

УДК 523.682

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ: СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПОРИСТОГО И СПЛОШНОГО ТЕЛ

© 2022 г. В. В. Ефремов<sup>1\*</sup>, О. П. Попова<sup>1</sup>, Д. О. Глазачев<sup>1</sup>, А. П. Карташова<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: efremov.vv@phystech.edu

В рамках представленной работы предлагается модель абляции, описывающая взаимодействие малых метеороидов с атмосферой Земли, в которой метеорное тело рассматривается в двух модификациях: сплошное и пористое тело. Приводится анализ полученных параметров для метеоров с яркостью от  $-2^m$  до  $+2^m$ , полученных по оптическим наблюдениям

**Ключевые слова:** метеоры, метеороиды, модель абляции, метеорный поток Персеид.

**Для цитирования:** Ефремов В.В., Попова О.П., Глазачев Д.О., Карташова А.П. Определение параметров мелких метеорных тел: сравнение моделей пористого и сплошного тел // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14. № 2. С. 99–105. [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_99](http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_99)

### Введение

Согласно современной терминологии метеороидами принято называть твердые природные объекты с размерами от 30 микрон до 1 м, движущихся в межпланетном пространстве или прибывающих из него (IAU meteor terminology, 2017). Мелкие метеорные тела (размером меньше 1 см) принято считать не достигающих поверхности Земли, поэтому основным способом получения информации об их свойствах является изучение их взаимодействия с атмосферой. Метеорные исследования ведутся на протяжении длительного времени, и, тем не менее, характеристики метеорных частиц определяются с большими погрешностями, а задача точного определения параметров метеорных тел, в частности их массы, плотности и свойств вещества остается актуальной [Subasinghe et al., 2017]. Массы метеороидов как правило оценивают по различным эмпирическим соотношениям или при помощи моделирования (см., например, [Porova et al., 2019; Vida et al., 2018; Efremov et al., 2021]), а для оценки плотности часто привлекают дополнительные соображения [Babadganov and Kokhirova, 2009].

В нашей работе параметры метеороидов потока Персеид (массы, размеры и плотности) были определены с помощью модели абляции для мелких метеорных тел [Лебединец, 1980]. Метеорный поток Персеид является одним из наиболее изученных метеорных потоков, значительное количество оценок этих метеороидов было опубликовано разными авторами (см., например, [Kikwaya et al., 2011; Babadganov and Kokhirova, 2009]). Наблюдательные данные, использованные при расчетах, были получены в результате кампании 2016 г., проводившейся во время действия метеорного потока Персеид [Margonis et al., 2018]. Используемая аппаратура позволила зарегистрировать метеоры от  $-6^m$  до  $+2^m$ .

Целью данной работы является оценка параметров мелких метеорных тел, поэтому были выбраны метеоры слабее  $-2^m$ , публикуемые результаты дополняют и развивают опубликованные ранее оценки [Efremov et al., 2021].

## Модель абляции

Для оценки параметров метеорных тел (массы, плотности и др.) по наблюдательным данным была выбрана модель абляции, где набегающий поток расходуется на излучение, нагрев и испарение метеорного тела (см., например, [Лебединец, 1980]). Уравнение энергии дополняется уравнениями потери массы, торможения и изменения высоты полета, соотношением для определения кривой блеска. Эта модель описывает процесс абляции мелких метеорных тел; для таких метеороидов важен предварительный прогрев, и, как следствие, высота над уровнем планеты, с которой начинается расчет (см. обзор [Popova et al., 2019]). Увеличение этой высоты выше 300 км не влияет на получаемый результат. Для определения параметров метеорных тел требуется подобрать такие начальные данные, которые позволят воссоздать наблюдения путем решения системы дифференциальных уравнений, описывающих высоту, скорость, массу и светимость в зависимости от времени.

В рамках используемой модели предполагается, что метеороид имеет сферическую форму. В большинстве работ метеороид рассматривают как сплошное тело, но известно, что частицы космической пыли (IDP) и кометная пыль имеют высокую пористость [Borovicka et al., 2019]. Поэтому мы предлагаем рассматривать метеороид в двух вариантах: как сплошное тело и как пористое тело. Пористое тело представляется как сложенное частицами шарообразной формы при квадратной или ромбической укладке (модель П1). Сами частицы представляют из себя минеральное вещество плотностью (плотность минералов)  $3000 \text{ кг/м}^3$ . Испарение вещества происходит с поверхности самих частиц. Торможение и излучение учитывается как для метеороида, являющегося единым телом.

