

УДК 523.64

Д. И. Шестопапов, А. А. Атаи

Исследование газо- и пылевыведения в комете Галлея по результатам наземной спектрофотометрии

По спектрофотометрическим наблюдениям кометы Галлея, выполненным в Шемахинской астрофизической обсерватории АН АзССР (декабрь 1985 г.—январь 1986 г.), проведен расчет пыле- и газопроизводительности Q в рамках модели Хазера. С привлечением аналогичных данных, полученных в обсерватории Катания (Италия) в ноябре—декабре 1985 г., исследовано изменение этих величин с приближением кометы к Солнцу. Построены диаграммы $Q(\text{CN}) - Q(\text{C}_2)$ и $Q(\text{CN}) - Q(\text{C}_3)$ для кометы Галлея, и 17 периодических и непериодических комет. Показано, что ядро кометы Галлея однородно по составу; по этому признаку она существенно не выделяется среди других исследованных комет. Данный вывод подтверждается также сравнением фотометрических характеристик пыли кометы, полученных наземными и космическими средствами наблюдений.

INVESTIGATION OF THE GAS AND DUST PRODUCTION IN COMET HALLEY BY GROUND-BASED SPECTROPHOTOMETRY, by Shestopapov D. I., Atai A. A.—Using Haser model we have calculated CN, C₂, C₃ and dust production rate Q in comet Halley based on spectrophotometric observations made at the Shemakha Observatory in December, 1985—January, 1986. The change of these values connected with the approach of the comet to the Sun is studied. The diagrams $Q(\text{CN}) - Q(\text{C}_2)$ and $Q(\text{CN}) - Q(\text{C}_3)$ have been constructed for comet Halley and 17 periodic and non-periodic comets. It is shown that the core of comet Halley is compositionally homogeneous and from this point of view it does not differ essentially from other comets investigated. This conclusion is also confirmed by the comparison of dust photometric characteristics obtained from ground-based and space observations.

Введение. В основу определения скорости образования родительских молекул CN, C₃, C₂ (а также скорости пылевыведения) в комете Галлея положены наши спектрофотометрические наблюдения кометы до прохождения ею перигелия. Расчет выполнен согласно модели Хазера, которая описывает пространственное распределение данного компонента в оболочке кометы.

Распределение энергии в спектре кометы Галлея получено в Шемахинской астрофизической обсерватории АН АзССР в декабре 1985 г.—январе 1986 г. (десять ночей). Наблюдения выполнялись на

Газо- и пылепроизводительность кометы Галлея

Дата	r, а. е.	Δ, а. е.	φ, град	R, 10 ⁴ км	lg Q		
					CN	C ₃	C ₂
06/07.12.1985	1.39	0.69	140	3.45	25.94	24.92	26.72
08/09.12.1985	1.36	0.72	137	3.60	25.97	24.91	26.78
09/10.12.1985	1.34	0.74	135	3.70	26.62	25.63	—
30/31.12.1985	1.02	1.14	126	5.70	26.51	25.27	27.14
31/01.01.1986	1.01	1.16	125	5.80	26.38	25.19	—
02/03.01.1986	0.98	1.20	127	6.00	26.76	25.44	27.40
04/05.01.1986	0.95	1.24	128	6.20	26.62	25.47	27.34
05/06.01.1986	0.93	1.25	129	6.25	26.81	25.50	27.50
06/07.01.1986	0.92	1.27	130	6.35	26.57	25.03	27.19
08/09.01.1986	0.89	1.31	131	6.55	26.71	25.45	27.45

Примечание. Угол рассеяния $\phi = 180^\circ - \alpha$ (α — угол фазы); R — размер диафрагмы спектрофотометра в рамках модели Хазера; Q_d — пылепроизводительность, оцененная по интенсивности континуума в полосе излучения указанных молекул; I — интенсивность в континууме.

