

УДК 523.4

Некоторые физические характеристики атмосферы кометы Галлея по данным наземной спектрофотометрии

Д. И. Шестопапов, А. А. Атап

По спектрофотометрическим наблюдениям кометы Галлея в декабре 1985 г.—январе 1986 г. (до прохождения перигелия) выполнена оценка абсолютного блеска и фотометрического параметра в цветах *B* и *V* системы *UBV*. Рассчитано полное число молекул CN, C₂, C₃, относительное содержание этих газов, отношение масс газа и пыли в атмосфере кометы Галлея на разных гелиоцентрических расстояниях.

SOME PHYSICAL CHARACTERISTICS OF COMET HALLEY ATMOSPHERE BY THE GROUND SPECTROPHOTOMETRY DATA, by Shestopalov D. I., Atai A. A.—Spectrophotometric observations of comet Halley in December 1985—January 1986 (before the perihelion) have been used for determining the absolute brightness and photometric parameter in *B* and *V* filters. The total number of molecules CN, C₂, C₃, the relative abundance of these gases, the gas and dust mass ratio in the comet Halley atmosphere for different heliocentric distances are calculated.

Введение. Абсолютная спектрофотометрия комет позволяет оценить ряд физических параметров газово-пылевой атмосферы, окружающей ее ядро (состав газа, скорость образования молекул, массы газа и пыли и др.), проследить вариации этих величин при изменении гелиоцентрического расстояния, а также в моменты вспышечной активности ядра.

Распределение энергии в спектре кометы Галлея исследовалось с помощью фотоэлектрического сканирующего спектрометра системы Сейя—Намиока [9, 10], установленного в кассегреневском (11 м) фокусе рефлектора АЗТ-8. Изображение кометы находилось в центре полностью раскрытой диафрагмы спектрометра, которая ограничивает на небесной сфере телесный угол $\Omega = 6.38 \cdot 10^{-7}$ ср. Фон неба измерялся при той же диафрагме в нескольких градусах от кометы. В качестве звезд-стандартов использовались γ Ori (B2 III), α Leo (B7 V), α Peg (B9.5 III) [14], распределение энергии в спектре которых известно с высокой внутренней точностью. Разрешение большинства спектров в области $\lambda\lambda$ 380—740 нм составляло 2.48 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.

Из 40 наблюденных спектров кометы отобраны 30, которые использованы для получения средних данных для каждой из десяти дат (в декабре 1985 г.: 6/7, 8/9, 9/10, 30/31, 31/1; январе 1986 г.: 2/3, 4/5, 5/6, 6/7 и 8/9). Относительная ошибка измерений оценивалась по нескольким спектрам для данной ночи и составляет в основном 1—3 %, но в крыльях интенсивных полос излучения она возрастает до 8 %.

Несмотря на невысокое разрешение, хорошо выделяются полосы молекул CN, C₃, CN, C₂ и атомарного кислорода O I, типичные для головы кометы. Поскольку телесный угол, ограничиваемый диафрагмой спектрометра, достаточно велик, на спектре 9 декабря отождествлены полосы иона CO⁺, возникающие, по-видимому, в хвосте кометы. Кроме того, у λ 620 нм замечен слабый пик эмиссии H₂O⁺ (отождествление выполнено согласно [19]), который повторяется на всех полученных регистрограммах. Несколько эмиссий в областях $\lambda\lambda$ 450, 695 и 730 нм остались неотожествленными. Примеры регистрограмм спектров кометы Галлея показаны на рис. 1. Результаты наблюдений кометы приведены в [3, 16].

Абсолютная звездная величина и фотометрический параметр. Видимые звездные величины B и V кометы рассчитаны по наблюдаемым спектрам и кривым реакций соответствующих фильтров системы UBV , взятым из [13]. При этом принималось, что изменение блеска кометы с изменением гелиоцентрического расстояния r соответствует следующей формуле С. В. Орлова:

$$M_{obs} = M_0 + 5 \lg \Delta + 2.5 n_f \lg r, \quad (1)$$

где M_{obs} и M_0 — видимая и абсолютная звездная величина кометы в данной фотометрической системе; Δ — геоцентрическое расстояние (как и r , выражено в а. е.); n_f — фотометрический параметр.

