

Нагрев и разрушение пористого поверхностного слоя кометного ядра

© Т.А. Андреева,¹ Н.Ю. Быков,¹ В.В. Захаров,² А.Я. Лукин,¹ Д.С. Шмыр¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

²LIRA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS,
Sorbonne Université, Université Paris Cité,
Meudon, France
e-mail: nbykov2006@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 28 июля 2025 г.

Принято к публикации 4 августа 2025 г.

Рассмотрена модель нагрева поверхностного слоя кометы и сублимации имеющихся в нем льдов, учитывающая наличие закрытых пор. В процессе длительной эволюции кометы в результате переконденсации летучие компоненты соединяют частицы пыли и могут образовывать замкнутые полости (поры). По мере нагрева газообразные продукты сублимации покидают поверхностный слой через открытые поры. Количество льда уменьшается, и газ из ранее закрытых пор создает повышенное давление в поверхностном слое, достаточное для его разрушения и формирования газо-пылевого потока. Таким образом, результаты моделирования согласуются с наблюдаемой эжекцией пылевых агрегатов даже для условий низких значений потока энергии солнечного излучения.

Ключевые слова: кометы, пористый приповерхностный слой кометного ядра, процесс теплопроводности, диффузия газа, компьютерное моделирование.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61792.236-25

Кометы являются уникальными объектами Солнечной системы, сформировавшимися на начальной стадии ее эволюции [1]. Исследование комет имеет важное значение для разработки модели образования Солнечной системы [1–3], оценки вероятности столкновения с Землей, а также проверки существующих гипотез зарождения жизни на нашей планете.

На большей части траектории своего движения кометы не активны. С приближением к Солнцу под действием солнечного излучения происходит процесс сублимации летучих веществ из поверхностного слоя ядра, сопровождающийся уносом пыли.

Математические модели нагрева кометного ядра развиваются достаточно давно [4–9]. Все они базируются на решении классического уравнения теплопроводности с учетом особенностей строения поверхностного слоя, обуславливающих постановку граничных условий на поверхности ядра и выбор значений теплофизических параметров, и различаются уровнем детализации структуры слоя, в том числе наличием/отсутствием „сухой“ мантии, поверхностного/объемного испарения, учетом диффузии летучих компонентов и пр.

Ряд моделей предсказывает интегральную газопроницаемость ядра в согласии с экспериментальными данными. Однако существуют нерешенные вопросы, связанные с пониманием механизмов уноса пыли с поверхности и корректным предсказанием интегральных потоков пыли. Под пылью понимаются крупные (доли микрона и выше) частицы, которые в общем случае могут содержать как включение минералов (силикатов, карбидов, сульфидов), так и лед различной природы

(H₂O, CO₂, CO). Предполагается, что частицы пыли связаны друг с другом силами Ван-дер-Ваальса. Для отрыва, например, пылевого агрегата миллиметрового размера необходимо давление порядка 1 Па [10]. Как правило, преобладающей летучей компонентой является водяной лед. Температура поверхности ядра, состоящего только из водяного льда, при „максимальном“ сближении ядра с Солнцем на расстояние $S = 1$ au составляет примерно 207 К, что соответствует давлению насыщенных паров 0.46 Па. На большей части траектории ($S > 1$ au) давление насыщенных паров оказывается существенно (на порядки) ниже. Наличие мантии (для которой степень черноты близка к единице и отсутствует отвод тепла за счет процесса испарения льдов) увеличивает температуру „сухого“ слоя, однако не приводит к существенному росту давления сублимированных молекул в глубине за его пределами. Углекислый газ и моноксид углерода в твердой фазе имеют большие давления насыщения для заданной температуры по сравнению с водяным льдом. Но их объемная доля обычно существенно ниже.

