Влияние льда CO_2 на процесс нагрева и разрушения поверхностного слоя кометного ядра

© Т.А. Андреева,[1] Н.Ю. Быков,[1] В.В. Захаров,[2] А.Я. Лукин[1]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия
[2] Observatoire de Paris,
75014 Paris, France
e-mail: nbykov2006@yandex.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2026 г.
В окончательной редакции 1 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Предложена модель поверхностного слоя кометы, содержащего тугоплавкую компоненту, водяной лед и твердую углекислоту. Особенностью модели является гипотеза о наличии в пористой структуре кометы закрытых пор. В процессе нагрева поверхности кометы солнечным излучением сублимация льдов внутри этих пор приводит к появлению значительных давлений, приводящих к разрушению поверхностного слоя.

Ключевые слова: комета, поверхностный слой кометного ядра, кометная пыль, газопроизводительность ядра, компьютерное моделирование.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64042.302-26

Введение

Исследование мультифизических процессов, сопровождающих нагрев пористой поверхности, представляет интерес как для развития современных технологий фильтрации и гетерогенного синтеза веществ, так и для прогнозирования и объяснения ряда природных явлений, в том числе в области астрофизики [1]. К одной из астрофизических задач относится определение параметров кометных ядер (структуры, состава, газо- и пылепроизводительности). Решение указанной задачи предполагает наличие глобальной модели, связывающей результаты наблюдений кометной активности с параметрами самого ядра. Центральное место в такой модели занимает описание процессов в поверхностном слое: (1) нестационарного нагрева под действием солнечного излучения, (2) объемного испарения и конденсации летучих соединений (H_2O, CO_2, CO, CH_4 и др.) в глубине слоя, (3) диффузии газовой смеси к поверхности, (4) уноса пыли потоком газа, (5) механического разрушения поверхностного слоя.

Имеющиеся модели теплового состояния поверхности кометного ядра хорошо описывают нагрев поверхности и интегральную газопроизводительность, однако предсказывают малые значения давления внутри пористого поверхностного слоя, недостаточные для его разрушения и эжекции твердых фрагментов, достигающих размера до нескольких метров.

Ранее авторами была предложена модель нагрева пористого приповерхностного слоя кометного ядра с учетом диффузии газа [2], предполагающая наличие не только открытых (соединенных с поверхностью) пор, но и закрытых пор — изолированных от внешнего пространства и открытых пор областей. По мере сублимации льда, образующего „стенки“ закрытых пор, часть из них открывается, но в оставшейся части нарастает давление не имеющего выхода газа. Численные результаты, полученные с использованием модели, показали возможность достижения умеренных значений давления внутри слоя даже для случая однокомпонентного (водяного) льда. В настоящей работе представлена модификация модели, позволяющая более точно учесть процесс трансформации открытых и закрытых пор, выполнены расчеты для пористого слоя, состоящего из пыли и двухкомпонентной смеси льдов (CO_2 и H_2O), и проанализирован вклад углекислого газа в процесс разрушения поверхности кометы.

1. Модель

Предлагаемая модель имеет ряд существенных отличий от рассмотренной в [2]. Во-первых, рассматривается двухкомпонентный лед, состоящий из льдов CO_2 и H_2O. Во-вторых, уточнено описание процессов переноса. Для расчета коэффициента теплопроводности вводится фактор Герца (коэффициент, характеризующий отношение теплопроводностей пористого и плотного материалов) и учитывается вклад радиационного переноса тепла в пористой среде. В-третьих, для концентрации паров в закрытых порах учитывается ее зависимость от количества льда в них, изменен подход к вычислению доли закрытых пор.

В основе модифицированной модели лежит представление о поверхностном слое кометы как о полидисперсной пористой среде, содержащей тугоплавкие и замороженные летучие компоненты [1]. Значительную часть объема занимают полости — поры (рис. 1). В процессе формирования ядра кометы тугоплавкие зерна покрывались конденсирующимися летучими компонентами, в результате чего часть пор оказалась закрыта.