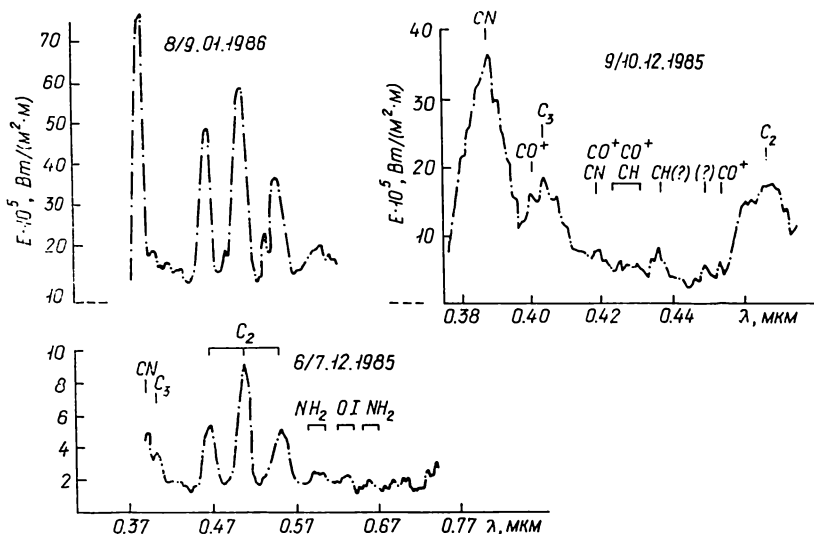


Рис. 1. Примеры регистрограмм спектров кометы Галлея

Величины M_0 и n_f вычислены методом наименьших квадратов на основе наших наблюдений. Они принимают следующие значения — в фильтре V : $M_0 = 3.50 \pm 0.26^m$ и $n_f = 7.5 \pm 0.65$; в фильтре B : $M_0 = 5.46 \pm 0.26^m$ и $n_f = 7.3 \pm 3.1$. Видимый блеск кометы в декабре 1985 г. по нашим данным меньше, чем по эфемериде [22] (примерно на одну звездную величину), а скорость изменения блеска существенно превышает предсказанное значение.

Сравним фотометрические характеристики кометы Галлея на малых и больших гелиоцентрических расстояниях. Согласно данным [4], в интервале расстояний $r = 4-11$ а. е. блеск кометы увеличивался примерно так же, как и в период ее предыдущего появления, но было отмечено систематическое увеличение параметра n_f с уменьшением r . Так, в интервалах 8—11 и 4—8 а. е. величина n_f увеличилась в фильтре B от 2.3 до 5.4, а в фильтре V от 1.2 до 6.3. Теперь ясно, что такая же тенденция сохраняется вплоть до гелиоцентрических расстояний $r \sim \sim 0.9$ а. е., по крайней мере для фильтра V . Что касается параметра M_0 , то, учитывая значение расчетных ошибок в нашей работе и в [4], можно утверждать, что абсолютная звездная величина кометы на расстояниях 0.9—1.4 а. е. увеличилась по сравнению с интервалом 4—11 а. е.

Число молекул CN , C_2 и C_3 . Эмиссионный спектр комет обусловлен резонансно-флуоресцентным переизлучением солнечного света молекулами газовой атмосферы. По аналогии с механизмом Запстра—Вурма, объясняющего излучение планетарных туманностей, в [2] пред-

ложена формула для расчета полного числа молекул данного вида в основном электронном состоянии:

$$E_k = [W\pi^2 e^2 \lambda^2 f / (c^2 \Delta^2 m_e)] F_\lambda, \quad (2)$$

где E_k — измеряемая освещенность в полосе излучения данной молекулы; W — фактор дилуции солнечного излучения; e и m_e — заряд и масса электрона; c — скорость света; Δ — геоцентрическое расстояние; λ и f — эффективная длина волны и сила осциллятора для рассматриваемой полосы излучения; F_λ — интенсивность излучения солнечного диска в интегральном (континуум+линии поглощения) спектре. Иными словами, выражение (2) позволяет вычислить мгновенное количество молекул данного вида внутри телесного угла Ω , который стягивает на небесной сфере диафрагма спектрометра. Чтобы исключить влияние этого фактора, размер диафрагмы выбран заведомо больше, чем угловые размеры головы кометы.

