

УДК 523.64-853

Л. М. Шульман, О. В. Иванова

Головна астрономічна обсерваторія НАН України  
03680, МПС, Київ, ул. Академіка Заболотного 27

### Утворення кратерної структури на поверхні кометного ядра внаслідок зіткнень з метеороїдами

*Можливі декілька механізмів утворення кратерів на поверхні кометного ядра: орбітальна еволюція неоднорідного ядра, зіткнення з метеороїдом, інтенсивне випаровування об'ємних включень оксидів вуглецю, тепловий вибух внаслідок кристалізації аморфного льоду або рекомбінації гідратованих іонів. Розглядається один з можливих механізмів утворення кратерної структури на поверхні кометного ядра — метеороїдне бомбардування. Розраховується ймовірність одночасного існування кількох кратерів на одному ядрі залежно від тривалості життя та частоти утворення.*

*ОБРАЗОВАНИЕ КРАТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КОМЕТНОГО ЯДРА ВСЛЕДСТВИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ С МЕТЕОРОИДАМИ, Шульман Л. М., Иванова О. В. — Возможны несколько механизмов образования кратеров на поверхности кометного ядра: орбитальная эволюция неоднородного ядра, столкновение с метеороидом, интенсивное испарение объемных вкраплений окислов углерода, тепловой взрыв вследствие кристаллизации аморфного льда или рекомбинации гидратированных ионов. Рассматривается один из возможных механизмов образования кратерной структуры на поверхности кометного ядра — метеороидное бомбардирование. Рассчитывается вероятность одновременного существования нескольких кратеров на одном ядре в зависимости от времени жизни и частоты образования.*

*THE FORMATION OF THE CRATER STRUCTURE ON THE SURFACE OF A COMETARY NUCLEUS BY METEOROID IMPACTS, by Shulman L. M., Ivanova A. V. — Several mechanisms of the formation of craters on the surface of a cometary nucleus are possible: the orbital evolution of an inhomogeneous nucleus, a meteoroid impact, an intensive vaporization of bulk CO<sub>2</sub>/CO inclusions, and a heat explosion due to the crystallization of amorphous ice or the recombination of hydrated ions. One of the possible mechanisms of the formation of the crater structure on the surface of a cometary nucleus, namely meteoroid impacts is considered. The probability of the simultaneous existence of several craters on the same nucleus is calculated with respect to different lifetimes and their formation frequency.*

## ВСТУП

Предмет цієї роботи — можливі механізми утворення кратерів, що спостерігаються як активні зони кометного ядра. Можна уявити різні шляхи кратеризації кометного ядра: некатастрофічні еволюційні процеси та деякі вибухові механізми. Некатастрофічна кратеризація в процесі орбітальної еволюції можлива, коли різні ділянки ядра мають різний вміст та склад пилу: заглиблення утворюються в тих місцях, де немає достатньо крупної фракції пилу, і випаровування йде без екранування криги порошинками. Катастрофічні вибухові процеси можуть бути або екзогенними (зіткнення з метеороїдами), або ж ендогенними: швидка сублимація деякого легколетючого неводяного льоду (наприклад, CO або CO<sub>2</sub>), тепловий вибух внаслідок швидкої кристалізації аморфного водяного льоду [6, 7] або рекомбінація гідратованих іонів [2].

Досі немає певності, чи кратерна структура є загальною рисою всіх кометних ядер. Відповідь на це питання можна шукати у вивченні шляхів формування кратерів на поверхні. На сьогодні кількість публікацій на цю тему невелика [5, 9, 11], і в механізмі утворення активних областей залишається ще багато нез'ясованого. У роботі [3] розглядаються теоретичні моделі кратерів на поверхні кометного ядра на основі досліджень топографічного майбутнього кратерів за умови хімічної однорідності поверхні. Однак для побудови більш реалістичної моделі ядра необхідно врахувати той факт, що ядро неоднорідне, але, на жаль, надійної інформації про склад ядра дуже мало. Всі наявні дані базуються на інформації, отриманої під час космічних місій до комет Галлея та Бореллі, а також з даних лабораторного моделювання процесу сублимації запиленого льоду. Також пропонувалися гіпотези утворення кратерів під час формування самого ядра. Наприклад, якщо неоднорідне ядро сформувалося шляхом об'єднання фрагментів з різним вмістом пилу та CO<sub>2</sub>/CO.

