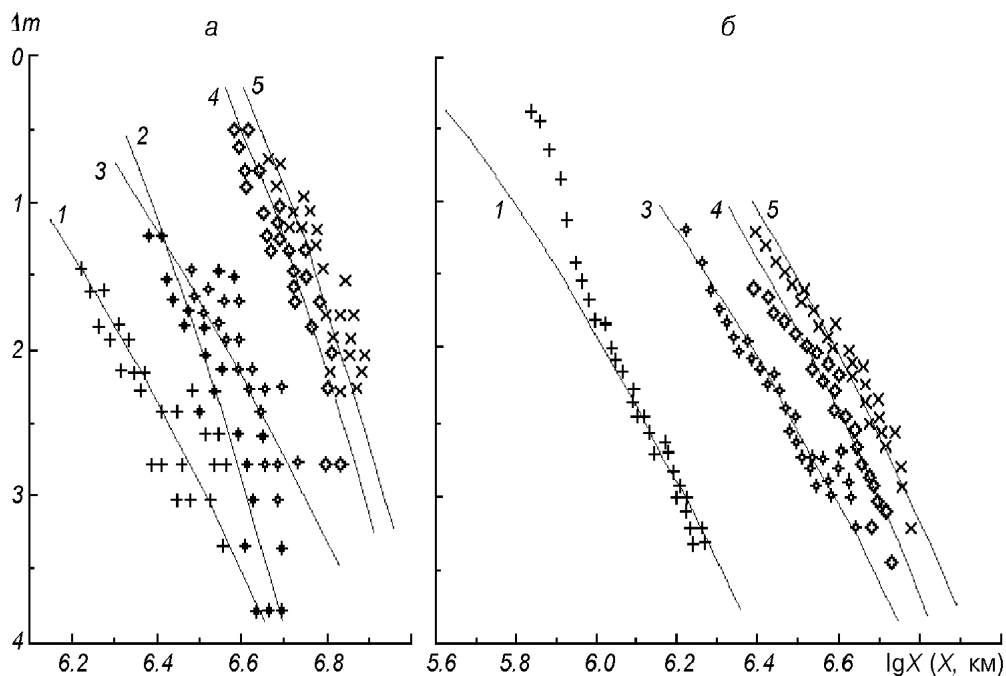


Рис. 2. Сопоставление продольных фотометрических разрезов 1—5 с кривыми $\Delta m = -2.5\lg\Phi(X, 0, \Gamma)$: а — снимок № 5019а от 09.03.76 г., б — снимок № 5074 от 12.03.76 г. Нумерация разрезов соответствует рис. 1; сплошные линии — рассчитанные кривые

Прологарифмировав (1), превратим постоянный множитель этого выражения в постоянное слагаемое, что позволит путем простого сдвига начала координат добиваться совпадения наблюдаемого фотометрического разреза с одной из однопараметрических кривых семейства

$$-2.5\lg I = \text{const} - 2.5\lg\Phi(X, Y, \Gamma), \quad (2)$$

где

$$\Phi = \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{(X - \Gamma\theta^2)^2 + Y^2}{\theta} - \theta\right) \frac{d\theta}{\theta}$$

— несобственный интеграл, вычисляемый численно. В работе [10] предложен новый, более удобный по сравнению с [4], способ вычисления значений $\Phi(X, Y, \Gamma)$. Работа с моделью сводится к выбору таких значений параметра Γ и масштабных множителей, которые при подстановке в (2) давали бы распределение яркости хвоста кометы, близкое к наблюдаемому. Сначала путем подбора находим такие Γ и L_{\parallel} , которые обеспечивали бы совпадение кривой $-2.5\lg\Phi(X, 0, \Gamma)$ с одним из продольных фотометрических разрезов хвоста. На рис. 2 показан результат сопоставления продольных фотометрических разрезов для снимков № 5019а и № 5074 с кривыми $\Delta m = -2.5\lg\Phi(X, 0, \Gamma)$.