По формуле (2) определено содержание CN и C_2 в голове кометы, при этом значения F_λ взяты из [8], остальные параметры — из [1]. Содержание C_2 рассчитано по наиболее интенсивным эмиссионным полосам, соответствующим колебательным переходам $\Delta v = +1; 0; -1$. Эмиссия трехатомного углерода ($\lambda = 405.2$ нм) на всех спектрах перекрывается крылом полосы CN ($\lambda = 388.2$ нм), поэтому содержание C_2 получено приближенно с неопределенностью около 2. Интенсивность эмиссионной полосы CN ($\Delta v = 0$) в большей степени, чем интенсивность полос Свана или C_2 , подвержена влиянию эффекта Свингса. Поэтому расчет полного количества молекул CN ($\lambda = 388.2$ нм) выполнен по такой формуле:

$$n = E_k \Delta^2 / g_T, \quad (3)$$

где g_T — эффективность флюоресценции для молекул CN, которая предложена в [21]. Там же представлены значения этого фактора (в виде подробной таблицы) в зависимости от гелиоцентрического расстояния и радиальной гелиоцентрической скорости кометы.

Изменение числа молекул указанных газов в атмосфере кометы Галлея с уменьшением гелиоцентрического расстояния в логарифмическом масштабе хорошо представляется линейными зависимостями, как показано на рис. 2, а. Наклон зависимостей для молекул CN и C_2 практически одинаков ($n \propto r^{4 \pm 1}$).

Скорость изменения числа молекул C_2 в голове кометы с приближением ее к Солнцу существенно ниже ($n \propto r^{1.4 \pm 1}$), чем для предыдущего случая. Рис. 2, б иллюстрирует изменение относительного содержания газов в кометной атмосфере с уменьшением гелиоцентрического расстояния. Видно, что доля CN и C_2 по отношению к C_2 увеличивается с уменьшением расстояния комета — Солнце ($n_1/n_2 \propto r^{-2.6 \pm 0.8}$).

Отношение CN/ C_2 в том интервале расстояний r , где мы наблюдали комету, существенно не изменяется ($n_1/n_2 \propto r^{0.2 \pm 0.4}$). Не исключено, что это отношение слабо увеличивается с удалением кометы от Солнца.

Видимое отношение масс пыли и газа. Определение этого параметра по наземным наблюдениям сопряжено с большими трудностями, в частности из-за ненадежности сведений о пылевых частицах (размерах, альбедо, плотности и др.). Однако для кометы Галлея такая оценка представляет интерес ввиду наличия прямых данных эксперимента «Вега» о свойствах пылевых частиц.

Поскольку полная масса газа M_g в атмосфере кометы коррелирует с количеством молекул CN, причем средняя массовая доля CN среди других газов по оценке [17] составляет $\epsilon = 1.3 \cdot 10^{-3}$, то, согласно [20],

$$M_g = \mu m_H n_{CN} / \epsilon_{CN}, \quad (4)$$

где $\mu = 18$ — средняя относительная атомная масса газа [20]; m_H — масса атома водорода. Таким образом, для кометы Галлея в период наших наблюдений $M_g = 1.1 \cdot 10^{11} - 1.2 \cdot 10^{12}$ г.

