

УДК 523.6

**Теплове випромінювання льодяних кометних пилинок
у випадку їхнього руйнування. Порівняння
з випромінюванням пилинок в рівноважному стані**

Д. П. Андрієнко, І. Г. Міщишина

Київський національний університет імені Тараса Шевченка.
03022 Київ, пр. Глушкова, 6

Поставлена та розрахована задача зміни теплового випромінювання кометних пилинок внаслідок порушення їхньої теплової рівноваги. Розглянуто випадки фіксованих початкових відхилень температури та відхилень, найбільших з можливих у моделі подрібнення пилових частинок. Наведено значення часу релаксації температури пилинок, розраховані за рівнянням, що визначає зміну кількості тепла пилінки у полі сонячної радіації, для випадку її максимальних початкових відхилень. Досліджено нерівноважне теплове випромінювання пилинок з чистого льоду та льоду, забрудненого силікатом або вуглецем. Показано, що льодяні пилінки, забруднені вуглецем, при подрібненні практично не виходять із стану теплової рівноваги. На противагу цьому, пилінки з чистого льоду та забруднені силікатом розмірами 10—100 мкм, які утворилися в результаті подрібнення, можуть значний час перебувати в стані з порушеною тепловою рівновагою. Зміни теплового потоку пилинок відносно рівноважного стану мають виражену асиметрію: внески від пилинок, що охолоджуються, та від тих, що нагріваються, суттєво різні. При цьому теплове випромінювання пилинок, які охолоджуються, усереднене за час релаксації, може змінюватись відносно рівноважного майже в 100 раз на довжині хвилі 3 мкм, ефект зростає із зменшенням довжини хвилі.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛЕДЯНЫХ КОМЕТНЫХ ПЫЛИНОК ПРИ ИХ РАЗРУШЕНИИ. СРАВНЕНИЕ С ИЗЛУЧЕНИЕМ ПЫЛИНОК В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ, Андрієнко Д. А., Міщишина І. І. — Поставлена и рассчитана задача изменения теплового излучения кометных пылинок вследствие нарушения их теплового равновесия. Рассмотрены случаи фиксированных начальных отклонений температуры и отклонений, наибольших из возможных (максимальных) в модели дробления пылевых частиц. Приведены значения времени релаксации температуры пылинок для случая ее максимальных отклонений, рассчитанные по уравнению, определяющему изменение количество тепла пилінки в поле солнечной радиации. Исследовано неравновесное тепловое излучение пылинок из водяного льда и льода, загрязненного силикатом или углеродом. Показано, что ледяные пилінки, загрязненные углеродом, при разрушении практически не выходят из состояния равновесия. В противовес этому пилінки

из чистого льда и загрязненные силикатом размерами 10—100 мкм, образовавшиеся в результате разрушения, могут значительное время пребывать в состоянии с нарушенным тепловым равновесием. Изменения теплового потока пылинок относительно равновесного состояния имеют выраженную асимметрию: вклады от пылинок, которые охлаждаются, и от тех, которые нагреваются, существенно различны. При этом тепловое излучение от охлаждающихся пылинок, усредненное за время релаксации, может изменяться относительно равновесного почти в 100 раз на длине волны 3 мкм, эффект растет с уменьшением длины волны.

THERMAL EMISSION FROM BREAKING COMETARY DUST PARTICLES AND ITS COMPARISON WITH THE EMISSION AT THERMAL EQUILIBRIUM by Andrienko D. P., Mischishina I. I. — The paper concerns with the evolution of the thermal properties of comet grains when their thermal equilibrium is disturbed. The problem is based on two assumptions regarding the initial temperature deviation: fixed initial deviation and its maximum values (according to the model of dust particle breaking). The temperature relaxation time of a dust particle for the maximal initial temperature deviation is calculated on the basis of the equation defining the dust particle heat variations in the solar radiation field. The nonequilibrium thermal radiation of the pure water ice particles as well as of the particles polluted by silicates or carbon was studied. When breaking up, the water/carbon ice particles practically stay at the thermal equilibrium. On the contrary, after breaking down pure water ice particles with a size of 10—100 μm and those polluted by silicates can be at the thermal nonequilibrium for a rather long time. Thermal emission variations of dust particle averaged over relaxation time are asymmetrical about the equilibrium value due to a substantially different contribution from cooling and heating particles. The thermal emission differs from the equilibrium one by a factor of 100 at 3 μm .

