

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЯДЕР КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ: НА ПРИМЕРЕ ЯДРА КОМЕТЫ 67P/ЧУРЮМОВА–ГЕРАСИМЕНКО

Академик РАН М. Я. Маров, А. В. Русол*, В. А. Дорофеева

Поступило 13.07.2018 г.

С помощью численных моделей исследовано, на какую глубину внешнего слоя происходит дегазация кометных ядер, когда они в течение десятков лет находятся на орбитах, перигелий которых близок к Солнцу. Задача актуальна, поскольку помогает понять, сколь значительно экспериментально получаемые результаты состава кометных ком зависят от того, как долго комета находится на современной орбите и насколько адекватно получаемые данные отражают состав кометных ядер в целом. Предлагаемый подход, продемонстрированный на примере 67P/Чурюмова–Герасименко, основан на использовании 3D-модели рельефа поверхности ядра кометы и учитывает не только его движение по орбите, но и собственное суточное вращение. Распространение тепла в субповерхностных слоях ядра описывается одномерным уравнением теплопроводности для пористой каменно-ледяной композиции вещества. На основе данного подхода получены распределения температур в субповерхностных слоях для нескольких участков поверхности, находящихся в регионе МА'АТ за 20 оборотов вокруг Солнца, что составляет около 130 лет.

Ключевые слова: кометы, модель тепловой эволюции, глубина распространения тепла.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524842150-155>

Кометы — самый многочисленный класс космических объектов Солнечной системы. По современным представлениям они образовались на ранних этапах её эволюции, и по составу пылевого и газового компонентов их ядер можно судить о первичном составе вещества газопылевого околосолнечного диска и о термодинамических условиях в зоне формирования транснептуновых объектов пояса Койпера. Однако определить состав ядер комет прямыми методами невозможно, хотя такая попытка и была предпринята в ходе миссии Европейского космического агентства “Розетта” к комете 67P/Чурюмова–Герасименко (далее 67P), когда на её ядро был сброшен зонд “Фила”. Поэтому на данном этапе о составе летучих компонентов кометных ядер судят по данным экспериментальных исследований состава их атмосфер (ком), образующихся при сублимации вещества ядер. Их состав может существенно изменяться по мере дегазации внешних слоёв ядра при неоднократном прохождении кометы вблизи Солнца [1]. Степень дегазации тем выше, чем больше оборотов совершает комета, находясь на

околосолнечной орбите, что особенно важно для короткопериодических комет.

Цель данной работы — исследовать с помощью численной модели, на какую глубину происходит изменение состава компонентов внешнего слоя кометного ядра при многократном прохождении кометой (в течение десятков лет) перигелия, расположенного близко к Солнцу. В качестве модельного объекта в данном исследовании была выбрана комета 67P с афелием ~5,68 а.е. и перигелием ~1,24 а.е. от Солнца. Рассчитана тепловая эволюция субповерхностных слоёв для нескольких точек поверхности, имеющих разный режим инсоляции, за 20 оборотов вокруг Солнца, что составляет ~130 лет.

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В СУБПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ КОМЕТНОГО ЯДРА

Для решения поставленной задачи была построена гибридная модель, в которой граничные условия на поверхности определяются 3D-моделью освещённости ядра кометы, подробно рассмотренной ранее авторами в работе [2], а задача о распространении тепла в субповерхностных слоях решается в одномерной постановке. Такой подход позволяет объединить достоинства

*Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского
Российской Академии наук, Москва*

*E-mail: fermata@inbox.ru

3D-модели освещённости поверхности с экономичной одномерной вычислительной схемой и тем самым избежать больших требований к вычислительным ресурсам. С помощью разработанной модели были рассмотрены термические изменения в субповерхностном слое ядра кометы 67P за 20 оборотов вокруг Солнца. Модель учитывает рельеф поверхности, движение по орбите вокруг Солнца и собственное суточное вращение.