Целью настоящей работы является формулировка математической модели прогрева пористого приповерхностного слоя кометного ядра под действием солнечного излучения с учетом процессов объемной сублимации летучих компонентов и их диффузии, и исследование с ее помощью распределения давления газовой фазы внутри слоя и возможности его разрушения. Предлагаемая модель основывается на применении законов сохранения в форме дифференциальных уравнений в частных производных. К ее особенностям относится включение в рассмотрение внутри поверхностного слоя микрополо-

стей (пор), изначально изолированных и открывающихся в процессе эволюции поверхностного слоя по мере сублимации льдов. Таким образом, модель описывает как приповерхностный слой с открытыми порами и сублимирующими льдами, так и внутреннее пространство ядра кометы с закрытыми порами, а также область перехода между ними. Структура пористой среды описывается в общем виде с помощью объемных долей компонентов. Предлагаемая модель нагрева и разрушения поверхностного слоя предсказывает достаточные давления для разрушения поверхностного слоя ядра.

Поверхностный слой кометы рассматривается как полидисперсная среда — хаотическое нагромождение агломератов разной формы и размеров. Тугоплавкие зерна покрыты слоем замёрзших летучих компонентов — льдов. В процессе образования и эволюции кометы пространственное распределение льдов изменяется в результате коалесценции и пере конденсации. Поверхностное натяжение и зависимость равновесного давления от кривизны приводят к образованию закрытых полостей — пор. В процессе испарения слой льда истончается и поры открываются. Содержащийся в них пар повышает давление в „сухом“ поверхностном слое, увеличивая вероятность отрыва пыли.

В рассматриваемом варианте модели учитывается только лед H_2O , однако модель может быть легко обобщена на любое число летучих компонентов. Для описания многокомпонентной пористой среды вводится объемная доля тугоплавкой пыли ψ_d и льда ψ_i . Тогда объемная доля пор равна: $\psi_p = \psi_o + \psi_c = 1 - \psi_i - \psi_d$, где ψ_o и ψ_c — объемная доля открытых и закрытых пор соответственно. Концентрация молекул газообразной фазы вычисляется в расчете на полный объем вещества кометы: $n_i = dN_i/dV$, где dN_i — количество молекул газообразной фазы (в нашем случае — паров воды) в объеме $dV = dx \cdot dy \cdot dz$.

В закрытых порах (параметры с индексом c) давление газа равновесное (кривизна поверхности не учитывается). Поскольку давления невелики, плотность газов на три и более порядков меньше их твердой фазы, поэтому изменением ее объема при испарении можно пренебречь. Тогда для них выполняется уравнение состояния: $p_i = n_{i,c}kT/\psi_c$, $n_{i,c} = p_{i,s}(T)\psi_c/kT$, где $p_{i,s}(T)$ — равновесное давление паров при температуре T , k — постоянная Больцмана.

Уравнения тепло- и массопереноса записываются в одномерном приближении. Поскольку толщина прогреваемого слоя (десятки сантиметров) много меньше размеров кометы, кривизной поверхности можно пренебречь и использовать декартову координату x . Начало координат — на поверхности кометы.

Для открытых пор (параметры с индексом o) записывается уравнение диффузии с источниковыми членами в правой части, учитывающими соответственно диффузию, испарение/конденсацию и открытие пор

$$\frac{\partial n_{i,o}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} g_i + q_i - n_{i,c} \frac{\partial \psi_c}{\partial t}. \quad (1)$$

Поскольку концентрация газообразной фазы мала, молекулы значительно чаще сталкиваются со стенками пор, чем друг с другом. Поэтому диффузионный поток определяется диффузией Кнудсена [8]:

$$g_i = -D_i^{ch} \frac{\partial (n_{i,o} \sqrt{T})}{\partial x}, \quad D_i^{ch} = \frac{1}{3} d_p \left(\frac{8k}{\pi m_i} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где d_p — характерный диаметр пор. Испарение/конденсация проходят в свободномолекулярном режиме, поэтому скорость испарения q_i равна

$$q_i = \frac{4\psi_o}{d_p} \frac{\psi_i}{\psi_i + \psi_d} \sqrt{\frac{1}{2\pi m_i k T}} \Delta P_i, \quad \Delta P_i = p_{i,s}(T) - p_{i,o}, \quad \psi_i > 0. \quad (3)$$

Если твердая фаза отсутствует ($\psi_i = 0$), то возможна только конденсация.