ВСТУП

Для визначення природи кометних пилових частинок та вивчення процесів, які відбуваються в голові комети, важливе значення має дослідження їхнього теплового випромінювання. Основу таких досліджень становить порівняння вимірювань теплових потоків від комети з результатами теоретичного моделювання. І хоча цей підхід не дозволяє в результаті розрізнити ефекти розподілу за розмірами та складу пилинок, все ж у поєднанні з іншими методами досліджень, такими як вивчення радіовипромінювання, розсіяного світла та динамічних особливостей руху пилових часток, він дає можливість значно зменшити неоднозначність інтерпретації.

Для випадку, коли пилінки перебувають у стані теплової рівноваги, подібна задача в кометній фізиці розв'язувалась неодноразово [12, 16]. Для пилинок з чистого та забрудненого мінеральними включеннями водяного льоду (льодяні та льодисті пилінки) подібні дослідження теж проводились [5—7]. Названі пилінки сублімують в полі сонячної радіації і повільно зменшують свій розмір, залишаючись при цьому в стані теплової рівноваги.

Особливістю льодяних та льодистих пилинок є те, що вони нестійкі до механічних напруг і можуть руйнуватись в атмосфері комети. Руйнування може спричинятися, наприклад, взаємодією їх із швидкісними потоками сонячного вітру [1, 14, 15], або від теплового шоку [9, 10]. Процес подрібнення пилинок приводить до того, що температура новоутворених уламків буде дорівнювати температурі материнської пилінки, яка може значно відрізнятися від рівноважної температури, що відповідає розміру уламка. В результаті температура кожного уламка буде змінюватися,

наближаючись до його власної рівноважної температури. Попереднє дослідження задачі про релаксацію температури до рівноважного значення показало, що час, протягом якого льодяна пилінка міліметрового розміру перебуває в стані з порушеною тепловою рівновагою, може сягати кількох хвилин на геліоцентричній відстані 1 а. о. [2]. Цей час ми умовно назвали часом релаксації до рівноважної температури (щоб відрізнити від відомого параметра «час релаксації»), позначивши його τ_r . Він визначає інтервал часу, коли температура релаксуючої пилінки відрізняється від рівноважної більше, ніж на задану малу величину ΔT_r , яку ми вибрали рівною 0.01 К. Величина τ_r складним чином залежить від розмірів пилинок, їхнього складу та початкових відхилень температури ΔT_0 . Ці початкові відхилення при подрібненні визначаються різницею між власною рівноважною температурою уламка T_a та температурою його материнської пилінки T_0 , тобто $\Delta T_0 = T_0 - T_a$. Рівноважні температури льодяних та льодистих пилинок різних розмірів неодноразово вивчалися на основі рівняння балансу енергії з врахуванням сублимації [11, 13].

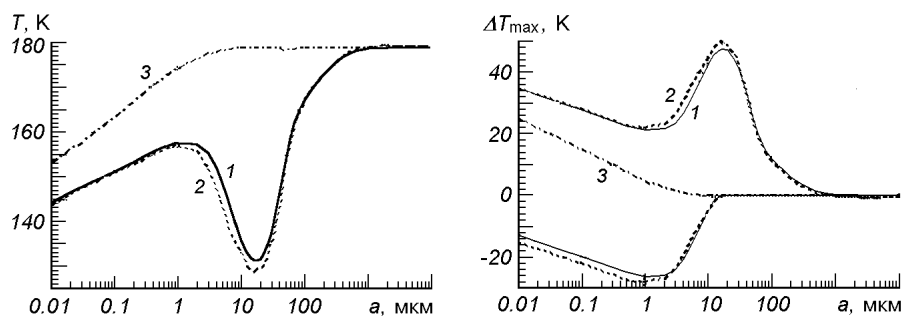


Рис. 1. Залежність рівноважної температури пилинок на геліоцентричній відстані 1 а. о. від їхнього розміру для сумішей: 1 — лід, 2 — лід + силікати, 3 — лід + вуглець

Рис. 2. Максимально можливі початкові відхилення температури від рівноважної в залежності від розміру уламка в моделі подрібнення (позначення ті ж)

Нами також проведені розрахунки рівноважної температури, які наведені на рис. 1 для геліоцентричної віддалі 1 а.о. з параметрами, визначеними в [2]. За залежностями рис. 1 можна визначити максимальні можливі значення різниць між температурами уламків та температурами його материнської пилінки, якою може бути будь яка пилінка, більша за уламок. Ці різниці визначають максимальні можливі початкові відхилення температури в залежності від розміру уламка $\Delta T_{\max}(a) = (T_0)_{\max} - T_a$. Вони приведені на рис. 2, причому від'ємна частина координатної площини використана для випадків, коли $T_a > T_0$, тобто новоутворені уламки для повернення в рівноважний стан повинні нагріватись. Додатні відхилення означають, що в процесі релаксації пилінка вихолоджується. Звертає на себе увагу різко виражена асиметрія поведінки кривих ΔT_{\max} для пилинок, що охолоджуються та пилинок, що нагріваються після подрібнення. Для пилинок з льоду та суміші лід—силікат при додатних відхиленнях характерні значення ΔT_{\max} складають декілька десятків градусів з максимумом при $a = 16$ мкм, для якого $\Delta T_{\max} \approx 50$ К. При від'ємних відхиленнях значення ΔT_{\max} значно менші і властиві меншим розмірам; при $a > 10$ мкм вони неможливі взагалі. Найбільшим від'ємним значенням є 27 К для $a = 2...3$ мкм. Для пилинок, менших 1 мкм, від'ємні відхилення зменшуються, а додатні досить значні і збільшуються зі зменшенням розміру уламка.