Затем, используя найденные значения Γ и L_{\parallel} , путем подбора множителя L_{\perp} добиваемся совпадения i -го поперечного разреза выбранного потока с одной из параметрических кривых $-\lg\Phi(X, Y_i, \Gamma)$. В табл. 2 приведены найденные параметры диффузионной модели плазменного хвоста Γ , L_{\parallel} и L_{\perp} для всех обработанных снимков. Сопоставление параметров моделирования для снимков № 5019а и № 5019в, которые отображают один и тот же

Таблица 2. Параметры диффузионной модели для основных потоков плазменного хвоста кометы Веста C/1975 R1 9 и 12 марта 1976 г.

Номер луча	Сн. № 5019а (UT = 9.07374)			Сн. № 5019в (UT = 9.08040)			Сн.№ 5074 (UT = 12.08388)		
	Г	L , 10 ⁶ км	L _⊥ , 10 ⁵ км	Г	L , 10 ⁶ км	L _⊥ , 10 ⁵ км	Г	L , 10 ⁶ км	L _⊥ , 10 ⁵ км
1	0.5	0.776	0.833	0.5	0.912	0.812	0.5	0.621	1.145
2	0.1	1.288	0.851	0.1	1.0	0.851	—	—	—
3	0.5	1.349	0.832	0.3	1.175	0.977	0.7	1.135	1.202
4	0.1	2.188	0.977	0.2	1.841	1.148	0.5	1.365	1.610
5	0.1	2.570	0.955	0.1	2.410	1.412	0.5	1.698	2.393

плазменный хвост (между моментами экспозиции меньше 10 мин), свидетельствует как об удовлетворительной точности результатов поверхностной фотометрии, так и о применимости диффузионной модели к плазменному хвосту кометы Веста.

Для оценки коэффициентов диффузии D_{\perp} , $D_{||}$, среднего времени жизни светящихся частиц τ и индукции магнитного поля B использован подход, предложенный [5]. Сначала нужно найти нижнюю оценку ускорения ионов:

$$a \geq \gamma \frac{M_s}{r^2} (1 + \mu), \quad (3)$$

где γ — гравитационная постоянная, M_s — масса Солнца, r — гелиоцентрическое расстояние, μ — эффективное ускорение частицы хвоста. Согласно механической теории кометных форм для хвостов I типа полагаем $1 + \mu \geq 10$. Пользуясь нижним предельным значением найденным из (3), и соотношениями, связывающими найденные выше параметры моделирования с искомыми величинами [10], мы нашли для каждого моделируемого потока плазменного хвоста оценки верхнего предела времени жизни τ и индукции магнитного поля B , а также нижние оценки коэффициентов диффузии D_{\perp} , $D_{||}$. Для оценки максимального значения индукции магнитного поля приня-

Таблица 3. Оценки некоторых физических параметров основных потоков плазменного хвоста кометы Веста (C/1975 R1)

Номер луча	τ , 10 ⁵ с	$D_{ }$, 10 ¹⁷ см ² /с	D_{\perp} , 10 ¹⁷ см ² /с	B , нТ
Снимок 5019а, март 9.07374; $a \geq 25.6$ см/с ²				
1	0.275	0.547	0.675	32.68
2	0.158	2.618	1.246	11.05
3	0.362	1.255	0.477	25.79
4	0.206	5.796	1.163	7.69
5	0.237	7.378	1.060	7.15
Снимок 5019в, март 9.08040; $a \geq 25.6$ см/с ²				
1	0.298	0.698	0.595	30.92
2	0.140	1.789	1.111	14.14
3	0.262	1.315	0.855	18.80
4	0.268	3.150	0.820	12.41
5	0.217	6.693	2.356	5.02
Снимок 5074, март 12.08388; $a \geq 18.9$ см/с ²				
1	0.286	0.336	1.619	26.45
2	—	—	—	—
3	0.459	0.702	1.252	21.14
4	0.425	1.095	1.540	15.29
5	0.471	1.520	2.980	9.39