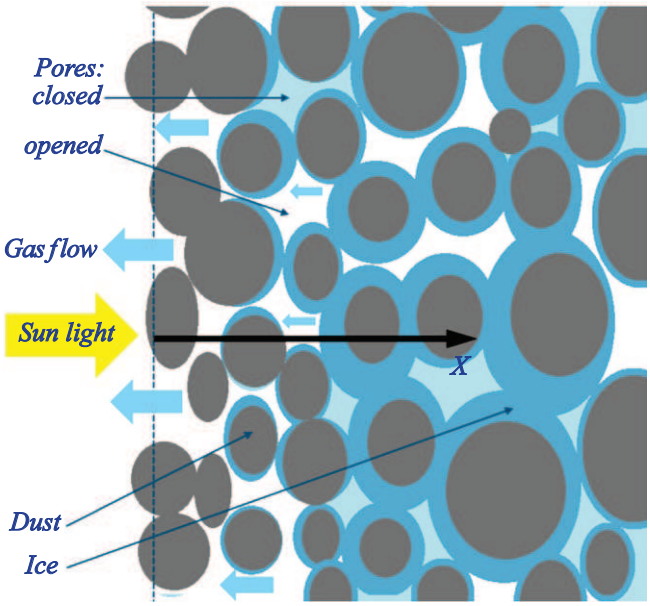


Рис. 1. Элементы модели поверхностного слоя кометного ядра: закрытые и открытые поры, поток покидающего комету газа, солнечное излучение, тугоплавкие частицы, лед летучих компонентов.

Доля закрытых пор зависит от количества льдов: образование закрытых пор только из тугоплавких зерен маловероятно.

Для описания такой многокомпонентной пористой среды вводятся объемные доли открытых пор Ψ_o, тугоплавких зерен (пыли) Ψ_d, объемные доли льда компонента i (H_2O или CO_2) в открытых и закрытых порах $\Psi_{i,o}$, $\Psi_{i,c}$ и суммарная объемная доля льдов $\Psi_{ice} = \sum(\Psi_{i,o} + \Psi_{i,c})$. Объемная доля закрытых пор $\Psi_c = 1 - \Psi_d - \Psi_o - \Psi_{ice}$. Для летучих компонентов вводятся локальные концентрации в отрытых $n_{i,o}$ и закрытых $n_{i,c}$ порах. Далее смысл используемых нижних индексов аналогичен: d — пыль, o — открытые поры, c — закрытые поры, i — компонент льда, ice — фазовое состояние лед).

Для определения параметров поверхностного слоя кометного ядра решается система дифференциальных уравнений в частных производных.

Уравнение теплового баланса учитывает теплоемкость всех компонент, перенос тепла теплопроводностью, массовым потоком паров летучих компонентов, энтальпию сублимации.

$$\left(\rho_d \Psi_d c_d + \sum_i \left(\rho_{i,ice}\Psi_i c_{i,ice} + n_{i,o}C_i + n_{i,c}C_i\right)\right)\frac{\partial T}{\partial t}$$
$$+ \left(\sum_i C_i g_i\right)\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)$$
$$- \sum_i h_i(T)\left(G^{sub}_{i,c} + G^{sub}_{i,o}\right). \qquad (1)$$

Здесь C — теплоемкость летучих компонентов в газовой фазе в расчете на одну молекулу, c — удельная теплоемкость твердой фазы, ρ — плотность, G^{sub} — число испарившихся/сконденсировавшихся на поверхности пор молекул в единице объема, h — энергия, требуемая для испарения одной молекулы. Коэффициент теплопроводности λ учитывает теплопроводность по твердой среде с учетом пористости введением фактора Герца и радиационный перенос тепла в порах [3].

Изменение температуры приводит к изменению концентрации летучих соединений в порах и доли льдов:

$$\frac{\partial n_{i,o}}{\partial t} = G^{sub}_{i,o} + G^{dif}_{i,o} + G^{trans}_{i,o}, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial n_{i,c}}{\partial t} = G^{sub}_{i,c} + G^{trans}_{i,c}, \qquad (3)$$

$$\frac{\partial \Psi_{i,o}}{\partial t} = -\frac{m_i}{\rho_i}\Psi_o G^{sub}_{i,o} + T^{trans}_{i,o}(\Psi_{ice}), \qquad (4)$$

$$\frac{\partial \Psi_{i,c}}{\partial t} = -\frac{m_i}{\rho_i}\Psi_c G^{sub}_{i,c} + T^{trans}_{i,c}(\Psi_{ice}). \qquad (5)$$

