

УДК 523.681.8

МОДЕЛЬ ФРАГМЕНТАЦИИ ДЛЯ УДАРНЫХ КЛАСТЕРОВ НА МАРСЕ© 2022 г. Е. Д. Подобная^{1*}, О. П. Попова¹, Д. О. Глазачев¹¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: epodobnaya@gmail.com

За последние годы на Марсе обнаружено более 1200 недавно образованных датированных мест падения метеороидов в виде одиночных кратеров и кратерных полей. Благодаря разреженной атмосфере Марса (по сравнению с Землей) падающие метеороиды разрушаются меньше, тем не менее, около половины из них фрагментируют в марсианской атмосфере и образуют кратерные поля рассеяния (кластеры). Изучение кластеров кратеров на Марсе позволяет изучить детали фрагментации, которые невозможно обнаружить в земных условиях. В работе рассматриваются первые результаты математического моделирования взаимодействия метеороида с атмосферами Марса и Земли. Сравнение результатов моделирования фрагментации показало, что размер поля рассеяния на Земле во много раз больше, чем на Марсе. В атмосфере Земли фрагменты долетают до поверхности без образования кратеров и имеет место атмосферная сортировка фрагментов. Показано, что конечное расположение небольших фрагментов метеоритов существенно зависит от выбранного выражения для коэффициента сопротивления. Кратерные поля на Марсе в большей степени определяются фрагментацией и разлетом фрагментов, эффект атмосферной сортировки выражен слабо. Результаты, полученные для Марсианской атмосферы, дают основания предполагать, что серийное применение разработанной модели фрагментации позволит описать кластеры и предложить лучшие методы для оценки направления полета и свойств ударника.

Ключевые слова: кратеры, метеороиды, фрагментация, численное моделирование, коэффициент сопротивления.

Для цитирования: Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О. Модель фрагментации для ударных кластеров на Марсе // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14, № 2. С. 106–114.
http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_106

1. Введение

Ранее было предсказано, что метеороиды в атмосфере Марса могут разрушаться и образовывать кластеры кратеров на поверхности Марса [Porova et al., 2003; 2007]. За последние годы на Марсе обнаружено более 1200 свежих датированных мест падения метеороидов [Malin et al., 2006; Daubar et al., 2013; 2022]. Около 58% из всех каталогизированных [Daubar et al., 2022] мест падения метеороидов – кластеры, а остальные – отдельные кратеры. Размеры кратеров для рассматриваемых мест падения метеороидов варьируются от 1 до 50 м, размеры ударников оцениваются в 0.1–5 м [Hartmann et al., 2018; Podobnaya et al., 2021].

На Земле, как правило, метеороиды наблюдаются во время недолгого пролета через атмосферу, большая часть их массы остается в атмосфере благодаря фрагментации и абляции, в редких случаях находятся их фрагменты в виде метеоритов. Такие объекты в условиях разреженной атмосферы Марса в половине случаев (40–50%) привели бы к образованию кластеров [Hartmann et al., 2018]. Плотность атмосферы у поверхности Марса соответствует примерно 30 км высоте земной атмосферы, таким образом, исследование кратерных полей на Марсе позволяет изучать детали фрагментации, которые не могут быть обнаружены в земных условиях. Свойства космических объектов оцениваются по наблюдательным данным в рамках тех или иных предположений с не очень высокой точностью, исследование марсианских кластеров предоставляет возможность оценить свойства метеороидов независимым образом.

В предыдущих работах [Daubar et al., 2013; 2022; Подобная и др., 2020; Podobnaya et al., 2021] рассматривались различные способы определения параметров траектории метеороида для 77 кластеров на Марсе: по эллипсам рассеяния и по кратерным выбросам. Оценки угла наклона траектории метеороида показали хорошее совпадение между собой и с независимой оценкой. Направление полета, оцененное по эллипсам и по кратерным выбросам, не совпадало в половине случаев. Расхождение между оценками азимута требует применения других подходов.

Целью данной работы является описание модели фрагментации, которая позволит описать поведение метеороидов в атмосферах двух планет – Марса и Земли, поскольку предполагается, что популяция метеороидов для обеих планет общая [Adolfsson et al., 1996]. Мы предполагаем, что результаты моделирования позволят определять характеристики фрагментации (прочности и плотности ударников, распределение фрагментов, параметры траектории метеороидов и др.), а также описать реальные кластеры на Марсе и поля рассеяния метеоритов на Земле.