то значение температуры кометной плазмы $T \leq 2 \cdot 10^6$ К. Оценки физических параметров плазменного хвоста приведены в табл. 3. Из-за неопределенности оценки максимального ускорения ионов в хвосте мы не нашли парные оценки искомых величин. Несмотря на это, полученные величины можно использовать для некоторых качественных выводов, что мы и сделаем ниже.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные величины лучше сопоставить на графике. На рис. 3 представлены значения индукции магнитного поля B и среднего времени жизни τ светящихся частиц для каждого исследованного потока плазменного хвоста кометы Веста 9 и 12 марта 1976 г. Разброс между значениями B и τ для одних и тех же лучей снимков № 5019a и № 5019b можно считать наглядной оценкой точности этих величин, так как они относятся к мало изменившемуся за время между экспозициями хвосту. С учетом такой оценки точности можно сделать вывод о незначительно изменившихся за время наблюдений значениях индукции магнитного поля и возросшем времени жизни светящихся частиц.

Увеличение τ произошло в силу увеличения гелиоцентрического расстояния кометы. Полученные оценки τ недостаточно точны, а интервал изменения гелиоцентрического расстояния r слишком мал, чтобы определить, соответствовало ли изменение времени жизни ионов закону $\tau \propto r^2$. Незначительное изменение величины B также будет понятно, если вспомнить о почти не изменившейся структуре плазменного хвоста кометы. Этот факт, а также низкие значения скорости солнечного ветра для моментов наблюдений [1, 7], могут свидетельствовать в пользу предположения о стационарном характере потока солнечного ветра в начале марта 1976 г. Этому предположению не противоречит и отсутствие сколь-нибудь значительных событий на Солнце в эпоху окончания XX цикла солнечной активности. 9 марта для потока 2, исчезнувшего 12 марта, получены низкие значения B , что может говорить о постепенной перестройке структуры

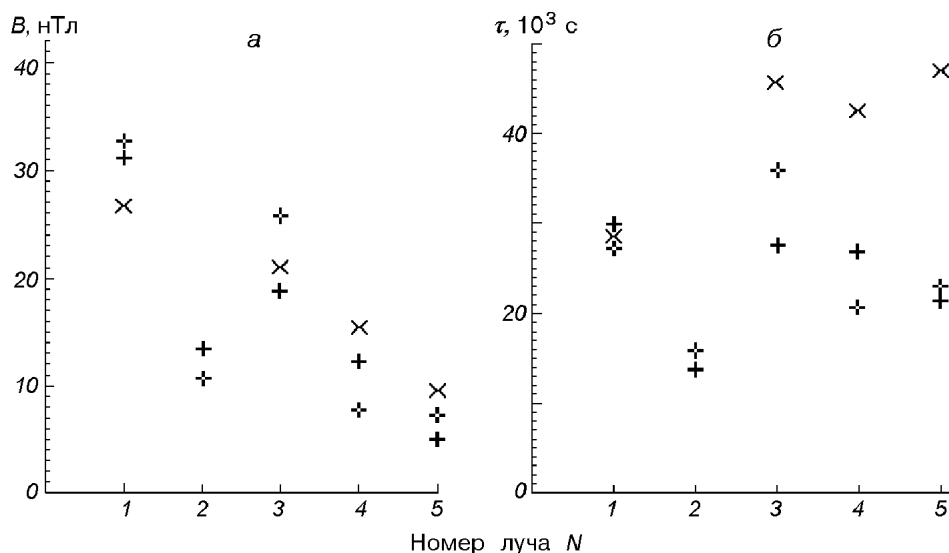


Рис. 3. Физические параметры диффузионной модели плазменного хвоста кометы Веста: а — индукция B магнитного поля, б — среднее время τ жизни светящихся частиц. Значения физических параметров, полученные для каждого из снимков, указаны особыми значками