Зовсім інша ситуація має місце для пилинок з суміші лід—вуглець. Для них значні відхилення початкової температури виникають тільки при додатних значеннях, тобто, коли уламки охолоджуються, і то тільки для малих розмірів осколків. Коли вони більші за 10 мкм, подрібнення практично не виводить пилінку зі стану теплової рівноваги.

Таким чином, подрібнення пилинок, крім забруднених вуглецем, супроводжується значними порушеннями їхньої теплової рівноваги і, як наслідок — складними процесами динаміки температури, оскільки подрібнення може мати місце як для рівноважних пилинок, так і для тих, що знаходяться у процесі релаксації. Тобто, руйнування пилинок може привести до зміни теплового режиму кометного пилу в цілому. Це, в свою чергу, буде впливати на потік теплового випромінювання від комети. Тому необхідно дослідити такі зміни у випадку руйнування кометного пилу. В загальному випадку задача дуже обширна, оскільки пиловий компонент кометної атмосфери із нестійкими пилінками є складним динамічним утворенням, яке характеризується змінним з часом розподілом частинок за розмірами та складною динамікою їхнього руху.

ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Спектральна потужність теплового потоку від пилінки розміром a визначається виразом

$$F_{\lambda}(a) = 4\pi a^2 Q_{\text{rad}}(\lambda, a) I(\lambda, T), \quad (1)$$

де $Q_{\text{rad}}(\lambda, a)$ — фактор ефективності випромінювання на довжині хвилі λ , який ми розраховували за формулами Мі [3], $I(\lambda, T)$ — випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла при температурі пилінки T , що описується формулою Планка.

Якщо пилінка знаходиться в стані теплової рівноваги, то її температуру в масштабах часу вимірювань можна вважати постійною величиною і визначати за класичним рівнянням теплового балансу з урахуванням втрат на сублімацію [7, 11, 13]. У випадку порушення теплової рівноваги пилінки її температура і розмір змінюються з часом. Метод визначення цих величин ми детально розглянули в роботі [2], де привели відповідні рівняння. Розв'язок цих рівнянь, крім часу релаксації до рівноважної температури, дозволяє одержати залежності розміру та температури з часом як функції від початкових умов задачі. Зважаючи на це, у виразі (1) величини a , $Q_{\text{rad}}(\lambda, a)$, $I(\lambda, T)$ також є функціями часу, а значить і тепловий потік від пилінки змінюватиметься з часом. Надалі тепловий потік пилінки a при температурі, що не відповідає рівноважній, позначимо через $F^*(a)$, тобто:

$$F_{\lambda}^*(a, t) = 4\pi a^2(t) Q_{\text{rad}}[\lambda, a(t)] I[\lambda, T(t)]. \quad (2)$$

Коли порушення теплової рівноваги пов'язані з подрібненням, потік буде залежати не тільки від розміру уламка, а й від розміру материнської пилінки, оскільки саме від нього залежить початкове значення температури. Таким чином, теплове випромінювання від пилінки, що релаксує, визначається багатьма параметрами задачі. Для його описання є сенс представити результати у вигляді спектрального теплового потоку від пилінки, усередненого за час релаксації $\tau_r(a)$ та віднормованого на рівноважний спектральний потік пилінки цього ж розміру

$$\Phi_{\lambda}(a) = \int_0^{\tau_r} F_{\lambda}^*(a, t) dt [\tau_r F_{\lambda}(a)]^{-1}. \quad (3)$$

Крім того, можна розрахувати середній відносний інтегральний потік, який припадає на 1 град початкового відхилення температури, усереднений таким же чином за час $\tau_r(a)$:

$$\Phi_{\text{Тл}}(a) = \int_0^{\tau_r} F_{\lambda}^{*}(t) dt [\tau_r F_{\lambda}(a)]^{-1} (\Delta T_0)^{-1}, \quad (4)$$

де $F_{\lambda}(a)$ визначається виразом (1) при рівноважній температурі. Зауважимо, що величина $\tau_r(a)$ є функцією не тільки розміру, а й початкового відхилення температури.