70-см телескопе АЗТ-8, в фокусе Кассегрена ($F=11$ м) которого установлен фотоэлектрический сканирующий спектрометр системы Сейя — Намиока. Разрешение большинства спектров составляло 2.48 нм в области $\lambda\lambda$ 380—740 нм; 9 декабря 1985 г. и 1 января 1986 г. спектры кометы получены в области $\lambda\lambda$ 380—470 нм с разрешением 0.98 нм. Время наблюдения кометы в течение каждой ночи не превышало 1 ч. Размер диафрагмы спектрофотометра приведен в таблице. Более подробные сведения о характеристиках аппаратуры и условиях наблюдения кометы приведены в [3].

Расчетные формулы. В модели Хазера изотропный поток молекул первичного газа Q и наблюдаемое содержание вторичных молекул n внутри цилиндра радиусом R , ось которого проходит через ядро кометы, связаны соотношением [5]:

$$n = QRF(\mu, x)/v.$$

Как и в работе [9], принималось в первом приближении, что радиальная скорость истечения первичных молекул $v=0.58/\sqrt{r}$. Функция $F(\mu, x)$ выражается через соответствующие цилиндрические функции K_0 и K_1 следующим образом:

$$F(\mu, x) = \int_x^{\mu x} K_0(y) dy + \frac{1}{x} \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) + K_1(\mu x) - K_1(x),$$

где μ — отношение шкал расстояний дочерних и родительских молекул; x — отношение R к шкале расстояний дочерних молекул. Выражения для шкал родительских и дочерних молекул (в км) в форме, отражающей их зависимость от гелиоцентрического расстояния (в а. е.), взяты из [12]: для CN — $1.7 \cdot 10^4 r^2$ и $3.0 \cdot 10^5 r^2$; для C_3 — $3.1 \cdot 10^3 r^2$ и $1.45 \cdot 10^5 r^2$; для C_2 — $2.5 \cdot 10^4 r^{2.5}$ и $1.20 \cdot 10^5 r^2$.

Полное число молекул CN, C_3 и C_2 , рассчитанное нами, приведено в [3]. Чтобы исключить возможные систематические расхождения результатов, содержания двух- и трехатомного углерода пересчитаны по стандартной формуле, которая, как правило, используется при интерпретации фотометрических наблюдений комет [15]:

$$\lg n = \lg E + 27.449 + 2 \lg(r\Delta) - \lg g,$$

где E — измеренная освещенность в полосе излучения данной молекулы (в системе СГС); Δ и r — гео- и гелиоцентрическое расстояния кометы

lg Q_d			$W(C_2)$, нм	lg E (Вт·м ⁻²)			lg I (Вт·м ⁻² ·м ⁻¹)		
443.8	480.9	523.0		CN	C_3	C_2	443.8	480.9	523.0
10.21	10.32	10.31	95.3	-12.06	-12.01	-11.89	-7.89	-7.77	-7.79
10.11	10.24	10.27	115.8	-12.01	-12.58	-11.86	-7.95	-7.82	-7.79
—	—	—	—	-11.35	-11.86	—	—	—	—
10.14	10.28	10.25	118.3	-11.45	-12.29	-11.48	-7.47	-7.33	-7.36
—	—	—	—	-11.58	-12.77	—	—	—	—
10.20	10.36	10.37	145.8	-11.17	-12.15	-11.18	-7.35	-7.19	-7.18
10.59	10.63	10.72	64.7	-11.10	-12.11	-11.11	-6.93	-6.89	-6.80
10.62	10.66	10.67	76.0	-11.04	-12.09	-11.01	-6.87	-6.83	-6.80
10.25	10.34	10.35	73.4	-11.27	-12.56	-11.29	-7.22	-7.14	-7.12
10.48	10.56	10.62	79.4	-11.10	-12.15	-11.10	-6.96	-6.88	-6.81

рофотометра (соответствующий расстоянию Земля — комета); Q — газопроизводительность в нуума; $W(C_2)$ — эквивалентная ширина полосы молекулы C_2 $\lambda=516.5$ нм; E — измеренная

(в а. е.) соответственно; g — эффективность флюоресценции при $r = 1$ а. е. Мы использовали $\lg g(C_2) = -12.657$ и $\lg g(C_3) = -12.00$. Напомним, что расчет полного количества молекул CN в [3] выполнен по формуле

$$n = E_k \Delta^2 / g_T,$$

где g_T — эффективность флюоресценции для молекул CN, зависящая от гелиоцентрического расстояния и гелиоцентрической скорости кометы [16].

