

Научная статья

УДК 523.681.8

doi: 10.17223/19988621/80/9

Оценка траектории метеороидов по марсианским кластерам

Елена Дмитриевна Подобная¹, Ольга Петровна Попова²,
Дмитрий Олегович Глазачев³

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

¹ *epodobnaya@gmail.com*

² *olga@idg.chph.ras.ru*

³ *glazachevd@gmail.com*

Аннотация. С 2006 г. на Марсе было обнаружено около 1 200 мест недавних падений метеороидов, примерно половина которых разрушается при пролете через атмосферу и приводит к образованию кратерных полей (кластеров). Анализ кластеров позволяет изучать плохо различимые на Земле детали взаимодействия метеороидов с атмосферой. Ранее предлагалось оценивать траекторию метеороида по эллипсу рассеяния кластеров и по выбросам из кратеров, однако оценки, полученные этими методами, согласуются только в 30% случаев. В данной работе представлены первые результаты применения модели фрагментации к описанию кластеров; мы надеемся, что в дальнейшем эта модель позволит описать кластеры и предложить методы определения направления полета и свойств ударника.

Ключевые слова: кратеры, метеороиды, кратерные выбросы, фрагментация, численное моделирование

Для цитирования: Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О. Оценка траектории метеороидов по марсианским кластерам // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 80. С. 97–107. doi: 10.17223/19988621/80/9

Original article

Estimation of the trajectory of meteoroids from Martian clusters

Elena D. Podobnaya¹, Olga P. Popova², Dmitry O. Glazachev³

^{1, 2, 3} *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics Russian Academy of Science*

¹ *epodobnaya@gmail.com*

² *olga@idg.chph.ras.ru*

³ *glazachevd@gmail.com*

Abstract. Recently, about 1200 fresh meteoroid impact sites were discovered on Mars, they are single craters and crater fields with crater sizes up to 50 m. Atmosphere density on the surface of Mars corresponds to about 30 km height of the Earth's atmosphere. Thus, scattering fields of craters on Mars allow one to study fragmentation details, which are hidden in terrestrial conditions.

Previously, data on 77 Martian clusters were analyzed. To estimate the trajectory of meteoroids, the scattering ellipses were constructed. The ellipse size determines the angle of the meteoroid entry into the atmosphere and provides information about the height of destruction and the density of a space object. For more than 70% of clusters, the obtained azimuth estimations are within 20° of those determined by independent evaluations. For some clusters, the flight direction can be specified from crater ejecta on Martian HiRISE images. Estimations of azimuth angles for 42 clusters coincide with previous results obtained for 70% of clusters, while the data on the flight direction fit only for 30%. The discrepancy between different estimations of azimuth angles requires the use of other approaches.

Continuing on the topic, this work presents numerical modeling of the flight and fragmentation of a meteoroid in the atmospheres of two planets, Mars and Earth. It is assumed that the simulation results will allow one to determine meteoroid parameters, in particular, the trajectory parameters.

The main purpose of the presented work is to demonstrate the efficiency of the fragmentation model, its applicability to Martian clusters, and the difference in the scattering fields on the Earth and Mars: the atmospheric sorting effect is weak on Mars, and the scattering field is mainly dependent on fragmentation and the lateral spreading of fragments. The area of the simulated cluster is described with an accuracy of about 10%; the size of the maximum crater, with an accuracy of about 35%. The ratios of crater diameters to the maximum crater diameter for the model and real cluster are close to each other. In the future, it is planned to implement a series of numerical simulations with different initial data and to compare the results with real clusters on Mars, which have already been analyzed in previous works. The aim is to propose the advanced methods for determining the direction of the flight of meteoroids and the properties of impactors such as density and strength.

Keywords: craters, meteoroids, crater ejecta, fragmentation, numerical modeling

For citation: Podobnaya, E.D., Popova, O.P., Glazachev, D.O. (2022) Estimation of the trajectory of meteoroids from Martian clusters. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 80. pp. 97–107. doi: 10.17223/19988621/80/9

Введение

В течение последних лет на Марсе было обнаружено около 1 200 свежих мест падения метеороидов [1–4], приведших к образованию одиночных ударных кратеров и кратерных полей (кластеров) с диаметрами отдельных кратеров от 1 до 50 м. Кластер определяется как скопление в одной и той же области нескольких кратеров, которые образовались почти одновременно в результате атмосферной фрагментации ударника. Метеороидом принято называть твердый природный объект размером примерно от 30 мкм до 1 м, движущийся в межпланетном пространстве или прибывающий из него. Метеорит – это космический объект, который пролетел атмосферу, не испарившись полностью, и достиг поверхности планеты.

