

УДК 523.64

С. В. Харчук, П. П. Корсун

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

**Полосоподобные детали в пылевом хвосте кометы
C/2006 P1 (Мак-Нота)**

Для объяснения четких поперечных полос, которые наблюдаются в хвосте кометы C/2006 P1 (Мак-Нота) вблизи перигелия, построена динамическая модель формирования пылевого хвоста кометы. Предполагается, что на поверхности ядра есть три локальные активные области повышенного выделения вещества. Формирование полос обусловлено разным темпом выделения вещества из активных областей в зависимости от того, располагаются они на освещенной или на затененной стороне вращающегося ядра. Получено, что период осевого вращения кометы равен 21 ч.

СМУГОПОДІБНІ ДЕТАЛІ У ПИЛОВОМУ ХВОСТІ КОМЕТИ C/2006 P1 (Мак-Нота), Харчук С. В., Корсун П. П. — Для пояснення чітких поперечних смуг, які спостерігаються у хвості комети C/2006 P1 (Мак-Нота) поблизу перигелію, побудовано динамічну модель формування пилового хвоста комети. Припускається, що на поверхні ядра є три локальні активні області підвищеного виділення речовини. Формування смуг зумовлене різним темпом виділення речовини з активних областей залежно від того, розташовані вони на освітленому чи на затіненому боці ядра, що обертається. Отримано, що період осевого обертання комети дорівнює 21 год.

STRIATED FEATURES IN THE DUST TAIL OF COMET C/2006 P1 (MCNAUGHT), by Kharchuk S. V., Korsun P. P. — Some results of dynamic modelling for the dust tail formation of comet C/2006 P1 (McNaught) are presented. The clear transversal striae in its tail are characteristic features of the comet during observations near the perihelion. This phenomenon can be explained by the presence of local active areas on the surface of the rotating nucleus. The striated features are

due to different dust production rate depending on whether the active areas are located on the sunlit or shaded side of the rotating nucleus. The tail of comet C/2006 P1 (McNaught) was fitted under the assumption that not only the dust flows uniformly from the nucleus, but also the considerable fraction of the dust streams out from three active local sources. Our model experiments give the period of comet C/2006 P1 (McNaught) to be 21 hours.

ВВЕДЕНИЕ

Комета C/2006 P1 (Мак-Нота) была открыта 7 августа 2006 г. Робертом Мак-Нотом, когда ее блеск равнялся 17^m. Комета пересекла точку перигелия 12 января 2007 г. на расстоянии 0.17 а. е., когда ее блеск достиг значения примерно -5^m. Хвост кометы своей максимальной видимой длины 35° достиг в первые дни после прохождения перигелия. Комета C/2006 P1 (Мак-Нота) является динамически новой кометой из облака Оорта, и вполне возможно, что это есть ее первое прохождение через внутреннюю часть Солнечной системы [12]. Во время прохождения перигелия из ядра кометы было выброшено большое количество пылевых частиц микронного и субмикронного размеров. Изучение инфракрасных спектров, полученных с помощью космического телескопа Спитцера, показало нехарактерную для динамически новых комет нехватку кристаллических силикатов в пылевой составляющей [7]. Также с помощью инфракрасных наблюдений получено, что химический состав кометы несколько беднее на СО и СН₄, в то время как содержание С₂Н₂ и NH₃ заметно выше, чем в большинстве комет [1]. С борта космического аппарата "Одиссей" впервые в кометном хвосте был зафиксирован трижды ионизированный кислород O³⁺ [13].