В следующем разделе работы описывается взаимодействие метеороида с атмосферой, описываются существующие модели фрагментации и приводится обзор аппроксимаций для коэффициента сопротивления из различных литературных источников. В третьем разделе представлена применяемая модель фрагментации, примеры модели для входа метеороида в атмосферы Земли и Марса приводятся в четвертом разделе.

2. Взаимодействие метеороида с атмосферой

Взаимодействие метеороидов с атмосферой планеты описывается стандартной системой дифференциальных уравнений физической теории метеоров, включающей в себя уравнения торможения и абляции, дополненные уравнениями, определяющими положение ударника в пространстве [см., например, [Baldwin, Sheaffer, 1971, Бронштэн 1981]. К этим уравнениям добавляется та или иная модель фрагментации. Кроме того, необходимо учитывать режим взаимодействия метеороида с атмосферой, который влияет на выбор коэффициентов, используемых в уравнениях (см далее раздел 2.2).

2.1. Существующие модели фрагментации

Космические тела имеют разный состав, скорость, структуру, размер, и разрушаются они по-разному. Разрушение метеорного тела обычно начинается в момент, когда аэродинамическое давление в критической точке становится равным некоторой константе, характеризующей прочность вещества метеороида. Оценки прочности при первом разрушении в атмосфере составляют 0.1–1 МПа [Попова и др., 2014].

Разрушение метеорного тела может происходить различным образом [Попова и др., 2014], например, оно может разделиться на несколько достаточно крупных отдельных фрагментов, которые до некоторого момента взаимодействуют друг с другом, генерируя одну общую ударную волну, а затем продолжают свое движение независимо друг от друга и могут разрушаться дальше (прогрессивная фрагментация). Такие модели рассматривались во многих работах, начиная с Левина (1956). До работы Passey and Melosh (1980) эти модели не учитывали взаимодействие фрагментов друг с другом даже на начальном этапе.

Другой механизм разрушения – разрушение метеороида на облако мелких фрагментов и паров, объединенных общей ударной волной (pancake) [Svetsov et al., 1995]. Если падающее тело разрушается на очень большое число небольших фрагментов, то после разрушения это облако паров и фрагментов может деформироваться как жидкость. Мелкие фрагменты могут легко испариться или заполнить промежутки между крупными кусками. Движение полностью разрушившегося метеороида внутри общей для всех фрагментов ударной волны часто применяют к крупным телам (таким, как Тунгусский метеороид [Shuvalov, Artemieva, 2002]).

Для описания процесса фрагментации может быть использована гибридная модель, объединяющая *pancake* и прогрессивную фрагментацию, и предполагающая, что часть начальной массы образует

облако фрагментов и паров, а другая часть – независимо летящие и разрушающиеся фрагменты [Попова и др., 2014]. Один из вариантов гибридной модели (модель облаков фрагментов, FCM) широко применяют к входу крупных космических тел [Wheeler et al., 2017].

Еще одним из вариантов фрагментации является модель эрозии, она представляет собой квазинепрерывное дробление, дополненное образованием крупных фрагментов – пыль и фрагменты высвобождаются из метеороида постепенно [Borovicka et al., 2007].

2.2. Коэффициент сопротивления

Как уже отмечалось, коэффициенты, входящие в основные уравнения, зависят от режима взаимодействия метеороида с атмосферой, среди которых выделяют свободно-молекулярный, переходный режим и режим сплошной среды. Границы между этими газодинамическими режимами определяются числом Кнудсена (Kn), равным отношению длины свободного пробега молекул к размеру метеороида. Было предложено [Бронштэн, 1981] использовать модифицированное число Кнудсена, учитывающее увеличение концентрации испаряемых молекул вблизи метеороида из-за разницы между тепловой скоростью и скоростью метеороида. Эта поправка сдвигает границы между режимами течения вверх по высоте.