Як перший етап дослідження нами була поставлена задача провести розрахунки теплового випромінювання для випадку, коли початкове відхилення температури від рівноважної є фіксованим для всіх розмірів і становить $\Delta T_0 = \pm 10$ К, як у роботі [2]. Результати, отримані при такому спрощенні, мають самостійне значення. По-перше, таким чином ми не зводимо задачу вивчення нерівноважного теплового випромінювання тільки до одного механізму виведення пилинок з рівноваги процесом подрібнення. По-друге, це полегшує аналіз наступних обчислень, тому що, знаючи залежність зміни теплового потоку від розміру частинок, можна дослідити вплив на неї початкового відхилення температури. Для розрахунків величин F_{λ}^{*} були використані залежності $a(t)$ та $T(t)$, отримані при розв'язуванні рівнянь (4) та (9) (або їхніх аналогів для забрудненого льоду) у роботі [2].

Другим етапом досліджень було визначення нерівноважного теплового випромінювання окремих пилинок при початкових відхиленнях температури, які відповідають максимальним значенням в моделі подрібнення (рис. 2). Для цього при відповідних кожному розміру максимальних відхиленнях були проведені розрахунки часу релаксації $\tau_r(a, \Delta T_{\text{max}})$, зміни розміру пилінки з часом $a(t)$ та ходу її температури $T(t)$ за рівняннями (4) та (9) [2] для льоду або за аналогічними їм для забрудненого льоду.

Нижче на рис. 3 для пилинок різного складу наведено залежності $\tau_r(a, \Delta T_{\text{max}})$ від розміру. Вони побудовані для випадків, коли температура пилінки не доходить до рівноважної на величини 0.01 К (суцільні лінії) та 1 К (пунктирні), які ми називаємо кінцевими відхиленнями ΔT_r .

Криві рис. 3 демонструють, що час релаксації пилинок малих розмірів (< 1 мкм) будь-якого складу залишається незначним навіть для великих відхилень (20—30 К, рис. 1) і становить кілька секунд. Це означає, що

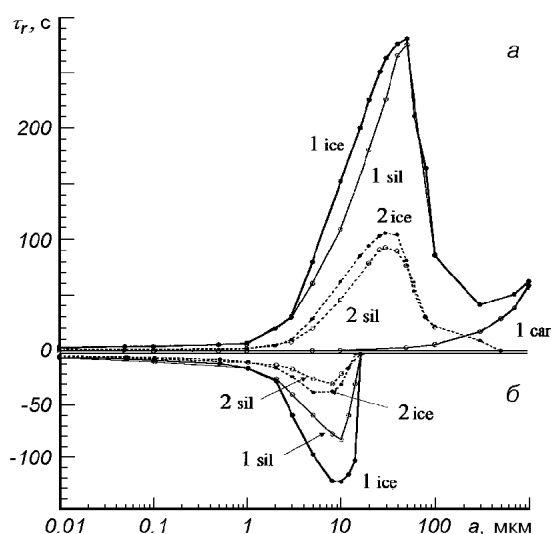


Рис. 3. Час релаксації пилинок до рівноважної температури при максимально можливих додатних (1а, 2а) та від'ємних (1б, 2б) початкових відхиленнях. Позначення ice, sil, car відноситься до складу речовини пилинок: чистий лід, суміші лід—силікат та лід—вуглець відповідно. Розрахунки відповідають відстані 1 а. о.

руйнування дрібних пилинок, скоріше за все, мало впливає на їхній температурний режим, бо релаксація відбувається досить швидко. Цей результат добре узгоджується з оцінкою часу нагрівання малих графітових пилинок, отриманою Шульманом [4]. Пилінки більших розмірів (від 5 до 100 мкм), крім забруднених вуглецем, навпаки, значний час можуть перебувати в нерівноважному стані з підвищеною, а з розмірами 1—14 мкм — із зниженою температурою. Для ще більших пилинок (> 100 мкм) при додатних початкових відхиленнях час релаксації помітно зменшується, що спричиняється зменшенням початкових відхилень. Це підкреслюють криві 2а, які фіксують тільки значні відхилення від рівноважної температури. Звичайно, особливо при однакових початкових відхиленнях [2], криві типу 2 повторюють криві типу 1 на менших значеннях часу. Для розмірів, більших за 300 мкм, поведінка кривих 1а та 2а істотно відмінна: крива 1а зростає, а 2а — спадає. Це викликано тим, що час релаксації збільшується пропорційно до розміру пилинок, а їхня рівноважна температура в цій області від розміру не залежить. Крім того, при початкових відхиленнях менше 2 К темп релаксації малий з самого початку і ще більше сповільнюється при наближенні температури до рівноважної. З цих же причин спостерігається деяке збільшення (до 70 с) часу релаксації великих пилинок з льоду, забрудненого вуглецем (рис. 3, крива 1а сар). Але в цілому крива для пилинок лід—вуглець підтверджує зроблений нами раніше висновок про те, що подрібнення пилинок, більших за 10 мкм, практично не виводить їх з стану теплової рівноваги. Пилінки, більші за 300 мкм, при подрібненні