Другая модификация пористого тела: метеороид представлен в виде шарообразных кластеров, которые состоят из частиц минерального вещества (модель П2). Сами кластеры сложены квадратной или ромбической укладкой и занимают половину объема метеороида (макропористость 50%). Микропористость самих кластеров неизвестна. Испарение вещества происходит с шарообразных кластеров (П2), которые составляют метеорное тело. Набегающий поток, излучение и торможение рассчитываются как и в модели П1, с учетом поперечного сечения метеороида как целого.

В рассматриваемой модели абляции потеря массы определяется через давление насыщенного пара вещества метеороида. Одним из основных компонентов метеорного вещества являются силикаты, в том числе оливин. Подтверждено, что оливин присутствует в составе комет [Zolensky et al., 2008; Patzold et al., 2019] и в космической пыли [Rietmeijer, 2004; Borovicka et al., 2019]. Поэтому в данной работе использовалась зависимость давления насыщенного пара для оливина. Следует отметить, что разные авторы предлагают заметно различающиеся зависимости для одного и того же вещества, что влияет на определение параметров метеороидов (см. [Efremov et al., 2021]).

Для построения автоматизированного метода оценки параметров метеорного тела необходимо сформулировать задачу минимизации функции отклонения модельного решения от наблюдаемых данных, то есть определить невязку. Были рассмотрены различные невязки и проанализировано их влияние на определяемые параметры метеороидов [Efremov et al., 2021]. Невязки рассчитывались как среднеквадратичное отклонение рассчитанной звездной величины или интенсивности от наблюдаемой. Рассматривались как размерные величины, так и приведенные. Для поиска наилучшего решения использовался генетический алгоритм, реализованный в Wolfram Mathematica.

Чтобы доказать, что используемый алгоритм дает достоверные результаты, была создана искусственная кривая светимости для метеороида с известными выбранными параметрами. После получения кривой, она зашумливалась, т.е. на кривую накладывался белый шум разной мощности, и при помощи алгоритма находилось решение. Пример такой проверки представлен на рис. 1, разница заданных и найденных параметров метеора составляла менее 5%. Алгоритм способен находить решение с хорошей точностью при амплитуде шума до 0.5 звездных величин.

В случае модели сплошного тела и пористого (П2) варьировались размер и плотность (плотность тела метеороида, отношение массы к объему), а при применении модели пористого тела П1 варьировались размер и пористость.

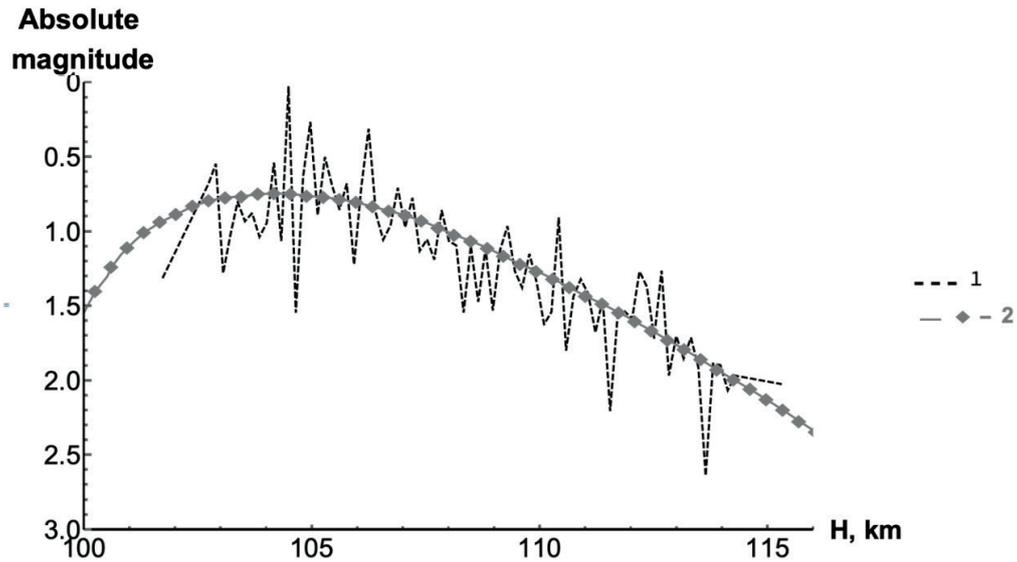


Рис. 1. Кривая блеска модельного зашумленного метеора (пунктир, кривая 1) и найденное решение (2). Амплитуда шума до  $0.5^m$  звездных величин