Задача исследования длительной тепловой эволюции внутренних слоёв вещества ядра даёт возможность исключить из рассмотрения быстротекущие процессы, связанные с сублимацией льдов различного состава, их реструктуризацией и выделением газов, что не нарушает, однако, общности рассмотрения, так как указанные процессы происходят в относительно узкой приповерхностной области. Принятый подход позволил отказаться от решения задачи Стефана и ограничиться исследованием распространения тепловой энергии в глубь вещества ядра, описываемого уравнением теплопроводности, что значительно сокращает объём требуемых вычислительных ресурсов. Поскольку рассматривается распространение тепла на глубину значительно меньше геометрических размеров кометного ядра, использование одномерной постановки представляется вполне оправданным.

В декартовых координатах одномерное уравнение теплопроводности записывается в виде

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq L. \quad (1)$$

Граничные условия приняты в виде

$$T|_{x=0} = T_{surf}, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0. \quad (2)$$

Здесь c — теплоёмкость, ρ — плотность, λ — теплопроводность, L — максимальная глубина, рассматриваемая в данной модели, T_{surf} — температура поверхности, которая определяется из упрощенного соотношения теплового баланса для элемента поверхности

$$\sigma_B T_{surf}^4 S_{el} - \sum_i L_i^{sub} Q_i = (1 - A) S_{el} W_R \cos \beta, \quad (3)$$

где σ_B — постоянная Стефана–Больцмана, S_{el} — площадь элемента поверхности; A — оптическое альbedo; W_R — энергия излучения Солнца на расстоянии R , β — угол между нормалью к плоскости элемента поверхности и направлением на Солнце. Второй член в левой части (3) описывает эффект охлаждения поверхности, связанный с процессами сублимации льдов, и характеризуется суммой произведений скрытой теплоты сублимации и массового выхода при сублимации льда

i -го типа. Из-за отсутствия необходимых данных из рассмотрения были исключены процессы, связанные с изменением фазового состояния льдов, поэтому в левой части выражения (3) сохраняется только первый член. Влияние пористости на теплофизические свойства каменно-ледяной композиции изучалось подходами, аналогичными применяемым в теории конструкционных материалов [3, 4].

Теплофизические свойства вещества кометного ядра, согласно уравнению (1), определяются как свойства композиции веществ льда воды и силикатной пыли с учётом заданной массовой доли пыли:

$$\rho = \left(\frac{\Delta_{dust}}{\rho_{dust}} - \frac{1 - \Delta_{dust}}{\rho_{ice}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$\lambda = (\Delta_{dust} \lambda_{dust} + (1 - \Delta_{dust}) \lambda_{ice}), \quad (5)$$

$$c = (\Delta_{dust} c_{dust} + (1 - \Delta_{dust}) c_{ice}). \quad (6)$$

Поскольку процессы, связанные с фазовыми переходами, не учитываются, теплофизические характеристики пористой каменно-ледяной композиции приняты не зависящими от температуры.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для численного исследования тепловой эволюции в субповерхностных слоях ядра кометы 67P было выбрано несколько точек, находящихся в регионе МААТ (торцевая часть малой доли кометы). Характер ориентации оси собственного суточного вращения ядра таков, что при движении по орбите происходит выраженная смена освещённости выбранного региона. Так, например, при прохождении перигелия выбранные участки региона МААТ находятся на неосвещённой части ядра; их максимальная освещённость и температура поверхности достигаются в постперигельный период.

Уравнение (1) с граничными условиями (2) решали неявным методом конечных разностей. В качестве начального распределения температур во внутренних слоях вещества ядра было принято равномерное распределение температуры, $T_0 = 10$ К. Расчёт проводили в 20 точках орбиты; в каждой производился перерасчёт граничных условий (2), учитывающий текущее положение ядра на орбите и его суточное вращение.