Объемная доля льда уменьшается в результате его испарения

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} = -q_i \frac{m_i}{\rho_i}, \quad (4)$$

где m_i , ρ_i — масса молекулы воды и плотность твердого льда соответственно. По мере уменьшения толщины ледяного слоя увеличивается доля открытых пор и уменьшается закрытых $\psi_c = \psi_p \chi(\psi_i)$, $\chi(\psi_i|_{t=0}) \approx 1$, $\chi(0) \approx 0$. Здесь $\psi(\psi_i)$ — гладкая ступенчатая функция (сигмоида), параметры которой выбираются исходя из следующих предположений: в исходном состоянии большинство пор закрыты, после полного испарения льда — открыты.

Изменение температуры описывается уравнением [5]:

$$(\rho_d \psi_d c_d + \rho_i \psi_i c_i + n_o C + n_c C) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - C g_i \frac{\partial T}{\partial x} - q_i H. \quad (5)$$

Коэффициент при производной температуры по времени в левой части учитывает теплоемкости всех компонентов вещества кометы — пыли $\rho_d \psi_d c_d$, льда $\rho_i \psi_i c_i$ (ρ , c — плотность и удельная теплоемкость твердого вещества) и паров в закрытых и открытых порах $n_o C + n_c C$ (C — теплоемкость в расчете на одну молекулу). Слагаемые в правой части учитывают теплопроводность и испарение/конденсацию (H — энтальпия фазового перехода в расчете на одну молекулу). Коэффициент теплопроводности складывается из теплопроводности по газу, пористой среде из пыли и льда, а также радиационного теплообмена.

Основной вклад в теплопроводность вносит пористая среда, теплопроводность которой существенно зависит от ее структуры. В литературе рассматриваются различные модели, дающие при соответствующем выборе параметров значения теплопроводности, близкие к экспериментальным данным. В настоящей работе мы ограничимся заданием значений λ , равным $0.002 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ [8].

На поверхности кометы задаются граничные условия для концентрации газообразной компоненты (индекс s соответствует значениям концентрации и температуры на поверхности, т. е. при $x = 0$)

$$D_i^{ch} \frac{\partial(n_o \sqrt{T})}{\partial x} = \frac{1}{4} n_{o,s} \left(\frac{8kT_s}{\pi m_i} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

и температуры

$$I_0 \left(\frac{r_H}{1 \text{ au}} \right)^{-2} (1 - A) \cos \nu = \varepsilon \sigma T_s^4 - \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}. \quad (7)$$

Здесь $I_0 = 1360 \text{ W/m}^2$ — интенсивность солнечного света на расстоянии 1 ае, r_H — расстояние до Солнца, A — альбедо кометы, ν — угол между локальной нормалью к поверхности и направлением на Солнце, ε — степень черноты (в дальнем ИК диапазоне), σ — постоянная Стефана–Больцмана.

Расчеты по предложенной модели выполнены с использованием разработанного программного кода [11]. Дискретизация уравнений диффузии (1) и теплопроводности (5) выполнена методом конечных разностей. Использована неявная схема с разностными операторами, имеющими первый порядок точности по времени и второй по пространству. Процессы нагрева и диффузии на каждом временном шаге рассматриваются последовательно [8,12]. Вначале решается уравнение теплопроводности. Особенностью этой части вычислительного алгоритма является необходимость определения температуры на границе расчетной области с использованием нелинейного уравнения (7). Затем с использованием данных о распределении температуры решается уравнение диффузии. Регулярная расчетная сетка имеет шаг $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$, глубина слоя — 0.2 m , шаг по времени — 0.01 s , рассматриваемый интервал времени 10 оборотов кометного ядра — 124 h .

Основная серия расчетов выполнена для расстояния кометы до Солнца 2.5 ае. Рассматривается пористый слой, состоящий из пыли (начальная доля $\psi_d = 0.2$), льда (начальная доля $\psi_i = 0.1$) и паров воды, заполняющих поры (начальная доля $\psi_0 = 0.013$). Плотность пыли — 2000 kg/m^3 , льда — 920 kg/m^3 [8]. Теплоемкость льда и пыли полагалась равной $1000 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$. Расчеты представлены для элемента поверхности сферического ядра, находящегося на экваторе. Ось вращения ядра перпендикулярна плоскости орбиты кометы. Период вращения $T = 12.4 \text{ h}$.