Благодаря более разреженной (в сравнении с Землей) атмосфере Марса, падающие метеороиды меньше фрагментируются. Тем не менее около половины метеороидов разрушается в марсианской атмосфере и образует кратерные поля [2–5]. На Земле, как правило, метеороиды наблюдаются во время недолгого пролета через атмосферу, в редких случаях находят их фрагменты в виде метеоритов. На Марсе в 40–50% случаев аналогичные объекты привели бы к образованию кластеров. Плотность атмосферы у поверхности Марса соответствует примерно

30 км высоты земной атмосферы; таким образом, исследование кратерных полей на Марсе позволяет увидеть результаты менее существенной 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 дает возможность оценить свойства метеороидов независимым образом.

Цель данной работы – предложить модель фрагментации метеороидов на Марсе, которая позволит описать реальные кластеры и определить для них характеристики фрагментации (прочность и плотность ударников, распределение фрагментов, параметры траектории метеороидов и др.).

В первом разделе приводится описание обнаруженных кластеров, представлены полученные ранее результаты. Второй раздел посвящен разрабатываемой модели фрагментации метеороидов и сопоставлению первых результатов моделирования с реальным кластером, сравнению фрагментации в атмосфере Земли и Марса для одного и того же модельного метеороида.

Кластеры и кратерные выбросы

Недавно были опубликованы подробные данные для 77 марсианских кластеров, содержащих от 2 до 465 отдельных кратеров [3], которые включают информацию о размере и расположении кратеров в кластере. Средний диаметр кратеров для этих кластеров составляет 2.5 м, наибольшее расстояние между двумя кратерами в кластере – от 16.5 м до 3.8 км (среднее значение 350 м), характерный размер кластера – 50–500 м.

Для получения различных оценок параметров траектории космических объектов, образовавших марсианские кластеры, содержащие более 5 кратеров, в работе [3] предложено построить минимальный эллипс, покрывающий 90% кратеров в кластере (эллипс рассеяния). Ориентация траектории ударника в пространстве определяется двумя углами – углом входа (угол между траекторией ударника и горизонтальной плоскостью) и наклоном проекции траектории на плоскости (рис. 1). Азимут полета метеороида определяется наклоном проекции на плоскости с учетом направления движения метеороида и отсчитывается от направления на север по часовой стрелке.

Размер эллипса определяет угол входа метеороида в атмосферу, содержит информацию о высоте разрушения и плотности космического объекта [6]. Непонятно, насколько достоверными являются полученные оценки углов и размеров кластеров, поэтому в работах [7, 8] мы воспроизвели тот же алгоритм самостоятельно, а также построили эллипсы рассеяния для рассматриваемых кластеров еще одним способом. Для каждого кластера, исходя из эллипса рассеяния, определялся азимут его траектории как угол наклона главной оси эллипса рассеяния, направление полета выбиралось в сторону большего суммарного диаметра фрагментов (от центра эллипса) [7, 8]. В более чем 70% случаев оценки углов, полученных по эллипсам рассеяния и описывающих траекторию ударника, отличаются от независимых оценок [3] не более чем на 20°. Эллипсы рассеяния позволяют оценить разброс кратеров в кластере – площадь поля рассеяния была оценена с точностью $\pm 50\%$ в сравнении с независимой оценкой [3]. Кроме того, были построены эллипсы рассеяния для двух известных полей рассеяния метеоритов на Земле. Показано, что возможно оценить азимут и угол входа с точностью до 15° для по-

логой траектории и наличия достаточного количества крупных фрагментов, на чье падение мало влияет ветровой снос [7, 8]. Поле рассеяния (территория, по которой разлетаются метеоритные осколки, образованные в результате падения космического тела) маленьких фрагментов метеороида (< 1 кг) с почти вертикальной траекторией входа определяется только ветровым сносом [7, 8].