Одним из важнейших коэффициентов в системе дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие атмосферы и метеороида [Baldwin, Sheaffer, 1971], является коэффициент сопротивления C_d . Для случаев классических форм (например, сфера, параллелепипед) коэффициент сопротивления зависит от газодинамического режима, а также от чисел Маха (M) и Рейнольдса (Re), которые изменяются при переходе от сверхзвукового режима в воздухе с низкой плотностью к дозвуковому режиму в турбулентном воздухе высокой плотности, близко к поверхности [Towner et al., 2022]. Во время движения метеороида число Рейнольдса в среднем увеличивается с понижением скорости и/или высоты. На больших высотах наблюдается заметное изменение величины числа Рейнольдса, что влияет на величину коэффициента сопротивления; для метеороида размером от 0.3 см до 1 м при уменьшении высоты от 60 км до поверхности Земли число Рейнольдса изменяется от 25 до 10^6 . При движении в сильно разреженном газе ($Kn \gg 1$) $C_d = 2$ (для сферы), то есть весь импульс набегающего газа передается телу (неупругий удар молекул). При движении тела в достаточно плотной атмосфере, когда длина свободного пробега молекул много меньше характерного размера тела, для выпуклых гладких тел, близких к сфере, при метеорных скоростях $C_d \approx 1$. Также коэффициент сопротивления зависит от формы фрагментов метеороида, которая может меняться в процессе полета [Zhdan et al., 2007].

Реализованная модель фрагментации должна одинаково хорошо работать в атмосферах и Марса и Земли для фрагментов самых разных размеров. На Марсе разрушение метеороидов при типичных значениях прочности происходит в режиме сплошной среды, падающий метеороид не входит в дозвуковой режим до самой поверхности. На Земле важны низкие скорости во время перехода в дозвуковой режим, особенно при определении мест падения метеоритов.

В Таблице 1 собраны используемые в литературе формулы для коэффициента сопротивления в свободно-молекулярном режиме [ReVelle, 1976; Masson et al., 1960; Sansom et al., 2015], режимах сплошной среды и переходном [Khanukaeva, 2003; Towner et al., 2022]. Для режима сплошной среды приведены два различных выражения: первое опирается на формулы для дозвукового и гиперзвукового режима с учетом сферической формы метеороида [Haider, Levenspiel, 1989], представленные в работе Towner et al. (2022), между этими режимами значение определяется линейной интерполяцией; второе соответствует представленному в дополнительных материалах к работе Porova et al. (2013). В работах Khanukaeva (2003) и Towner et al. (2022) коэффициент сопротивления для свободно-молекулярного режима представлен суммой двух слагаемых, одно из которых имеет постоянное значение, определяемое формой фрагмента, а второе – добавка, зависящая от скорости движения. Эта добавка при больших скоростях может быть сравнима с основным слагаемым, и достигать значения 1.5–2, что приводит к существенному росту коэффициента сопротивления. Такой подход требует дальнейшего

Таблица 1

Свободно-молекулярный $Kn > 10$	$C_{d_free} = 2$
Режим сплошной среды $Kn < 0.01$	$C_{d_cont_1} = \begin{cases} \frac{24 + 4.46985 \times Re^{0.6529}}{Re} + \frac{0.437316 \times Re}{7185.35 + Re} & M \leq 1 \\ \text{линейная интерполяция} & 1 < M < 3 \\ 0.92 & M \geq 3 \end{cases}$ $C_{d_cont_2} = \begin{cases} 0.43 & M \leq 0.5 \\ 0.715 + 0.285 \times \sin\left(\pi \times \frac{M}{0.9} - 1.05\right) & 0.5 < M < 1.4 \\ 0.92 & M \geq 1.4 \end{cases}$
Переходный ($0.0 \leq Kn \leq 10$)	$C_{d_trans} = 0.92 + (C_{d_free} - 0.92) \times e^{-0.001 \times Re^2}$

рассмотрения, поэтому пока данное увеличение коэффициента сопротивления не предлагается применять. Используются обозначения: M – число Маха, Re – число Рейнольдса (Табл. 1).

В качестве иллюстрации, демонстрирующей при каких условиях важны изменения в коэффициенте сопротивления, были рассмотрены несколько различных фрагментов с размерами от 0.3 см до 1 м, движущихся в атмосфере Земли с высоты 60 км при скорости 20 км/с под углом 45° . Для двух из этих фрагментов изменение скорости с высотой приведено на рис. 1 вместе с зависимостью C_d от высоты и скорости. На большей части пролета фрагментов коэффициент сопротивления находится в промежутке 0.9–1, на высотах ниже 20–30 км C_d уменьшается и достигает значения меньше 0.5. Тела таких размеров падают на поверхность с дозвуковыми скоростями и не образуют кратеров.

