

Научная статья

УДК 523.682

doi: 10.17223/19988621/81/10

Абляция мелких метеорных тел: сравнение модели сплошного и пористого тела

Владимир Владимирович Ефремов¹, Ольга Петровна Попова²,
Дмитрий Олегович Глазачев³, Анастасиос Маргонис⁴,
Юрген Оберст⁵, Анна Петровна Карташова⁶

^{1,2,3} *Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского
Российской академии наук, Москва, Россия*

^{4,5} *Берлинский технический университет, Берлин, Германия*

⁶ *Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия*

¹ *efremov.vv@phystech.edu*

² *olga@idg.chph.ras.ru*

³ *glazachevd@gmail.com*

⁴ *anastasios.margonis@tu-berlin.de*

⁵ *juergen.oberst@tu-berlin.de*

⁶ *akartashova@inasan.ru*

Аннотация. Модель абляции для мелких метеороидов используется для оценки физических параметров метеоров в разных предположениях. Метеороид рассматривается в двух модификациях: сплошное и пористое тело. Использован автоматизированный метод оценки параметров по кривым блеска. Обсуждаются ограничения и особенности модели.

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

Благодарности: В.В. Ефремов и О.П. Попова благодарят за финансовую поддержку госзадание 1021052706222-8-1.5.4 «Разработка комплексной модели воздействия на внутренние и внешние геосферы внедряющихся космических тел и оценка последствий таких падений (FMWN-2022-0011)»; А. Маргонис и Ю. Оберст благодарят за финансовую поддержку фонд Deutsch Forschungsgemeinschaft (DFG – German Research Foundation), грант № OB 124/20-1.

Для цитирования: Ефремов В.В., Попова О.П., Глазачев Д.О., Маргонис А., Оберст Ю., Карташова А.П. Абляция мелких метеорных тел: сравнение модели сплошного и пористого тела // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 81. С. 110–122. doi: 10.17223/19988621/81/10

Original article

Ablation of small meteor bodies: comparison of solid and porous body models

Vladimir V. Efremov¹, Olga P. Popova², Dmitry O. Glazachev³,
Anastasios Margonis⁴, Jurgen Oberst⁵, Anna P. Kartashova⁶

^{1,2,3} *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

^{4,5} *Technical University Berlin, Berlin, Germany*

⁶ *Institute of Astronomy of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

¹ *efremov.vv@phystech.edu*

² *olga@idg.chph.ras.ru*

³ *glazachevd@gmail.com*

⁴ *anastasios.margonis@tu-berlin.de*

⁵ *juergen.oberst@tu-berlin.de*

⁶ *akartashova@inasan.ru*

Abstract. An ablation model is used to describe the interaction of small meteoroids with the Earth's atmosphere. In this model, the mass loss of a meteoroid is determined using the saturated vapor pressure of the assumed meteoroid substance. The meteoroid is considered in two modifications as a solid and a porous object. An automated method for estimating the parameters of meteoroids (mass, size, and density) from light curves is developed based on the model of small meteor body ablation, which has been used to estimate the parameters of the Perseid meteors with a brightness of -2^m to $+2^m$. The effect of the dependence for saturated vapor pressure and the residual on the parameters of the meteoric body is analyzed. It is shown that for the same meteor, the use of different dependences for pressure or different residuals leads to the dispersion of the meteor mass estimate of not more than 10–15% of the average value, and for the meteor size not more than 35–40%. The difference between the maximum and minimum density estimates can be up to five times. The selected dependence for the saturation vapor pressure strongly affects the shape of the light curve, the quality of its approximation, and the density estimate. The average porosity for all meteoroids is $86 \pm 5\%$, which is close to the values for IDP. The density of meteoroids is determined with a large error. The selected model better describes meteoroids with the degree of skewness of the light curve in the range of 0.4 – 0.5. The use of the porous body model has little effect on the mass estimate, while the density estimates increase by up to 2 times.

Keywords: meteors, meteoroids, ablation model, Perseids

Acknowledgments: V.V. Efremov and O.P. Popova were funded by the program “Development of an complex model of the entering cosmic objects action on the internal and external geospheres and assessment of the consequences of these impacts” (1021052706222-8-1.5.4); A. Margonis and J. Oberst were funded by the Deutsch Forschungsgemeinschaft (DFG – German Research Foundation) (project No. OB 124/20-1).

For citation: Efremov, V.V., Popova, O.P., Glazachev, D.O., Margonis, A., Oberst, J., Kartashova, A.P. (2023) Ablation of small meteor bodies: comparison of solid and porous body models. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 81. pp. 110–122. doi: 10.17223/19988621/81/10

Введение

Большинство метеорных тел не достигает поверхности Земли, поэтому их свойства приходится определять по косвенным признакам. Основной способ получения информации о свойствах метеорных тел – изучение их взаимодействия с атмосферой. Несмотря на длительную историю изучения метеорных явлений, проблема точного определения массы, плотности и свойств вещества метеороида по наблюдательным данным остается до конца не решенной [1]. Детали взаимодействия метеорных частиц с атмосферой известны плохо, поэтому их характеристики определяются с большими погрешностями.