На рис. 1 показано изменение температуры элемента поверхности ядра при его вращении вокруг собственной оси.

Поток солнечного излучения на рассматриваемом расстоянии от Солнца составляет 217 W/m^2 . Так как ядро кометы вращается, элемент поверхности переходит с дневной (освещаемой) стороны на ночную и наоборот. Температура меняется периодическим образом. За счет излучения в космическое пространство и отвода тепла теплопроводностью поверхность остывает, минимальная

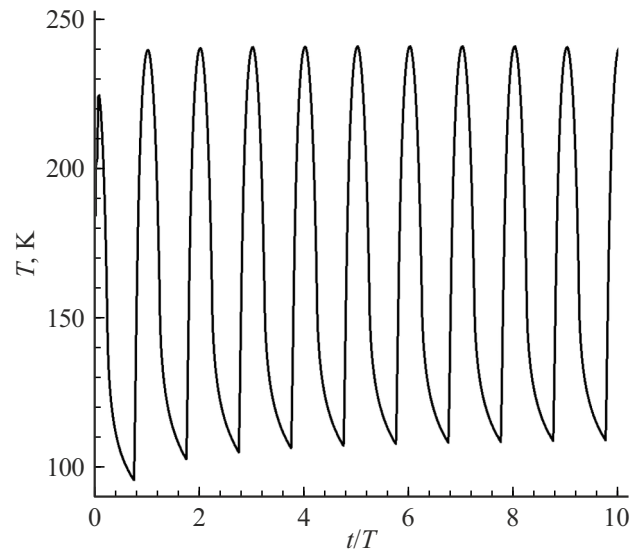


Рис. 1. Зависимость температуры элемента поверхности на экваторе от времени.

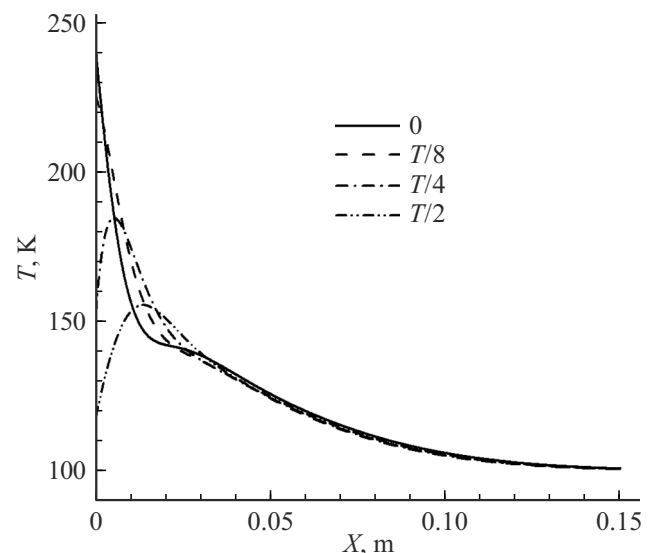


Рис. 2. Распределение температуры по глубине слоя в различные моменты времени.

температура составляет около 110 К. Квазипериодический режим устанавливается по истечении 3–5 оборотов, далее графики изменения температуры во времени с хорошей точностью повторяются на каждом обороте.

За 10 оборотов тепловая волна проходит примерно 15 см вглубь кометного ядра. На рис. 2 показано распределение температуры по глубине ядра в различные моменты времени: 0 и $T/8$ — дневная сторона (0 и 1.55 h соответственно), $T/4$ — граница дневной и ночной стороны (3.1 h) и $T/2$ — ночная сторона (6.2 h). Изменения температуры затрагивают только приповерхностный слой, на достаточном удалении от поверхности распределение температуры не зависит от времени. Тем-

