

С. В. Харчук¹, О. В. Иванова¹, П. П. Корсун¹, О. Р. Баранский²

¹ Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
kharchuk@mao.kiev.ua, sandra@mao.kiev.ua, korsun@mao.kiev.ua

² Астрономическая обсерватория Киевского университета им. Тараса Шевченко
ул. Обсерваторная, 3, Киев-53, 04053

Модельный анализ пылевого хвоста кометы C/2012 K5 (LINEAR)

В результате динамического моделирования пылевого хвоста кометы C/2012 K5 (LINEAR) воспроизведено распределение яркости в ее пылевом хвосте. Для моделирования использовалась модель, разработанная П. П. Корсуном на базе статистического подхода Монте-Карло. Адекватность модели определялась степенью совпадения наборов наблюдаемых и модельных изофот. Получены оценки физических параметров пылинок, которые сформировали пылевую составляющую атмосферы кометы: диапазон радиусов (0.7–100 мкм), показатель степени закона распределения по радиусам (-2.4), диапазон скоростей (6–135 м/с), максимальный возраст пылевых частиц (88 сут).

MODEL ANALYSIS OF THE DUST TAIL OF COMET C/2012 K5 (LINEAR), by Kharchuk S. V., Ivanova O. V., Korsun P.P., Baransky O.R. — The results of dynamic modelling of the dust tail formation of comet C/2012 K5 (LINEAR) are presented. The distribution of brightness in the comet tail was fitted. Correlation of isophotes was adopted as a criterion for consistency of observed and simulated data. As a result of successful simulation we obtained the following physical parameters of comet dust particles that formed the tail: the range of radii (0.7–100 μ m), the power of the radius distribution law (-2.4), velocity range (6–135 m/s), the maximum age of the dust particles (88 days).

ВВЕДЕНИЕ

Изучение природы комет важно в контексте понимания эволюции Солнечной системы. Кометы, находясь на ее окраинах, в поле слабой радиации, содержат первичное, практически не переработанное вещество, которое осталось со времен формирования Солнечной системы. Поэтому исследования динамически новых комет, которые впервые попадают во внутренние части Солнечной системы, может дать новую информацию об условиях их формирования, физические характеристики пыли и газа и механизмы взаимодействия с межпланетной средой.

Модельная интерпретация процессов формирования пылевых хвостов даст информацию о природе пылинок в хвостах комет, об их размерах и распределении по размерам, а также о времени жизни в поле солнечной радиации. Полученные результаты позволят расширить представления о разнообразии пыли, которая содержится в различных кометах, происхождении и динамическом вкладе различных комет в межпланетное пылевое облако.

Работа посвящена динамическому моделированию пылевого хвоста динамически новой кометы C/2012 K5 (LINEAR). Комета была открыта 25 мая 2012 года программой поиска околоземных астероидов (Lincoln Near-Earth Asteroid

Research, LINEAR), когда она имела блеск 18.5 зв. вел. Комета прошла перигелий 28 ноября 2011 г. ($q = 1.14$ а.е., $e = 0.9985$), однако наибольшего блеска она достигла в начале 2013 года ($= 8^m$).

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для динамического моделирования был использован ряд фотометрических изображений кометы C/2012 K5 (LINEAR), полученных 27 сентября 2012 года, когда комета находилась на расстоянии 1.5 а.е. от Солнца и 1.8 а.е. от Земли. Наблюдение кометы были получены А. Баранским на телескопе АЗТ-8 (Астрономическая обсерватория Киевского университета им. Тараса Шевченко, с. Лесники). Фотометрические данные были получены с помощью широкополосного фильтра R. В качестве приемника излучения использовалась ПЗС матрица PL47-10 FLI размером 1024x1024 пкл. Размер полученных изображений и масштаб в режиме аппаратного бининга 2x2 составляет 16x16' и 0.99"/пкл соответственно.

После этого было проведено редуцирование полученных данных с помощью кодов пакета IDL. Эта предварительная обработка наблюдательных данных позволяет учесть особенности матрицы, очистить изображение от следов космических частиц и учесть плоское поле.