Чтобы оценить массу пылевого компонента, воспользуемся выражением из [20]:

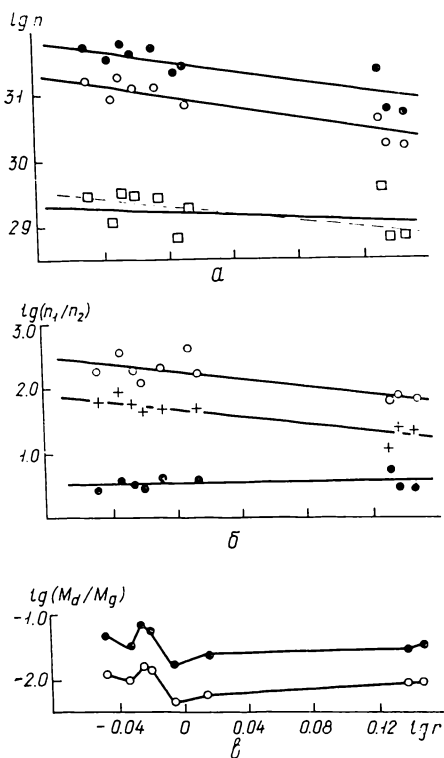
$$M_d = \frac{4}{3} \rho a \sigma, \tag{5}$$

где ρ и a — плотность и средний радиус пылевых частиц; σ — суммарное поперечное сечение частиц пыли. Допуская, что уровень непрерывного спектра обусловлен в основном рассеянием света пылевыми частицами атмосферы кометы, последний параметр можно найти из формулы

$$P(\lambda, \alpha) \sigma = \pi r^2 \Delta^2 [I_h(\lambda) / S(\lambda)], \tag{6}$$

где $P(\lambda, \alpha)$ — спектральный коэффициент яркости пылевого компонента; $I_h(\lambda)$ — внеатмосферная интенсивность излучения головы кометы; $S(\lambda)$ — спектральная освещенность, создаваемая Солнцем вне земной атмосферы на расстоянии 1 а. е. (по данным [18]); α — угол фазы.

Рис. 2. Изменение некоторых физических характеристик атмосферы кометы Галлея с гелиоцентрическим расстоянием: a — полное число молекул CN (точки), C₂ (кружки), C₃ (квадраты) при разных r (штриховая линия — вариант зависимости без трех «отскочивших» точек); b — относительное содержание газов CN/C₃ (кружки), C₂/C₃ (крестики), CN/C₂ (точки) в атмосфере кометы при разных r ; v — отношение массы пыли к массе газа при разных r : $\gamma = 1.5$ (точки); $\gamma = 2.5$ (кружки)



За уровень непрерывного спектра принимались минимальные значения $P(\lambda, \alpha) \sigma$ для каждой даты наблюдений. Так как при используемом нами спектральном разрешении не исключено блендирование крыльями сильных эмиссий, то мы, вероятно, определяем только верхний предел произведения $P(\lambda, \alpha) \sigma$.

Итак, чтобы вычислить M_d , необходимо знать физические параметры пылевых частиц ρ , a и σ . Для этого воспользуемся данными космического эксперимента «Вега». Определение отражательной способности ядра проводилось по наиболее ярким участкам, соответствующим зонам активной эмиссии пыли. Поэтому авторы телевизионного эксперимента по наблюдению кометы Галлея [11] отмечают, что «полученные результаты по отражательной способности ядра кометы могут быть полностью или частично обусловлены рассеянием на уходящих с ядра частицах». С учетом этих сведений, а также зависимости максимального коэффициента яркости системы кома — ядро от угла фазы, полученной на стадиях пролета КА [11], можно полагать, что коэффициент яркости пыли $P(\lambda = 560 \text{ нм}) \approx 0.04$ для интересующего нас интервала $\alpha = 40 - 50^\circ$.