Здесь G^{dif} — слагаемое, связанное с изменением диффузионного потока g, G^{trans} — изменение концентрации за счет трансформации пор (изменения числа открытых/закрытых пор за время dt), T^{trans} — изменение доли льдов в порах, происходящее при трансформации пор. Диффузионный вклад определяется как [4]:

$$G^{dif}_{i,o} = -\frac{1}{\Psi_o}\frac{\partial g_i}{\partial x}, \quad g_i = -\Psi_o D_i \frac{\partial (n_{i,o}\sqrt{T})}{\partial x},$$
$$D_i = \frac{1}{3} d \left(\frac{8k}{\pi m_i}\right)^{1/2}. \qquad (6)$$

Здесь k — постоянная Больцмана, d — характерный диаметр пор. Число испарившихся/сконденсировавшихся на поверхности пор молекул в единице объема

$$G^{sub}_i = \frac{4}{d}\sqrt{\frac{kT}{2\pi m_i}}(n_{i,sat} - n_i), \quad \Psi_i > 0,$$
$$G^{sub}_i = \min\left(0, \frac{4}{d}\sqrt{\frac{kT}{2\pi m_i}}(n_{i,sat} - n_i)\right), \quad \Psi_i = 0. \qquad (7)$$

Здесь $n_{i,sat}$ — концентрация насыщенного пара, $n_i = n_{i,o}$, $n_{i,c}$ — концентрация паров в открытых/закрытых порах при использовании (7) для вычисления $G^{sub}_{i,o}$ и $G^{sub}_{i,c}$ соответственно. Поскольку в нашем случае фазовый переход происходит между газообразной и твердой фазой, в дальнейшем для простоты будем называть его сублимацией, имея в виду и обратный процесс.

Для определения значения функций $T^{trans}_i = \left(\frac{d\Psi_i}{dt}\right)^{trans}$ и $G^{trans}_i = \left(\frac{dn_i}{dt}\right)^{trans}$ необходим алгоритм перераспределения паров и льдов в зависимости от доли закрытых

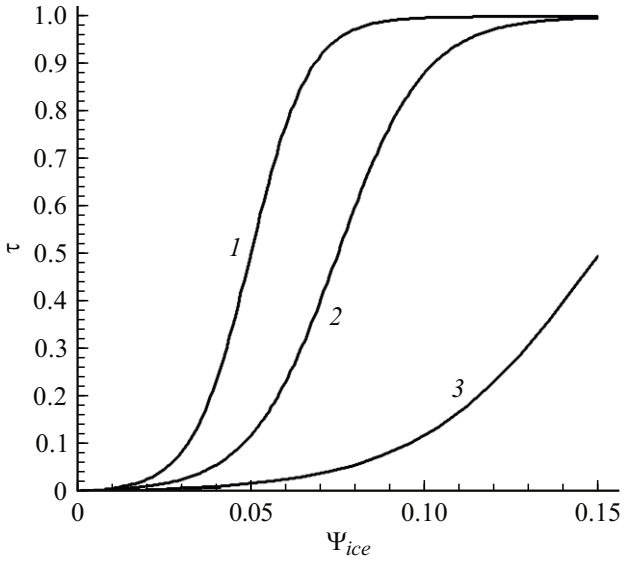


Рис. 2. Зависимость функции τ от доли льда (1 — $a = 60$, $b = 0.05$; 2 — $a = 40$, $b = 0.075$; 3 — $a = 20$, $b = 0.15$).

пор, который, в свою очередь, является функцией суммарной доли льда Ψ_{ice}.

В процессе испарения льдов количество закрытых пор уменьшается. В модели предполагается, что конденсация не приводит к увеличению количества закрытых пор — летучие осаждаются в твердую фазу, не формируя замкнутых полостей. Относительная доля закрытых пор определяется количеством льдов через монотонно возрастающую функцию $\tau(\Psi_{ice})$:

$$\frac{\Psi_c}{\Psi_c + \Psi_o} = \tau(\Psi_{ice}), \tag{8}$$

при этом $\tau(0) = 0$, $\tau(\Psi_{ice,\max}) = 1$.

В качестве $\tau(\Psi_{ice})$ необходима функция типа „сглаженной“ ступеньки. В качестве такой функции может выступать либо сигмоида, либо нормированный гиперболический тангенс со смещенным аргументом

$$\tau(\Psi_{ice}) = \frac{1}{2}[\tanh\big(a(\Psi_{ice} - b)\big) - \tanh(-ab)], \tag{9}$$

параметры которых выбираются в зависимости от начальных условий — количества льдов и доли закрытых пор. Вид функции (9) для различных параметров a и b приведен на рис. 2.

