

УДК 523.6

**С. В. Харчук, П. П. Корсун**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, 03680  
kharchuk@mao.kiev.ua; korsun@mao.kiev.ua

### **Модель пилового хвоста комети C/2011 L4 (PANSTARRS)**

*Представлено результати динамічного моделювання процесу формування пилового хвоста комети C/2011 L4 (PANSTARRS). Для модельної побудови пилового хвоста були простежені траєкторії 100 млн пилових частинок, розміри, напрями та моменти вильоту і початкові швидкості для яких були задані за допомогою алгоритму Монте-Карло. Отриманий тривимірний модельний хвіст було спроектовано на небесну сферу для порівняння з даними спостережень. Було відтворено розподіл яскравості та синхронні смуги у пиловому хвості комети. Поясненням формування смуг може бути різний темп виділення речовини з активної області в залежності від того, розташована вона на освітленій чи на затіненій стороні ядра комети, що обертається. Згідно з нашими модельними дослідженнями спостережений хвіст міг бути сформований пиловими частинками розмірами від 0.22 до 82 мкм, швидкості вильоту яких становили від 460 до 12 м/с, а показник степеня закону їхнього розподілу по розмірах дорівнює  $-3.1$ . Наші модельні експерименти показали, що період осьового обертання комети становить 17.2 год.*

*МОДЕЛЬ ПЫЛЕВОГО ХВОСТА КОМЕТЫ C/2011 L4 (PANSTARRS), Харчук С. В., Корсун П. П. — Представлены результаты динамического моделирования процесса формирования пылевого хвоста кометы C/2011 L4 (PANSTARRS). Для построения модельного пылевого хвоста были прослежены траектории 100 млн пылевых частиц, размеры, направления и моменты вылета и начальные скорости для которых были заданы с помощью алгоритма Монте-Карло. Полученный трехмерный модельный хвост был спроектирован на небесную сферу для сравнения с данными наблюдений. Были воспроизведены распределение яркости и синхронные полосы в пылевом хвосте кометы. Объяснением формирования полос может быть разный темп*

выделения вещества из активной области в зависимости от того, расположена она на освещенной или на затененной стороне вращающегося ядра кометы. Согласно нашим исследованиям наблюдаемый хвост мог быть сформирован пылевыми частицами, обладающими размерами от 0.22 до 82 мкм, со скоростями вылета от 460 до 12 м/с и с показателем степени закона распределения по размерам, равным  $-3.1$ . Наши модельные эксперименты показали, что период осевого вращения кометы составляет 17.2 ч.

*A MODEL OF THE DUST TAIL OF COMET C/2011 L4 (PANSTARRS), by Kharchuk S. V., Korsun P. P. — Our results of dynamic modelling of the dust tail formation for the comet C/2011 L4 (PANSTARRS) are presented. To simulate the dust tail, the trajectories of 100 million dust particles were traced. Their sizes, ejection moments, outflow directions and velocities were defined by a Monte Carlo algorithm. The obtained three-dimensional model tail was projected on the sky plane to compare with the observed images. The brightness distribution and synchronic features in the comet tail were fitted. According to our model experiments, the observed tail could be formed by particles with sizes from 0.22 to 82  $\mu\text{m}$ , with ejection velocities from 460 to 12 m/s and with a power index of the size distribution of  $-3.1$ . Our model experiments showed that the rotation period of the comet is 17.2 hours.*

## ВСТУП

Комету C/2011 L4 (PANSTARRS) було виявлено великим колективом дослідників при огляді неба в рамках програми пошуків потенційно небезпечних астероїдів. Її названо на честь 1.8-м телескопа Pan-STARRS 1, розташованого на острові Мауї (Гаваї, США) та оснащеного найбільшою цифровою камерою у світі (1.4 млрд пкл) [8]. Комета на момент відкриття мала блиск  $19.5^m$  і перебувала на відстані 7.9 а. о. від Сонця. Мінімальної відстані від Землі (1.1 а. о.) комета досягла 5 березня 2013 р., а точку перигелію перетнула 10 березня 2013 р. на відстані 0.3 а. о. Її ексцентриситет трохи перевищує одиницю. Максимального блиску  $-3^m$  за результатами спостережень комета досягла 10 березня 2013 р. [8].