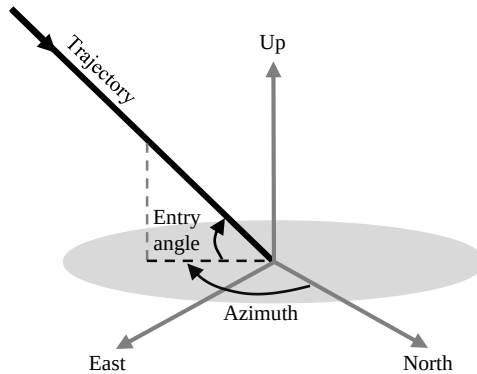


Рис. 1. Схематическое изображение углов, определяющих траекторию метеороида в атмосфере. Черная линия со стрелкой обозначает направление полета метеороида; серые линии – система координат

Fig. 1. Schematic representation of the angles determining the meteoroid trajectory in the atmosphere. The black line with an arrow indicates the direction of the meteoroid flight; the gray arrows, the coordinate system

Изображения Марса, полученные проектом HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment), позволяют детально рассмотреть выбросы из кратеров для ряда кластеров и найти соответствующую траекторию ударника [7, 8]. В случае косых ударов выбросы из образующегося кратера распределены ассиметрично и более выражены по направлению полета [9]. Кроме того, в ряде случаев для определения направления полета метеороида можно использовать пылевые следы на поверхности Марса – параболические элементы, которые рассматриваются как поверхностные записи взаимодействия атмосферных ударных волн [10, 11]. Определить направление полета по расположению кратерных выбросов оказалось возможным для 42 из 77 рассмотренных кластеров [8], в остальных случаях изображения кластеров не дают возможности получить однозначную оценку направления кратерных выбросов. Направление полета определялось приближенно, с точностью $\pm 45^\circ$. Кратерные выбросы не дают возможности определить угол входа метеороида в атмосферу.

Направление полета, определяемое выбросами, сравнивалось с оценками, полученными по эллипсам рассеяния. Кластер ESP_013655_1710 (рис. 2) демонстрирует совпадение оценок направления полета: азимут, вычисленный по эллипсам рассеяния, составляет 300° , как и полученный по расположению кратерных выбросов. Направление полета метеороида, образовавшего кластер PSP_009305_1830 (рис. 3), составляет 315° при оценке траектории по эллипсам рассеяния и 220° – исходя из выбросов из кратеров. Таким образом, полученные направления полета различаются на 95° , т.е. полученные оценки направления полета расположены практически перпендикулярно.

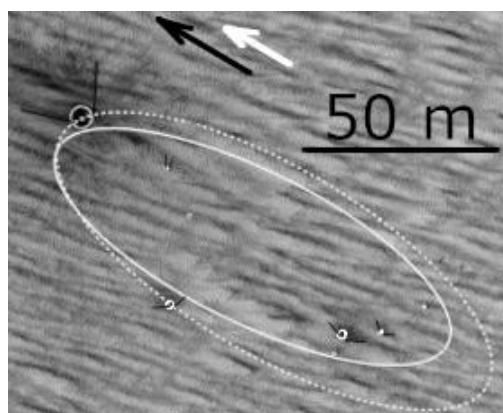


Рис. 2. Изображение, полученное камерами HiRISE для кластера ESP_013655_1710. Эллипсы рассеяния, построенные двумя различными способами [7, 8], показаны белой сплошной и пунктирной линиями. Стрелки показывают направление полета метеороида, полученное с помощью эллипсов рассеяния (белая стрелка) и по расположению выбросов из кратеров (черная стрелка); границы кратерных выбросов и кратеров отмечены черными линиями и белыми окружностями соответственно

Fig. 2. Image made by a HiRISE camera for ESP_013655_1710 cluster. Scattering ellipses (white solid and dashed lines) are constructed by two different methods [7, 8]. The meteoroid flight direction obtained from scattering ellipses (white arrow) and from crater ejecta location (black arrow) are shown; areas of crater ejecta and craters are indicated by black lines and white circles, respectively