Поскольку изображение кометы смещается относительно звезд поля, все кадры смещались таким образом, чтобы изображение кометы оставалось "неподвижным". С этой целью измерялись положения центров избранных звезд поля и центра кометы, все изображения приводились к единому центру, который соответствует координатам центра изображения кометы на одном из кадров. После извлечения фона неба к набору кадров со смещенными изображениями применялась межкадровая медианная фильтрация, что позволило увеличить отношение сигнал/шум, а также частично избавиться от звезд поля. Этот набор суммарных кадров после медианной фильтрации дал изображение, которое использовалось для дальнейшего динамического моделирования пылевого хвоста кометы. В заключение были определены ориентация и масштаб полученного суммарного изображения, что необходимо для правильного моделирования пылевого хвоста кометы.

Модельное воспроизведение пылевого хвоста кометы осуществлялось с помощью модели, разработанной П. П. Корсуном [12] на основе статистического подхода Монте-Карло [3]. Модель была успешно апробирована при моделировании хвостов комет C/1995 O1 (Hale-Bopp) [2], C/2003 W42 (LINEAR) [12] и др. При модельном анализе пылевого хвоста кометы C/2012 K5 (LINEAR), которая на момент наблюдения находилась на близком к Солнцу расстоянии (1.5 а.е.) мы учитывали, что ледяной компонент конгломерата полностью сублимировал, и мы анализируем движение сильно пористых тугоплавких пылевых частиц.

Для построения пылевых атмосфер комет в модели прослеживается траектория каждой отдельной пылинки с момента ее вылета из зоны столкновений вокруг ядра кометы до момента наблюдения. Для этого задаются модельные параметры: максимальный возраст пылинок, которые могут формировать хвост, степень γ распределения по размерам пылинок ($n(a)=a^\gamma$), геометрический характер пылеобразования. По алгоритму Монте-Карло задается время и направление вылета пылинки, ее радиус, наконец, вычисляется скорость вылета пылинки из зоны столкновений.

Далее для каждой пылинки решается система уравнений движения под действием двух основных сил: солнечной гравитации (F_G) и давления солнечного излучения (F_R). Движение частиц удобно рассматривать в неинерциальной кометоцентрической системе координат ξ , η , ζ . Также использовались соответствующие сферические координаты r , φ , θ . Систему уравнений движения пылинки тогда можно представить в виде [4, 5]

$$\begin{aligned}\ddot{\xi} &= -\mu_s(1-\beta)\frac{r+\xi}{y^3} - \mu_c\frac{\xi}{x^3} + \ddot{\theta}\eta + \dot{\theta}^2\xi + 2\dot{\theta}\dot{\eta} + \mu_s\frac{1}{r^2} \\ \ddot{\eta} &= -\mu_s(1-\beta)\frac{\eta}{y^3} - \mu_c\frac{\eta}{x^3} - \ddot{\theta}\xi + \dot{\theta}^2\eta - 2\dot{\theta}\dot{\xi} \\ \ddot{\zeta} &= -\mu_s(1-\beta)\frac{\zeta}{y^3} - \mu_c\frac{\zeta}{x^3},\end{aligned}$$

где $\mu_s=Gm_s$ — солнечный гравитационный параметр, $\mu_c=Gm_c$ — гравитационный параметр кометы, $r, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ — соответственно гелиоцентрическое расстояние кометы, ее угловая скорость и угловое ускорение относительно Солнца; $x = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}$, $y = \sqrt{(r+\xi)^2 + \eta^2 + \zeta^2}$. Первое слагаемое системы уравнений движения — гравитационные силы Солнца с поправкой на давление излучения (β). Второе слагаемое — сила тяжести кометного ядра, другие слагаемые являются коррекциями на неинерциальные эффекты. Координаты ξ и η лежат в плоскости орбиты кометы, ζ направлена противоположно направлению на Солнце, η — противоположно направлению движения кометы вокруг Солнца, ζ направлена перпендикулярно к плоскости орбиты.