На ряде изображений околоядерной области кометы обнаружены довольно мощные джеты [18]. Со временем джеты претерпевают морфологические изменения, что может быть связано с вращением ядра. Характерной особенностью данной кометы был широкий, сильно вытянутый хвост с довольно хорошо структурированными полосами. Наблюдение полос в хвосте ранее было зафиксировано также для комет C/1743 X1 (Шезо), C/1901 G1 (Большая Комета), C/1910 A1 (Большая Январская Комета), C/1975 V1 (Уэста). Попытку объяснения полосовых структур в хвостах комет предприняли Секанина и Фаррел [15, 16]. В частности, они полагают, что возникновение полосовой структуры хвоста кометы C/1910 A1 (Большая Январская Комета) [15] и кометы C/1975 V1 (Уэста) [16] обязано дискретным эпизодам повышенного выделения частиц, которые фрагментируют через определенное время. По мнению авторов, это должно приводить к формированию полос.

Приоритетной задачей для нас было модельное воспроизведение наблюдаемой системы полос в пылевом хвосте кометы C/2006 P1

(Мак-Нота). Кроме того, результатом моделирования есть определение ряда физических характеристик пылевых частиц: диапазона размеров частиц, их распределения по размерам, скорости вылета частиц из зоны столкновений, максимально возможного возраста частиц, формирующих хвост.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

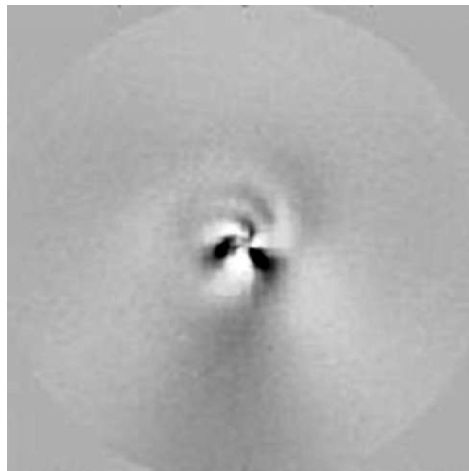
Для модельного воспроизведения пылевого хвоста кометы C/2006 P1 (Мак-Нота) мы выбрали одно из наиболее удачных изображений, полученное Дэвидом Хэдлэндом 24.00766 UT января 2007 г. [<http://www.cortinastelle.it/comete/2006P1-mcnaught-best.htm>] (рис. 3, б).

Моделирование пылевого хвоста кометы C/2006 P1 (Мак-Нота) осуществлялось на базе модели, разработанной П. П. Корсуном для исследования комет, проявляющих значительную активность на больших расстояниях от Солнца [10]. Позже эта модель была модифицирована для моделирования пылевых хвостов комет на близких расстояниях от Солнца, и в частности, была применена к комете Хейла — Боппа [8]. Основные отличия модифицированной модели состоят в том, что частицы, которые формируют хвост кометы, состоят исключительно из твердой составляющей (без примеси льдов) и имеют намного меньшие размеры, которые не изменяются со временем, так как нет сублимации льдов.

Для построения модели пылевого хвоста кометы необходимо проследить траекторию каждой отдельной частицы начиная с некоторого предшествующего момента времени и заканчивая моментом наблюдения. Для этого по алгоритму Монте-Карло задаются момент времени и направление вылета частицы, а также радиус и скорость её вылета из зоны столкновений. Далее для каждой частицы решается система уравнений движения под воздействием двух сил: солнечной гравитации и давления солнечного излучения. Результатом решения системы уравнений есть координаты одной частицы на момент наблюдения, а их совокупность дает модельный пылевой хвост кометы. Наконец, полученные кометоцентрические координаты частиц проецируются на картинную плоскость для сравнения с наблюдениями.

В случае кометы C/2006 P1 (Мак-Нота) с четко выраженными поперечными полосами в хвосте необходима дополнительная модификация модели. Будем предполагать, что истечение вещества с поверхности ядра происходит не равномерно, а значительной частью — с расположенных на поверхности ядра локальных активных источников газа и пылевых частиц. В результате вращения ядра вокруг своей оси источники поочередно пребывают на освещенной Солнцем поверхности и на затененной стороне. Темпы выделения газа и пыли из источников на освещенной Солнцем стороне и в тени значительно различаются, благодаря чему и формируются неоднородности в хвосте, которые имеют вид полос.