Хімічна неоднорідність ядра (варіації гранулометричного складу пилу та летючих речовин) теж може бути причиною кратеризування поверхні ядра. Цілковито ймовірними причинами кратеризації поверхні кометного ядра можна вважати вищезгадані орбітальну еволюцію неоднорідного ядра, метеороїдні зіткнення з ядром, об'ємне вкраплення оксидів вуглецю, вибух на поверхні за рахунок швидкого вмикання джерела внутрішньої енергії, яке є в кометному ядрі. Нижче з усіх можливих механізмів кратеризації ми розглядаємо лише один — метеоритну кратеризацію. Жодного випадку утворення кратерів таким шляхом на очах спостерігачів не зареєстровано, але кратери спостерігаються не лише на ядрах комет, але й на поверхнях астероїдів та супутників планет. В останньому випадку маємо, крім ймовірних метеоритних, вулканічні кратери. Виверження вулкану на супутнику Юпітера Іо спостерігалось приладами КА «Вояджер-1» у 1979 р.

Кометні ядра значно менші за розмірами, ніж супутники планет чи астероїди, проте за даними апаратів «Вега» та «Джотто» на ядрі комети Галлея було щонайменше 17 кратерів. З усієї окресленої вище проблеми ми обговорюємо одне конкретне питання, а саме: чи може метеоритний механізм забезпечити наявність на поверхні ядра багатьох кратерів одночасно.

## ІМОВІРНІСТЬ СПОСТЕРЕЖЕННЯ КІЛЬКОХ КРАТЕРІВ НА ПОВЕРХНІ КОМЕТНОГО ЯДРА

Земля, Місяць, Марс та інші тіла Сонячної системи бомбардуються метеороїдними тілами. Зіткнення тіл Сонячної системи вивчається багато років. Найближчим до теми нашої роботи було дослідження Фернандеса [4], який оцінив час формування кратерів різного діаметра при кожному проходженні

перигелію для комет Галлея та Аренда — Ріго. Ці дослідження і покладено в основу нашої роботи. Фернандес створив модель просторового розподілу метеороїдів. Він користувався напівемпіричним зв'язком між енергією тіла  $E$  та діаметром кратера  $D$  у вигляді

$$D = K_{\text{imp}} \sqrt[3]{E}, \quad (1)$$

де  $K_{\text{imp}} = 0.013 \text{ м/Дж}^{1/3}$ . Згідно з оцінками Фернандеса ймовірність утворення на одному оберті навколо Сонця кратера діаметром від кількох десятків до 200 метрів становить від 0.01 для великих кратерів до 0.1 і більше — для малих кратерів. Чим менший діаметр кратера, тим більше шансів зіткнутися з метеороїдом, здатним такий кратер утворити. Це — прямий наслідок розподілу метеорних тіл за масами. Зіткнення метеорних тіл із іншими тілами Сонячної системи вивчали також Стил та Елфорд [8].

Ймовірність утворення  $n$  кратерів на поверхні кометного ядра при зустрічі з метеороїдними тілами за  $N$  обертів навколо Сонця можна розрахувати за формулою розподілу Пуассона:

$$P = \frac{(\nu N)^n}{n!} e^{-(\nu N)}, \quad (2)$$

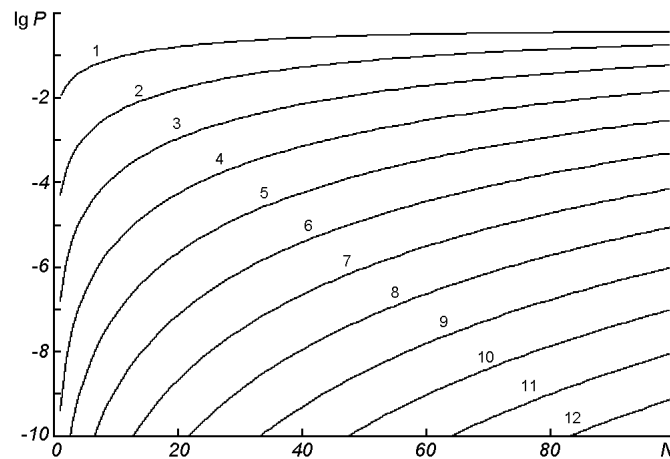


Рис. 1. Ймовірність утворення  $n$  кратерів з різним часом життя, при частоті утворення  $\nu = 0.01$  за один оберт комети. Числа біля кривих — значення  $n$

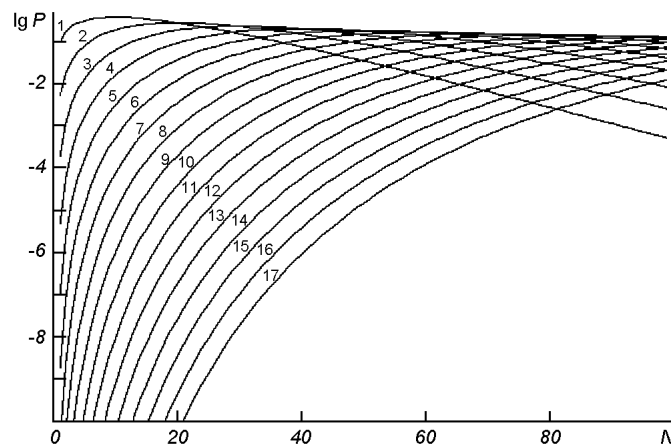


Рис. 2. Ймовірність утворення  $n$  кратерів з різним часом життя, при частоті утворення  $\nu = 0.1$  за один оберт комети

де  $\nu$  — частота утворення кратерів на поверхні ядра. На рис. 1 та 2 показана ця функція для двох частот утворення:  $\nu = 0.01$  та  $0.1$  за один оберт комети навколо Сонця.

#### ОРБИТАЛЬНА ЕВОЛЮЦІЯ КОМЕТНИХ ЯДЕР

Якби кратери, що утворилися на поверхні кометного ядра існували практично необмежений час, то поверхня кометних ядер була б схожа на поверхні астероїдів чи супутників планет. Насправді кратер на кометному ядрі — це отвір у поверхневому пиловому шарі, якій утворився за рахунок утримання на поверхні найкрупніших фракцій пилу. Після утворення кратера його дно стає джерелом газопилового потоку, а відтак дно може знов вкритися пилом, тобто активна область кометного ядра має обмежену тривалість життя. Ясно, що кількість активних областей, які можуть одночасно існувати на ядрі, визначається балансом між кратероутворенням та вторинним зникненням кратерів.

Еволюція кометних ядер описується двома рівняннями [2]. Перше рівняння описує зміну радіуса  $r$  ядра:

$$\frac{dr}{d\varphi} = - \frac{86400(1 - \xi)mZ_1(1 + e\cos\varphi)^{n-2}}{k_g(1-f)\rho[q(1+e)]^{n-1.5}}, \quad (3)$$

де константа 86400 — це кількість секунд в добі,  $k_g = 0.01720209895$  рад/добу — константа Гаусса,  $m$  — маса молекули води,  $Z_1$  — газопродуктивність на одиницю площі на відстані 1 а. о. від Сонця,  $n$  — показник степеня в емпіричній геліоцентричній залежності  $Z = Z_1/r^n$ ,  $\rho$  — густина ядра,  $f$  — об'ємний вміст пилу,  $\xi$  — частка поверхні, закрита пилом,  $e$ ,  $q$ ,  $\varphi$  — ексцентриситет, перигелійна відстань та істинна аномалія комети.