магнитного поля кометы. Характерно, что коэффициенты диффузии для этого потока значительно больше коэффициентов диффузии для соседних потоков 1 и 3, что и можно ожидать для исчезающего, расплывающегося потока. Заметное уменьшение индукции магнитного поля от периферии к оси плазменного хвоста также находит объяснение в теории взаимодействия плазменного хвоста кометы с потоком солнечного ветра [3, 11], которая предсказывает образование магнитного барьера на границе плазменного хвоста. Наши оценки индукции магнитного поля в плазменном хвосте кометы Веста значительно ниже величины B , полученной при непосредственных измерениях в хвосте кометы Галлея космическими аппаратами (50—75 нТ). Возможно, это связано с нахождением кометы Веста в области с низкой напряженностью межпланетного магнитного поля (вблизи секторной границы).

1. Голубев В. М. Колебания оси плазменного хвоста кометы Уэст и скорости солнечного ветра // *Кометный циркуляр*.—1977.—№ 215.—С. 3.
2. Добровольский О. В. *Кометы*. — М.: Наука, 1966.—287 с.
3. Дубинин Э. М., Израйлевич П. Л., Подгорный И. М. Распределение магнитного поля в хвосте кометы Галлея, вытекающее из кинематики плазменного образования // *Астрон. журн.*—1982.—59, № 5.—С. 1006—1011.
4. Коноплева В. П., Назарчук Г. К., Шульман Л. М. *Поверхностная фотометрия комет*. — Киев: Наук. думка, 1977.—266 с.
5. Назарчук Г. К. Анализ распределения поверхностной яркости в хвосте кометы 1956 h // *Физика комет*. — Киев: Наук. думка, 1969.—С. 77—89.
6. Назарчук Г. К., Шульман Л. М. Диффузионная модель хвоста кометы // *Проблемы космич. физики*.—1968.—Вып. 3.—С. 11—19.
7. Сизоненко Ю. В. Структура хвостов кометы Веста 1976 VI // *Астрометрия и астрофизика*.—1981.—Вып. 45.—С. 46—52.
8. Сизоненко Ю. В. Стандартизация астрономических снимков с помощью радиоломинесцентных эталонов яркости // *Астрометрия и астрофизика*.—1984.—Вып. 51.—С. 90—97.
9. Сизоненко Ю. В., Сизоненко Т. А. Поверхностная фотометрия кометы Веста 1976 VI. — Киев, 1992.—16 с.—(Препринт / АН Украины. Главная астрономическая обсерватория; ГАО-92-9Р).
10. 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.
11. Ip W.-H., Axford W. I. Theories of physical processes in the cometary comae and ion tails // *Comets* / Ed. by L. L. Wilkening. — Tucson, Arizona, 1982.—P. 588—634.
12. Michalsky J. J. Polarimetry of comet West 1976 VI // *Icarus*.—1981.—47, N 3.—P. 388—396.
13. Ney E. P., Merrill K. M. Comet West and the scattering function of cometary dust // *Science*.—1976.—194, N 4269.—P. 1051—1053.
14. Nishioka K., Saito K., Watanabe I., et al. Photographic observations of the synchronic bands in the comet West 1976 VI // *Publ. Nat. Astron. Obs. Jap.*—1992.—2, N 4.—P. 602—621.
15. Sekanina Z., Farrell J. A. Comet West 1976 VI: discrete bursts of dust, split nucleous, flare-ups, and particle evaporation // *Astron. J.*—1978.—83, N 12.—P. 1675—1680.
16. Surdej J., Surdej A. Orientation et structure des differetes composantes dans la queue de la comete West (1975 n) // *Astron. and Astrophys.*—1977.—57, N 1-2.—P. 257—264.

Поступила в редакцию 18.12.01