Для моделювання ми вибрали зображення, отримане астрономом-аматором Лоренцо Комоллі 21 березня 2013 р., 18:56 UT за допомогою 140-мм рефрактора з чутливим ПЗЗ [<http://www.astrosurf.com/comolli/com38.htm>]. Саме у цей час у пиловому хвості комети спостерігались слабкі синхронні смуги. Зображення є комбінацією семи кадрів з експозицією 120 с кожен. На час спостереження комета була на відстані 0.46 а. о. від Сонця і на відстані 1.19 а. о. від Землі [<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi#results>].

## МОДЕЛЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

При модельному відтворенні пилового хвоста комети C/2011 L4 була використана модель, розроблена П. П. Корсуном [6]. У процесі модельної побудови пилового хвоста комети простежується траєкторія кожної окремої пилінки від часу вильоту із зони зіткнень навколо ядра до моменту спостереження. Для цього за допомогою алгоритму Монте-Карло задаються радіус пилінки, а також час, напрям і швидкість її вильоту із зони зіткнень. Потім для кожної пилінки розв'язується система рівнянь руху під дією двох основних сил: сонячної гравітації і тиску сонячного випромінювання. Результатом розв'язку системи рівнянь є координати однієї пилінки на момент спостереження, а їхня сукупність дає змодельований пиловий хвіст комети. Нарешті, отримані кометоцентричні координати пилинок проектуються на площину небесної сфери для порівняння зі спостережними даними.

Кометний пил переважно рухається під впливом двох основних сил: сонячної гравітації й тиску сонячного випромінювання. Для опису цього руху використовується відношення  $F_R/F_G$  сили тиску сонячного випромінювання до сили сонячної гравітації на тій же відстані. Оскільки [2]

$$F_G = \frac{GM_s}{r^2} \frac{4}{3} a^3, \quad F_R = \frac{Q_{pr}}{c} \frac{L_s}{4 r^2} a^2,$$

то

$$\frac{0.57Q_{pr}}{a},$$

де  $c$  — швидкість світла,  $G$  — гравітаційна стала,  $M_s$  — маса Сонця,  $a$  — радіус пилінки в нанометрах,  $\rho$  — густина пилінки,  $r$  — геліоцентрична відстань пилінки,  $Q_{pr}$  — ефективність радіаційного тиску, яка залежить від розміру, форми та оптичних характеристик пилінки,  $L_s$  — загальна енергія, виділена Сонцем за 1 с. Для пилинок  $a$

0.2 мкм величина  $Q_{pr}$  залишається приблизно незмінною, а значення пропорційне  $a^{-1}$  [2]. Було прийнято, що об'ємна густина пористих пилових частинок незмінна з часом і рівна  $1 \text{ г/см}^3$ .

Швидкості вильоту частинок визначались за емпіричною формулою, запропонованою Секаніною [10]:

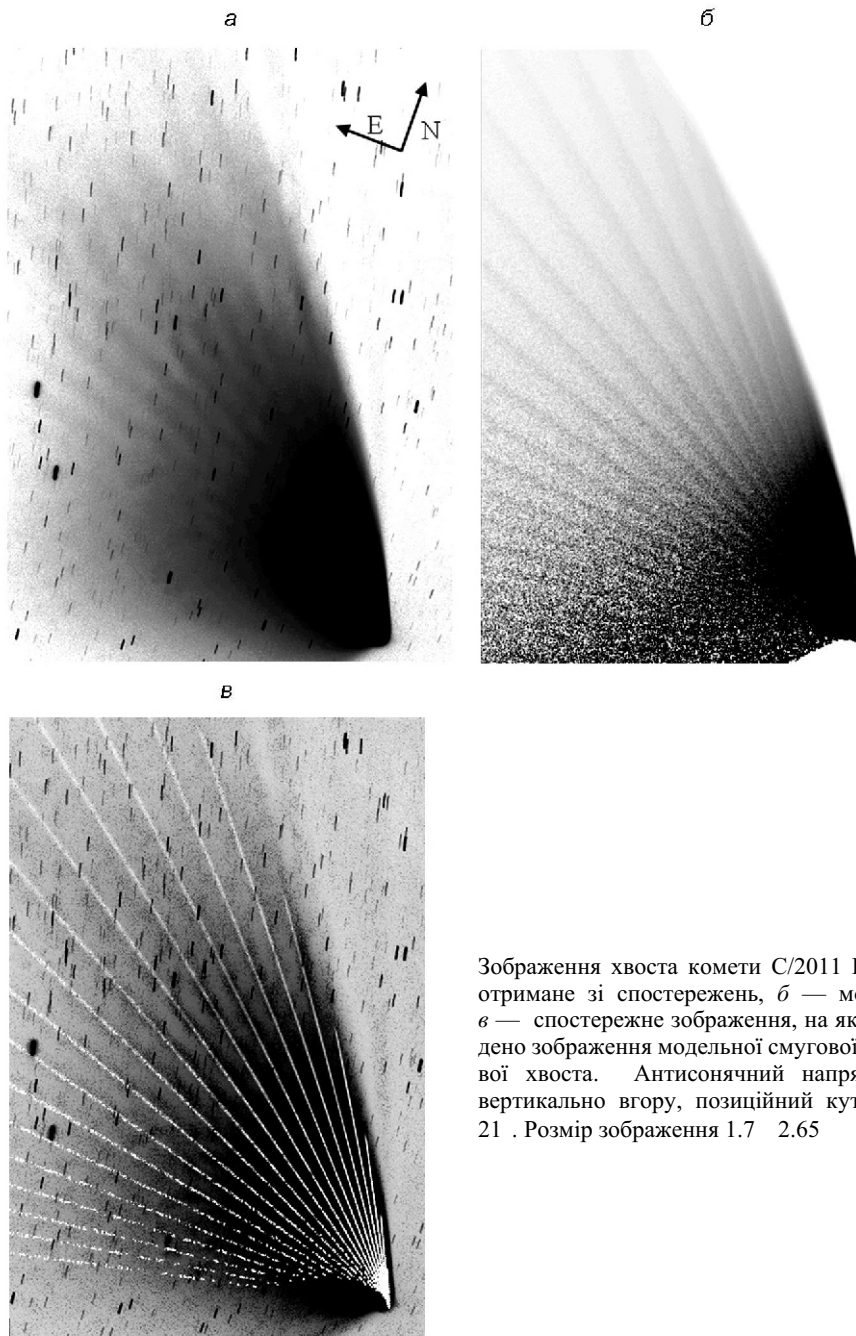
$$V = r_d^{0.5} / (A + Ba^{0.5}).$$

Тут  $V$  — швидкість викиду пилинок,  $A, B$  — числові параметри,  $r_d$  — геліоцентрична відстань пилінки,  $a$  — радіус пилінки.

У результаті моделювання були отримані оптимальні модельні параметри, які є характеристиками кометного пилу. Виявилось, що значення радіусів пилинок, з яких утворений пиловий хвіст комети, лежать в інтервалі 0.22 і 82 мкм, швидкості пилинок лежать у межах 12 і 460 м/с. Це узгоджується з даними теоретичних та спостережних досліджень, за якими субмікронні пилові частинки мають швидкості

360—740 м/с [9]. Максимальний вік пилинок — 47 діб, степінь їхнього розподілу за розмірами ( $n(a) \propto a^{-3}$ ) незмінний із часом і має значення  $\alpha = -3.1$ . Ми отримали значення  $\alpha = -3...-4$ , характерне для багатьох комет [3, 4].