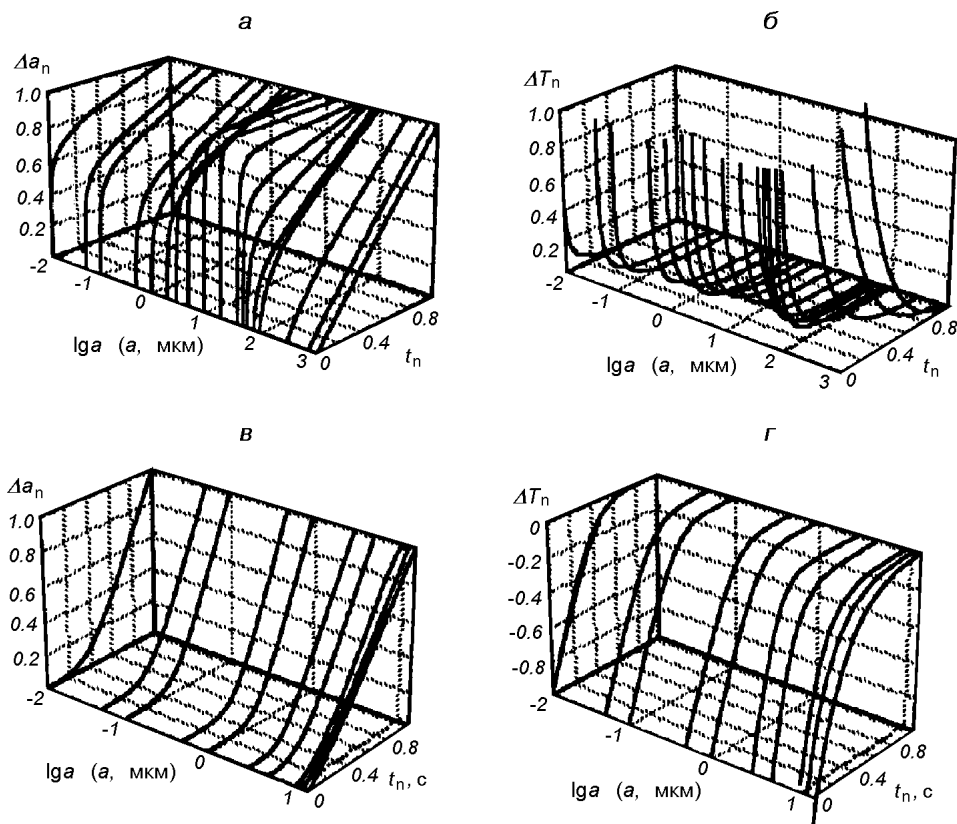


Рис. 4. Залежності дефекту розміру Δa_n та відхилення температури ΔT_n льодяних пилинок різних розмірів від часу на 1 а. о.: а, б — при максимальних додатних відхиленнях температури, в, г — при максимальних від'ємних відхиленнях температури

довго перебувають в стані з температурою, близькою до рівноважної, тому їхній час релаксації великий.

Необхідні для визначення нерівноважного теплового випромінювання пилинок нормовані залежності розміру та температури від часу ми наводимо на рис. 4. Нормування температури виконано таким чином, що за одиницю зміни температури прийнято її початкове відхилення ΔT_{\max} , тобто $\Delta T_n = [T(t) - T_{\text{end}}] / \Delta T_{\max}$, де T_{end} — кінцева температура. Кінцева температура відрізняється від рівноважної на деяку величину $\Delta T_{\text{end}} = T_a - T_{\text{end}}$ внаслідок того, що в процесі релаксації пилінка змінює свій розмір. При такому нормуванні величина $0 < \Delta T_n < 1 + \Delta T_{\text{end}} / |\Delta T_{\max}|$. Останній доданок може бути як додатним, так і від'ємним, залежно від знаку похідної dT_a/da . У більшості випадків його значення досить мале, і на верхній межі величина ΔT_n близька до одиниці. Проте для великих розмірів ($a > 300$ мкм), коли температура висока, а початкові додатні відхилення ΔT_{\max} малі, він може сягати кількох одиниць (рис. 4, б). Для побудови кривих рис. 4 а, в використані значення величини Δa з рис. 5. Ясно, що різке падіння значень Δa при від'ємних відхиленнях температури (рис. 5, б) пов'язане з швидким зменшенням самих відхилень.