При определении параметра a учитывалось, что распределение пылинок по размерам описывается степенным законом $l = \text{const} \cdot R^{-\gamma}$, где

l — число пылинок радиусом в интервале от R до $(R+dR)$:

$$a = (1 - \gamma)(2 - \gamma) R_{\min} \frac{(R_{\max}/R_{\min})^{2-\gamma} - 1}{(R_{\max}/R_{\min})^{1-\gamma} - 1}. \quad (7)$$

Поскольку с Земли измеряется интегральный блеск кометы, нас интересовали спектры размеров частиц, полученные КА «Вега» на большом подлетном участке траектории [7]. В этом случае в интервале масс частиц 10^{-16} — 10^{-9} г параметр γ находится в пределах 1.5—3. Средний размер частиц вычислен для двух значений параметра: $a = 12.31 R_{\min}$ ($\gamma = 1.5$) и $a = 2.75 R_{\min}$ ($\gamma = 2.5$).

Масс-спектрометрические измерения пылевых частиц кометы Галлея показали, что большинство из них близко по элементному составу к углистым хондритам С I с преобладанием элементов Н, С, N, О [12]. Плотность относительно крупных частиц — примерно 0.35 г/см^3 (пушистые пылинки), тогда как плотность мелких частиц — около 1 г/см^3 (минеральная плотность, характерная для углистых хондритов типа С I) [6, 7]. Принималось, что частицы массой $m \sim 10^{-16}$ г имеют плотность 1 г/см^3 , а плотность частиц массой $m \sim 10^{-9}$ г равна 0.35 г/см^3 .

Вычисленные таким образом отношения массы пыли к массе газа с приближением кометы к Солнцу показаны на рис. 2, в. За исследуемый период интервал изменения M_d/M_g составляет 0.02—0.07. Следует иметь в виду, что при $\gamma = 2$ —3 в степенном спектре размеров частиц суммарное поперечное сечение σ определяется мелкими частицами, тогда как основная масса пыли заключена в крупных частицах. Таким образом, истинное отношение M_d/M_g может быть в несколько раз больше определенного нами. Кроме того, поскольку должна существовать стратификация частиц по расстоянию от ядра (чем тяжелее частицы, тем они ближе к ядру), видимое отношение «пыль/газ» правильнее описывает ситуацию для внешних областей кометной комы.

Вспышечная активность кометы. Все изложенное позволяет прийти к заключению, что, по крайней мере по исследованным параметрам, комета Галлея существенно не отличается от других комет на таких же расстояниях от Солнца. Изменения относительных содержаний CN/C_2 и C_3/C_2 с изменением гелиоцентрического расстояния аналогичны в нынешнем и предыдущем появлениях кометы Галлея [5].

Относительно высокое значение фотометрического параметра свидетельствует о том, что с приближением кометы к Солнцу резко увеличивается активность ее ядра и, следовательно, можно ожидать проявления нестационарности, вспышечной активности кометы. По-видимому, два таких события нами зарегистрированы. 9/10 декабря 1985 г. наблюдалось заметное увеличение, по отношению к предыдущим датам, блеска кометы в полосах CN , C_3 , C_2 (соответствующие точки на рис. 2, а лежат за пределами ошибки положения средней линии регрессии). Второе событие зарегистрировано 5/6 и 6/7 января 1986 г., что особенно отчетливо видно на рис. 2, в, который иллюстрирует ход отношения M_d/M_g с уменьшением гелиоцентрического расстояния. К сожалению, на этом рисунке нет данных за 9/10 декабря 1985 г.

Возможно, это свидетельствует о том, что в эти даты спектроскопически зафиксирована фаза развития активных процессов, которые примерно в это же время наблюдались на снимках, полученных на выскогорной станции Астрофизического института АН КазССР [15].

1. Аллен К. У. Астрофизические величины.— М.: Мир, 1977.—446 с.
2. Амбарцумян В. А. Теоретическая астрофизика.— М.: ГОНТИ, 1939.—254 с.
3. Атаи А. А., Шестопалов Д. И., Гаджиев М. С. Распределение энергии и интенсивность полос излучения в спектре кометы Галлея // Циркуляр Шемахин. астрофиз. обсерватории.— 1987.— № 82.— С. 3—8.
4. Герасименко С. И., Киселев Н. Н., Чернова Г. П. Точные положения и фотометрия кометы Галлея (1982i) // Письма в Астрон. журн.— 1986.—12, № 2.— С. 149—155.