Перше рівняння добре інтегрується у випадку, коли геліоцентрична відстань  $r < 5$  а. о., на таких відстанях  $n \approx 2$ , і температура водяного льоду контролюється сублімацією. В цьому випадку тепловою радіацією, як і кондуктивним тепловим потоком, спрямованим вглиб кометного ядра, можна знехтувати. На великих геліоцентричних відстанях водяна крига перебуває у променистій рівновазі, тобто

$$Z \propto \exp(-B\sqrt{r}/T_1), \quad (4)$$

де  $T_1$  — температура при геліоцентричній відстані  $r_k = 1$  а. о.,  $B$  — константи для апроксимації залежності тиску насиченої пари від температури. Враховуючи, що  $n = -d\lg Z/d\lg r$ , маємо вираз для показника  $n$ :

$$n = L\sqrt{r}/(kT) > 2, \quad (5)$$

де  $L$  — енергія сублімації однієї молекули

Друге еволюційне рівняння описує вікове запилення кометної поверхні:

$$\frac{d\lg(1 - \xi)}{d\varphi} = K_d \left( \frac{1}{a_{кр(\varphi=0)}} - \frac{1}{a_{\max}} \right) (1 + e\cos\varphi)^{n-2}, \quad (6)$$

де  $K_d$  — коефіцієнт, який розраховується з функції розподілу частинок за розмірами,  $a_{кр}$  — критичний радіус найбільшої порошокинки, яка ще виноситься газовим потоком до атмосфери,  $a_{\max}$  — максимальний радіус порошокинки в даному ядрі комети,  $\xi$  — частка поверхні, закрита пилом,  $e$ ,  $q$ ,  $\varphi$  — ексцентриситет, перигелійна відстань та істинна аномалія комети. Ми використали розподіл частинок в метеорних потоках, які утворилися після розпаду комет. У метеорній астрономії використовується розподіл Парето [1]:

$$F(a) \propto a^{-4} \quad \text{для} \quad a_{\min} < a < a_{\max}, \quad (7)$$

де  $a_{\min}$  та  $a_{\max}$  — мінімальний та максимальний радіус порошинок, за умови, що  $F(a) = 0$  за межею  $(a_{\min}, a_{\max})$ . Тоді маємо

$$K = \frac{3f}{4lg(a_{\max}/a_{\min})} \cdot \frac{86400Z_1m_{\text{H}_2\text{O}}}{k_g\rho(1-f)[q(1+e)]^{n-1.5}}, \quad (8)$$

і критичний радіус порошинки дорівнює

$$a_{\text{кр}}(\varphi = 0) = \frac{51}{64\pi} \cdot \frac{Z_1\sqrt{2\pi m_{\text{H}_2\text{O}} kT}}{G\rho_{\text{я}}\rho_{\text{п}}r_{\text{я}}q^n}, \quad (9)$$

де  $G$  — гравітаційна стала,  $Z_1$  — газопродуктивність на одиницю площі на відстані 1 а. о. від Сонця,  $n$  — показник ступеню в емпіричній геліоцентричній залежності:  $Z = Z_1/r_{\text{с}}^n$ ,  $\rho_{\text{я}}$  — густина ядра,  $\rho_{\text{п}}$  — густина пилінки,  $r_{\text{я}}$  — радіус ядра. Частинки, для яких  $a > a_{\text{кр}}(\varphi = 0)$  акумулюються на поверхні ядра.

Цей підхід прийнятний для звичайного мінерального пилу, який складається з ковалентних кристалів або з керамічної чи іншої матерії з достатньо малою силою зв'язку. Космічні дослідження підтвердили те, що більша частина поверхні ядра покрита досить твердою пиловою коркою чи достатньо міцною темною плівкою, органічні полімери якої формуються за рахунок радіаційної полімеризації. Більшість вуглеводнів здатні полімеризуватись або під дією Галактичних космічних променів, які досягають глибини 1 м, або під дією сонячних космічних променів. Останні генеруються в основному в потужних хромосферних спалахах. Вони м'якші за галактичні та проникають у ядро тільки на глибину приблизно 1 мм.