Так как изменение количества льдов в открытых и закрытых порах происходит как вследствие сублимации, так и в результате изменения $\tau(\Psi_{ice})$, для вычисления доли льдов недостаточно использовать обычную пропорцию между долями открытых и закрытых пор. Для нахождения доли льда в закрытых порах предполагается, что суммарная концентрация $n_{\Sigma c}$ летучих молекул и молекул льда в закрытых порах уменьшается за время dt пропорционально уменьшению доли закрытых пор:

$$\frac{n_{i,\Sigma c}|_{t+dt}}{n_{i,\Sigma c}|t} = \frac{\Psi_c|_{t+dt}}{\Psi_c|t}. \tag{10}$$

Доля льда в закрытых порах определяется как

$$\Psi_{i,c}\,\big|_{t+dt} = \frac{m_i}{\rho_i} n_{i,\Sigma c}\,\big|_{t+dt} - \Psi_c n_{c,i}. \tag{11}$$

Расчет доли льда в открытых порах происходит с учетом того, что общее количество льда i (т. е. Ψ_i) от его распределения по порам не зависит. Функции G_i^{trans} рассчитываются с учетом закона сохранения массы.

Вычислительный алгоритм предполагает расщепления процесса на стадии:

1) вычисление распределения температуры по глубине с учетом (1). Для расчета используется явная конечно-разностная схема первого порядка точности по времени и второго по пространству;

2) вычисление концентраций паров и определение изменения доли льда в открытых и закрытых порах за счет процесса объемной конденсации/сублимации

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = G_i^{sub}, \quad \frac{\partial \Psi_i}{\partial t} = -\frac{m_i}{\rho_i}\Psi_o G_i^{sub}; \tag{12}$$

3) определение доли льда Ψ_{ice};

4) расчет $\frac{\partial \Psi_i}{\partial t} = T_i^{trans}(\Psi_{ice})$, а именно коррекция доли льдов в открытых и закрытых порах согласно (10);

5) изменение концентраций паров в открытых и закрытых порах, связанное с трансформацией пор $\frac{\partial n_i}{\partial t} = G_i^{trans}$;

6) для открытых пор моделирование процесса диффузии — решение дифференциального уравнения в частных производных $\frac{\partial n_{i,o}}{\partial t} = G_{i,o}^{dif}$ (см. (6)). Для расчета используется неявная конечно-разностная схема первого порядка точности по времени и второго по пространству. Величины шагов по времени и пространству идентичны п.1.

Граничные условия необходимы только для уравнений диффузии паров в открытых порах и уравнения теплопроводности, все остальные переменные (доли пор и льдов) не имеют производных по координате. На поверхности кометы предполагается, что $n_{i,o} = 0$, а тепловые потоки включают поглощаемое излучение от Солнца, собственное излучение кометы и отвод тепла от поверхности теплопроводностью

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial x} = I_0\left(\frac{r_{\mathrm{H}}}{\mathrm{lau}}\right)^{-2}(1 - A)\cos\upsilon - \varepsilon\sigma T^4, \tag{13}$$

где I_0 — интенсивность солнечного излучения на расстоянии 1 au, r_{H} — расстояние до Солнца в астрономических единицах, A — альбедо кометы, υ — угол падения лучей, ε — степень черноты, σ — постоянная Стефана–Больцмана.

Расчеты выполнены с использованием собственного программного кода [2,5]. Для численного решение дифференциальных уравнений использован метод конечных разностей [6].

2. Результаты

На основе развитой модели выполнено численное исследование процесса нагрева поверхностного слоя