Измеряя интенсивность в континууме, можно оценить скорость пылевыведения в комете (при изотропном рассеянии света пылью) [5]:

$$Q_d = \text{const} (I r^2 / R).$$

Константа в этой формуле приравняется единице, а значения Q_d даются в произвольных единицах и используются только для относительных оценок.

Мерой отношения газо- и пылевыведения в комете может служить эквивалентная ширина полосы C_2 ($\lambda = 516.5$ нм) [15]:

$$W \approx \Delta \lambda \sum_{i=1}^N (i_p / i_k - 1),$$

где i — частное от деления интенсивностей в спектрах кометы и Солнца (индексы p и k обозначают полосу излучения и континуум); N — число точек вдоль полосы излучения; $\Delta \lambda$ — спектральное разрешение. Поскольку уровень истинного континуума из-за блендирования крыльев полос излучения находится ниже определенного нами по минимумам спектроэнергетической функции кометы, то можно оценить только нижний предел величины W . Пыле- и газопродуктивность кометы Галлея и другие сопутствующие характеристики даны в таблице.

Особенности газо- и пылевыведения в комете Галлея. Рассчитанные газопродуктивность (CN, C_2 , C_3) и пылепродуктивность кометы Галлея в зависимости от гелиоцентрического расстояния показаны на рис. 1. На этом же рисунке приведены аналогичные данные из [11] по наблюдениям кометы Галлея в ноябре — декабре 1985 г. в обсерватории Катания (Италия). Таким образом, можно проследить вариации газо- и пылевыведения в комете Галлея на расстояниях 1.79—0.89 а. е.

Даты 6, 8 декабря 1985 г. — общие для системы данных Шемаха — Катания, что позволяет оценить сходимость независимых измерений. Авторы [11] выполнили фотометрические наблюдения кометы с помощью стандартных фильтров с привязкой к звездам-стандартам, рекомендованным IHW. По-видимому, в основном из-за различий в методах наблюдений систематические расхождения составляют 10—15 %. Как видно из рис. 1, они сравнимы с рассеянием данных от почти к почти в обеих сериях измерений. Точка при $\lg r = 0.13$ на всех графиках находится за уровнем ошибки средней линии регрессии. Это связано с тем, что в ночь с 9 на 10 декабря мы наблюдали вспышку блеска кометы [3], в результате которой произошло резкое увеличение газопродуктивности (CN, C_2 , C_3).

Изменение скорости образования молекул рассматриваемых газов в комете Галлея с уменьшением гелиоцентрического расстояния пропорционально r^{-n} . Значения n вычислены методом наименьших квадратов на интервале изменения r , который охватывает обе серии измерений: $n = 3.5 \pm 0.3$ для CN; $n = 3.4 \pm 0.3$ для C_2 ; $n = 1.8 \pm 0.2$ для C_3 . Таким образом, скорости образования молекул CN и C_2 практически совпадают и остаются неизменными на гелиоцентрическом расстоянии примерно 2 а. е. и расстоянии вдвое меньшем.

Изменение газопродуктивности C_3 за весь период наблюдений также постоянно, причем показатель степени n близок к 2. Другими

словами, она пропорциональна потоку поглощенного солнечного излучения. Значения $n > 2$ (как в случае CN и C_2) не являются исключительными для комет, хотя окончательного объяснения пока не предложено (обстоятельная дискуссия по этому поводу приведена в [4]). Можно, конечно, допустить, что родительские молекулы, из которых происходят C_3 и CN, C_2 , отличаются по химическому составу. Однако надо иметь в виду, что речь идет о газах, для которых легко выполнить фотометрические измерения, но они относятся к малым компонентам по отношению к общему количеству летучих составляющих атмосферы кометы. Поэтому допустимо также, что C_2 , CN и C_3 являются лишь «осколками» многоступенчатых фотохимических реакций. Правда, в таком случае модель Хазера представляет собой грубое приближение.

