

Введение

Метеорные тела, наряду с астероидами и кометами, несут важную информацию о нашей Солнечной системе. Большинство метеорных тел не достигают поверхности Земли, поэтому их свойства приходится определять по косвенным признакам. Основной способ получения информации о свойствах метеорных тел - изучение их взаимодействия с атмосферой.

Метеоры являются источником различных металлов и кремния в верхних слоях атмосферы, которые образуют слои нейтральных атомов металлов (Na, Fe, Ca и т.д.) на высотах 80-105 км, влияют на образование спорадических E-слоев на высотах 90-140 км [1], участвуют в возникновении серебристых облаков и полярных стратосферных эхо [2].

Несмотря на длительную историю изучения метеорных явлений, проблема точного определения массы, плотности и свойств вещества метеороида по наблюдательным данным остается до конца нерешенной [3]. Детали взаимодействия метеорных частиц с атмосферой известны плохо, поэтому их характеристики определяются с большими погрешностями.

Модель абляции

В данной работе для оценки параметров метеорных тел (массы, плотности и др.) по наблюдательным данным используется модель абляции, где набегающий поток расходуется на излучение, нагрев и испарение метеорного тела [4, 5]. 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.

Рассматриваемое уравнение баланса энергии выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{2}c_h \rho_a V^3 = 4\epsilon\sigma(T^4 - T_0^4) - \frac{L}{\pi R^2} \frac{dM}{dt} + \frac{4}{3}R\rho_c \frac{dT}{dt},$$

где M , V - масса и скорость тела; t - время; ρ_a - плотность атмосферы на высоте полета; g - ускорение свободного падения; L - теплота абляции; c_h - коэффициент теплопередачи; T - температура тела; p_v - давление насыщенного пара; ρ - плотность тела; R - радиус тела; ϵ - излучательная способность; c - теплоемкость.

Применяемая система уравнений использует различные предположения: коэффициент теплопередачи постоянен по траектории и равен значению для сферы в свободном молекулярном режиме $c_h=1$; эффективность высвета (τ) также постоянна и составляет от 1 до 5% [3]. Теплота абляции и атомная масса определяются веществом, которое выбирается при задании зависимости давления насыщенного пара. Метеороид имеет сферическую форму.

Для построения автоматизированного метода оценки параметров метеорного тела, необходимо сформулировать задачу минимизации функции отклонения модельного решения от наблюдаемых данных, то есть определить невязку. Первой рассматриваемой невязкой стала функция среднеквадратичного отклонения.

$$\Delta_{AI} = \sqrt{\frac{\sum^n (I_n - I_p)^2}{n}},$$

где I_n - наблюдаемая интенсивность, I_p - расчетная интенсивность. Расчет невязки происходит только на высотах, где есть наблюдательные данные. Однако, в связи с тем, что интенсивность меняется на порядки, то было решено рассчитывать среднеквадратичное отклонение относительной невязки.

$$\Delta_{RI} = \sqrt{\frac{\sum^n ((I_n - I_p)/I_n)^2}{n}},$$

Так же невязка рассчитывалась по абсолютной звездной величине.

$$\Delta_{AM} = \sqrt{\frac{\sum^n (M_n - M_p)^2}{n}},$$

$$\Delta_{RM} = \sqrt{\frac{\sum^n ((M_n - M_p)/M_p)^2}{n}},$$

где M_n - наблюдаемая абсолютная звездная величина, M_p - расчетная абсолютная звездная величина.

Неопределенность параметров в модели

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. Поэтому в данной работе использовалась зависимость для оливина. Следует отметить, что разные авторы предлагают заметно различающиеся зависимости для одного и того же вещества, что влияет на определение параметров метеороидов [5]. Разбор для зависимости давления насыщенного пара от температуры у разных авторов превышает разброс между зависимостями для форстерита и фаялита (двумя предельными состояниями изоморфного ряда оливина).

