

УДК 523.64

**С. В. Харчук<sup>1</sup>, О. В. Иванова<sup>1</sup>, П. П. Корсун<sup>1</sup>, О. Р. Баранський<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, 03680

kharchuk@mao.kiev.ua, sandra@mao.kiev.ua, korsun@mao.kiev.ua

<sup>2</sup>Астрономічна обсерваторія Київського університету ім. Тараса Шевченка  
вул. Обсерваторна 3, Київ-53, 04053

### **Модельний аналіз пилового хвоста комети C/2012 K5 (LINEAR)**

*У результаті динамічного моделювання процесу формування пилового хвоста комети C/2012 K5 (LINEAR) відтворено розподіл яскравості у її пиловому хвості. Для моделювання використовувалась модель, розроблена П. П. Корсуном на базі статистичного підходу Монте-Карло. Адекватність моделі визначалась ступенем збігу спостережених і модельних наборів ізофот. Отримано оцінки фізичних параметрів пилинок, які сформували пилову складову атмосфери комети: діапазон радіусів (0.7—100 мкм), показник степеня закону розподілу по радіусах (–2.4), діапазон швидкостей (6—135 м/с), максимальний вік пилових частинок (88 діб).*

*МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЫЛЕВОГО ХВОСТА КОМЕТЫ C/2012 K5 (LINEAR), Харчук С. В., Иванова А. В., Корсун П. П., Баранский А. Р. — В результате динамического моделирования процесса формирования пылевого хвоста кометы C/2012 K5 (LINEAR) было 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. A Monte Carlo model developed by Korsun was used to fit the observed tail. The adequacy of the model was defined by the match of the observed and modelled isophotes. 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  $\mu\text{m}$ ), the power index of the radius distribution law ( $-2.4$ ), velocity range (6–135 m/s), the maximum age of the dust particles (88 days).

## ВСТУП

Вивчення природи комет важливе в контексті розуміння еволюції Сонячної системи. Комети, перебуваючи на її околицях, в полі слабкої радіації, містять первинну, практично не перероблену речовину, яка залишилася з часів формування Сонячної системи. Тому дослідження динамічно нових комет, які вперше потрапляють у внутрішні частини Сонячної системи, може дати нову інформацію про умови їхнього формування, фізичні характеристики пилу та газу та механізми взаємодії з міжпланетним середовищем.

Модельна інтерпретація процесів формування пилових хвостів дасть інформацію про природу пилинок у хвостах комет, про їхні розміри та розподіл за розмірами, а також про час життя в полі сонячної радіації. Отримані результати дозволять розширити уявлення про різноманітність пилу, який міститься в різних кометах, походження та динамічний внесок різних комет у міжпланетну пилову хмару.

Роботу присвячено динамічному моделюванню пилового хвоста динамічно нової комети C/2012 K5 (LINEAR). Комета була відкрита 25 травня 2012 року програмою пошуку навколосемних астероїдів (Lincoln Near-Earth Asteroid Research, LINEAR), коли мала блиск 18.5<sup>m</sup>. Комета пройшла перигелій 28 листопада 2011 р. ( $q = 1.14$  а. о.,  $e = 0.9985$ ), однак найбільшого блиску вона досягла на початку 2013 року ( $= 8^m$ ).

## ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ ТА ОПИС МОДЕЛІ

Для динамічного моделювання було використано ряд фотометричних зображень комети C/2012 K5 (LINEAR), отриманих 27 вересня 2012 року, коли комета перебувала на відстані 1.5 а. о. від Сонця та 1.8 а. о. від Землі. Спостереження комети були отримані О. Баранським на телескопі АЗТ-8 (Астрономічна обсерваторія Київського університету ім. Тараса Шевченка, с. Лісники). Фотометричні дані були отримані з допомогою широкосмугового фільтра R. Як приймач випромінювання використовувалась ПЗЗ матриця PL47-10 FLI розміром 1024×1024 пкл. Розмір отриманих зображень та масштаб в режимі апаратного бінінгу 2×2 складає 16×16' та 0.99"/пкл відповідно.