### Оценка параметров метеорных тел

Описанная модель абляции использовалась для моделирования 11 метеоров потока Персеид, данные для которых приведены в работе [Efremov et al., 2021]. Массы этих метеоров лежат в диапазоне  $0.15\text{--}1.73 \cdot 10^{-5}$  кг (по нашим оценкам) в рамках модели сплошного тела, и в диапазоне  $1.62\text{--}87.71 \cdot 10^{-5}$  кг – при оценке по различным эмпирическим соотношениям [Efremov et al., 2021]. Разброс оценок для одного и того же метеора достигает сорока раз.

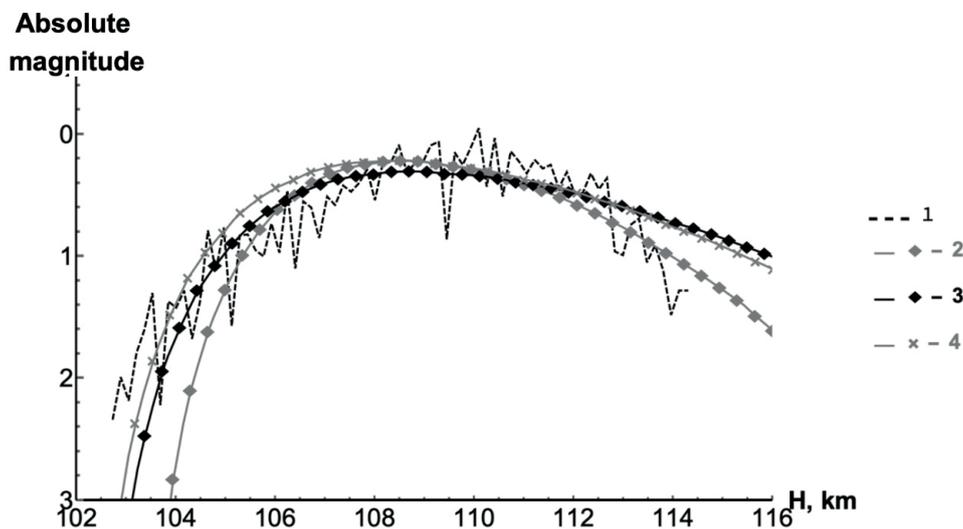
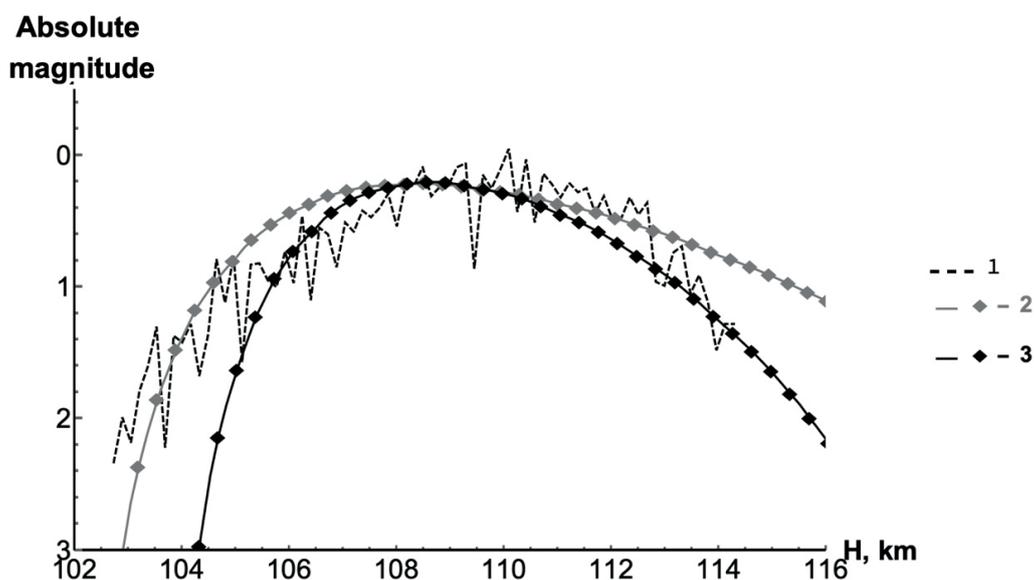