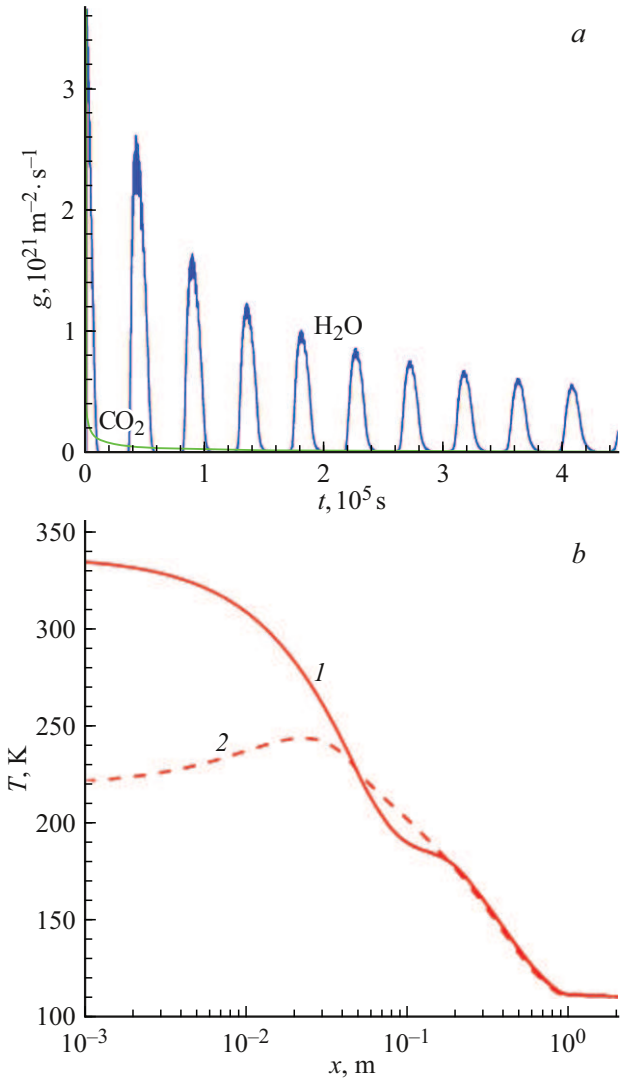


Рис. 3. *a* — поток молекул с поверхности ядра кометы. Распределение температуры на десятом обороте: *1* — $\upsilon = \pi/32$ (дневная сторона), *2* — $\upsilon = \pi/2$ (переход с дневной на ночную сторону).

кометы, состоящего из льдов H_2O и CO_2, а также твердых частиц пыли. В расчетах использованы следующие параметры: расстояние до Солнца 1.24 a. e., период обращения 12.4 h. Предполагается, что ось вращения кометы перпендикулярна плоскости орбиты. Рассматривается экваториальная плоскость.

Начальная доля пыли $\Psi_d = 0.2$, доля водяного льда $\Psi_{H_2O} = 0.099$, доля льда углекислоты $\Psi_{CO_2} = 0.001$. Параметры функции (9) $a = 10$, $b = 0.25$, что примерно соответствует доле закрытых пор $\Psi_c = 0.0285$ и соответственно доля открытых пор $\Psi_c = 0.6715$. Характерный размер пор $d = 10^{-3}$ m. Начальная температура $T_0 = 110$ K.

Плотность пыли $\rho_d = 2000\,\mathrm{kg/m^3}$, плотность льдов: $\rho_{H_2O} = 920\,\mathrm{kg/m^3}$, $\rho_{CO_2} = 1600\,\mathrm{kg/m^3}$ [7], другие теплофизические параметры рассчитывались аналогично [3].

Начальные условия для расчета: доли льдов, открытых и закрытых пор и температура везде одинаковы внутри кометы. Из-за нагрева поверхности солнечным излучением приповерхностные льды быстро испаряются. Активное испарение водяного льда происходит вблизи поверхности кометы, где температура выше и подвержена значительному суточному изменению. Поэтому поток водяного пара имеет колебательный характер (рис. 3, *a*). По мере обеднения приповерхностных слоев амплитуда колебаний потока уменьшается — колебания температуры в глубине кометы быстро затухают. На рис. 3, *b* показано изменение распределения температура в течение десятых суток, когда влияние начальных условий уже мало. Имеющий значительно более низкую температуру сублимации лед CO_2 из приповерхностных слоев кометы