Решением системы уравнений движения являются координаты одной пылинки на момент наблюдения, а их совокупность дает модельный пылевой хвост кометы. Полученные кометоцентрические координаты пылинок проецируются на картинную плоскость для сравнения с наблюдательными данными.

Выражение для безразмерной величины $\beta=F_R/F_G$ имеет вид [8]

$$\beta=0.57Q_{pr}/\rho a,$$

где Q_{pr} — эффективность радиационного давления, ρ — плотность (г/см^3), a — радиус пылинки (мкм). Для частиц $a \geq 0.2$ мкм Q_{pr} остается примерно неизменным, а значение β пропорционально a^{-1} [8]. В ходе данных модельных исследований плотность пористых пылевых частиц было принято равным $\rho=1$ г/см^3 .

Пылевые частицы, выхваченные из поверхности ядра газами, покидают зону столкновений с установившейся скоростью, которая может быть определена по эмпирической формуле [7, 14]

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

Здесь V — скорость выброса пылинок, A — числовой параметр, r_d — гелиоцентрическое расстояние пылинки, a — радиус пылинки. Дополнительно было принято, что скорости вылета характеризуются распределением Гаусса. Среднее значение распределения составляет наиболее вероятное значение V , а относительное стандартное отклонение равно 0.1.

Как известно, после высвобождения из ядра кометы, динамически не разделённые нейтральный газ и пыль формируют кому. Но уже через несколько десятков кометных радиусов от поверхности пыль динамически отделяется от газа и

формирует пылевой хвост [6]. Нашей целью было добиться в процессе моделирования сопоставления модельных и наблюдательных изофот.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование осуществлялось с помощью компьютерной программы, написанной на алгоритмическом языке Фортран. Интерфейс запуска и контроля полученных вычислений был реализован через пакет IDL, ориентированный на анализ изображений. Основным критерием согласованности наблюдательных и модельных данных служила степень совпадения наборов изофот. Значения всех модельных параметров для удобства задавались в отдельном файле. В результате моделирования были получены оптимальные модельные параметры, соответствующие достигнутому сопоставлению изофот, и которые являются характеристиками пыли, формирующей пылевую составляющую атмосферы кометы C/2012 K5. Модельное изображение было создано из 200 млн частиц. Источником пылеобразования служил конус, направленный на Солнце с углом раскрытия 100° , то есть активность проявляла значительная часть освещенной Солнцем поверхности кометы. В результате модельных исследований были получены оптимальные модельные параметры (радиусы, скорости, максимальный возраст пылинок и показатель степени γ их распределения по размерам), которые являются характеристиками пыли, формирующей пылевую составляющую атмосферы комет. Значение модельных параметров следующие: максимальный возраст пылинок — 88 суток, радиусы пылинок $a = 0.7\text{--}100$ мкм, степень закона распределения по размерам $\gamma = -2.4$, скорости пылинок $V = 6\text{--}135$ м/с.

На рис. 1 показаны размещенные рядом наблюдательное (слева) и модельное (справа) изображения, а на рис. 2 — наложенные друг на друга наборы наблюдательных и модельных изофот.