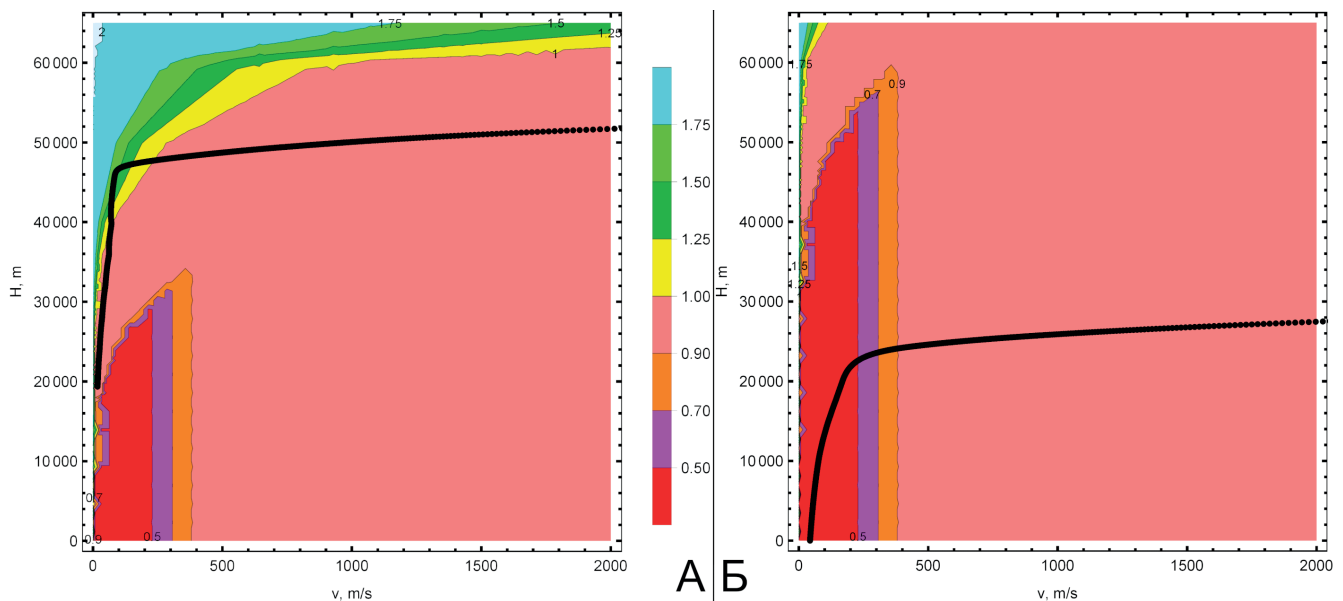


Рис. 1. Изменение величины коэффициента сопротивления (показана цветом) при пролете фрагментов метеороида с размерами: А – 0.3 см и Б – 10 см. Черной линией показана зависимость высоты от скорости (профиль пролета). В режиме сплошной среды $C_d = C_{d_cont_2}$ (Табл. 1.)

Сравнение выражений для коэффициента сопротивления в режиме сплошной среды показывает, что для C_{d_cont1} имеет место более плавный переход между дозвуковыми и сверхзвуковыми скоростями ($M > 3$), чем для второго выражения C_{d_cont2} , который быстрее падает с уменьшением скорости (рис. 1).

Коэффициент сопротивления слабо меняется на протяжении большей части траектории метеороида. Заметные изменения начинаются при скоростях сравнимых со скоростью звука, т.е. под конец траектории. Видимого влияния на профиль скорости различие в формулах определения коэффициента C_d в режиме сплошной среды не имеет.

Следует отметить, что важную роль в процессе взаимодействия метеороида с атмосферой имеет коэффициент теплопередачи C_h , определяющий скорость абляции. На данный момент в модели используется постоянное значение $C_h = 0.1$.

3. Модель фрагментации

Предлагаемая модель взаимодействия метеороида с атмосферой описывается стандартной системой дифференциальных уравнений физической теории метеоров (см раздел 2), фрагментация описывается как одномоментное разрушение на несколько отдельных фрагментов. Их плотность предполагается равной плотности ударника до разрушения и влияет на величину разлета фрагментов [Passey, Melosh, 1980; Ivanov et al., 2014]. Из-за разреженной атмосферы рассматриваемая модель фрагментации в одну стадию актуальна в атмосфере Марса. Для Земли многочисленные наблюдения показывают, что разрушение метеороида, как правило, происходит неоднократно. Разрушение метеороида происходит на высоте, где динамическое давление на лобовую поверхность метеороида превышает заранее заданное значение его прочности. В модель включен боковой разлет фрагментов (дополнительная скорость разлета перпендикулярно к траектории возникает за счёт начального взаимодействия ударных волн фрагментов сразу после разрушения [Passey, Melosh, 1980]), который происходит под случайным углом в плоскости, перпендикулярной траектории.