Для оценки параметров метеорных тел (массы, плотности и т.д.) по данным наблюдений используются различные модели абляции (см. обзор [2]). Существует два основных варианта модели абляции, которые модифицируются различными авторами тем или иным способом [2]. Основное различие между этими вариантами моделей состоит в записи уравнения баланса энергии. В одном из вариантов набегающий поток расходуется только на испарение метеорного тела [3], в другом – на излучение, нагрев и испарение метеорного тела [4–6]. Все эти модели позволяют оценить параметры метеорного тела.

В работе [7] к ряду метеоров были применены две различные модели абляции, принадлежащие к разным вариантам, и результаты показали значительную разницу в оценках параметров. Оценки массы мелких метеороидов по тем или иным моделям сильно зависят от предположений используемой модели. Целью данной работы является применение модели абляции (с различными модификациями) для воссоздания наблюдаемых кривых блеска ряда метеороидов потока Персеид, что позволит оценить параметры этих метеороидов.

Используемая модель абляции

В качестве модели абляции была выбрана модель, в которой энергия набегающего потока расходуется на излучение, нагрев и испарение метеорного тела [4–6]. В рассматриваемой модели абляции потеря массы определяется через давление насыщенного пара вещества метеороида.

Выбранная модель абляции широко используется в исследованиях, касающихся притока микрометеоритов, внеземного вещества и космической пыли, а также воздействия этого материала на атмосферу [9–11]. Для оценки параметров метеороидов данная модель используется не так часто. Наиболее проработанная модель пылевого шара [12] дополняет эту модель абляции фрагментацией и предполагает, что метеороиды распадаются на фундаментальные зерна при достижении пороговой температуры. В работе [13] были оценены параметры метеороидов разных потоков на основе этой модели пылевого шара. В нашей работе фрагментация не рассматривается, модель абляции применяется к наблюдениям метеоров потока Персеид в качестве первого подхода для более детального рассмотрения ограничений модели. В период с 2010 по 2016 г. во время активности метеорного потока Персеид была проведена серия наблюдательных кампаний на юге Греции [8]. Диапазон яркостей зарегистрированных метеоров составил от -6^m до $+2^m$. Поскольку используемая модель описывает процесс абляции небольших метеорных тел, были выбраны метеоры потока Персеид слабее -2^m .

Для определения параметров метеорных тел требуется подобрать такие начальные данные, которые позволят воссоздать кривую светимости путем решения системы дифференциальных уравнений, описывающих высоту, скорость, массу и светимость в зависимости от времени.

Кроме баланса энергии модель абляции включает в себя уравнение потери массы, уравнения торможения и изменения высоты полета, соотношения для определения кривой блеска [5]. Применяемая система уравнений использует различные предположения: коэффициент теплопередачи постоянен по траектории и равен значению для сферы в свободно молекулярном режиме $c_h = 1$; эффективность высвета τ также постоянна и составляет от 1 до 5% [1]. Теплота абляции и атомная масса определяются веществом, которое выбирается при задании зависимости давления насыщенного пара.

В описываемой модели предполагается, что метеороид имеет сферическую форму. Обычно все рассматривают метеороид как сплошное тело, но известно, что частицы космической пыли (IDP) и кометная пыль имеют высокую пористость [14]. В рамках данной работы метеороид рассматривается в двух модификациях: сплошное тело и пористое тело. Пористое тело представляется как сложенное частицами шарообразной формы при квадратной или ромбической укладке (модель П1) [15]. Сами частицы представляют собой минеральное вещество плотностью $3\,000\text{ кг/м}^3$. Другая модификация пористого тела представлена шарообразными кластерами, которые состоят из частиц минерального вещества (модель П2). Такие кластеры схожи по структуре с частицами IDP, их плотность и пористость неизвестны. Сами кластеры сложены квадратной или ромбической укладкой и занимают половину объема метеороида (макропористость 50%). Микропористость самих кластеров неизвестна. В случае пористого тела испарение происходит с поверхности минеральных частиц (модель П1) или шарообразных кластеров (П2), которые составляют метеорное тело. Набегающий поток, излучение и торможение рассчитываются с учетом поперечного сечения метеороида как целого.

Поскольку в рассматриваемой модели абляции потеря массы определяется через давление насыщенного пара вещества метеороида, следует определить вещество, из которого может состоять метеороид. Одним из основных компонентов метеорного вещества являются силикаты, в том числе оливин. Присутствие оливина подтверждено в материале комет [16, 17] и в космической пыли [14, 18]. В спектрах Персеид [19] присутствуют химические элементы, входящие в состав оливина. 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, как это было показано в работе В. Ефремова и соавт. [20]. В этой публикации также отмечалось, что зависимость для давления насыщенного пара из работы [21] занимает среднее положение относительно других зависимостей в интересующем нас диапазоне температур, поэтому она была выбрана для дальнейшего использования.

Для построения автоматизированного метода оценки параметров метеорного тела необходимо сформулировать задачу минимизации функции отклонения модельного решения от наблюдаемых данных, т.е. определить невязку. Были рассмотрены четыре функции невязки [20], и проанализировано их влияние на определяемые параметры метеороидов. Невязки рассчитывались как среднеквадра-

точное 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. В случае модели сплошного тела и пористого (П2), варьировали размер и плотность, а при применении модели пористого тела П1 варьировали размер и пористость.