Полученные результаты показали, как и следовало ожидать, что изменения распределения температур, сильно зависящие от интенсивности освещения и температуры поверхности, происходят

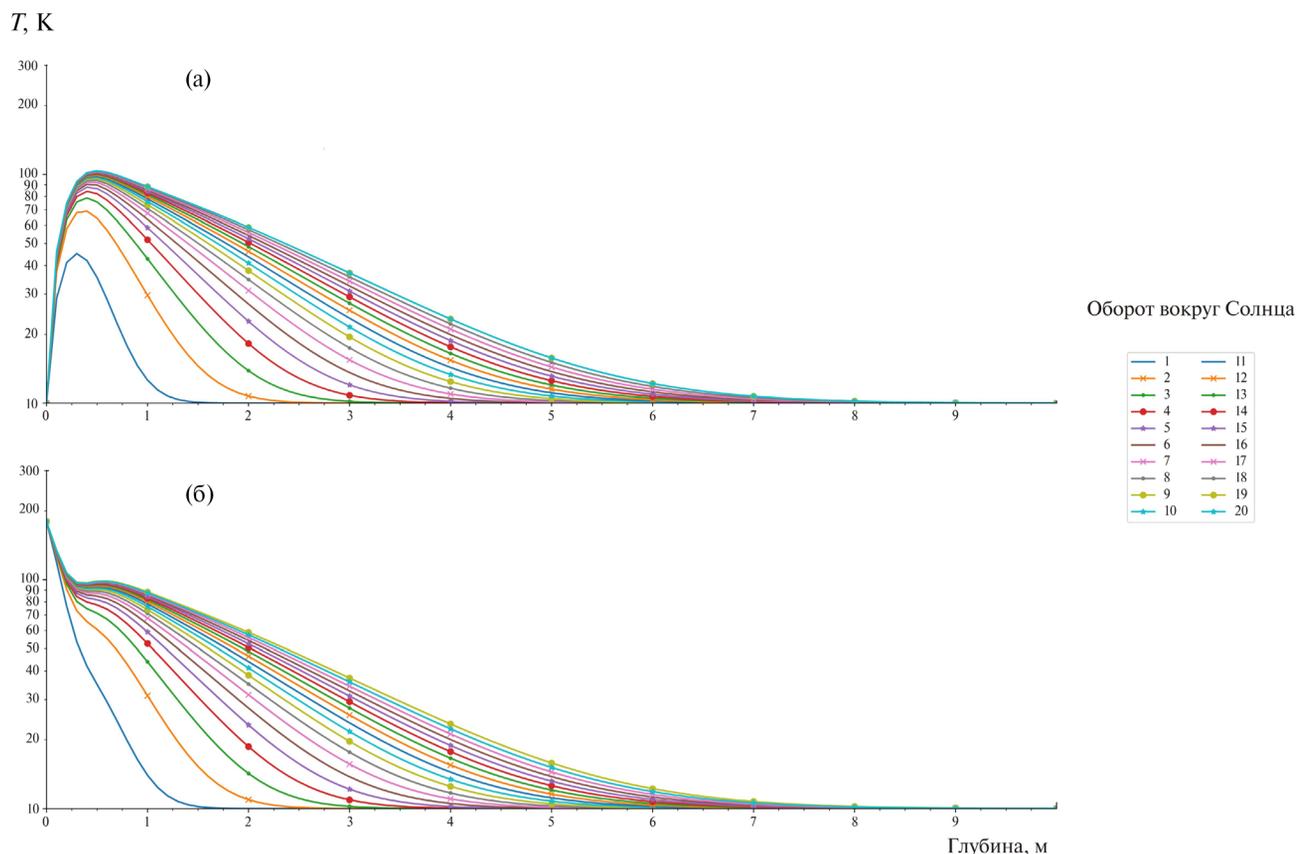


Рис. 1. Распределение температур во внутренних слоях ядра в точке *A* региона МААТ: а — в перигелии точка *A* не освещена; б — после прохождения перигелия точка *A* максимально освещена.