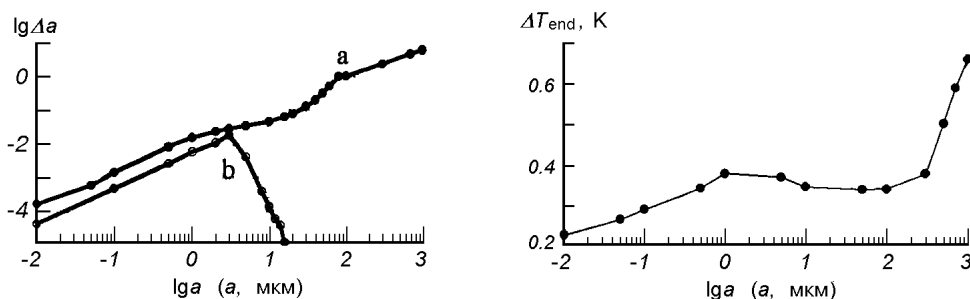


Рис. 5. Дефект розміру Δa_n пилинок з чистого льоду за час релаксації при максимальних початкових відхиленнях температури: 1 — додатні, 2 — від'ємні відхилення

Рис. 6. Залежності дефекту температури від розміру пилинок з льоду, забрудненого 10 % вуглецю, для додатних максимальних відхиленнях температури

На рис. 6 представлено значення дефекту температури ΔT_{end} в залежності від розміру пилинок з льоду, забрудненого вуглецем. Збільшення ΔT_{end} , яке має місце для великих пилинок, пов'язане з тим, що вони, по-перше, мають високі температури, а по-друге, для них збільшується час релаксації (рис. 3).

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Перейдемо до аналізу результатів, одержаних при визначенні теплових потоків кометних льодяних та льодистих пилинок. На рис. 7, 8 представлені значення відносних потоків від пилинок з льоду, розраховані за формулою (3) для випадків, коли початкові відхилення фіксовані і коли вони максимальні. Відносні потоки для пилинок з силікатом дуже близькі до чисто льодяних. Для пилинок з вуглецем наведено розрахунки тільки для максимально можливих відхилень (рис. 9). Звертає на себе увагу відсутність симетрії в змінах теплового випромінювання при додатних та від'ємних

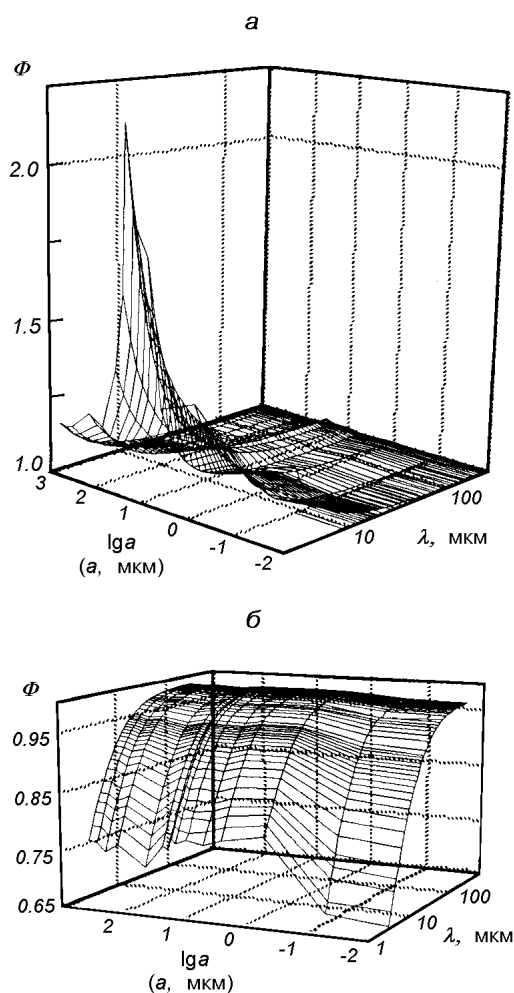


Рис. 7. Нормоване значення нерівноважного теплового випромінювання пилинок в залежності від довжини хвилі та їхнього розміру з водяного льоду на 1 а. о.: *а* — для початкового відхилення температури +10 К, *б* — для відхилення -10 К