Моделювання показало, що наявність смугових структур у хвості комети можна пояснити активністю однієї локальної області. Завдяки осьовому обертанню активна область перебуває по черзі то на освітленій, то на нічній півкулі комети. Рівень продукування пилу і газу при



Зображення хвоста комети C/2011 L4: *a* — отримане зі спостережень, *б* — модельне, *в* — спостережне зображення, на яке накладено зображення модельної смугової складової хвоста. Антисонячний напрямок — вертикально вгору, позиційний кут хвоста  $21^\circ$ . Розмір зображення  $1.7 \times 2.65$

цьому різний, завдяки чому й утворюються згущення пилу, що спостерігаються у вигляді смуг. У процесі моделювання ми прийняли зміну активності локальної області пропорційною квадрату косинуса кута відхилення від напрямку на Сонце. Визначений нами період осевого обертання комети 17.2 год узгоджується з даними [7], згідно з якими для ряду комет значення періодів обертання лежать у діапазоні від 3.471 год (для комети 133P/Elst-Pizarro) до кількох діб. Використане тут пояснення утворення смуг ми використовували раніше при моделюванні утворення смуг у пилових хвостах деяких комет і отримали такі значення періодів обертання: для комети C/2006 P1 (McNaught) — 21 год, C/1957 P1 (Mrkos) — 15.4 год, C/1910 A1 — 8.5 год, C/1975 V1 (West) — 7.35 год.

Моделним аналогом викиду пилу з активної області був конус із кутом розкриття  $100^\circ$ . Фізичні характеристики пилу, продукованого активною областю, такі ж, як характеристики пилу, який виділяється з усієї поверхні ядра комети, однак через те що видимість смуг з їхнім віком стає гіршою, моделювання з впевненістю показало лише те, що у смугоутворенні беруть участь пилинки віком до 15 діб. Загалом модельне зображення було утворене зі 100 млн пилинок. Модельне та спостережене зображення комети C/2011 L4 (PANSTARRS) приведені на фрагментах *a* та *b* рисунка, а на фрагменті *в* показано, як ці два зображення узгоджуються між собою.

## ВИСНОВКИ

Нам вдалося відтворити розподіл яскравості у пиловому хвості комети C/2011 L4 за допомогою моделювання методом Монте-Карло. Також були відтворені смугові деталі хвоста шляхом моделювання активності локальної ділянки на поверхні ядра комети, що обертається. Оцінено значення модельних параметрів: максимальний вік пилинок, які формують хвіст, становить 47 діб, діапазон швидкостей вильоту  $V = 12 \dots 460$  м/с, характерний розмір пилових частинок  $a = 0.22 \dots 82$  мкм, степінь розподілу по розмірах  $\alpha = -3.1$ , період обертання комети навколо своєї осі  $P = 17.2$  год.

1. Харчук С. В., Корсун П. П. Утворення смугових структур у пилових хвостах комет // Вісник Астрон. школи.—2012.—**8**, № 1.—Р. 80—86.
2. Fernandez J. A., Jockers K. Nature and origin of comets // Rep. Prog. Phys.—1983.—**46**.—Р. 665—772.
3. Fulle M. Motion of cometary dust // Comets II / Eds M. C. Festou, H. U. Keller, H. A. Weaver. — Tucson: Univ. Arizona Press, 2004.—Р. 565—575.
4. Jockers K. Observations of scattered light from cometary dust and their interpretation // Earth, Moon, and Planets.—1997.—**79**, N 1/3.—Р. 221—245.
5. Kharchuk S. V., Korsun P. P. Striated features in the dust tail of comet C/2006 P1 (McNaught) // Kinematics and Physics of Celestial Bodies.—2010.—**26**, N 6.—Р. 322—325.

6. *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.
7. *Samarasinha N. H., Mueller B. E. A., Belton M. J. S., Jorda L.* Rotation of cometary nuclei // *Comets II* / Eds M. C. Festou, H. U. Keller, H. A. Weaver. — Tucson: Univ. Arizona Press, 2004.—P. 281—299.
8. *Schnabel A.* Infoblatt für den Kometen C/2011 L4 PANSTARRS.—2013.
9. *Sekanina Z., Hanner M. S., Jessberger E. K., Fomenkova M. N.* Cometary dust // *Interplanetary dust* / Eds E. Gruen, B. A. S. Gustafson, S. F. Dermott, H. Fechtig. — Heidelberg: Springer, 2001.—P. 95—161.
10. *Sekanina Z., Larson S. M., Hainaut O., Smette A., West R. M.* Major outburst of periodic comet Halley at a heliocentric distance of 14 AU // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**263**.—P. 367—386.

Стаття надійшла до редакції 27.03.14