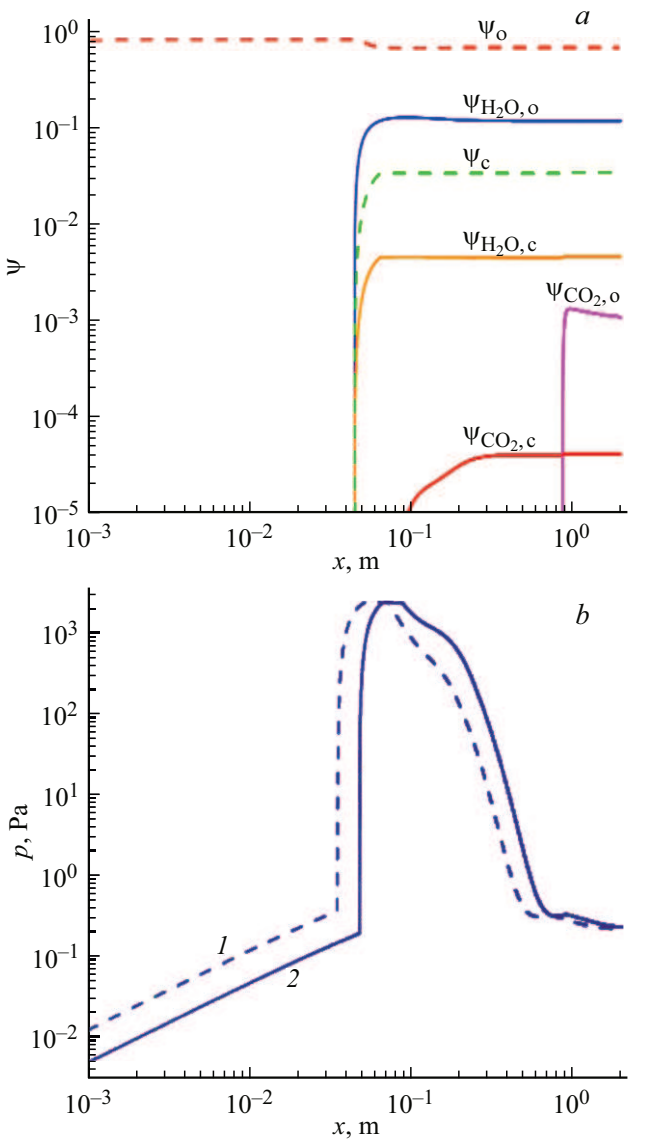


Рис. 4. *a* — объемные доли льдов H_2O и CO_2 в открытых и закрытых порах, объемные доли открытых (o) и закрытых (c) пор, десятый оборот; *b* — распределение давления на шестом (*1*) и десятом (*2*) оборотах.

испаряется практически весь, поэтому график его потока не имеет выраженного колебательного характера.

Сублимация льдов и открытие пор происходит в узких областях, которые можно назвать фронтом сублимации (рис. 4, *a*). Фронт сублимации CO_2 находится в глубине слоя, где практически весь лед в открытых порах сублимирует, там же происходит частичное открытие пор. Фронт сублимации водяного льда находится ближе к поверхности, где температура существенно выше. Не все образовавшиеся пары покидают комету, часть диффундирует вглубь, в зону низких температур, и конденсируется там. Поэтому непосредственно за фронтом сублимации объемная доля льда оказывается больше первоначальной. Чем глубже область сублимации и чем больше градиент температуры, тем больше испарившегося льда оседает внутри кометы.

Область между фронтами характеризуется практически первоначальной долей закрытых пор — из-за малого количества льда CO_2 его сублимация не приводит к значительному увеличению доли открытых пор. В закрытых порах остается углекислота, которая ближе к поверхности кометы переходит в газообразную фазу, создавая значительное давление, в данном расчете 2.5 kPa (рис. 4, *b*). При сублимации водяного льда происходит полное открытие пор, содержащих в том числе и углекислый газ.

Заключение

Таким образом, предложенная модель демонстрирует существенные значения давления смеси газов, превышающие аналогичные, предсказываемые моделью, учитывающей наличие только водяного льда, или моделью для смеси льдов без учета наличия закрытых пор.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 24-12-00299, https://rscf.ru/project/24-12-00299/ при использовании вычислительного ресурса СКЦ СПбПУ Петра Великого.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] N. Thomas. *An Introduction to Comets. Post-Rosetta Perspectives* (Springer, Cham, 2020), DOI: 10.1007/978-3-030-50574-5
[2] Т.А. Андреева, Н.Ю. Быков, В.В. Захаров, А.Я. Лукин, Д.С. Шмыр. ЖТФ, **95** (12), 2350 (2025). DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61792.236-25
[3] B.J.R. Davidsson. MNRAS, **505** (4), 5654 (2021). DOI: 10.1093/mnras/stab1593
[4] К. Хир. *Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы* (Мир, М., 1976)
[5] Т.А. Андреева, А.Е. Беркович, Н.Ю. Быков, С.В. Козырев, А.Я. Лукин. ЖТФ, **90** (9), 1516 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.09.49685.54-20
[6] К. Флетчер. *Вычислительные методы в динамике жидкостей* (Мир, М., 1991), т. 1.
[7] X. Hu, X. Shi. Astrophys. J., **910** (1), 1 (2021). DOI: 10.3847/1538-4357/abddbf