Після цього було проведено редукцію отриманих даних за допомогою кодів пакета IDL. Ця попередня обробка спостережних даних дозволяє врахувати особливості матриці, очистити зображення від слідів космічних частинок та врахувати плоске поле.

Оскільки зображення комети зміщується відносно зірок поля, всі кадри зміщувалися таким чином, щоб зображення комети залишалося “нерухомим”. З цією метою вимірювались положення центрів обраних зірок поля та центра комети, всі зображення приводилися до єдиного центра, який відповідає координатам центра зображення комети на одному з кадрів. Після вилучення фону неба до набору кадрів зі зміщеними зображеннями застосовувалася міжкадрова медіанна фільтрація, що дозволило збільшити відношення сигнал/шум, а також частково позбутися зірок поля. Цей набір сумарних кадрів після медіанної фільтрації дав зображення, яке використовувалося для подальшого динамічного моделювання пилового хвоста комети. Насамкінець були визначені орієнтація та масштаб отриманого сумарного зображення, що є необхідним для правильного моделювання пилового хвоста комети.

Моделльне відтворення пилового хвоста комет здійснювалось за допомогою моделі, розробленої П. П. Корсуном [12] на базі статистичного підходу Монте-Карло [3]. Модель була успішно апробована при моделюванні хвостів комет C/1995 O1 (Hale-Bopp) [2], C/2003 WT42 (LINEAR) [12] та ін. При модельному аналізі пилового хвоста комети C/2012 K5 (LINEAR), яка на момент спостереження перебувала на близькій до Сонця відстані (1.5 а. о.) ми враховували, що крижаний компонент конгломерату повністю сублимував, і ми аналізуємо рух сильно пористих тугоплавких пилових частинок.

Для побудови пилових атмосфер комет у моделі простежується траєкторія кожної окремої пилинки від моменту її вильоту із зони зіткнень навколо ядра комети до моменту спостереження. Для цього задаються модельні параметри: максимальний вік пилинок, які можуть формувати хвіст, степінь  $\gamma$  розподілу за розмірами пилинок ( $n(a) = a^{-\gamma}$ ), геометричний характер пилоутворення. По алгоритму Монте-Карло задається час і напрямок вильоту пилинки, її радіус, зрештою обчислюється швидкість вильоту пилинки із зони зіткнень.

Далі для кожної пилинки розв’язується система рівнянь руху під дією двох основних сил: сонячної гравітації ( $F_G$ ) і тиску сонячного випромінювання ( $F_R$ ). Рух частинок зручно розглядати в неінерційній кометоцентричній системі координат  $\{\xi, \eta, \zeta\}$ . Також використовувались відповідні сферичні координати  $r, \varphi, \theta$ . Систему рівнянь руху пилинки тоді можна подати у вигляді [4, 5]

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

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

$$\ddot{\xi} = -\mu_s(1-\beta)\frac{\xi}{y^3} - \mu_c\frac{\xi}{x^3},$$

де  $\mu_s = Gm_s$  — сонячний гравітаційний параметр,  $\mu_c = Gm_c$  — гравітаційний параметр комети,  $r, \theta, \dot{\theta}$  — відповідно геліоцентрична відстань комети, її кутова швидкість і кутове прискорення відносно Сонця;  $x = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}$ ,  $y = \sqrt{(r + \xi)^2 + \eta^2 + \zeta^2}$ . Перший доданок системи рівнянь руху — гравітаційні сили Сонця з поправкою на тиск випромінювання ( $\beta$ ). Другий доданок — сила тяжіння кометного ядра, інші доданки є корекціями на неінерційні ефекти. Координати  $\xi$  та  $\eta$  лежать у площині орбіти комети,  $\xi$  направлена протилежно до напрямку на Сонце,  $\eta$  — протилежно до напрямку руху комети навколо Сонця,  $\zeta$  направлена перпендикулярно до площини орбіти.

Розв'язками системи рівнянь руху є координати однієї пилинки на момент спостереження, а їхня сукупність дає модельний пиловий хвіст комети. Отримані кометоцентричні координати пилинок проєктуються на картинну площину для порівняння зі спостережними даними.