Фрагменты считаются сферическими, их количество и размеры в момент разрушения определяются распределением по усеченному степенному закону с фиксированной массой максимального фрагмента [Popova et al., 2019a]. Анализ оценок массы наибольшего фрагмента для 77 кластеров показал, что можно выделить несколько групп ударников: с отношением массы наибольшего фрагмента к массе метеороида до разрушения >0.8 ; отношением масс примерно 0.6–0.7 и 0.2–0.4 [Popova et al., 2019b]. В данной работе было выбрано значение в 0.6 (60%).

Результатом моделирования является информация о параметрах фрагментов – масса, скорость, угол падения, координаты места падения и размеры кратера в случае, если фрагмент столкнулся с поверхностью с достаточно высокой скоростью (большей примерно 0.5 км/с).

4. Применение модели

Рассматривается каменный ударник диаметром 1 м (анализ 77 кластеров на Марсе показал, что диаметр соответствующих метеороидов примерно 0.2–3 м [Подобная и др., 2020]) и плотностью 2650 кг/м³ входящий в атмосферы Земли и Марса под углом 45° и азимутом 45°, фрагментация происходила при динамическом давлении 0.1 МПа (это значение соответствует разрушению на Земле примерно на высоте 60 км, на Марсе – 30 км). Поверхность планеты в месте падения метеороида считалась каменной, с плотностями 2650 кг/м³ для Земли и 2000 кг/м³ для Марса. Скорость входа метеороида в атмосферу предполагалась примерно равной средней для каждой планеты (10 км/с для Марса и 20 км/с для Земли).

На Земле образовавшиеся фрагменты с массами от примерно 40 до 830 кг долетают до поверхности с массами от 1.5 до 29 кг (диаметр максимального фрагмента 0.3 м (рис. 2). Финальная скорость фрагментов недостаточна для образования кратеров, размер поля рассеяния метеоритов вдоль траектории составляет примерно 5 км, поперек траектории – менее 100 м. В моделировании не учитывался ветровой снос, реальные поля рассеяния метеоритов сильно модифицируются за счет влияния ветра [Попова и др., 2014]. В условиях достаточно плотной земной атмосферы происходит атмосферная

сортировка, крупные фрагменты образуют головную часть поля рассеяния, фрагменты располагаются вдоль траектории в зависимости от своей массы (рис.2), как и наблюдается в многочисленных земных полях рассеяния метеоритов [Frost, 1969].

Использование различных выражений для C_d (Табл. 1) в режиме сплошной среды при уменьшении