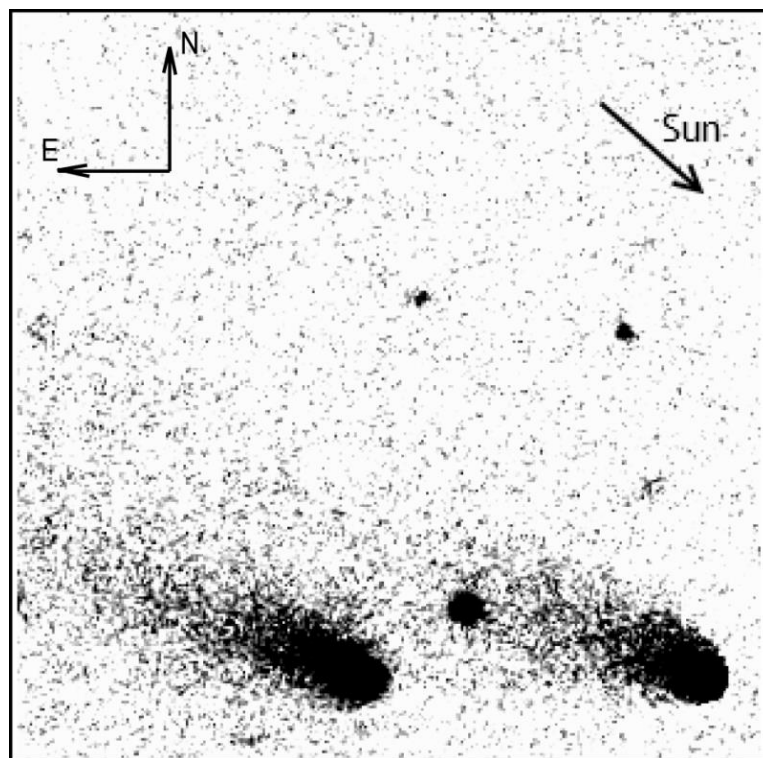


Рис. 1. Изображение кометы C/2012 K5: справа модельное, слева наблюдательное. Размер изображения $4.7 \times 4.7'$, 375 тыс. км.

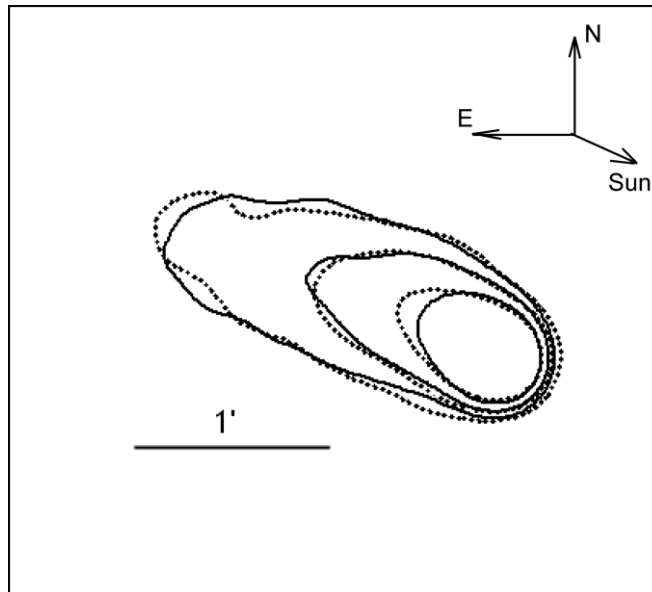


Рис.2. Модельные (сплошные линии) и наблюдательные (пунктир) наборы изофот пылевого хвоста кометы C/2012 K5.

Полученное нами в результате моделирования значение степени закона распределения по размерам ($\gamma = -2.4$) отличается от тех, что сообщались для многих комет ($\gamma = -3...-4$), хотя оно, например, соответствует степени, полученной для кометы Shoemaker-Levy 9 ($\gamma = -2.3$) [9] и кометы 1P/Halley [13]. Измерение потоков пыли при прохождении космических аппаратов вблизи ядер комет 1P/Halley («Джотто») и 81P/Wild 2 («Стардаст») также показали наличие частиц в очень широком диапазоне радиусов — от нанометров до миллиметров с распределением по примерно степенному закону с индексом от -2 до -4 , в зависимости от размеров пылинок и их расположения в коме кометы [11].

Полученные в результате моделирования оценки скоростей (6...135 м/с) согласуются с оценкой скоростей пыли кометы 9P/Tempel, выделенного из искусственно созданного кратера во время миссии Deep Impact. Комета тогда находилась на расстоянии около 1.5 а.е., и скорости, достигнутые пылью после пылегазового взаимодействия, лежали в диапазоне от 10 до 600 м/с для частиц от 0.1 до 100 мкм [10].