Совершенно иначе происходит пылевыделение в комете Галлея с приближе-

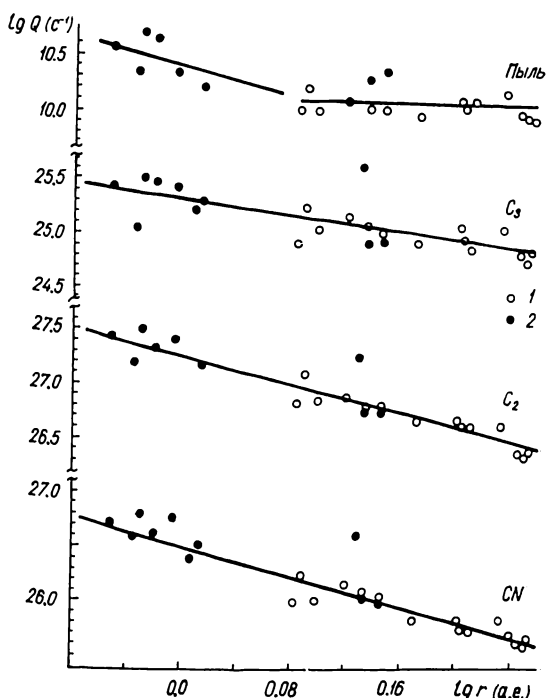


Рис. 1. Производительность газа и пыли в комете Галлея в зависимости от гелиоцентрического расстояния: 1 — данные [11]; 2 — наблюдения авторов

нием ее к Солнцу. С учетом ошибок измерения функцию $Q_d(r)$ можно изобразить в виде двух отрезков прямых. На интервале $1.21 < r < 1.79$ а. е. производительность пыли постоянна, на интервале $0.89 < r < 1.21$ а. е. величина $Q_d \propto r^{-3.5 \pm 1.1}$.

Равновесная температура ядра кометы с приближением ее к Солнцу увеличивается по закону, близкому к $r^{-1/2}$. Полученная зависимость $Q_d(r)$ для кометы Галлея определяется, по-видимому, не только температурой ядра, но и количеством активных зон эмиссии пыли на его поверхности.

Интересно сравнить скорости образования рассматриваемых молекул в комете Галлея и в других кометах. Для этого величины $Q(C_2)$ и $Q(C_3)$ сопоставлялись с $Q(CN)$ для 18 комет (в том числе и кометы Галлея). Отметим, что данные рис. 2 нельзя считать однородными (наблюдения выполнялись на разных инструментах, в разные годы, использовались различные звезды-стандарты и т. п.). Кроме того, кометы — существенно нестационарные объекты. Тем не менее между исследуемыми характеристиками отчетливо наблюдается корреляция: рассеяние точек составляет в среднем один порядок на интервале изменения величин, равном четырем порядкам.

Короткопериодические кометы обладают систематически меньшими значениями газопроизводительности: $Q(CN) \sim 10^{24} - 3 \cdot 10^{25} \text{ с}^{-1}$. Используются все определения за период наблюдений следующих периодических комет: Кроммелина 1818 I [14], Стефана — Отермы 1980 X [15], Тутля 1980 XIII, Копфа 1983 [12], Д'Арре 1976 XI, Григга — Шеллерупа 1977 VII, Энке 1977 XI, Черных 1978 [8], Вилда 2 1978 XI, Ашбука — Джексона 1978 XIV, Ханеды — Кампоса 1978 XX [7] и Джакобини — Циннера 1985 XII [13].