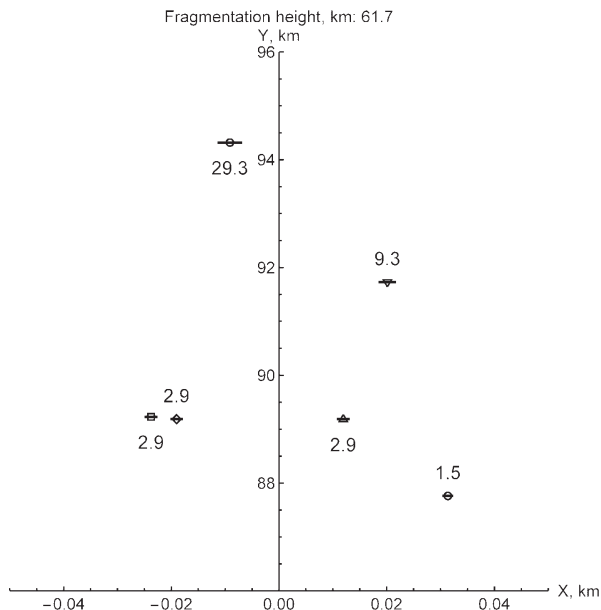
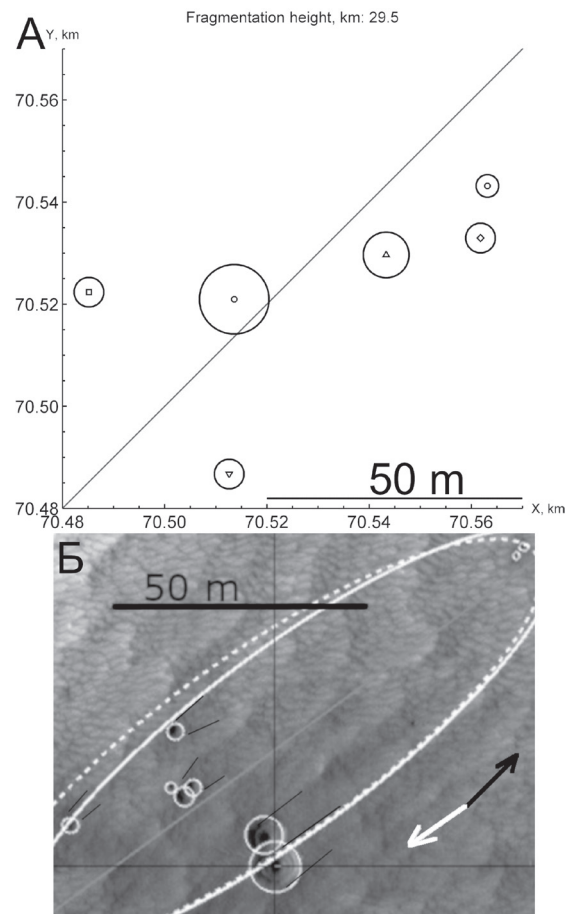


Рис. 3. А – расположение кратеров от 1 м метеороида на поверхности Марса. Массы фрагментов от 30 кг до 735 кг. Линия обозначает траекторию ударника, направление полета метеороида – из пересечения осей; кругами обозначены соответствующие кратеры, размер кругов соответствует размерам кратеров в масштабе осей. Б – снимок камерой HIRISE похожего кластера (ESP_037706_1765). Эллипсы рассеяния, построенные двумя различными способами, показаны белой сплошной и пунктирной линиями. Стрелки – направление полета метеороида, полученное с помощью эллипсов рассеяния (белая стрелка) и по расположению выбросов из кратеров (черная стрелка). Границы кратерных выбросов и кратеров отмечены черными линиями и белыми окружностями соответственно

Рис. 2. Расположение фрагментов метеорита на поверхности Земли, полученное по результатам моделирования входа 1 м метеороида в атмосферу (вид сверху). Траектория метеороида совпадает с вертикальной осью. Фрагменты долетают до поверхности Земли; их финальные массы от 1.5 до 29 кг (обозначены цифрами). Длина отрезков пропорциональна диаметру соответствующего фрагмента



числа Маха (см. раздел 3) приводит к заметной разнице в месте падения метеорита – для фрагмента диаметром 5 см и массой 200 г относительное смещение места падения составляет около 700 м, для фрагмента диаметром 0.5 см и массой 0.26 г – более 1.5 км. Выбор аппроксимации для коэффициента сопротивления существенно влияет на нахождение места падения, приводит к неточности в его определении и затрудняет поиск метеоритов, особенно небольших.

В случае разрушения метеороида в Марсианской атмосфере (рис. 3А) фрагменты достигают поверхности планеты со скоростью, достаточной для образования кратеров. Размер кратеров вычислялся исходя из соотношений подобия [Holsapple, Housen, 2007] для каменной мишени и для

рассматриваемого ударника составил от 4.5 до 13.5 м, разлет фрагментов составил примерно 60 м вдоль траектории и 40 м – поперек. Соотношение между размерами кратеров и размер поля рассеяния хорошо соответствуют реальному кластеру на Марсе – кластер ESP_037706_1765 имеет размер, примерно 75 м на 35 м (рис. 3Б), отношение диаметров кратеров к диаметру максимального кратера в модели и реальном кластере близки друг к другу. В головной части поля рассеяния оказываются не наиболее крупные фрагменты (как происходит на Земле и как предполагалось при построении эллипсов рассеяния).

Результаты моделирования показали, что разработанная модель разрушений метеороида в атмосфере способна описывать кратерные кластеры и в дальнейшем позволит предложить методы определения направления полета и свойств ударника. На Марсе эффект атмосферной сортировки выражен слабо, поле рассеяния в основном определяется фрагментацией и боковым разлетом осколков.