Оценка параметров метеорных тел

Описанная модель абляции использовалась для моделирования 11 метеоров, скорость входа в атмосферу (V), угол входа от горизонтали (γ) и абсолютная звездная величина (M_v) которых приведены в табл. 1.

Для определения параметров метеороидов использовались только кривые блеска; кривые торможения детально не регистрировались, но контролировалось отсутствие значительного торможения (потеря не больше 10% от начальной скорости). Также следует отметить, что мы не учитывали в нашей модели фрагментацию, хотя ее роль может быть заметной.

Таблица 1

Скорость, угол входа, абсолютная звездная величина для рассматриваемых метеороидов. Оценки массы по эмпирическим зависимостям (по формулам из работ [22] и [23])

Метеор	V , км/с	γ , °	M_v	Масса, 10^{-5} кг	
				По формуле [22]	По формуле [23]
20160811_184336	60.7	12.8	-1.14	60.30	11.30
20160811_221139	58.3	32.1	-1.30	86.71	8.29
20160811_200532	61.3	17.0	-0.91	47.33	7.56
20160811_202351	60.7	21.4	-0.73	42.13	5.92
20160811_190504	66.2	14.8	-0.78	30.92	5.57
20160811_205252	59.4	21.5	-0.18	27.65	4.22
20160811_190233	66.8	13.3	0.55	8.74	2.10
20160811_205351	59.4	22	-0.18	27.65	4.22
20160811_202522	60.4	19	-0.05	22.84	3.83
20160811_205505	60.5	22	0.12	19.55	3.06
20160811_205716	63.5	24	0.64	10.08	1.62

Сравнение модельных (при применении модели сплошного тела) и наблюдаемой кривых блеска для метеора 20160811_200532 приведено на рис. 1 при использовании разных невязок. Разные невязки лучше описывают разные части кривой блеска. Оценка разброса решений при применении различных функций невязок показывает, что выбор функции практически не влияет на массу (отклонение от среднего не более 15%) и на радиус (отклонение от среднего не более 20%), но влияет на плотность (минимальное и максимальное значения плотности могут различаться в два раза). Плотность определяется как отношение массы к объему. Для моделей пористого тела эти закономерности сохраняются.

Для модели сплошного тела выбранное давление насыщенных паров незначительно влияет на оценку массы (отклонение от среднего значения составляет не более 10%); более выраженный эффект наблюдается при оценке радиуса (отклонение составляет не более 35%). Различие между максимальным и минимальным

значением оценки плотности может достигать пяти раз. Зависимость давления паров существенно влияет на форму кривой блеска (рис. 2), качество ее подгонки и оценку плотности.

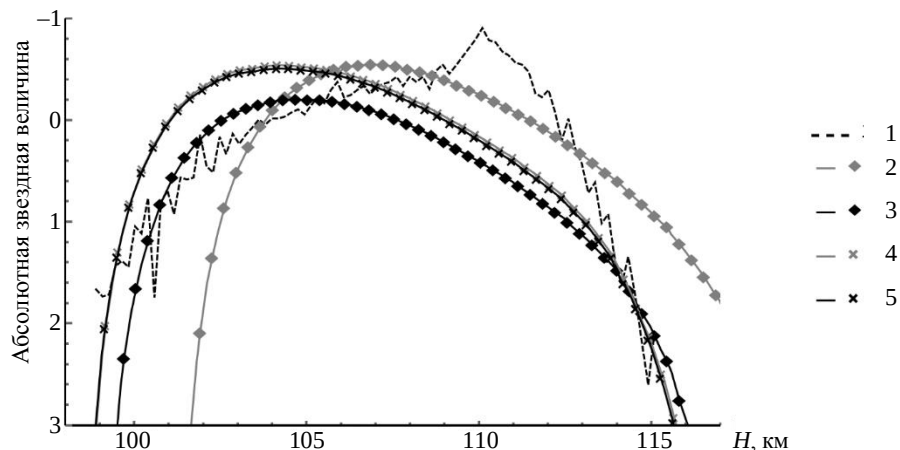


Рис. 1. Кривая блеска метеора 20160811_200532 (1) и модельные кривые (модель сплошного тела), полученные при использовании разных невязок (2–5).

Использовалось давление насыщенных паров (оливин, пары Fe/Mg) [21]

Fig. 1. (1) Light curve of meteor 20160811_200532 and (2)–(5) the model curves (a solid body model) obtained with different residuals. The saturated vapor pressure is from [21] (olivine and Fe/Mg vapors)