Вираз для безрозмірної величини  $\beta = F_R/F_G$  має вигляд [8]

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

де  $Q_{pr}$  — ефективність радіаційного тиску,  $\rho$  — густина ( $\text{г/см}^3$ ),  $a$  — радіус пилінки (мкм). Для частинок  $a \geq 0.2$  мкм  $Q_{pr}$  залишається приблизно незмінним, а значення  $\beta$  пропорційне  $a^{-1}$  [8]. У ході даних модельних досліджень густину пористих пилових частинок було прийнято рівною  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ .

Пилові частинки, вихоплені з поверхні ядра газами, залишають зону зіткнень з усталеною швидкістю, яка може бути визначена емпіричною формулою [7, 14]

$$V = Ar_a^{-0.5}a^{-0.5}.$$

Тут  $V$  — швидкість викиду пилинок,  $A$  — числовий параметр,  $r_a$  — геліоцентрична відстань пилінки,  $a$  — радіус пилінки. Додатково було прийнято, що усталені швидкості характеризуються розподілом Гаусса. Середнє значення розподілу становить найбільш ймовірне значення  $V$ , а відносне стандартне відхилення дорівнює 0.1.

Як відомо, після вивільнення з ядра комети динамічно не відділені нейтральний газ і пил формують кому. Та вже за кілька десятків кометних радіусів від поверхні пил динамічно відділяється від газу і формує пиловий хвіст [6]. Нашою метою було домогтися у процесі моделювання зіставлення модельних та спостережних ізофот.

#### МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Моделювання здійснювалося за допомогою комп'ютерної програми, написаної на алгоритмічній мові Фортран. Інтерфейс запуску і конт-

ролю отриманих обчислень був реалізований через пакет IDL, зорієнтований на аналіз зображень. Основою критерію узгодженості спостережених і модельних даних слугував ступінь збігу наборів ізофот. Значення всіх модельних параметрів для зручності задавалися в окремому файлі. У результаті моделювання були отримані оптимальні модельні параметри, які відповідають досягнутому зіставленню ізофот, і які є характеристиками пилу, що формує пилову складову атмосфери комети C/2012 K5. Модельне зображення було утворене з 200 млн частинок. Джерелом пилоутворення служив конус, направлений на Сонце з кутом розкриття  $100^\circ$ , тобто активність проявляла значна частина освітленої сонцем поверхні комети. У результаті модельних досліджень були отримані оптимальні модельні параметри (радіуси, швидкості, максимальний вік пилинок і показник степеня  $\gamma$  їхнього розподілу за розмірами), які є характеристиками пилу, що формує пилову складову атмосфери комет. Значення модельних параметрів такі: максимальний вік пилинок — 88 діб, радіуси пилинок  $a = 0.7 \dots 100$  мкм, степінь закону розподілу за розмірами  $\gamma = -2.4$ , швидкості пилинок  $V = 6 \dots 135$  м/с.

На рис. 1 показано розміщені поруч спостережене (зліва) та модельне (справа) зображення, а на рис. 2 — накладені один на інший набори спостережних та модельних ізофот.

Отримане нами у результаті моделювання значення степеня закону розподілу за розмірами ( $\gamma = -2.4$ ) відрізняється від тих, що повідомлялися для багатьох комет ( $\gamma = -3 \dots -4$ ), хоча воно, наприклад, відповідає степеню, отриманому для комети Shoemaker-Levy 9 ( $\gamma =$