Рис. 1. Истечение вещества из трех локальных активных областей ядра кометы C/2006 P1 (Мак-Нота) [18]



На изображении кометы [18] хорошо видно истечение вещества по меньшей мере из трех локальных активных областей (рис. 1). Процесс моделирования показал, что для воспроизведения характерных деталей в хвосте кометы, обусловленных активностью локальных источников, необходимо учитывать истечение вещества из них не только в период пребывания источников в полушарии, направленном на Солнце, но и во время их пребывания на ночной стороне кометы. Примером того, что локальные активные зоны могут проявлять активность и на ночной стороне, могут служить наблюдения комет P/Галлея, 81P/Уайлда 2 [4]. В работе [6] показано, что кратерные образования на ядре кометы, имеющие определенную морфологию, могут оставаться достаточно нагретыми и проявлять заметную активность на ночной стороне ядра.

Из соображений целесообразности на рассматриваемом изображении мы выделили четыре зоны (А—Б), как показано на рис. 2. Две локальные активные области ответственны за формирование полос в зоне А (рис. 2, 3). Они являются источником примерно одинаковых по размеру частиц и отличаются только своим местонахождением на поверхности ядра кометы. Темп выделения пыли в данных областях на 35 % больше на солнечной стороне (в зените), чем на ночной. Третья локальная активная область является источником более тяжелых частиц и производит на 15 % больше пыли на солнечной стороне, чем на ночной. Эта активная область формирует систему полос в зоне В.

В процессе моделирования мы учитывали изменение активности локальных областей пропорционально косинусу угла отклонения от направления на Солнце. Сразу же после прохождения точки перигелия комета показала резкое непредсказуемое увеличение блеска; позже блеск вернулся к расчетным значениям [17]. Данное обстоятельство в нашей модели отображается как появление локальных активных зон вблизи точки перигелия и последующее постепенное снижение их активности пропорционально косинусу временной шкалы в кубе.

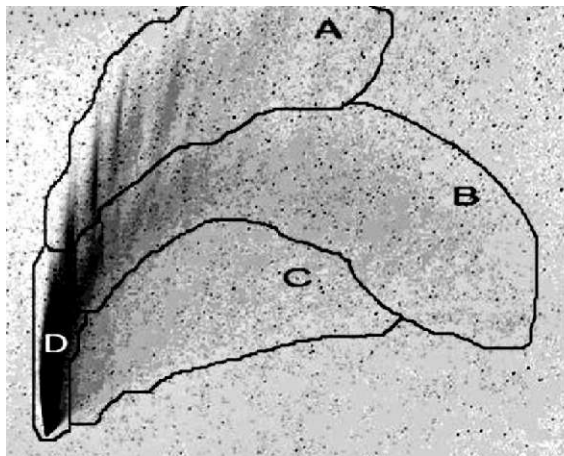


Рис. 2. Наиболее характерные зоны в хвосте кометы C/2006 P1 (Мак-Нота)

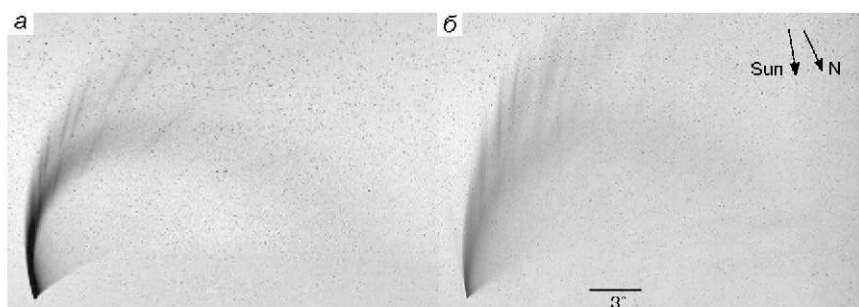


Рис. 3. Изображения кометы C/2006 P1 (Мак-Нота): а — модель, б — наблюдения 24 января 2007 г.