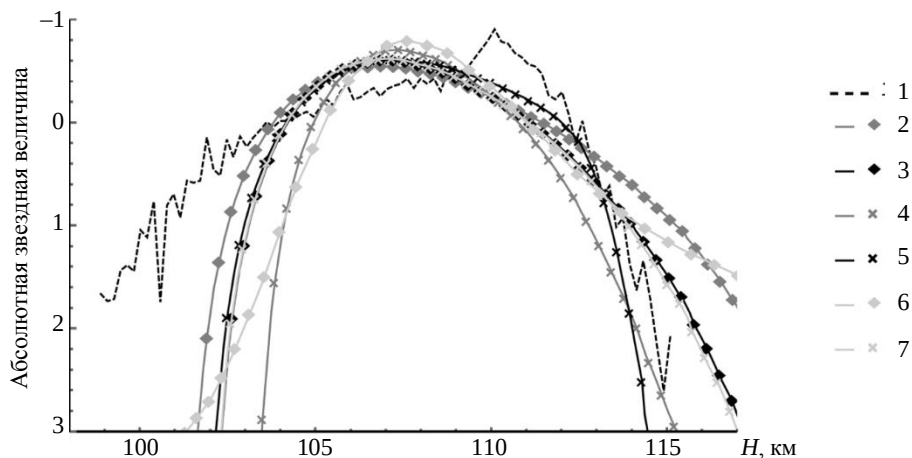


Рис. 2. Кривая блеска метеора 20160811_200532 (1) и модельные кривые (модель сплошного тела), полученные при использовании разных зависимостей для давлений насыщенных паров: 2 – оливин, пары Fe/Mg [21], 3 – оливин [21], 4 – форстерит [24], 5 – фаялит [24], 6 – кварц [25], 7 – силикаты [25]

Fig. 2. (1) Light curve of meteor 20160811_200532 and (2)–(7) the model curves (a solid body model) obtained at different dependencies for saturated vapor pressures: (2) olivine and Fe/Mg vapors [21], (3) olivine [21], (4) forsterite [24], (5) fayalite [24], (6) quartz [25], and (7) silicates [25]

Масса мелких метеороидов (примерно 1 см) часто оценивается на основе эмпирических соотношений, использующих максимальную яркость метеора, скорость и угол входа [22, 23, 26, 27]. Оценки массы, основанные на эмпирических соотношениях, приведены в табл. 1, результаты моделирования рассматриваемых метеоров приведены в табл. 2. Эти оценки демонстрируют большую неопределенность при вычислении массы – более чем на порядок, что является давней проблемой метеорных исследований. Полученные нами оценки массы наиболее близки к оценкам по соотношению из [23] (разница до 10 раз при эффективности высвета 5% и до 2 раз при эффективности высвета 1%). Оценки массы для моделей сплошного и пористого тела (при эффективности высвета 5%) практически не отличаются (отклонение не больше 20%). Для моделей пористого тела (П1 и П2) оценки массы различаются не более чем на 5%.

Таблица 2

Оценки массы для рассматриваемых метеороидов, полученные по четырем невязкам с давлением насыщенных паров из работы [21] (оливин, пары Fe/Mg), при разных эффективностях высвета τ

Метеор	Масса, 10^{-5} кг			
	Моделирование (сплошное тело), $\tau = 5\%$	Моделирование (сплошное тело), $\tau = 1\%$	Моделирование (пористое тело П1), $\tau = 5\%$	Моделирование (пористое тело П2), $\tau = 5\%$
20160811_184336	1.73 ± 0.17	8.76 ± 0.95	1.94 ± 0.24	1.83 ± 0.28
20160811_221139	1.14 ± 0.13	5.40 ± 0.62	0.99 ± 0.34	0.98 ± 0.30
20160811_200532	0.97 ± 0.12	4.82 ± 0.67	1.06 ± 0.11	1.09 ± 0.09
20160811_202351	0.99 ± 0.08	4.93 ± 0.51	1.17 ± 0.06	1.19 ± 0.05
20160811_190504	0.93 ± 0.10	4.72 ± 0.57	1.14 ± 0.08	1.16 ± 0.07
20160811_205252	0.51 ± 0.03	2.56 ± 0.17	0.62 ± 0.02	0.60 ± 0.04
20160811_190233	0.19 ± 0.03	0.97 ± 0.16	0.24 ± 0.03	0.24 ± 0.04
20160811_205351	0.46 ± 0.04	2.31 ± 0.25	0.53 ± 0.06	0.56 ± 0.04
20160811_202522	0.42 ± 0.03	2.10 ± 0.15	0.49 ± 0.02	0.50 ± 0.03
20160811_205505	0.39 ± 0.02	1.78 ± 0.39	0.44 ± 0.01	0.40 ± 0.07
20160811_205716	0.15 ± 0.05	0.80 ± 0.09	0.19 ± 0.02	0.20 ± 0.02

Все рассмотренные метеороиды являются метеорами потока Персеид, их скорости близки друг к другу. Оценка массы по модели абляции согласуется с известной корреляцией между яркостью метеора и массой метеороида: чем меньше максимальная яркость, тем меньше полученная масса метеороида.

Использование модели пористого тела мало влияет на оценку массы, оценки плотности увеличиваются (до 2 раз), заметно отличаются формы модельных кривых блеска (рис. 3).

Как уже упоминалось выше, фрагментация не включена в нашу модель, хотя может влиять на кривую блеска и оценки параметров метеороидов. Для грубой оценки влияния фрагментации на кривую блеска ранее был предложен F -параметр [28], параметр симметрии кривой блеска, который определяется как отношение односторонней ширины кривой блеска на 1^m ниже пика к общей ширине на этом уровне. Считается, что метеороид не испытывает фрагментации (ведет себя как единое тело) при значениях $F > 0.5$ – 0.7 .

Сопоставление результатов с параметром F для рассматриваемых метеоров показывает, что выбранная модель лучше описывает метеороиды, для которых

F превышает величину $\sim 0.4\text{--}0.5$. Для метеороидов с высоким значением F влияние фрагментации минимально, оценка параметров метеороида слабо зависит от выбранной функции невязки. Для метеоров с меньшими значениями F , по-видимому, требуется учитывать фрагментацию.