Окрім утворення органічного пилу (CHON-частинок в кометі Галлея) космічні промені можуть породжувати органічні плівки на поверхні мінеральних гранул. Крім того, складні органічні молекули можуть бути сформовані радіаційним синтезом в міжзоряних порошинках. Органічна плівка може покривати мінеральні порошинки в первинній туманності ще до конденсації на них водяної пари. Органічні плівки можуть бути хорошим клеєм, який захищає частинки від випаровування.

Ми не можемо представити всю картину кратероутворення в деталях. Ясно, що сила зчеплення між порошинками може тільки скоротити час існування кратерів. Однак якщо враховувати лише силу зчеплення, тоді можлива ситуація, коли всі періодичні комети перетворюються на астероїди за час одного чи кількох обертів, тому що оболонка комети ніколи б не була порушена після проходження афелію. Тому інші теорії повинні враховувати не лише одну силу зчеплення, а ще й термомеханічні руйнування.

Тепловий вплив на кометні ядра, а саме на водяний лід з вкрапленням  $\text{CO}_2$ , досліджували Тойбер та Кюрт [10]. Вони отримали цікавий феномен, що температура поверхні кометного ядра періодично змінюється від 100 К до 400 К при обертанні. У випадку коли кометне ядро покривається пилом, варіацією радіуса ядра можна знехтувати. Характерний час життя активних регіонів відносно часу покриття кіркою поверхні, можна знайти, розв'язуючи інтегральне рівняння еволюції кометних ядер (2).

Для розрахунків було взято такі параметри:  $n = 2$ ,  $r_{\text{я}} = 5.5$  км,  $q = 0.587$ ,  $e = 0.967$ ,  $\rho_{\text{я}} = 0.5$  г/см<sup>-3</sup>,  $T = 190$  К,  $a_{\max} = 20$  см,  $a_{\min} = 10$  нм,  $Z_1 = 2.7 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Результати представлені на рис. 3. Як бачимо, орбітальні параметри відповідають кометі Галлея. Рис. 3, а дає можливість оцінити вікове ослаблення  $\Delta t$  блиску комети, якби її ядро було повністю активне і вкривалося б пилом рівномірно. Застосовуючи ці розрахунки не до всього

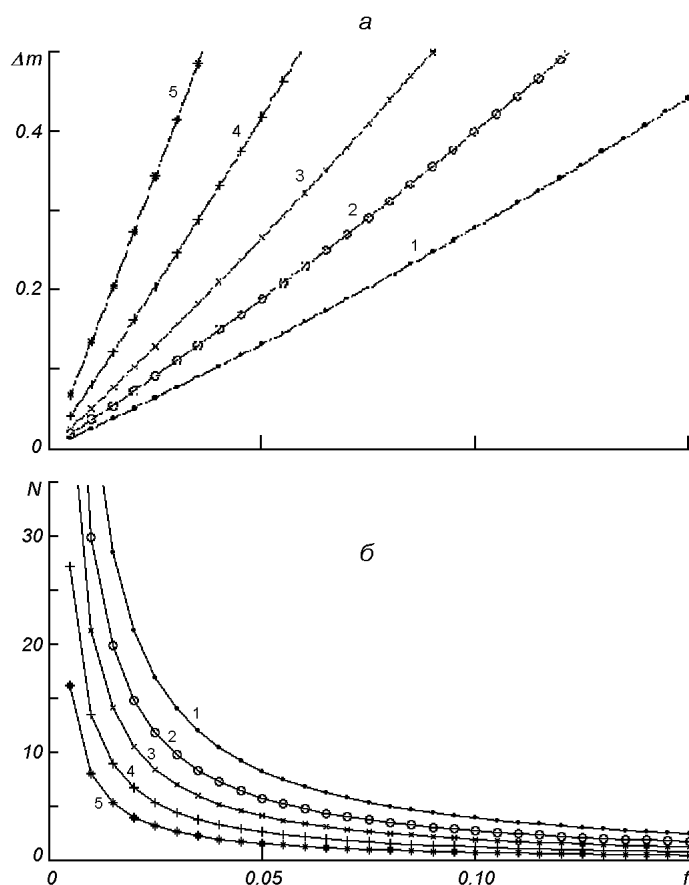


Рис. 3. Темп заповнення поверхні крижаного ядра (вікове ослаблення комети) (а) та тривалість життя кратерів (б) на поверхні ядра комети P/Halley в залежності від вмісту пилу та густини порошників; криві 1—5 — для  $\rho_p = 1.0, 1.3, 1.7, 2.5$  і  $4.0$  відповідно