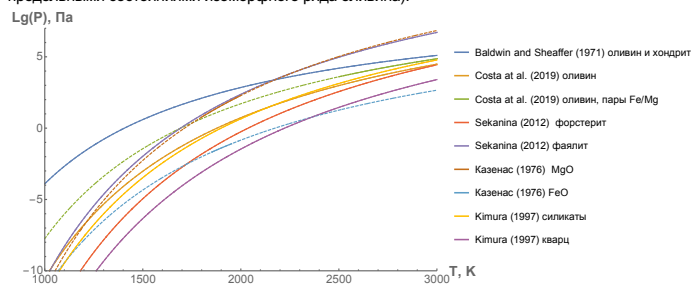


Рис. 1 Зависимость давления насыщенного пара от температуры для оливинов, силикатов, оксида железа и магнезия. Цвета кривых соответствуют цветам в легенде, где указаны вещество и ссылка на работу, из которой была взята зависимость. Штриховая линия показывает области, где зависимость для давления экстраполирована.

Заключение

Был разработан автоматизированный метод оценки параметров метеороидов (массы, размера и плотности) по кривым блеска на основе модели абляции мелких метеорных тел, который был применен для оценки параметров 11 метеороидов потока Персеиды яркостью от +2 до -2 абсолютной звездной величины. Проанализировано влияние неопределенности зависимости давления насыщенного пара (для одного и того же вещества) и используемой функции невязки на параметры метеорного тела. Показано, что для одного и того же метеороида применение разных зависимостей для давления или различных невязок приводит к разбросу значения массы метеороида не более 10-15% от среднего значения, а размера не более 35-40%. Различие между максимальным и минимальным значением оценки плотности может достигать пяти раз. Выбор зависимости для давления насыщенного пара сильно влияет на форму кривой блеска, качество ее приближения и оценку плотности. Плотность метеороидов определяется с большой погрешностью.

Результаты определения параметров метеороидного тела

Описанная модель абляции использовалась для моделирования 11 метеороидов, скорость, угол входа и абсолютная звездная величина которых приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Скорость, угол входа, абсолютная звездная величина и F фактор для рассматриваемых метеороидов. Оценки массы по эмпирическим зависимостям в сравнении со средней массой, полученной по четырем невязкам с давлением насыщенных паров из работы Costa et al. (2019) (оливин, пары Fe/Mg).

Метеор	V, км/с	γ, °	M _p	Масса, 10 ⁵ кг					
				Jacchia et al. (1967)	Verniani (1965)	Jenniskens (2006)	Vida et al. (2018)	Модель-не τ=5%	Модель-не τ=1%
20160811_184336	60.7	12.8	-1.14	5.28	21.40	60.30	4.18	1.73±0.17	8.76±0.95
20160811_221139	58.3	32.1	-1.30	7.98	30.77	86.71	6.06	1.14±0.13	5.40±0.62
20160811_200532	61.3	17.0	-0.91	4.08	16.79	47.33	3.42	0.97±0.12	4.82±0.67
20160811_202351	60.7	21.4	-0.73	3.59	14.95	42.13	3.15	0.99±0.08	4.93±0.51
20160811_190504	66.2	14.8	-0.78	2.63	10.97	30.92	2.28	0.93±0.10	4.72±0.57
20160811_205252	59.4	21.5	-0.18	2.24	9.81	27.65	2.26	0.51±0.03	2.56±0.17
20160811_190233	66.8	13.3	0.55	0.66	3.10	8.74	0.80	0.19±0.03	0.97±0.16
20160811_205351	59.4	22	-0.18	4.18	14.37	27.65	2.26	0.46±0.04	2.31±0.25
20160811_202522	60.4	19	-0.05	3.67	12.43	22.84	1.90	0.42±0.03	2.10±0.15
20160811_205505	60.5	22	0.12	2.81	10.02	19.55	1.68	0.39±0.02	1.78±0.39
20160811_205716	63.5	24	0.64	1.30	4.97	10.08	0.95	0.15±0.05	0.80±0.09

Сравнение наблюдаемой и модельных кривых блеска для метеороида 20160811_184336 приведено на Рис.2 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 (разница в два раза).