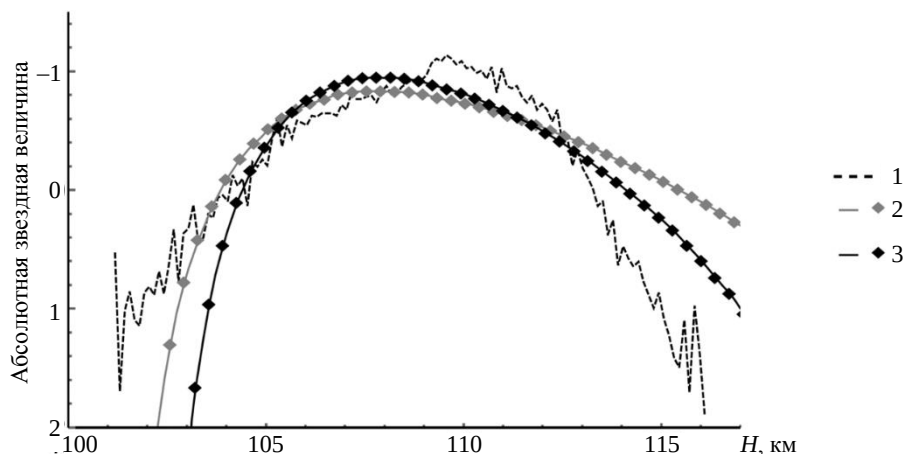


Рис. 3. Кривая блеска метеора 20160811_184336 (1) и модельные кривые, полученные в рамках модели пористого (PI1) (2) и сплошного тела (3). Использовалось давление насыщенных паров – оливин, пары Fe/Mg [21]

Fig. 3. (1) Light curve of meteor 20160811_184336 and the model curves obtained within the framework of (2) porous (PI1) and (3) solid models. The saturated vapor pressure is from [21] (olivine and Fe/Mg vapors)

Плотность 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) составляет 362 ± 237 кг/м³, для отдельных метеоров разброс средних плотностей составляет от 114 ± 99 до 640 ± 500 кг/м³. В рамках модели пористого тела (PI1) средняя плотность метеороидов составляет 429 ± 153 кг/м³, для отдельных метеоров разброс средних плотностей составляет от 153 ± 81 до 644 ± 50 кг/м³. В рамках модели пористого тела (PI2) средняя плотность метеороидов составляет 473 ± 156 кг/м³, для отдельных метеоров разброс средних плотностей составляет от 208 ± 75 до 770 ± 231 кг/м³.

Оценка плотности в случае моделей пористого тела оказывается выше, чем для модели сплошного тела. Оценки плотности метеороидов для моделей PI1 и PI2 практически не отличаются.

Метеороиды оказались высокопористыми телами. Средняя пористость по всем метеороидам в модели PI1 составила $86 \pm 5\%$, в модели PI2 значение полной пористости также составляет около 85%. Полученные пористости характерны для IDP [14].

В ряде работ были получены оценки плотности метеоров Персеид на основе наблюдательных данных. В работе [29] проанализировано 413 фотографических метеоров с яркостью от -5^m до $+2.5^m$ в рамках двух моделей: единого тела и тела,

которое испытывает фрагментацию. Плотности, найденные в рамках модели одного тела, всегда ниже, чем в модели с фрагментацией. Для пяти метеоров Персеид плотность была оценена в $600 \pm 100 \text{ кг/м}^3$ [29]. П.Б. Бабаджанов и Г.И. Кохилова оценили плотность для 44 Персеид (более ярких, чем наша выборка), в рамках модели, которая учитывает фрагментацию, и получили плотность $1\,300 \pm 200 \text{ кг/м}^3$ [30]. J.-B. Kikwaya и соавт. [13] оценили плотность в рамках модели теплового разрушения (фрагментации) для 107 Персеид как 420–820 кг/м^3 .

Наши оценки плотности 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 Чурюмова–Герасименко, составила от 100 до 400 кг/м^3 [31]. Средняя плотность кометы Чурюмова–Герасименко, полученная миссией Rosetta, – 537 кг/м^3 [16].

Заключение

Применение автоматизированного метода оценки параметров метеороидов (массы, размера и плотности) по кривым блеска на основе модели абляции с разными предположениями для оценки параметров метеоров потока Персеид яркостью от -2 до $+2$ звездной величины показало, что для одного и того же метеора применение разных зависимостей для давления или различных невязок приводит к разбросу значений массы метеора не более 10–15% от среднего значения, а размера – не более 35–40%. Различие между максимальным и минимальным значениями оценки плотности может достигать пяти раз. Выбор зависимости для давления насыщенного пара сильно влияет на форму кривой блеска, качество ее приближения и оценку плотности.

В данной исследовании была разработана и применена модель пористого тела. Средняя пористость по всем метеороидам (в модели П1) составила $86 \pm 5\%$, что близко к значениям для IDP. Плотность метеороидов определяется с большой погрешностью. Выбранная модель лучше описывает метеороиды, для которых $F \geq 0.4$ –0.5.