только в тонком приповерхностном слое вещества ядра. Распределение температур во внутренних слоях с увеличением количества оборотов изменяется достаточно медленно и стремится к некоторому предельному распределению, сохраняющему свой характер и слабо зависящему от освещённости и температуры поверхности. Поэтому полученное для 20 оборотов распределение температур в более глубоких слоях приблизительно соответствует распределению температур в ядре кометы 67P, установившемуся за значительно большее число оборотов и существующему в настоящее время. Справедливость такого вывода подтверждается приведёнными на рис. 1 и 2 распределениями температур в двух наиболее характерных положениях ядра кометы 67P на орбите и вида освещённости рассматриваемых участков региона МААТ: в перигелии, когда их поверхность не освещена (а), при максимальной освещённости и температуре их поверхности в постперигельный период (б).

Точка А. В этой точке в течение первого оборота вокруг Солнца происходит аккумуляция тепловой энергии на глубинах, достигающих 1,25 м, с максимумом температуры в 45 К,

расположенным на глубине около 0,35 м от поверхности (нижняя кривая на рис. 1). По мере увеличения числа оборотов кометы вокруг Солнца происходит распространение теплового фронта в глубь вещества ядра (последующие кривые на рис. 1), и за 20 оборотов его внутренние слои прогреваются до глубин около 7,0 м с максимальной $T = 105$ К на глубине около 0,45–0,55 м. На тех участках орбиты, где поверхность в выбранной точке *A* максимально освещена и её T достигает значений ~ 180 К, распределение температуры в самом внешнем слое глубиной до полуметра существенно меняется, что показано на рис. 1б, но при попадании в тень оно возвращается к характеру, показанному на рис. 1а.

Точка Б. Особенностью данной точки является то, что она находится в тени в 2,67 раза дольше, чем точка *A*, но максимальная температура T поверхности в постперигельный период достигает 275–280 К. В связи с этим в течение первого оборота вокруг Солнца происходит аккумуляция тепловой энергии на глубинах, достигающих 1,25 м, так же как и в точке *A*, но с существенно более низким максимумом в 15 К, расположенным, как и в точке *A*; на глубине 0,3–0,4 м от поверхности