Рис. 2. Кривая блеска метеора 20160811\_202522 (пунктир, кривая 1) и модельные кривые, полученные в рамках модели сплошного (2) и пористых тел: П1 – (3), П2 – (4). Зависимость для давления насыщенного пара из работы Costa et al. (2017) для вещества: оливин, пары Fe/Mg

Сравнение модельных (при применении модели сплошного тела) и наблюдаемой кривых блеска для метеора 20160811\_202522 приведено на рис. 2 для модели сплошного и моделей пористого тела. Для разных моделей заметно отличаются формы модельных кривых блеска. Масса метеороида оценивается

как  $0.42 \cdot 10^{-5}$  кг для сплошного тела, и как  $0.50 \cdot 10^{-5}$  кг в моделях П1–П2. Использование моделей пористого тела мало влияет на оценку массы, оценки плотности тела метеороида увеличиваются (до 2-х раз).

Для всех рассмотренных метеоров выбранное давление насыщенных паров незначительно влияет на оценку массы (отклонение от среднего значения составляет не более 10%). Для модели сплошного тела более выраженный эффект наблюдается при оценке радиуса (отклонение составляет не более 35%). Различие между максимальным и минимальным значениями оценки плотности тела метеороида может достигать пяти раз. Для модели пористого тела (П1), при использовании различных давлений насыщенного пара, выраженный эффект наблюдается при оценке пористости, разница достигает двух раз. Зависимость давления паров существенно влияет на форму кривой блеска (рис. 3), качество ее подгонки и оценку плотности.



**Рис. 3.** Кривая блеска метеора 20160811\_202522 (пунктир, кривая 1) и модельные кривые, полученные в рамках модели пористого тела (П1): при использовании зависимости для давления насыщенного пара из работы Costa et al. (2017) для вещества: оливин, пары Fe/Mg – (2) и Sekanina et al. (2012) для вещества фаялит – (3)

Плотность тела метеороидов в рамках нашей модели определяется с большой погрешностью, ошибка ее определения может достигать нескольких раз для одного и того же метеора при использовании разных невязок и разных давлений паров. Средняя плотность по всем метеороидам (в рамках модели сплошного тела и по всем зависимостям для давлений) составляет  $362 \pm 237$  кг/м<sup>3</sup>, для отдельных метеоров разброс средних плотностей составляет от  $114 \pm 99$  до  $640 \pm 500$  кг/м<sup>3</sup>.

Во всех рассматриваемых моделях оценка плотности – это средняя плотность и средняя плотность метеороида, состоящего из пористых фрагментов (модель П2), плотных минеральных фрагментов (модель П1) и из вещества с неопределенной структурой в модели сплошного тела.

При использовании зависимости для давления насыщенного пара из работы [Costa et al., 2017] для вещества: оливин, пары Fe/Mg, в рамках модели пористого тела (П1), средняя плотность тела метеороидов составляет  $429 \pm 153$  кг/м<sup>3</sup>, для отдельных метеоров разброс средних плотностей составляет от  $153 \pm 81$  до  $644 \pm 50$  кг/м<sup>3</sup>. В рамках модели пористого тела (П2) средняя плотность метеороидов составляет  $473 \pm 156$  кг/м<sup>3</sup>, для отдельных метеоров разброс средних плотностей составляет от  $208 \pm 75$  до  $770 \pm 231$  кг/м<sup>3</sup>.

Для вещества фаялит, при использовании зависимости для давления насыщенного пара [Sekanina et al., 2012] в рамках модели пористого тела (П1) – средняя плотность тела метеороидов составляет

$1798 \pm 648 \text{ кг/м}^3$ , для отдельных метеоров разброс плотностей составляет от 295 до  $2970 \text{ кг/м}^3$ . При этом в рамках модели сплошного тела средняя плотность метеороидов составляет  $781 \pm 316 \text{ кг/м}^3$ , для отдельных метеоров разброс плотностей составляет от 82 до  $1647 \text{ кг/м}^3$ . Разница в оценке плотности тела метеороидов между моделью сплошного и пористого (П1) тела более чем два раза.