Список источников

1. Subasinghe D., Campbell-Brown M., Stokan E. Luminous efficiency estimates of meteors-I. Uncertainty analysis // *Planetary and Space Science*. 2017. V. 143. P. 71–77. doi: 10.1016/j.pss.2016.12.009
2. Popova O., Borovicka J., Campbell-Brown M. Modelling the entry of meteoroids // *Meteoroids: Sources of Meteors on the Earth and Beyond* / ed. G.O. Ryabova, D.J. Asher, M.D. Campbell-Brown. Cambridge : Cambridge University Press, 2019. P. 9–36. doi: 10.1080/00107514.2020.1736170.
3. Bronshten V.A. Physics of meteoric phenomena. Dordrecht : Reidel Publishing Co, 1983. 356 p.
4. Лебединец В. Пыль в верхней атмосфере и в космосе. Метеоры. Л. : Гидрометеониздат, 1980. 248 с.
5. Lebedinec V.N., Šušková V.B. Evaporation and deceleration of small meteoroids // *Symposium-International Astronomical Union*. 1968. V. 33. P. 193–204.
6. Jones J., Kaiser T.R. The effects of thermal radiation, conduction and meteoroid heat capacity on meteoric ablation // *Mon. Not. R. Astron. Soc*. 1966. V. 133. P. 411–420.

7. Ефремов В.В., Попова О.П., Глазачев Д.О., Карташова А.П. Определение параметров мелких метеорных тел по наблюдательным данным // Динамические процессы в геосферах : сб. науч. тр. ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2018. Вып. 10. С. 150–157. doi: 10.26006/IDG.2018.10.20190
8. 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. V. 618 (99). P. 1–11. doi: 10.1051/0004-6361/201832927
9. Plane J.M.C. Cosmic dust in the earth's atmosphere // Chemical Society Reviews. 2012. V. 41 (19). P. 6507–6518. doi: 10.1039/C2CS35132C
10. Carrillo-Sanchez J., Nesvorný D., Pokorný P., Janches D., Plane J., Sources of cosmic dust in the Earth's atmosphere // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. P. 11–19. doi: 10.1002/2016GL071697
11. Genge M.J., Larse J., Van Ginneken M., Suttle M.D. An urban collection of modern-day large micrometeorites: Evidence for variations in the extraterrestrial dust flux through the Quaternary // Geology. 2017. V. 45. P. 119–122. doi: 10.1130/G38352.1
12. Campbell-Brown M., Koschny D. Model of the ablation of faint meteors // Astronomy & Astrophysics. 2004. V. 418. P. 751–758. doi: 10.1051/0004-6361:20041001-1
13. Kikwaya J.-B., Campbell-Brown M., Brown P. Bulk density of small meteoroids // Astronomy & Astrophysics. 2011. V. 530 (113). P. 1–17. doi: 10.1051/0004-6361/201116431
14. Borovicka J., Macke R.J., Campbell-Brown M.D. Physical and chemical properties of meteoroids // Meteoroids: : Sources of Meteors on the Earth and Beyond / ed. G.O. Ryabova, D.J. Asher, M.D. Campbell-Brown. Cambridge : Cambridge University Press, 2019. P. 37–62. doi: 10.1080/00107514.2020.1736170
15. Лейбензон Л.С. Собрание трудов. М. : Изд-во АН СССР, 1953. Т. 2: Подземная газогидродинамика. 544 с.
16. Zolensky M., Nakamura-Messenger K., Rietmeijer F. Comparing Wild 2 particles to chondrites and IDPs // Meteoritics & Planetary Science. 2008. V. 43 P. 261–272. doi: 10.1111/j.1945-5100.2008.tb00621.x
17. Patzold M., Ander T.P., Hahn M. 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. V. 483. P. 2337–2346. doi: 10.1093/mnras/sty3171
18. Rietmeijer F.J. Dynamic pyrometamorphism during atmospheric entry of large (10 micron) pyrrhotite fragments from cluster IDPs // Meteoritics & Planetary Science. 2004. V. 39. P. 1869–1887. doi: org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00082.x
19. Matlovič P., Tóth J., Kornoš L., Loehle S. On the sodium enhancement in spectra of slow meteors and the origin of Na-rich meteoroids // Icarus. 2020. V. 347. Art. 113817. doi: 10.1016/j.icarus.2020.113817
20. 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. V. 51. P. 186–206. doi: 10.31577/caosp.2021.51.3.186
21. Costa G.C.C., Jacobson N.S., Fegley Jr B. Vaporization and thermodynamics of forsterite-rich olivine and some implications for silicate atmospheres of hot rocky exoplanets // Icarus. 2017. V. 289. P. 42–55. doi: j.icarus.2017.02.006
22. Jenniskens P. Meteor showers and their parent comets. Cambridge : Cambridge University Press, 2006. 790 p. doi: 10.1017/CBO9781316257104
23. Vida D., Brown P.G., Campbell-Brown M. Modelling the measurement accuracy of pre-atmosphere velocities of meteoroids // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. V. 479 (4). P. 4307–4319. doi: 10.1093/mnras/sty1841
24. 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. V. 757. P. 127–160. doi: 10.1088/0004-637X/757/2/127