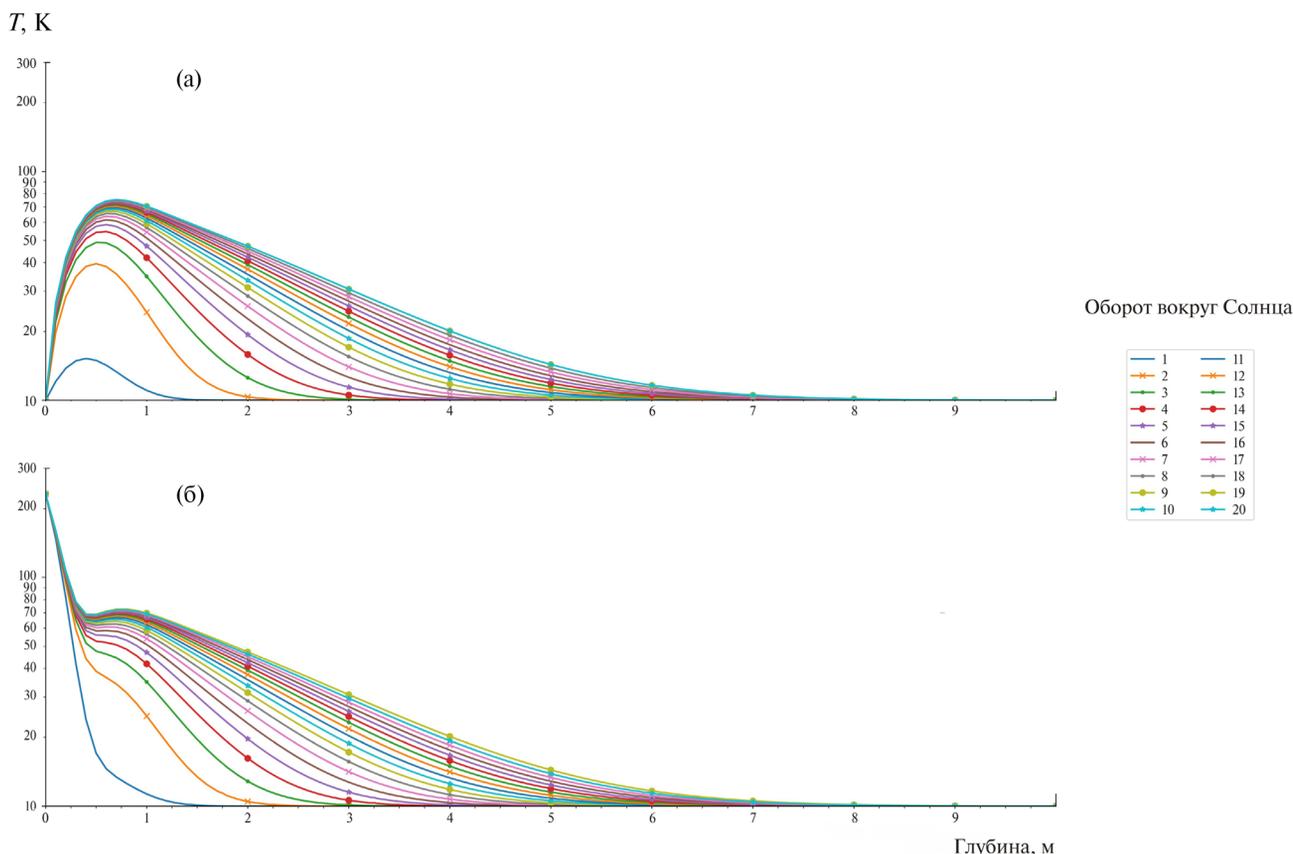


Рис. 2. Распределение температур во внутренних слоях ядра в точке *B* региона МААТ: а — в перигелии точка *B* не освещена; б — после прохождения перигелия точка *B* максимально освещена.

(рис. 2а). В течение 20 оборотов вокруг Солнца в рассматриваемой точке, как и в точке *A*, внутренние слои вещества ядра кометы прогреваются до глубин $\sim 7,0$ м, но максимум температур на 30 К ниже, чем в точке *A*, и составляет лишь 75 К и располагается он дальше от поверхности на глубине 0,65–0,75 м. В тот относительно короткий период, когда рассматриваемая точка поверхности ядра кометы максимально освещена, успевает кратковременно прогреться лишь тонкий ~ 20 см слой (рис. 2б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведённое численное моделирование показало, что даже при продолжительном (более 100 лет) нахождении короткопериодической кометы на современной орбите тепловая энергия аккумулируется в субповерхностном слое ядра, не превышающем 10 м. Полученное распределение тепла на этой глубине стремится к некоему квазистационарному состоянию, которое сохраняется в течение всего периода обращения кометы по орбите. Периодическая релаксация температуры до исходных значений происходит только

в тонком приповерхностном слое толщиной несколько десятков сантиметров. Особый интерес представляют расположение слоёв, на которых достигаются температуры сублимации основных летучих компонентов комы: N_2 ($T_{\text{субл}} \approx 20$ К), CO ($T_{\text{субл}} \approx 25$ К), CO_2 ($T_{\text{субл}} \approx 90$ К) и H_2O ($T_{\text{субл}} \approx 140$ К) в столь разных по условиям освещённости точках. Согласно проведённым расчётам, в исследуемых точках указанные температуры 20; 25; 90 и 140 К достигаются, в зависимости от освещённости поверхности, на глубинах: в точке *A* 4,35, 3,75, 1,0 и $\sim 0,07$ м, в точке *B* 4,0; 3,35; $\sim 0,15$ и $\sim 0,09$ м соответственно. Отсюда следует, что, несмотря на интенсивные изменения температуры поверхности в течение освещённых и затенённых периодов времени, тепловая энергия накапливается лишь в тонком внешнем слое ядра кометы, не превышающем по глубине нескольких метров. Тем не менее, накопленной энергии достаточно для инициализации фазовых переходов в веществе кометного ядра, что может служить объяснением наблюдаемой активности ядра кометы 67Р в постперигелийный период движения по орбите.