Оценка плотности тела метеороида в случае моделей пористого тела оказывается выше, чем для модели сплошного тела. Для моделей П1 и П2 оценки плотности тела метеороидов при одной и той же зависимости для давления насыщенного пара практически не отличаются.

Значение пористости для разных давлений сильно различаются. Средняя пористость, при использовании зависимости для давления насыщенного пара из работы [Costa et al., 2017] для вещества: оливин, пары Fe/Mg, по всем метеороидам (в модели П1) составила  $86 \pm 5\%$ , в модели П2 значения полной пористости также составляет около 85%. Средняя пористость при использовании зависимости для давления насыщенного пара для вещества фаялит [Sekanina et al., 2012] по всем метеороидам (в модели П1) составила  $44 \pm 18\%$ . Полученные пористости (и 44 и 85%) характерны для IDP [Borovička et al., 2019].

Наши оценки плотности вещества метеороидов потока Персеид оказываются ниже или сравнимы с оценками других авторов, полученными в результате анализа наблюдательных данных в рамках различных моделей, и попадают в диапазон известных плотностей комет. Так, плотность частиц пыли, собранных специальным прибором COSIMA в рамках космической миссии Rosetta к комете 67P/Чурюмова–Герасименко, составила от 100 до  $400 \text{ кг/м}^3$  [Hornung et al., 2016], а средняя плотность самой кометы –  $537 \text{ кг/м}^3$  [Patzold et al., 2019].

Оценки плотности тела метеороидов потока Персеид сравнимы с известными данными. Так, ряд авторов оценивали плотность частиц из потока Персеид и, если предположить, что плотность минеральных частиц  $3000 \text{ кг/м}^3$ , то можно оценить пористость через плотность. В работе [Bellot Rubio et al., 2002] для 5 Персеид плотность была оценена как  $600 \pm 100 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует пористости 80%. Бабаджанов и Кохилова (2009) оценили плотность для 44 Персеид –  $1300 \pm 200 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует пористости 57%. Kikwaya et al., (2011) оценили плотность для 107 Персеид как 420–820  $\text{кг/м}^3$ , что соответствует пористости 73–86%.

## Заключение

Автоматизированный метод оценки параметров метеороидов (массы, размера и плотности) по кривым блеска на основе модели абляции мелких метеорных тел был применен для оценки параметров метеоров потока Персеид яркостью от -2 до +2 звездной величины.

Показано, что предлагаемый метод позволяет оценивать параметры метеорных тел с хорошей точностью даже при зашумленных данных. Показано, что выбор зависимости для давления насыщенного пара сильно влияет на форму кривой блеска, качество ее приближения и оценку плотности. Различие между максимальным и минимальным значением оценки плотности тела метеороида может достигать пяти раз. Выбор зависимости для давления насыщенного пара сильно влияет на форму кривой блеска, качество ее приближения и оценку плотности тела метеороида. Была разработана модель поведения метеороида как пористого тела. Средняя модельная пористость по всем метеороидам (модель П1), в зависимости от давления насыщенного пара варьируется от  $44 \pm 18\%$  до  $86 \pm 5\%$ , что близко к значениям для IDP.

Зависимость для давления насыщенного пара влияет на оценку пористости более двух раз. Оценка плотности тела метеороида в случае моделей пористого тела оказывается выше, чем для модели сплошного тела. Во всех рассматриваемых моделях оценка плотности – это средняя плотность и средняя плотность метеороида, состоящего из пористых фрагментов в модели П2, плотных минеральных фрагментов в модели П1 и из вещества с неопределенной структурой в модели сплошного тела.

## Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900176-3).

## Список литературы

Лебединец В. Пыль в верхней атмосфере и в космосе. Метеоры. Ленинград: Гидрометеиздат 1980, 272 с.

Babadzhanov P. & Kokhirova G. Densities and porosities of meteoroids // *Astronomy & Astrophysics*. 2009. Vol. 495. P. 353–358.