25. Kimura H., Ishimoto H., Mukai T. A study on solar dust ring formation based on fractal dust models // *Astronomy and Astrophysics*. 1997. V. 326. P. 263–270.
26. Jacchia L., Verniani F., Briggs R.E. An analysis of the atmospheric trajectories of 413 precisely reduced photographic meteors // *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. 1967. V. 10. P. 1–139.
27. Verniani F. On the luminous efficiency of meteors // *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. 1965. V. 8 (5). P. 141–171.
28. Fleming D., Hawkes R., Jones J. Light curves of faint television meteors // *Meteoroids and their Parent Bodies* / ed. J. Stohl, I. Williams. Bratislava : Astronomical Institute SAS, 1993. P. 261–264.
29. Bellot Rubio L., González M.M., Herrero L.R. Modeling the photometric and dynamical behavior of Super-Schmidt meteors in the Earth's atmosphere // *Astronomy & Astrophysics*. 2002. V. 389. P. 680–691. doi: 10.1051/0004-6361:20020672
30. Babadzhanov P., Kokhirova G. Densities and porosities of meteoroids // *Astronomy & Astrophysics*. 2009. V. 495. P. 353–358. doi: 10.1051/0004-6361:200810460
31. Hornung K., Merouane S., Hilchenbach M. A first assessment of the strength of cometary particles collected in-situ by the COSIMA instrument onboard ROSETTA // *Planetary and Space Science*. 2016. V. 133. P. 63–75. doi: 10.1016/j.pss.2016.07.003

References

1. Subasinghe D., Campbell-Brown M., Stokan E. (2017) Luminous efficiency estimates of meteors-I. Uncertainty analysis. *Planetary and Space Science*. 143. pp. 71–77. doi: 10.1016/j.pss.2016.12.009
2. Popova O., Borovicka J., Campbell-Brown M. (2019) Modelling the Entry of Meteoroids. In: *Meteoroids: Sources of Meteors on the Earth and Beyond*. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 9–36. doi: 10.1080/00107514.2020.1736170
3. Bronshten V.A. (1983) *Physics of Meteoric Phenomena*. Dordrecht: Reidel Publishing Company.
4. Lebedinets V.N. (1980) *Pyl' v verkhney atmosfere i kosmicheskoy prostranstve. Meteory* [Dust in the upper atmosphere and in space. Meteors]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
5. Lebedinec V.N., Šušková V.B. (1968) Evaporation and deceleration of small meteoroids. In *Symposium-International Astronomical Union*. 33. pp. 193–204.
6. Jones J., Kaiser T.R. (1966) The effects of thermal radiation, conduction and meteoroid heat capacity on meteoric ablation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 133(4). pp. 411–420. doi: 10.1093/mnras/133.4.411
7. Efremov V.V., Popova O.P., Glazachev D.O., Kartashova A.P. (2018) Determination of the meteor particles properties from observational. *Dynamic Processes in Geospheres. Collection of Scientific Papers of the IDG RAS, Moscow, GEOS*. 10. pp. 150–157. doi: 10.26006/IDG.2018.10.20190
8. Margonis A., Christou A., Oberst J. (2018) Observations of meteors in the Earth's atmosphere: Reducing data from dedicated double-station wide-angle cameras. *Astronomy and Astrophysics*. 618(99). pp. 1–11. doi: 10.1051/0004-6361/201832927
9. Plane J.M.C. (2012) Cosmic dust in the Earth's atmosphere. *Chemical Society Reviews*. 41(19). pp. 6507–6518. doi: 10.1039/C2CS35132C
10. Carrillo-Sanchez J., Nesvorný D., Pokorný P., Janches D., Plane J. (2016) Sources of cosmic dust in the Earth's atmosphere. *Geophysical Research Letters*. 43. pp. 11–19. doi: 10.1002/2016GL071697
11. Genge M.J., Larsen J., Van Ginneken M., Suttle M.D. (2017) An urban collection of modern-day large micrometeorites: Evidence for variations in the extraterrestrial dust flux through the Quaternary. *Geology*. 45. pp. 119–122. doi: 10.1130/G38352.1
12. Campbell-Brown M., Koschny D. (2004) Model of the ablation of faint meteors. *Astronomy & Astrophysics*. 418. pp. 751–758. doi: 10.1051/0004-6361:20041001-1