Заключение

Сравнение результатов моделирования фрагментации для Земли и Марса показало, что благодаря различию в плотности атмосфер при одинаковых исходных данных ударник диаметром 1 м образует на Марсе кратерное поле во много раз меньшее, чем поле рассеяния метеоритов на Земле, и с кратерами размером до 13.5 м.

В атмосфере Земли фрагменты такого модельного метеороида долетают до поверхности без образования кратеров и имеет место атмосферная сортировка фрагментов.

Имеющиеся в литературе аппроксимации для коэффициента сопротивления дают заметно различающиеся оценки координат мест падения сантиметровых метеоритов.

Кратерные поля на Марсе в большой степени определяются фрагментацией и разлетом фрагментов, эффект атмосферной сортировки выражен слабо.

Реализованная модель разрушений метеороида в атмосфере позволяет описать кратерные кластеры и в будущем позволит предложить методы определения направления полета и свойств ударника.

Благодарности

Авторы благодарны рецензентам, в частности Б. А. Иванову, за внимательное прочтение и ценные замечания.

Список литературы

- Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений // М.: Наука. 1981. 416 с.
- Левин Б.Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе. М. : Изд. АН СССР. 1956. 294 с.
- Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О. Эллипсы рассеяния для недавно образованных кластеров кратеров на Марсе // Динамические процессы в геосферах, вып. 12.:сб. научн тр. ИДГ РАН. М. : 2020. С. 89–98.
- Попова О.П., Дженинскенс П., Глазачев Д.О. Фрагментация Челябинского метеороида // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеорита:сб. научн тр. ИДГ РАН. М. : 2014. С. 59–78.
- Adolfsson L.G., Gustafson B.Å., Murray C.D. The Martian atmosphere as a meteoroid detector // Icarus. 1996. V. 119. No. 1. P. 144–152.
- Baldwin B., Sheaffer Y. Ablation and breakup of large meteoroids during atmospheric entry // Journal of Geophysical Research. 1971. V. 76. No. 19. P. 4653–4668.
- Borovička J., Spurný P., Koten P. Atmospheric deceleration and light curves of Draconid meteors and implications for the structure of cometary dust // Astronomy & Astrophysics. 2007. V. 473. No. 2. P. 661–672.
- Daubar I.J., McEwen A.S., Byrne S., Kennedy M.R., Ivanov B. The current Martian cratering rate // Icarus. 2013. V. 225. No. 1. P. 506–516.
- Daubar I.J., Dundas C.M., McEwen A.S., Gao A., Wexler D., Piqueux S., Collins G. S., Miljkovic K.,