Результаты данной работы не имеют аналогов по детальности описания поверхности и учёта

влияния ориентации ядра относительно Солнца в зависимости от его положения на орбите и времени суток на нагрев исследуемых участков поверхности на протяжении длительного времени. Оценить корректность полученных результатов можно сравнением с распределением температур, полученным в [5] для одного оборота вокруг Солнца. Для точек, имеющих максимальную температуру поверхности 170–180 К, авторы [5] показали, что $T = 140$ К достигается на глубине 4–5 см, что совпадает со значениями, полученными нами (рис. 1б). В работе [6] рассмотрено распространение тепла в сферически-симметричном пористом каменно-ледяном теле за 10 оборотов вокруг Солнца в зависимости от принятого значения тепловой инерции вещества тела. Результаты моделирования показали, что глубина прогрева монотонно возрастает с увеличением числа оборотов. Это, с нашей точки зрения, указывает на приемлемый выбор описания теплофизических свойств пористой каменно-ледяной композиции, которое было принято в нашей модели.

Ещё один вывод, который следует из приведённых результатов, состоит в том, что по мере того, как солнечное излучение поглощается во время многих оборотов вокруг Солнца, тепловая энергия накапливается во внутренних областях кометного ядра с постепенным повышением температуры до некоторой глубины. Такая возможность обсуждалась, в частности, в [1]. Однако, как видно из рис. 1 и 2, положение температурного максимума постепенно стабилизируется, приближаясь к определённой постоянной глубине, в зависимости от изменения характера освещения поверхности рассматриваемого участка и теплофизических свойств вещества ядра. Такой тип накопления тепловой энергии обеспечивает возможность интенсивного производства газовой составляющей комы на участках орбиты после прохождения перигелия. Этот вывод качественно совпадает с результатами моделирования распространения тепла в кометоподобном теле, имитирующем межзвёздный астероид 11/2017 U1 'Oumuamua [7], где авторы показали, что даже при температуре поверхности тела около 600 К температура сублимации льда $\text{CO}_2 \sim 90$ К достигается только через два месяца после максимального сближения объекта с Солнцем.

Исходя из результатов данной модели, можно также оценить глубину сублимации различных льдов в областях, где наружный слой имеет значительные дефекты (разломы, трещины): на глубинах от 0,1 до 0,65 м слой будет почти полностью дегазирован, на глубинах от 0,1 до 0,85 м он будет

существенно обеднён CO_2 . Распределение наиболее летучих макрокомпонентов кометного ядра N_2 и Ag должно меняться в наибольшей степени. Они могут быть полностью дегазированы из слоя на глубинах до 0,9–1,5 м. CO , сублимируясь в относительно глубоких слоях, может повторно осесть во внешних слоях в виде клатратного гидрата $\text{CO} \cdot 5,75\text{H}_2\text{O}$; его температура сублимации примерно на 20 К выше, чем аналогичная температура льда CO .

Важно отметить, что явление газовой активности ядра кометы 67P существенно зависит не столько от максимальных значений поверхностной температуры, сколько от отношения продолжительности освещённых и затенённых периодов в течение одного оборота вокруг Солнца. Например, для точки области МААТ А, проявляющей большую газовую активность, такое отношение составляет 17/3, а для точки В 12/8.

Дальнейшее развитие модели может идти в нескольких направлениях. Во-первых, учёт зависимости теплофизических свойств пористой каменно-ледяной композиции от температуры вещества ядра кометы позволит перейти от задачи теплопроводности к изучению задачи Стефана, хотя это, несомненно, приведёт к существенному повышению требований к вычислительным ресурсам, что было отмечено в [8]. Изучение тепловых процессов с учётом фазовых и структурных переходов в веществе кометного ядра позволит сделать более правильные выводы о вариациях химического состава кометной комы и самого ядра в ходе продолжительной тепловой эволюции. Во-вторых, если наблюдательных данных достаточно для построения детальной триангуляции поверхности ядра кометы, как, например, для кометы 67P, целесообразно перейти к разномасштабному построению профиля поверхности. Это позволит более детально моделировать изменение освещённости рассматриваемых областей при относительно “грубой” детализации остальной части поверхности ядра кометы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17–02–00507).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маров М.Я. Физические свойства и модели комет. // Астрон. вестн. 1994. Т. 28. № 4/5. С. 5–85.
2. Маров М.Я., Русол А.В., Дорофеева В.А. Трёхмерная модель освещённости кометных ядер: на примере ядра кометы 67P/Чурюмова–Герасименко // ДАН. 2017. Т. 474. № 1. С. 41–45.