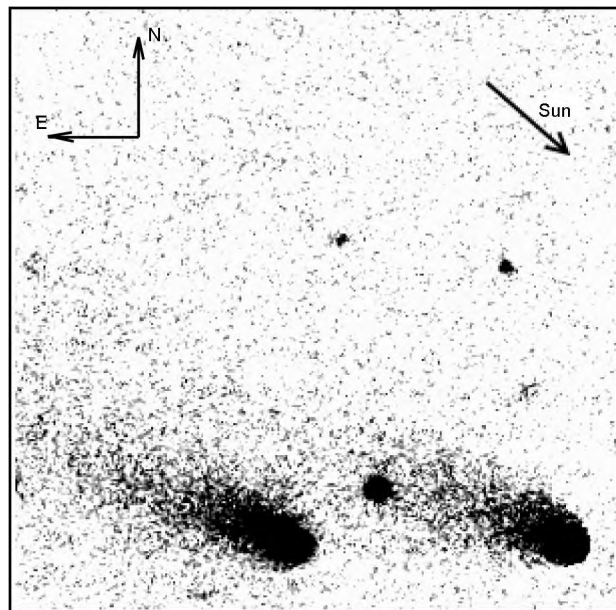
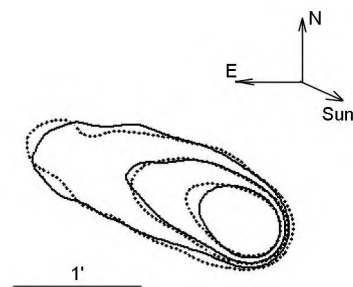


Рис. 1. Зображення комети C/2012 K5: справа — модельне, зліва — спостережене. Розмір зображення  $4.7 \times 4.7'$  (375 тис. км)

Рис. 2. Модельні (суцільні лінії) та спостережені (пунктир) набори ізофот пилового хвоста комети C/2012 K5



= -2.3) [9] і комети 1P/Halley [13]. Вимірювання потоків пилу під час проходження космічних апаратів поблизу ядер комет 1P/Halley («Джотто») та 81P/Wild 2 («Стардаст») також показали наявність частинок у дуже широкому діапазоні радіусів — від нанометрів до міліметрів із приблизно степеневим законом розподілу з індексом від -2 до -4, залежно від розмірів пилинок і їхнього розташування в комі комети [11].

Отримані в результаті моделювання оцінки швидкостей (6... 135 м/с) узгоджуються з оцінкою швидкостей пилу комети 9P/Tempel, виділеного зі штучно утвореного кратера під час місії Deep Impact. Комета тоді перебувала на відстані близько 1.5 а. о., і швидкості, досягнуті пилом після пилогазової взаємодії, лежали в діапазоні від 10 до 600 м/с для частинок від 0.1 до 100 мкм [10].

Авторами раніше було проведено модельне дослідження пилового компонента хвоста комети C/2012 S1 (ISON) [1], коли комета перебувала на відстані 1.45 а. о. від Сонця. У результаті моделювання були отримані такі оцінки: радіуси пилинок лежали у межах 0.5—16.6 мкм, швидкості пилинок — у межах 17—130 м/с. Максимальний вік частинок, які могли формувати хвіст, становив 25 діб. Степінь розподілу за розмірами пилинок не змінювався з часом і мав значення  $\gamma = -2.5$ . Як бачимо, при подібних відстанях від Сонця і значеннях показника розподілу пил, що формував пиловий хвіст комети C/2012 K5 (LINEAR), має ширший діапазон радіусів та швидкостей пилинок.

## ВИСНОВКИ

Нам вдалося відтворити відносний розподіл яскравості у пиловому хвості комети C/2012 K5 (LINEAR) за допомогою динамічного моделювання на основі алгоритму Монте-Карло. Як результат моделювання ми отримали модельні параметри, які є фізичними характеристиками пилових частинок, що формують хвіст комети: максимальний вік пилинок становить 88 діб, швидкості вильоту знаходяться в діапазоні від 6 до 135 м/с, радіуси пилинок — у діапазоні від 0.7 до 100 мкм, а значення степеня закону розподілу за розмірами становить -2.4.

Висловлюємо подяку президії НАН України за грант на розробку проектів науково-дослідних робіт молодим ученим НАН України.

1. Харчук С. В., Иванова А. В., Корсун П. П. и др. Исследование свойства пыли кометы C/2012 S1 (ISON) путем модельного анализа ее пылевого хвоста // Астрон. журн.—2014.
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.—(IAU Call. N 61).
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., Faury 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.

Стаття надійшла до редакції 24.02.15