Для воспроизведения наблюдаемого распределения вещества вдоль полос использовался закон распределения частиц по размерам, предложенный в работе [3]:

$$n(a) = (1 - a_0 / a)^M (a_0 / a)^N,$$

где a — радиус частиц, a_0 — минимальный радиус частиц, M, N — модельные параметры, ответственные за местонахождение пика в распределении по размерам и его крутизну. Наиболее вероятный радиус частицы можно найти по формуле $a_p = a_0(M + N)/N$. В ходе моделирования были использованы такие значения параметров, которые входят в закон распределения по размерам: $a_0 = 0.1, N = 50, M = 120$ для активной области А и $a_0 = 0.1, N = 50, M = 170$ для локальной активной области В. Распределение по размерам с такими большими степенями M, N дает в результате узкий диапазон размеров частиц.

Наилучшего согласия модельных и наблюдаемых изображений удалось достичь для периода вращения ядра вокруг оси, равного 21 ч.

Общее количество частиц, траектории которых были отслежены, составляет $5 \cdot 10^7$. Для расчета скорости вылета частиц мы использовали выражение [2, 14]

$$V = Ar_d^{-0.5} a^{-0.5},$$

где V — скорость выбрасываемой частицы, r_d — гелиоцентрическое расстояние пылинки, a — радиус частицы, A — числовой параметр.

Таблица содержит модельные параметры, с помощью которых были достигнуты наилучшие результаты моделирования. Значения скоростей V пылевых частиц приведены к расстоянию в 1 а.е. от Солнца. Они обратно пропорциональны квадратному корню радиуса частицы. Как видно, модельное изображение сформировано из частиц, возраст которых не превышает 12 сут при истечении из активных областей и 11.2 сут при истечении со всей поверхности ядра. Следует сказать, что данный параметр имеет очень сильное влияние на расположение четкой нижней границы модельного изображения хвоста кометы (зона С, рис. 2, 3), сформированной истечением вещества со всей поверхности ядра. Активные области генерируют частицы, которые находятся в двух очень узких диапазонах радиусов, в то время как со всей поверхности кометы вылетают частицы широкого диапазона радиусов. Наличие активных областей, которые являются источниками разных по размерам частиц, может косвенным образом свидетельствовать о неоднородности ядра кометы. Такая неоднородность, например, была свойственна комете, породившей кометы Б/1996 01 (Табура) и С/1988 А1 (Лиллера) [9]. В работе [11] на основе модельной интерпретации морфологии ОН, CN и C_2 компонентов кометы С/1995 01 (Хейла — Боппа) получен вывод о сильной химической неоднородности ядра.

Истечение пылевых частиц со всей поверхности кометы С/2006 Р1 (Мак-Нота) происходит в наших модельных исследованиях согласно экспоненциальному закону распределения по радиусам с показателем степени, который имеет характерное для комет значение $\gamma = -3.5$ [5]. Модельный параметр скорости вылета пылевых частиц имеет существенное влияние на ширину составляющей хвоста кометы, обозначенной как зона Б (рис. 2, 3). Период осевого вращения ранее никем не оценивался.

Следует отметить, что в ориентации модельных и наблюдаемых полос имеется расхождение в несколько градусов. Это расхождение можно объяснить, если предположить, что пылинки в хвосте имеют заряд, на который воздействует солнечный ветер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью динамического моделирования на основе метода Монте-Карло нам удалось успешно воспроизвести наблюдаемую четко выраженную структуру полос хвоста кометы С/2006 Р1 (Мак-Нота).

Оптимальные параметры моделирования

Активные области	Максимальный возраст частиц, сут	a , мкм		V , м/с	a_p , мкм
А		0.2—0.48	—	390—604	0.34
В	12	0.33—0.77	—	317—470	0.49
Однородное ядро	11.2	0.35—65.0	-3.5	33—456	—

Наше объяснение этого явления состоит в том, что на поверхности ядра имеются три локальные активные области, которые в результате осевого обращения кометы поочередно находятся на дневной и ночной ее стороне. Разный темп выделения газа и пыли на дневной и ночной стороне вращающегося ядра является причиной наблюдаемых квазипериодических неоднородностей в хвосте. Значение периода осевого вращения кометы C/2006 P1 (Мак-Нота), которое было параметром моделирования, оказалось равным 21 ч.