5. Добровольский О. В. Кометы.— М.: Наука, 1966.—288 с.
6. Краснопольский В. А., Морельс Г., Гогошев М. и др. Эксперимент ТСК на «Вега-2»: Некоторые результаты спектроскопии кометы Галлея // Письма в Астрон. журн.— 1986.—12, № 8.— С. 610—623.
7. Мазец Е. П., Аптекарь Р. Л., Голенецкий С. В. и др. Изучение пыли в комете Галлея со станций «Вега»: Предварительные результаты эксперимента СП-2 // Там же.— С. 624—630.
8. Макарова Е. А., Харитонов А. В. Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная.— М.: Наука, 1972.—288 с.
9. Погосбеков Д. Г., Шестопалов Д. И., Шустарев П. Н. Программируемый блок управления сканирующим спектрофотометром // Приборы и техника эксперимента.— 1985.— № 5.— С. 233.
10. Погосбеков Д. Г., Шестопалов Д. И., Шустарев П. Н. Информационно-измерительный и управляющий комплекс аппаратуры для сканирующего фотоэлектрического спектрометра // Циркуляр Шемахин. астрофиз. обсерватории.— 1986.— № 81.— С. 2—7.
11. Сагдеев Р. З., Аванесов Г. А., Крювель П. и др. Телевизионный эксперимент по наблюдению кометы Галлея с КА «Вега» // Письма в Астрон. журн.— 1986.—12, № 8.— С. 593—603.
12. Сагдеев Р. З., Киссель И., Берго Ж.-Л. и др. Первые результаты измерений элементного состава пылевых частиц кометы Галлея, полученные приборами ПУМА в проекте «Вега» // Там же.— С. 604—610.
13. Страйжис В. Многоцветная фотометрия звезд.— Вильнюс: Мокслас.— 1977.—311 с.
14. Харитонов А. В., Терещенко В. М., Князева Л. Н. Сводный спектрофотометрический каталог звезд.— Алма-Ата: Наука, 1978.—198 с.
15. Чурюмов К. И. Крупномасштабные явления в хвосте кометы Галлея // Земля и Вселенная.— 1986.— № 3.— С. 5—10.
16. Шестопалов Д. И., Гаджиев М. С., Атаи А. А., Погосбеков Д. Г. Абсолютная спектрофотометрия головы кометы Галлея 1982i в ШАО АН АзССР // Комет. циркуляр.— 1987.— № 379.— С. 1.
17. A'Hearn M. F. Spectrophotometry of comets at optical wavelengths // Comets / Ed. by L. Wilkening.— Tucson: Arizona Univ. press, 1982.— P. 433—460.
18. Arvesen J. C., Griffin R. N., Pearson B. D., Jr. Determination of extraterrestrial solar spectral irradiance from a research aircraft // Appl. Opt.— 1969.—8, N 11.— P. 2215—2232.
19. Bhattacharyya J. C., Bady G. S., Ghosh K. K. et al. Identification of emission bands in P/Halley // Curr. Sci. (USA).— 1986.—55, N 16.— P. 761—764.
20. Remillard R. A., Jekitt D. C. A comparison of the continuum spectra of four comets // Icarus.— 1985.—64, N 1.— P. 27—36.
21. 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.
22. Yeomans D. K. The comet Halley handbook.— Pasadena, Cal.: NASA, 1983.—44 p.

Шемахин. астрофиз. обсерватория
АН АзССР

Поступила в редакцию 11.11.87,
после доработки 10.05.88

Научные конференции

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ «ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА «ФОБОС» И БУДУЩИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАРСА»

Симпозиум состоится 23—27 октября 1989 г. в Париже. Организаторы симпозиума — Национальный центр космических исследований (Франция) и «Интеркосмос». Научная программа: 1. Задачи проекта «Фобос»; 2. Солнце и межпланетное пространство; 3. Ионосфера и магнитосфера Марса; 4. Спутник Фобос; 5. Поверхность и атмосфера Марса; 6. Будущие полеты к Марсу.