Авторами ранее было проведено модельное исследование пылевого компонента хвоста кометы C/2012 S1 (ISON) [1], когда комета находилась на расстоянии 1.45 а.е. от Солнца. В результате моделирования были получены следующие оценки: радиусы пылинок лежали в пределах 0.5–16.6 мкм, скорости пылинок — в пределах 17–130 м/с. Максимальный возраст частиц, которые могли формировать хвост, составлял 25 суток. Степень распределения по размерам пылинок не менялась со временем и имела значение $\gamma = -2.5$. Как видим, при подобных расстояниях от Солнца и значениях γ пыль, сформировавшая пылевой хвост кометы C/2012 K5 (LINEAR), имеет более широкий диапазон радиусов и скоростей пылинок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нам удалось воспроизвести относительное распределение яркости в пылевом хвосте кометы C/2012 K5 (LINEAR) с помощью динамического моделирования на основе алгоритма Монте-Карло. Как результат моделирования мы получили модельные параметры, которые являются физическими характеристиками пылевых частиц, формирующих хвост кометы: максимальный возраст пылинок составляет 88 суток, скорости вылета находятся в диапазоне от 6 до 135 м/с, радиусы пылинок — в диапазоне от 0.7 до 100 мкм, а значение степени закона распределения по размерам составляет -2.4.

Выражаем благодарность Президиуму НАН Украины за грант на разработку проектов научно-исследовательских работ молодым ученым НАН Украины.

1. Харчук С. В., Иванова А. В., Корсун П. П. и др. Моделирование пылевого хвоста кометы C/2012 S1 (ISON) по результатам наблюдений // *Астрономический вестник*. — 2015. — **49**, № 5. — С. 353—358.
2. Харчук С., Корсун П., Микуш Г. Модельный анализ пылевого хвоста кометы Хейла — Боппа // *Кинематика и физика небес. тел.*—2009. — **25**, № 5. —С. 268—276.
3. Cashwell E. D., Everett C. J. *The Monte Carlo method for random walk problems*. — New York: Pergamon Press, 1959.
4. Chörny G. F. Estimations of the energy quasi-integral of the restricted three-body problem // *Kinematics and Phys. of Celestial Bodies. Suppl.*—2005. — **5**. — P. 500—503.
5. Chörny G. F. Quasiintegrals of the photogravitational eccentric restricted three-body problem with Poynting Robertson drag // *Celest. Mech. Dynam. Astron.*—2007. — **97**. — P. 229—248.
6. Combi M. R., Kabin K., Dezeew D. L., et al. Dust-gas interrelations in comets: Observations and theory // *Earth, Moon, and Planets*. —1997. — **79**. — P. 275—306.
7. Delsemme A. H. Chemical composition of cometary nuclei // *Comets* / Ed. by L. Wilkening. — Arizona: University of Arizona Press, 1982. — P. 85—130.
8. Fernandez J. A., Jockers K. Nature and origin of comets // *Report on progress in physics*. —1983. — **46**. — P. 665—772.
9. Hahn J. M., Rettig T. W. Comet Shoemaker — Levy 9 dust size and velocity distributions // *Astron. and Astrophys.* —2000. — **146**. — P. 501—513.
10. Jorda L., Lamy P., Fauray G., et al. Properties of the dust cloud caused by the Deep Impact experiment // *Icarus*. —2007. — **187**. — P. 208—219.
11. Kolokolova L., Kimura H. Comet dust as a mixture of aggregates and solid particles: model consistent with ground-based and space-mission results // *Earth, Planets and Space*. —2010. — **62**, N 1. — P. 17—21.
12. Korsun P. P., Kulyk I. V., Ivanova O. V., et al. Dust tail of the active distant comet C/2003 WT42 (LINEAR) studied with photometric and spectroscopic observations // *Icarus*. —2010. — **210**, N 2. — P. 916—929.
13. Mazets E. P., Aptekar R. L., Golenetskii S. V., et al. Comet Halley dust environment from SP-2 detector measurements // *Nature*. —1986. — **321**. — P. 276—278.
14. Sekanina Z., Larson S. M., Hainaut O., et al. Major outburst of periodic comet Halley at a heliocentric distance of 14 AU // *Astron. and Astrophys.* —1992. — **263**, N 1, 2. — P. 367—386.