- Neidhart T., Eschenfelder J., Bart G.D., Wagstaff K.L., Doran G., Posiolova L., Malin M., Speth G., Susko D., Werynski A. New Craters on Mars: An Updated Catalog // *Journal of Geophysical Research (Planets)*. 2022. V. 127. No 7. e2021JE007145.
- Frost M.J. Size and special distribution in meteoritic showers // *Meteoritics*. 1969. V. 4, No. 3. P. 217–232.
- Haider A. and Levenspiel O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles // *Powder Technol.* 1989. V. 58. No. 1. P. 63–70.
- Hartmann W.K., Daubar I.J., Popova O.P., Joseph Emily C.S. Martian cratering 12. Utilizing primary crater clusters to study crater populations and meteoroid properties // *Meteoritics & Planetary Science*. 2018. V. 53, No. 4. P. 672–686.
- Holsapple K.A. and Housen K.R. A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact // *Icarus*. 2007. V. 191. No. 2. P. 586–597.
- Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S. and the HiRISE team. (2014.) New small impact craters in high resolution HiRISE images—IV: 45th Lunar and Planetary Science Conference. LPI Contribution No. 1777. P. 1812.
- Khanukaeva D.Y. On the Coefficients in Meteor Physics Equations // *Rarefied Gas Dynamics*. 2003. V. 663. P. 726–734.
- Malin M.C., Edgett K.S., Posiolova L.V., McColley S.M., Noe Dobrea E.Z. Catalog of New Impact Sites on Mars Formed May 1999–March 2006. Malin Space Science Systems. Inc.: San Diego, California. 2006.
- Masson D.J., Morris D.N., Bloxsom D.E. Measurements of sphere drag from hypersonic continuum to free-molecule flow. Santa Monica, California: RAND Corporation. 1960. 46 p.
- Passey Q.R. and Melosh H.J. Effects of atmospheric breakup on crater field formation // *Icarus*. 1980. V. 42: P.211–233.
- Podobnaya E.D., Popova O.P., Glazachev D.O. Trajectory estimation for fresh impacts on Mars // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. 2021. V. 51. No. 3. P. 241–248.
- Popova O., Nemtchinov I., Hartmann W.K. Bolides in the present and past martian atmosphere and effects on cratering processes. // *Meteoritics & Planetary Science*. 2003. V. 38. No. 6. P. 905–925.
- Popova O.P., Hartmann W.K., Nemtchinov I.V., Richardson D.C., Berman D.C. Crater clusters on Mars: Shedding light on martian ejecta launch conditions // *Icarus*. 2007. V. 190. No. 1. P. 50–73.
- Popova O.P. and 59 co-authors. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013. V. 342. No. 6162. P. 1069–1073.
- Popova O., Borovicka J., Campbell-Brown M. (2019a). Modelling the entry of meteoroids. In: G. Ryabova, D. Asher, M. Campbell-Brown (Eds), *Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond*. Cambridge University Press, New York, NY, V. 25. P. 9–36.
- Popova O.P., Hartmann W.K., Breton S., Quantin S., Daubar I., Podobnaya E. (2019b). Fresh impact craters and clusters on Mars // *Meteoroids Conference* held in Bratislava, Slovakia, June 17–21.
- ReVelle D.O. (1976). Dynamics and thermodynamics of large meteor entry: A quasi-simple ablation model. Ottawa, Canada: Herzberg Institute of Astrophysics, National Research Council Canada. 90 p.
- Sansom E.K., Bland P., Paxman J., Towner M. A novel approach to fireball modeling: The observable and the calculated // *Meteoritics & Planetary Science*. 2015. V. 50. No. 8. P. 1423–1435.
- Shuvalov V.V., Artemieva N.A. Numerical modeling of Tunguska-like impacts // *Planetary and Space Science*. 2002. V. 50. P. 181–192.
- Svetsov V.V., Nemtchinov I.V., Teterev A.V. Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus*. 1995. V. 116. P. 131–153.
- Towner M.C., Jansen-Sturgeon T., Cupak M., Sansom E.K., Devillepoix H.A.R., Bland P.A., Howie R.M., Paxman J.P., Benedix G.K., Hartig B.A.D. Dark-flight Estimates of Meteorite Fall Positions: Issues and a Case Study Using the Murrili Meteorite Fall // *The Planetary Science Journal*. 2022. V. 3. No. 44.
- Wheeler L.F., Register P.J., Mathias D.L. A fragment-cloud model for asteroid breakup and atmospheric energy deposition // *Icarus*. 2017. V. 295. P. 149–169.
- Zhdan I.A., Stulov V.P., Stulov P.V., Turchak L.I. Drag coefficients for bodies of meteorite-like shapes // *Solar System Research*. 2007. V. 41. No. 6. P. 505–508.

FRAGMENTATION MODEL FOR IMPACT CLUSTERS ON MARS

E. D. Podobnaya^{1*}, O. P. Popova¹, D. O. Glazachev¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: epodobnaya@gmail.com*

In recent years, about 1200 of fresh meteoroid impact sites were discovered on Mars, they are single craters and crater fields. Due to the rarefied atmosphere of Mars (compared with Earth), the falling meteoroids are destroyed less, nevertheless, about half of them fragment in the Martian atmosphere and form crater fields of scattering (clusters). The study of crater clusters on Mars allows us to study the details of fragmentation, which cannot be detected on Earth. The initial results of numerical modeling of the interaction of a meteoroid with the atmospheres of Mars and Earth are considered. A comparison of fragmentation simulation results showed that the size of the scattering field on Earth is many times larger than on Mars. In the Earth's atmosphere the fragments reach the surface without forming craters and there is atmospheric sorting of fragments. It is demonstrated that the final location of small meteorite fragments depends significantly on the chosen expression for the drag coefficient. Crater fields on Mars are largely determined by fragmentation and fragment dispersal, the effect of atmospheric sorting has little effect. The results obtained for the Martian atmosphere suggest that the serial implementation of the developed fragmentation model will allow to describe clusters and offer better methods for estimating the flight direction and properties of the impactor.

Keywords: craters, meteoroids, fragmentation, numerical modelling, drag coefficient.