Бóльшие значения Q представлены долгопериодической кометой Галлея (наши данные и [11]) и неперIODическими кометами Когоутека 1973 XII [5], Брэдфилда 1979 X [9], Остина 1982 VI [12], Мейера 1979 IX [7], Веста 1976 VI [10]. Интервал гелиоцентрических расстояний, на котором наблюдались кометы исследуемой выборки, составляет 0.4—3 а. е. Безусловно, с приближением кометы к Солнцу активность ее увеличивается. Однако утверждать, что все кометы на данном гелиоцентрическом расстоянии должны иметь одинаковую газопроизво-

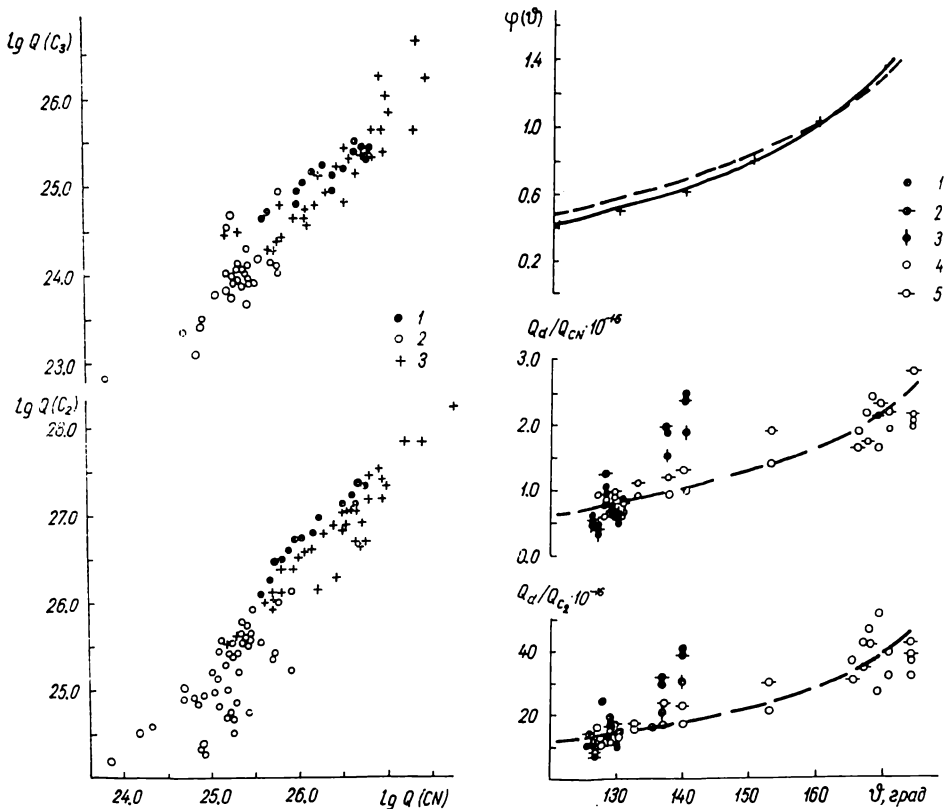


Рис. 2. Производительность родительских молекул C_3 и C_2 в зависимости от газопроизводительности родительских молекул CN: 1 — комета Галлея; 2 — короткопериодические кометы; 3 — неперIODические кометы

Рис. 3. Фотометрическая функция пыли в атмосфере кометы Галлея. Расчет Q_a выполнен по измерениям в континууме спектра кометы на следующих длинах волн (в нм): 1—480.9; 2—523.0; 3—443.8 (наблюдения авторов); 4—484.5; 5—365.0 (данные [11]). Нормированная фотометрическая функция (единица в точке $\varphi=160^\circ$) показана штриховой линией для зависимости Q_a/Q_{C_2} от φ ; сплошной линией для зависимости Q_a/Q_{CN} от φ ; крестиками — по данным КА «Вега-1»

дительность, нельзя. Например, в диапазоне $Q(CN) \sim 3 \cdot 10^{25} - 3 \cdot 10^{26} \text{ с}^{-1}$ располагаются кометы, наблюдавшиеся на гелиоцентрическом расстоянии 0.7 (Остина), 2.3—2.8 (Мейера), 0.8—1.8 а. е. (Галлея). Вместе с тем для существования зависимостей $Q(CN) - Q(C_2)$ и $Q(CN) - Q(C_3)$ не является решающим, на каком гелиоцентрическом расстоянии был измерен блеск комет.