початкових відхиленнях для всіх типів речовини. Для пилинок з чистого льоду та забруднених силікатом асиметрія полягає в наступному. По-перше, криві для від'ємних відхилень є гладкими, а криві для додатних відхилень демонструють різко виражений максимум. Він досягає фактора 2.2 (розміри 25—35 мкм) при початкових відхиленнях температури +10 К (рис. 7, *а*) і майже 2 порядки (розміри 15—20 мкм) при максимально можливих. Походження згаданого максимуму для всіх ΔT_0 пов'язане як з величиною початкових відхилень, так і з тим, що релаксація пилинок розмірами 15—30 мкм відбувається повільніше, ніж інших. Причина цього — нижча

температура, пов'язана з планківським випромінюванням та сублимацією. По-друге, функція Планка нелінійно залежить від температури, тому випромінювання пилинок, які нагріваються, дасть малий внесок в сумарний нерівноважний потік ансамблю, бо за абсолютною величиною воно буде значно меншим, ніж випромінювання від пилинок, що охолоджуються.

Зауважимо, що додатні відхилення призводять до зменшення теплового потоку з часом, а від'ємні — до його збільшення. Відносно значення теплового потоку від ансамблю нерівноважних пилинок буде визначатися сумою відносних потоків для відхилень обох знаків. У випадку рівномірного утворення пилинок одного розміру з відхиленнями різних знаків на зміну потоку будуть в основному впливати частинки, для яких має місце порушення симетрії при вищих середніх температурах. Умові несиметричності найкраще відповідають пилінки з льоду або суміші лід—силікат розмірами 10—100 мкм. Як уже було відмічено, для них, до того ж, є характерним найбільший час перебування у стані з порушеною рівновагою та відсутність від'ємних відхилень. Таким чином, відмічені фактори збільшують внесок цих пилинок у зміни теплового потоку, проте їхні температури низькі, і в результаті їхній внесок у збільшення зростаання сумарного теплового потоку складає 20 %. Використовуючи дані рис. 8, було оцінено відхилення потоку від рівноважного для ансамблю пилинок із степеневим розподілом за розмірами з показником 3. На довжині хвилі 3

Рис. 8. Те ж саме, що на рис. 7, але для максимальних початкових відхилень температури: *a* — для додатних, *б* — для від'ємних

мкм при максимальних початкових відхиленнях у моделі подрібнення потік змінюється порівняно з рівноважним на 10 %, а на 5 мкм — на 8 %. Похибки спостережень при визначенні теплового потоку залежать від довжини хвилі та величини сигналу. Сучасні спостереження можуть забезпечити для яскравих комет точність 1—3 % на довжинах хвиль до 25 мкм [8, 12]. Таким чином, порушення рівноваги пилинок може спричиняти зміни теплового випромінювання, які перевищують похибки спостережень.

Величина відхилень теплового потоку залежить також від довжини хвилі (рис. 7—9). Це призводить до того, що розподіл енергії у тепловому спектрі нерівноважного пилу змінюється. Ефекти зміни потоку та кольору, якщо вони викликані порушенням рівноваги пилинок, повинні корелювати між собою.

Для пилинок лід—вуглець при подрібненні мають місце тільки додатні відхилення, що призводить до зменшення теплових потоків відносно рівноважних. Помітні зміни (біля 10 %) характерні для розмірів $a < 0.5$ мкм і довжин хвиль $\lambda < 6$ мкм, досягаючи значення 40 % при $a = 0.01$ мкм на довжині хвилі $\lambda = 3$ мкм. Ясно, що подрібнення таких пилинок може дати ефект тільки в тому випадку, коли вони знаходяться у внутрішній частині

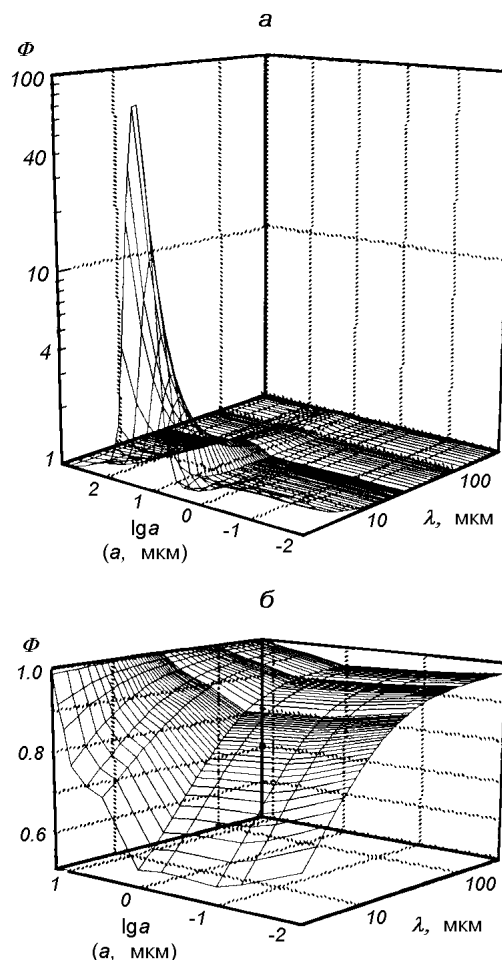
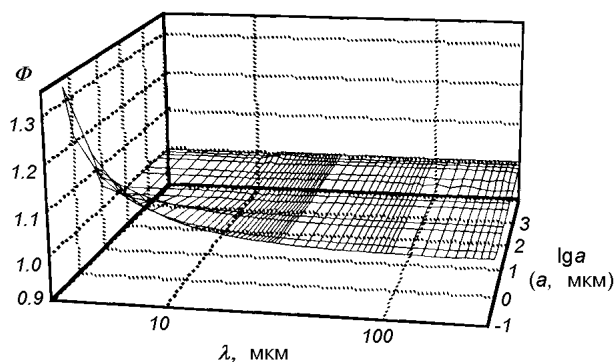