ядра, а для дна окремого кратера, матимемо оцінку тривалості його життя в залежності від вмісту пилу та густини речовини порошинки. Цей результат подано на рис. 3, б. Якщо вміст пилу в ядрі комети Галлея складав 10 %, а середня густина мінеральних частинок дорівнювала  $2.5 \text{ г/см}^3$ , то маємо тривалість життя кратера майже чотири оберти. Можна зробити висновок, що ймовірність існування 17 метеоритних кратерів на ядрі комети Галлея надзвичайно мала. Метеоритний механізм не може забезпечити виникнення більш ніж 3-4 активних областей, як це спостерігалось на ядрі комети Бореллі.

#### ВИСНОВКИ

Ймовірність існування 17 великих кратерів, кожний розміром 100 м, які б утворилися шляхом метеороїдного бомбардування ядра комети Галлея, дуже мала. Проте можна зауважити, що метеороїдне бомбардування грає не останню роль в еволюції комет та бере участь в утворенні кратерної структури на поверхні ядра. Як показує місія DS-1, ядро комети Бореллі мало значно меншу кількість активних областей, які принципово можуть мати метеоритне походження. Крім того, метеороїдне бомбардування пробуджує «мертві» кометні ядра, повністю вкриті пиловим шаром. Ймовірність

існування на поверхні кометного ядра великої кількості кратерів збільшується із зменшенням їхнього радіуса, тобто маси падаючого на поверхню ядра тіла. Отже, багато з кратерів, що спостерігаються на кометах, в тому числі і на кометі Галлея, мають інше походження.

1. Волощук Ю. И., Кащеев Б. Л., Кручиненко В. Г. Метеоры и метеорное вещество. — Киев: Наук. думка, 1989.—296 с.
2. Шульман Л. М. Ядра комет. — М.: Наука, 1987.—230 с.
3. Colwell J. E., Jakosky B. M., Sandor B. J., Stern S. A. Evolution of topography on comets. II. Icy craters and trenches // *Icarus*.—1990.—85, N 1.—P. 205—215.
4. Fernandez J. A. Collisions of comets with meteoroids // Asteroids, comets, meteors III: Proceedings of a meeting (AMC 89) held at the Astronomical Observatory of the Uppsala University, June 12—16.—1989.—P. 309.
5. Gombosi T. I., Houppis H. L. F. An icy-glue model of cometary nuclei // ESA Proceedings of the 20<sup>th</sup> ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet.—1986.—Vol. 2.—P. 397—401.
6. Patashnik H., Rupprecht G., Shuerman D. W. Energy source for comet outburst // *Nature*.—1974.—250, N 5464.—P. 313—314.
7. Sekanina Z. Dust environment of comet Halley // ESA Proceedings of the 20<sup>th</sup> ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet.—1986.—Vol. 2.—P. 131—143.
8. Steel D. I., Elford W. G. Collisions in the solar system. III. Meteoroid survival times // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1986.—218.—P. 185—199.
9. Stoffler D. Petrographic working model of the Rosetta sampling and modelling subgroup for a comet nucleus // ESA. Physics and Mechanics of Cometary Materials.—1989.—P. 23—29.
10. Tauber F., Kurt E. Thermal stresses in cometary nuclei // *Icarus*.—1987.—69, N 1.—P. 83—90.
11. Wallis M. K., Wickramasinghe N. C. Crustal models of the evolving comet nucleus // ESA. Proceedings of the International Symposium on the Diversity and Similarity of Comets.—1987.—P. 495—499.

Поступила в редакцію 17.07.03