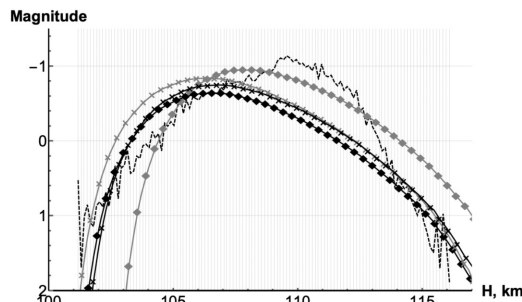


Рис. 2. Кривая блеска метеороида 20160811_184336 (пунктир, кривая 1) и модельные кривые, полученные при использовании разных невязок: (2) - невязка ΔAI, (3) невязка ΔRI, (4) - невязка ΔAM, (5) - невязка ΔRM. Использовались давление насыщенных паров Costa et al. (2019) (оливин, пары Fe/Mg).

Выбор давления 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%). Разброс плотности может превышать пять раз. Зависимость давления паров существенно влияет на форму кривой блеска (рис. 3), качество ее подгонки и оценку плотности.

Масса метеороида часто определяется на основе эмпирических соотношений, использующих максимальную яркость метеороида, скорость и угол входа (Jacchia et al. (1967); Verniani (1965); Jenniskens (2006); Vida et al. (2018)). Оценки массы, основанные на этих соотношениях, приведены в таблице 1 вместе с результатами моделирования рассматриваемых метеороидов. Эти оценки демонстрируют большую неопределенность в определении массы более чем на порядок, что является давней проблемой метеорных исследований. Полученные нами оценки массы наиболее близки к соотношению из [6] (разница до 10 раз для эффективности высвета 5% и до 2 раз при 1%). При изменении эффективности высвета с 5 до 1% масса растет в 5.4 раза, плотность падает в 2.1 раза, размер увеличивается в 2.2 раза.

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

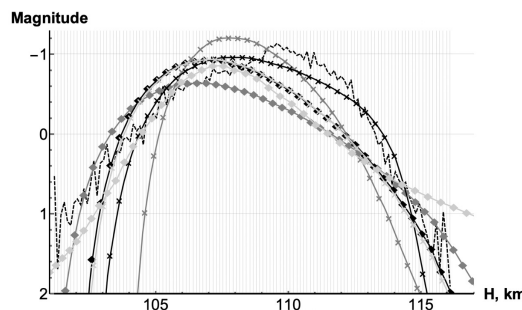


Рис. 3 Кривая светимости метеороида 20160811_184336 (пунктир, кривая 1) и модельные кривые, полученные по невязке ΔRI, и при использовании разных зависимостей для давлений насыщенных паров: (2) - Costa et al. (2019) (оливин, пары Fe/Mg), (3) - Costa et al. (2019) (оливин), (4) - Sekanina and Chodas (2012) (форстерит), (5) - Sekanina and Chodas (2012) (фаялит), (6) - Kimura (1997) (кварц), (7) - Kimura (1997) (силикаты).

Литература

- [1] Plane J. Chemical Society Reviews. 2012. Vol. 41, No 19. P. 6507-6518.
- [2] Kalashnikova O. et al., Geophysical research letters. 2000. Vol. 27, No 20. P. 3293-3296.
- [3] Subasinghe D. et al. Planetary and Space Science. 2017. Vol. 143. P. 71-77.
- [4] Lebedintsev V.N. Dust in the upper atmosphere and in space. Meteors. Leningrad Gidrometeoizdat, 1980. P. 272.
- [5] Efremov V., et al. Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. 2021. Vol. 51, N. 3, pp. 186 - 206.
- [6] Vida D., et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. Vol. 479, No 4. — P. 4307-4319.
- [7] Armitage T, Campbell-Brown M. Planetary and Space Science. 2020. Vol. 186. P. 104915.
- [8] Fleming D.E.B., et al. Meteoroids and their Parent Bodies / ed. by J. Stohr, I.P. Williams. 1993. pp. 261-264.
- [9] Costa G., et al. Icarus. 2017. Vol. 289. P. 42-55.
- [10] Jacchia L., et al. Smithsonian Contributions to Astrophysics. 1967. Vol. 10. P. 1-139.
- [11] Verniani F. Smithsonian Contributions to Astrophysics. 1965. Vol. 8, No 5. P. 141-171.
- [12] Jenniskens P. Meteor showers and their parent comets. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. P. 790.