Рис. 9. Нормоване значення нерівноважного теплового потоку від пилинок із суміші лід—вуглець для максимально можливих значень початкових відхилень



ками, де ще існує зіштовхувальний зв'язок з газом. Дослідження гідродинамічних ефектів, які виникають при одноактному розколі пилинок в навколоядерній області [9], показали, що в цьому випадку виникає додаткове нагрівання газу пилом та має місце віддалення області переходу до надзвукової течії. Це вказує на важливу роль динаміки температури пилинок у формуванні газопилової течії, оскільки від температури залежить обмін енергією між газом та пилом [4]. Наші дослідження свідчать про те, що релаксація температури до рівноважної веде до змін у тепловому випромінюванні, і це потрібно враховувати при розробці моделей газопилової течії з подрібненням.

1. Андриєнко Д. А., Мищущина И. И. О гало льдистых тел как возможном источнике вспышек блеска комет. Математическая модель вспышки // Астрон. журн.—1986.—63, вып. 2.—С. 335—348.
2. Андриєнко Д. П., Мищущина І. Г. Динаміка температури кометного пилу // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 1.—С. 40—48.
3. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. — М.: Мир, 1971.—165 с.
4. Шульман Л. М. Динамика кометных атмосфер. Нейтральный газ. — Киев: Наук. думка, 1972.—243 с.
5. Crifo J. F., Emerich C. Model for an icy halo in comets — Ices in the Solar System // Proc. NATO Adv. Res. Workshop, Nice, Jan. 16—19, 1984 / Ed. by J. Klinger. — 1984.—P. 429—442.
6. Fanale F. P., Salvail J. R. An idealized short—period comet model: surface insolation, H₂O flux and mantle evolution // Icarus.—1984.—60, N 3.—P. 476—511.
7. Hanner M. S. On the detectability of the ice grains in the comae of comets // Icarus.—1981.—47, N 3.—P. 342—350.
8. Herter T., Campins H., Gull G. E. Airborne spectrophotometry of p/Halley from 16 to 30 microns // Astron. and Astrophys.—1987.—187, N 1.—2.—P. 629—631.
9. Keller H. U., Marconi M. L., Thomas N. Hydrodynamic implications of particle fragmentation near cometary nuclei // Astron. and Astrophys.—1990.—227, N 1.—P. 41—44.
10. Keller H. U., Thomas N. Evidence for near-surface breezes on comet p/Halley // Astron. and Astrophys.—1989.—226, N 1.—P. 409—412.
11. Lien D. J. Dust in comets. I. Thermal properties of monogeneous and heterogeneous grains // Astrophys. J.—1990.—355, N 2.—P. 680—692.
12. Lynch D. K., Russell R. W., Campins H., et al. 5 to 13 μ m airborne observations of Comet Wilson 1986 // Icarus.—1989.—82, N 2.—P. 377—388.
13. Mukai T. Analysis of a dirty water-ice model for cometary dust // Astron. and Astrophys.—1986.—164, N 2.—P. 397—407.
14. Mukai T., Schwem G. Interaction of grains with the solar energetic particles // Astron. and Astrophys.—1985.—95, N 2.—P. 373—382.
15. Podgorny I. M., Andrienko D. A., Kleshcenok V. V., Mischishina I. I. The role of the interplanetary magnetic field reorientation in the mechanism of the comet's brightness outburst occurrence // Astro. Lett. and Communications.—1990.—28.—P. 33—37.
16. Wickramasinghe N. C., Wallis M. K., Hoyle F. Modelling the 5—30 μ m spectrum of comet Halley // Earth, Moon, and Planets.—1988.—43, N 2.—P. 145—153.

Поступила в редакцию 20.10.00