Bellot Rubio L., González M.M., Herrera L.R. et al. Modeling the photometric and dynamical behavior of Super-Schmidt meteors in the Earth's atmosphere // *Astronomy & Astrophysics*. 2002. Vol. 389. P. 680–691.

Borovička J., Macke R.J., Campbell-Brown M.D. et al. Physical and chemical properties of meteoroids. In *Meteoroids: Sources of Meteors on the Earth and Beyond*, ed. G.O. Ryabova, D.J. Asher, & M.D. Campbell-Brown // Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2019. P. 37–62.

Costa Gustavo C.C., Jacobson Nathan S., Fegley Jr Bruce. Vaporization and thermodynamics of forsterite-rich olivine and some implications for silicate atmospheres of hot rocky exoplanets // *Icarus*. 2017. Vol. 289. P. 42–55.

Efremov V., Popova O., Glazachev D., Margonis A., Oberst J., Kartashova A. Small Meteor Ablation Model: Applying to Perseid Observations // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. 2021. Vol. 51. P. 186–206.

Hornung K., Merouane S., Hilchenbach, M. et al. A first assessment of the strength of cometary particles collected in-situ by the COSIMA instrument onboard ROSETTA // *Planetary and Space Science*. 2016. Vol. 133. P. 63–75.

Kikwaya J.-B., Campbell-Brown, M. & Brown P. Bulk density of small meteoroids // *Astronomy & Astrophysics*. 2011. Vol. 530. A113 P. 1–17.

Margonis A., Christou A. & Oberst J. Observations of meteors in the Earth's atmosphere: Reducing data from dedicated double-station wide-angle cameras // *Astronomy and Astrophysics*. 2018. Vol. 618. A99. P. 1–11.

Patzold M., Andert T. P., Hahn M. et al. The Nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko–Part I: The global view–nucleus mass, mass-loss, porosity and implications // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 483. P. 2337–2346.

Popova O., Borovička J., Campbell-Brown M. Modelling the entry of meteoroids. In *Meteoroids: Sources of Meteors on the Earth and Beyond*, ed. G. O. Ryabova, D. J. Asher, & M. D. Campbell-Brown. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2019. P. 9–36.

Rietmeijer F.J. Dynamic pyrometamorphism during atmospheric entry of large (10 micron) pyrrhotite fragments from cluster IDPs // *Meteoritics & Planetary Science*. 2004. Vol. 39. P. 1869–1887.

Sekanina Z. & Chodas P.W. Comet C/2011 W3 (Lovejoy): Orbit determination, outbursts, disintegration of nucleus, dust-tail morphology, and relationship to new cluster of bright sungrazers // *The Astrophysical Journal*. 2012. Vol. 757. P. 127–160.

Subasinghe Dilini, Campbell-Brown Margaret, Stokan Edward. Luminous efficiency estimates of meteors-I. Uncertainty analysis // *Planetary and Space Science*. 2017. Vol. 143. P. 71–77.

Vida Denis, Brown Peter G., Campbell-Brown Margaret. Modelling the measurement accuracy of preatmosphere velocities of meteoroids // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. Vol. 479, No 4. P. 4307–4319.

Zolensky M., Nakamura-Messenger K., Rietmeijer F. et al. Comparing Wild 2 articles to chondrites and IDPs // *Meteoritics & Planetary Science*. 2008. Vol. 43. P. 261–272.

IAU meteor terminology, 2017:

[https://www.iau.org/static/science/scientific\\_bodies/commissions/f1/meteordefinitions\\_approved.pdf](https://www.iau.org/static/science/scientific_bodies/commissions/f1/meteordefinitions_approved.pdf).

## DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF SMALL METEORAL BODIES: COMPARISON OF POROUS AND SOLID BODY MODELS

V. V. Efremov<sup>1\*</sup>, O. P. Popova<sup>1</sup>, D. O. Glazachev<sup>1</sup>, A. P. Kartashova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*E-mail: efremov.vv@phystech.edu

The presented work proposes an ablation model describing the interaction of small meteoroids with the Earth's atmosphere, in which the meteoroid body is considered in two modifications: a solid and a porous body. An analysis is given of the obtained parameters for meteors with magnitudes from  $-2^m$  to  $+2^m$  obtained from optical observations.

**Keywords:** meteors, meteoroids, ablation model, Perseid shower.