Из приведенных данных можно заключить, что скорость образования рассматриваемых молекул определяется в основном физическими свойствами ядра. Это вытекает из того, что отношения $Q(C_2)/Q(CN)$ и $Q(C_3)/Q(CN)$ для исследуемой совокупности комет не коррелируют с гелиоцентрическим расстоянием. Другими словами, «спусковым ме-

ханнизмом» для проявления активности кометы служат теплофизические и механические свойства ядра, а также запас в нем летучих компонентов. В этом смысле комета Галлея мало отличается от других комет с известными фотометрическими характеристиками.

Еще один вывод можно сделать из рис. 2: это однородность состава ядер комет. В самом деле, характер зависимости между скоростями образования рассматриваемых молекул существенно не различается у короткопериодических комет с большим динамическим возрастом и истощенным запасом летучих в ядре и у «молодых» непериодических комет. В случае кометы Галлея этому заключению можно найти независимое подтверждение.

Фотометрические свойства пыли. В [15] отмечается, что отношение пылепроизводительности к газопроизводительности в функции угла рассеяния (или фазы) может служить удобной характеристикой светорассеивающих свойств пыли в атмосфере кометы. Например, у кометы Стефана — Отермы обнаружено резкое нелинейное увеличение блеска в континууме (по отношению к интенсивности полосы излучения C_2) вблизи оппозиции. Для кометы Галлея изменения отношений $Q_d/Q(C_2)$ и $Q_d/Q(CN)$ в зависимости от угла рассеяния ϑ (по нашим наблюдениям и данным [11]) показаны на рис. 3. При расчете Q_d использованы интенсивности излучения в континууме на $\lambda\lambda$ 0.3650, 0.4438, 0.4809, 0.4845, 0.5230 мкм. Фотометрическая функция пыли в комете Галлея имеет ярко выраженный нелинейный оппозиционный эффект, причем в пределах рассеяния точек на графиках характер изменения блеска в континууме при изменении ϑ не зависит от области спектра.

Интересно сравнить полученные результаты с фазовой зависимостью коэффициента яркости системы кома — ядро по наблюдениям кометы с КА «Вега». В эксперименте «Вега» для оценки коэффициента яркости выбирались наиболее яркие участки ядра, соответствующие зоне активной эмиссии пыли [2]. На рис. 3 сопоставлены нормированные значения фотометрической функции пыли в комете Галлея по данным наземных и космических средств наблюдений. Нормировка при $\vartheta = 160^\circ$ определяется условиями наблюдения ядра кометы в космическом эксперименте. Согласно рис. 3 фотометрические функции пыли кометы Галлея, полученные с Земли и из космоса, совпадают с точностью 10 %.

Если учесть, что интервал наземных наблюдений составляет более 2 мес (до перигелия), а время измерения фазовых изменений яркости пыли на стадиях полета КА к комете не превышает нескольких минут, то утверждение об однородности ядра кометы по глубине становится более обоснованным. Во избежание путаницы отметим, что речь идет не о структурных особенностях строения ядра, а о физической и химической однородности составляющего его вещества.

В заключение рассмотрим интересную деталь на рис. 3, которая состоит в существенном отклонении от общей зависимости отношения пылепроизводительности к газопроизводительности при $\vartheta = 140^\circ$ и $\vartheta = 137^\circ$. Детальный анализ спектров кометы, проверка последующих расчетов подтверждают, что наблюдаемое различие данных вызвано не аппаратными или какими-либо вычислительными ошибками, а отражает реальную ситуацию: 6 и 8 декабря 1985 г. уровень континуума в спектре кометы был заметно выше, чем в последующие даты. Это обстоятельство позволяет по-новому взглянуть на условия вспышки в газовом спектре кометы 9 декабря, о которой мы сообщали ранее [3]. Полагаем, что последовательность событий была следующей: сначала — интенсивный выброс частиц пыли из ядра кометы, затем — усиление свечения газовой оболочки кометы вследствие дополнительного поступления газа, испарившегося из пылевых частиц. Процесс оказывается неожиданно «затянутым» по времени, однако сходную картину наблюдали А'Херн и др. [6] по изображению кометы Галлея в полосе

CN. Циановые выбросы, распространявшиеся на расстоянии более 60 тыс. км от ядра, существовали несколько недель. Молекулы CN высвобождаются, по-видимому, из пылинок CHON, образующих выброс.