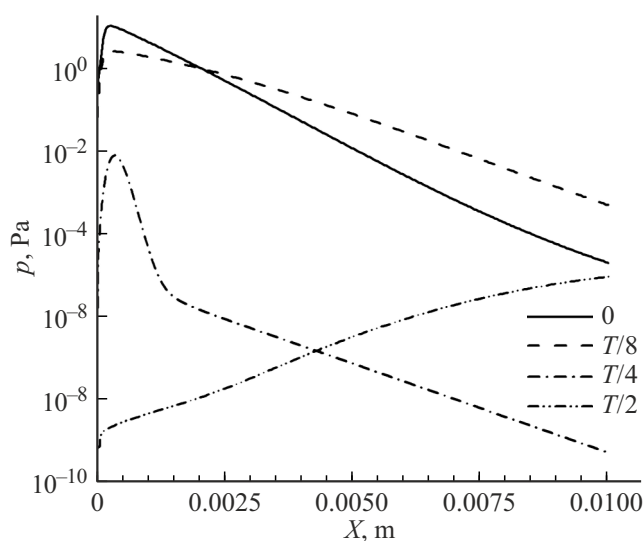


Рис. 3. Распределение давления по глубине слоя для разных моментов времени.

пература по глубине приповерхностного слоя меняется существенно нелинейно.

Давление в приповерхностном слое определяется интегральным вкладом открытых и закрытых пор. Распределение давления по глубине слоя для различных моментов времени приведено на рис. 3.

Для рассматриваемого удаления ядра от Солнца (2.5 au) на части дневной стороны максимальное давление существенно превышает значение 1 Па. Таким образом, согласно [10], возможно разрушение слоя и эжекция пылевых агрегатов даже для условий низких значений потока энергии солнечного излучения. С приближением к Солнцу ожидается усиление наблюдаемого эффекта. На ночной стороне давление в слое падает за счет уменьшения температуры (рис. 2), и происходит конденсация молекул на стенках открытых/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] J. Blum, D. Bischoff, B. Gundlach. *Universe*, **8**, 381 (2022). DOI: 10.3390/universe8070381
- [2] N. Thomas. *An Introduction to Comets. Post-Rosetta Perspectives* (Springer, Cham, 2020), DOI: 10.1007/978-3-030-50574-5

- [3] Л. Еленин. *Кометы. Странники Солнечной системы* (Эксмо, М., 2024)
- [4] E. Kührt, H.U. Keller. *Icarus*, **109**, 121 (1994). DOI: 10.1006/icar.1994.1080
- [5] B.J.R. Davidsson, Y.V. Skorov. *Icarus*, **159**, 239 (2002). DOI: 10.1006/icar.2002.6912
- [6] M.C. De Sanctis, M.T. Capria, A. Coradini, R. Orosei. *Astronom. J.*, **120** (3), 1571 (2000). DOI: 10.1086/301512
- [7] J. Blum, B. Gundlach, M. Krause, M. Fulle, A. Johansen, J. Agarwal, I. von Borstel, Xi. Shi, Xu. Hu, M.S. Bentley, F. Capaccioni, L. Colangeli, V.D. Corte, N. Fougere, S.F. Green, S. Ivanovski, Th. Mannel, S. Merouane, A. Migliorini, A. Rotundi, R. Schmied, C. Snodgrass. *MNRAS*, **469**, 755 (2017). DOI: 10.1093/mnras/stx2741
- [8] X. Hu, X. Shi. *Astrophys. J.*, **910** (1), 1 (2021). DOI: 10.3847/1538-4357/abddbf
- [9] N. Attree, C. Schuckart, D. Bischoff, B. Gundlach, J. Blum. *MNRAS*, **535**, 65 (2024). DOI: 10.1093/mnras/stae2315
- [10] Y. Skorov, J. Blum. *Icarus*, **221** (1), 1 (2012). DOI: 10.1016/j.icarus.2012.01.012
- [11] Т.А. Андреева, А.Е. Беркович, Н.Ю. Быков, С.В. Козырев, А.А. Лукин. *ЖТФ*, **90** (9), 1516 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.09.49685.54-20
- [12] X. Hu, B. Gundlach, I. von Borstel, J. Blum, X. Shi. *AA*, **630**, A5 (2019). DOI: 10.1051/0004-6361/201834631