1. *Dello Russo N., Vervack R. J., Weaver H. A., Lisse C. M.* Infrared measurements of the chemical composition of C/2006 P1 McNaught // *Icarus*.—2009.—**200**.—P. 271—279.
2. *Delsemme A. H.* Chemical composition of nuclei // *Comets* / Ed. by L. L. Wilkening.—1982.—P. 85—130.
3. *Hanner M. S.* The nature of cometary dust from remote sensing // *Cometary exploration*.—1982.—**2**.—P. 1—22.
4. *Hoover R. B. et al.* Astrobiology of Comets // *Proc. SPIE*.—2004.—**5555**.—P. 93—106.
5. *Jockers K.* Observations of scattered light from cometary dust and their interpretation // *Earth, Moon and Planets*.—1997.—**79**, N 1/3.—P. 221—245.
6. *Ivanova A. V., Shulman L. M.* Modeling of heating and intensification of sublimation from a cometary active regions // *Proc. of Asteroids, Comets, Meteors*. — Berlin, Germany, 2002.—P. 55—58.
7. *Kelley M. S., Harker D. E., Wooden D. H., Woodward C. E.* Crystalline silicates and the spectacular comet C/2006 P1 (McNaught) // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—2007.—**39**.—P. 827.
8. *Kharchuk S. V.* Dust tail modelling for comet Hale-Bopp // *YSC'15 Proc. of Contributed Papers* / Eds V. Ya. Choliy, G. Ivashchenko. — Kyiv: Kyivskiy Universytet, 2008.—P. 57—59.
9. *Kiselev K., Jockers K., Rosenbush V.* Comparative study of the dust polarimetric properties in split and normal comets // *Earth, Moon and Planets*.—2002.—**60**, N 1.—P. 167—176.
10. *Korsun P. P.* Distant activity of comet C/2001 K5 (Linear) // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2005.—N 5.—P. 465—471.
11. *Lederer S. M., Campins H.* Evidence for chemical heterogeneity in the nucleus of C/1995 O1 (Hale-Bopp) // *Earth, Moon and Planets*.—2002.—**90**, N 1.—P. 381—389.

12. *Marsden B. G.* // IAU Circ.—2007.—N 8801.
13. *Neugebauer M., Gloeckler G., Gosling J. T., et al.* Encounter of the Ulysses spacecraft with the ion tail of comet McNaught // *Astrophys. J.*—2007.—**667**, N 2.—P. 1262—1266.
14. *Sekanina Z.* Thermal infrared imaging and spectroscopy of comet Hale-Bopp (C/1995 O1) // *Astrophys. J.*—2000.—**538**.—P. 428—455.
15. *Sekanina Z., Farrel J. A.* The striated dust tail of comet 1910 I // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1986.—**18**.—P. 818.
16. *Sekanina Z., Farrel J. A.* Evidence for fragmentation of strongly nonspherical dust particles in the tail of Comet West 1976 VI // *Solid particles in the solar system: Proc. Symp., Ottawa, Canada, 1979.* — Dordrecht: Reidel, 1980.—P. 267—270.
17. *Shanklin J.* Review of comet observations for 2007 January — 2007 December // *THE COMET'S TALE* (Newsletter of the Comet Section of the British Astronomical Association).—2007.—N 2.—P. 10—29.
18. *Snodgrass C., Fitzsimmons A., Jehin E., et al.* Optical observations of comet McNaught from La Silla // *Asteroids, Comets, Meteors. LPI Contribution.*—2008.— N 1405.— paper id. 8328.

Поступила в редакцию 04.06.09