1. *Погосбеков Д. Г., Шестопалов Д. И., Шустарев П. Н.* Информационно-измерительный и управляющий комплекс аппаратуры для сканирующего фотоэлектрического спектрометра // Циркуляр Шемахин. астрофиз. обсерватории АН АзССР.— 1986.— № 81.— С. 19—23.
2. *Сагдеев Р. З., Аванесов Г. А., Крювелье П. и др.* Телевизионный эксперимент по наблюдению кометы Галлея с КА «Вега» // Письма в Астрон. журн.— 1986.— 12, № 8.— С. 593—602.
3. *Шестопалов Д. И., Атаи А. А.* Некоторые физические характеристики атмосферы кометы Галлея по данным наземной спектрофотометрии // Кинематика и физика небес. тел.— 1989.— 5, № 2.— С. 29—34.
4. *Шульман Л. М.* Ядра комет.— М.: Наука, 1987.— 230 с.
5. *A'Hern M. F., Cowan J. J.* Molecular production rates in comet Kohoutek // Astron. J.— 1975.— 80, N 10.— P. 852—860.
6. *A'Hern M. F., Hoban S., Brich P. V. et al.* Cyanogen jets in comet Halley // Nature.— 1986.— 324, N 6098.— P. 649—651.
7. *A'Hern M. F., Millis R. L.* Abundance correlation among comets // Astron. J.— 1980.— 85, N 11.— P. 1528—1537.
8. *A'Hern M. F., Millis R. L., Brich P. V.* Gas and dust in some recent periodic comets // Ibid.— 1979.— 84, N 4.— P. 570—579.
9. *A'Hern M. F., Millis R. L., Brich P. V.* Comet Bradfield 1979 X. The gassiest comet? // Ibid.— 1981.— 86, N 10.— P. 1559—1566.
10. *A'Hern M. F., Turber C. H., Millis R. L.* Evaporation of ices from comet West // Ibid.— 1977.— 82, N 7.— P. 518—524.
11. *Catalano F. A., Baratta G. A., Lo Presti C., Stazzulla G.* Pre-perihelion photometry of P/Halley (1982i) at Catania (Italy) Observatory // Astron. and Astrophys.— 1986.— 168, N 1/2.— P. 341—345.
12. *Cochran A. L.* A re-evaluation of the Hazer model scale lengths for comets // Astron. J.— 1985.— 90, N 12.— P. 2609—2614.
13. *Cochran A. L., Barker E. S.* Comet Giacobini — Zinner: a normal comet? // Ibid.— 1987.— 93, N 1.— P. 239—243.
14. *Goraya P. S., Sunwall B. B., Rautela B. S.* Scanner observation of comet P/Crommelin 1818 I // Earth, Moon, and Planets.— 1986.— 36, N 3.— P. 257—262.
15. *Millis R. L., A'Hern M. F., Thompson D. T.* Narrowband photometry of comet P/Stefan — Oterma and backscattering properties of cometary grains // Astron. J.— 1982.— 87, N 9.— P. 1310—1317.
16. *Tatum J. B.* Cyanogen radiance/column density ratio for comets calculated from the Swings effect // Astron. and Astrophys.— 1984.— 135, N 1.— P. 183—187.

Шемахин. астрофиз. обсерватория
АН АзССР

Поступила в редакцию 04.05.88,
после доработки 08.09.88

Научные конференции

СИМПОЗИУМ МАС № 141 «НЕБЕСНАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ»

Состоится в августе 1989 г. в Ленинграде. Научная программа: современное определение понятия «небесная инерциальная система координат»; фундаментальные каталоги и распространение фундаментальных систем на слабые звезды; система астрономических постоянных и инерциальная система, влияние небесной механики; значение наблюдений тел Солнечной системы для построения инерциальных систем координат; система абсолютных собственных движений относительно галактик и квазаров, роль старых каталогов; влияние современной астрометрической техники на будущие проблемы инерциальной системы.