13. Kikwaya J.-B., Campbell-Brown M., Brown P. (2011) Bulk density of small meteoroids. *Astronomy & Astrophysics*. 530(113). pp. 1–17. doi: 10.1051/0004-6361/201116431
14. Borovicka J., Macke R.J., Campbell-Brown M.D. (2019) Physical and chemical properties of meteoroids. In: *Meteoroids: Sources of Meteors on the Earth and Beyond*. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 37–62. doi: 10.1080/00107514.2020.1736170
15. Leybenzon L.S. (1953) *Sobranie trudov. Tom 2. Podzemnaya gidrogazodinamika* [Collected papers. Volume 2. Underground gas- and hydrodynamics]. Moscow: Izdatel'stvo ANSSR.
16. Zolensky M., Nakamura-Messenger K., Rietmeijer F. (2008) Comparing Wild 2 particles to chondrites and IDPs. *Meteoritics & Planetary Science*. 43 pp. 261–272. doi: 10.1111/j.1945-5100.2008.tb00621.x
17. Patzold M., Andert T.P., Hahn M. (2019) 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*. 483. pp. 2337–2346. doi: 10.1093/mnras/sty3171
18. Rietmeijer F.J. (2004) Dynamic pyrometamorphism during atmospheric entry of large (10 micron) pyrrhotite fragments from cluster IDPs. *Meteoritics & Planetary Science*. 39. pp. 1869–1887. doi: 10.1111/j.1945-5100.2004.tb00082.x
19. Matlovič P., Tóth J., Kornoš L., Loehle S. (2020) On the sodium enhancement in spectra of slow meteors and the origin of Na-rich meteoroids. *Icarus*. 347. Article 113817. pp. 1–17. doi: 10.1016/j.icarus.2020.113817
20. Efremov V., Popova O., Glazachev D., Margonis A., Oberst J., Kartashova A. (2021) Small meteor ablation model: applying to Perseid observations. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. 51. pp. 186–206. doi: 10.31577/caosp.2021.51.3.186
21. Costa G.C.C., Jacobson N.S., Fegley Jr.B. (2017) Vaporization and thermodynamics of forsterite-rich olivine and some implications for silicate atmospheres of hot rocky exoplanets. *Icarus*. 289. pp. 42–55. doi: 10.1016/j.icarus.2017.02.006
22. Jenniskens P. (2006) *Meteor Showers and Their Parent Comets*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781316257104
23. Vida D., Brown P.G., Campbell-Brown M. (2018) Modelling the measurement accuracy of preatmosphere velocities of meteoroids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 479(4). pp. 4307–4319. doi: 10.1093/mnras/sty1841
24. Sekanina Z., Chodas P.W. (2012) 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*. 757. pp. 127–160. doi: 10.1088/0004-637X/757/2/127
25. Kimura H., Ishimoto H., Mukai T. (1997) A study on solar dust ring formation based on fractal dust models. *Astronomy and Astrophysics*. 326(1). pp. 263–270.
26. Jacchia L., Verniani F., Briggs R.E. (1967) An analysis of the atmospheric trajectories of 413 precisely reduced photographic meteors. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. 10(1). pp. 1–139. doi: 10.5479/si.00810231.10-1.1
27. Verniani F. (1965) On the luminous efficiency of meteors. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. 8(5). pp. 141–171. doi: 10.5479/si.00810231.8-5.141
28. Fleming D., Hawkes R., Jones J. (1993) Light Curves of Faint Television Meteors. In: *Meteoroids and their Parent Bodies*. Bratislava: Astronomical Institute SAS. pp. 261–264.
29. Bellot Rubio L.R., Martínez González M.J., Ruiz Herrera L., Licandro J., Martínez-Delgado D., Rodríguez-Gil P., Serra-Ricart M. (2002) Modeling the photometric and dynamical behavior of Super-Schmidt meteors in the Earth's atmosphere. *Astronomy & Astrophysics*. 389. pp. 680–691. doi: 10.1051/0004-6361:20020672
30. Babadzhanyan P., Kokhirova G. (2009) Densities and porosities of meteoroids. *Astronomy & Astrophysics*. 495. pp. 353–358. doi: 10.1051/0004-6361:200810460
31. Hornung K., Merouane S., Hilchenbach M. (2016) A first assessment of the strength of cometary particles collected in-situ by the COSIMA instrument onboard ROSETTA. *Planetary and Space Science*. 133. pp. 63–75. doi: 10.1016/j.pss.2016.07.003

Сведения об авторах:

Ефремов Владимир Владимирович – младший научный сотрудник Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия. E-mail: efremov.vv@phystech.edu

Попова Ольга Петровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия. E-mail: olga@idg.chph.ras.ru

Глазачев Дмитрий Олегович – научный сотрудник Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия. E-mail: glazachevd@gmail.com

Маргонис Анастасиос – Кандидат наук, Берлинский технический университет, Институт геодезии и геоинформатики, Берлин, Германия. E-mail: anastasios.margonis@tu-berlin.de

Оберст Юрген – Профессор, Берлинский технический университет, Институт геодезии и геоинформатики, Берлин, Германия. E-mail: juergen.oberst@tu-berlin.de

Карташова Анна Петровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института астрономии Российской академии наук, Москва, Россия. E-mail: akartashova@inasan.ru

Information about the authors:

Efremov Vladimir V. (Junior Researcher, Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation). E-mail: efremov.vv@phystech.edu

Popova Olga P. (Candidate of Physics and Mathematics, Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation). E-mail: olga@idg.chph.ras.ru

Glazachev Dmitry O. (Researcher, Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation). E-mail: glazachevd@gmail.com

Margonis Anastasios (Doctor of Engineering, Technical University Berlin, Institute of Geodesy and Geoinformation Science, Berlin, Germany. E-mail: anastasios.margonis@tu-berlin.de

Oberst Jurgen (Professor., Doctor of Natural Sciences, Chair of Planetary Geodesy, Technical University Berlin, Institute of Geodesy and Geoinformation Science, Berlin, Germany). E-mail: juergen.oberst@tu-berlin.de

Kartashova Anna P. (Candidate of Physics and Mathematics, Institute of Astronomy of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation). E-mail: akartashova@inasan.ru

Статья поступила в редакцию 14.06.2022; принята к публикации 03.02.2023

The article was submitted 14.06.2022; accepted for publication 03.02.2023