3. Карпинос Д.М., Клименко В.М. Пористые конструкционные материалы и их теплофизические свойства. Киев: Знание, 1978.
4. Черемской П.Г. Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Hu, X., Shi X., Siers H., Blum J., Oberst J., Fulle M., Kührt E., Güttler C., Gudlach B., Keller H.U., Mottola S., Pajola M., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., Koschny D., Rickman Y., Agarwal J., A'Hern M.F., Barucci V.F., Bertaux J.-L., Bertini I., Boudreault S., Buttner I., Gremone-se G., De Deppo V., Davidsooon B., Debei S., De Cecco M., Deller J., Fornasier S., Groussin O., Guti'errez-Marques P., Hall I., Hofmann M., Hviid S.F., Ip W.-H., Jorda L., Knollenberg J., Kovaks G., Kramm J.R., Kuppers M., Lara L.M., Lazzarin M., L'opez-Moreno J.J., Marzari F., Naletto G., Ockay N., Richards M.L., Ripken J., Thomas N., Tubiana C., Vincent J.-B. Thermal Modelling of Water Activity on Comet 67P/Churyumov–Gerasimenko with Global Dust Mantle and Plural Dust-to-Ice Ratio // Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 2017.V. 469. Iss. Suppl 2. P. S295–S311.
6. Guilbert-Lepoutre, A., Jewitt, D. Modelling the Evolution of a Comet Subsurface: Implications for 67P/Churyumov–Gerasimenko // Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 2016. V. 462. P. S146–S155.
7. Fitzsimmons, A., Snodgrass C., Roziti B., Yang B., Hyland M., Seccull T., Bannister M.T., Fraser W.S., Jedicke R., Lacerda P. Spectroscopy and Thermal Modelling of the First interstellar Object 1I/2017 U1 'Oumuamua // Nature Astron. 2018. V. 2. P. 133–137.
8. Komle N.I., Macher W., Niefenbacher P., Karg G., Pelivan I., Knollenberg J., Jorda L., Cappana C., Lommatsch V., Cozzoni B., Finke F. Three-Dimensional Illumination and Thermal Model of the Abydos Region on Comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. P. S2–S19.

NUMERICAL SIMULATION OF THE LONG-TERM THERMAL EVOLUTION OF THE NUCLEI OF SHORT-PERIOD COMETS: USING THE NUCLEUS OF COMET 67P/CHURYUMOV–GERASIMENKO AS AN EXAMPLE

Academician of the RAS M. Ya. Marov, A. V. Rusol, V. A. Dorofeeva

Received July 13, 2018

Using numerical models, we have studied what depth of the outer layer the comet nuclei are degassed to when they are in orbits whose perihelion is close to the Sun for tens of years. The problem is topical, because it helps to understand how much the experimentally obtained results on the composition of comet comas depend on how long the comet is in its present-day orbit and how adequately the data obtained reflect the composition of comet nuclei as a whole. The proposed approach, which is demonstrated using comet 67P/Churyumov–Gerasimenko as an example, is based on a 3D comet nucleus surface relief model and takes into account not only its orbital motion, but also its diurnal rotation. The propagation of heat in the nucleus subsurface layers is described by a 1D heat conduction equation for a porous rock-ice composition of matter. Based on this approach, we have derived the temperature distributions in the subsurface layers for several surface patches located in the Ma'at region in 20 revolutions around the Sun, ~130 years.

Keywords: comets, thermal evolution model, heat propagation depth.