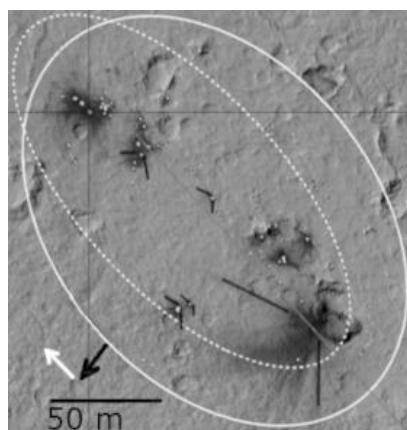


Рис. 3. Изображение, полученное камерами HiRISE для кластера PSP_009305_1830. Эллипсы рассеяния, построенные двумя различными способами [7, 8], показаны белой сплошной и пунктирной линиями. Стрелки показывают направление полета метеороида, полученное с помощью эллипсов рассеяния (белая стрелка) и по расположению выбросов из кратеров (черная стрелка); границы кратерных выбросов и кратеров отмечены черными линиями и белыми окружностями соответственно

Fig. 3. Image made by a HiRISE camera for PSP_009305_1830 cluster. Scattering ellipses (white solid and dashed lines) are constructed by two different methods [7, 8]. The meteoroid flight direction obtained from scattering ellipses (white arrow) and from crater ejecta location (black arrow) are shown; areas of crater ejecta and craters are indicated by black lines and white circles, respectively

Для азимутов, полученных по кратерным выбросам, азимут метеороида без учета направления полета соответствует предыдущим оценкам примерно для 70% кластеров [8], направление полета соответствует примерно в 30%. Различие оценок, полученных разными способами, показывает необходимость рассмотрения иных способов нахождения азимута.

Модель фрагментации метеороидов

В качестве следующего шага рассматривается численное моделирование полета и фрагментации метеороида в атмосферах двух планет – Марса и Земли, поскольку популяция метеороидов для обеих планет общая [12]. Мы предполагаем, что результаты моделирования позволят определять параметры метеороидов, в том числе параметры траектории.

Взаимодействие метеороида с атмосферой планеты описывается системой дифференциальных уравнений [13]. В качестве примера рассматривается каменный ударник диаметром 1 м (анализ 77 кластеров на Марсе показал, что диаметр соответствующих метеороидов примерно 0.2–3 м [7]) и плотностью $2\,650\text{ кг/м}^3$, входящий в атмосферы Земли и Марса под углом 45° и азимутом 45° . Поверхность планеты в месте падения метеороида считалась каменной, с плотностями $2\,650\text{ кг/м}^3$ для Земли и $2\,000\text{ кг/м}^3$ 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.

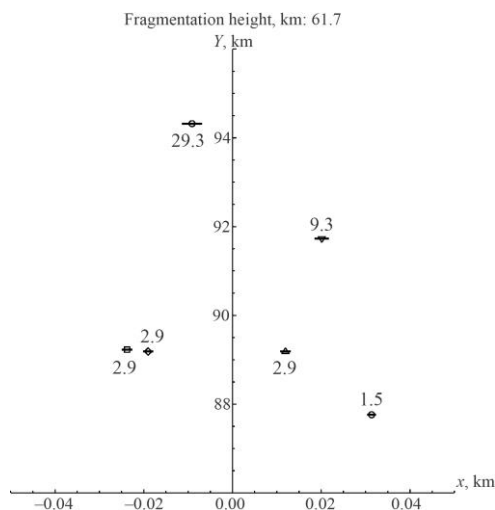


Рис. 4. Расположение фрагментов 1 м метеороида ($v_0 = 20\text{ км/с}$; $\rho = 2\,650\text{ кг/м}^3$), входящего в атмосферу Земли под углом 45° и азимутом 45° и разрушающегося при давлении 0.1 МПа. Траектория метеороида совпадает с вертикальной осью. Фрагменты долетают до поверхности Земли; их финальные массы от 1.5 кг до 29 кг (обозначены цифрами). Длина отрезков пропорциональна диаметру соответствующего фрагмента

Fig. 4. Location of fragments of a 1 m meteoroid ($v_0 = 20\text{ км/с}$; $\rho = 2\,650\text{ кг/м}^3$), which enters the atmosphere of the Earth at an angle of 45° and azimuth angle of 45° , and explodes at a pressure of 0.1 МПа. Meteoroid trajectory coincides with the vertical axis. Fragments reach the Earth surface; their final masses are in the range of 1.5 – 29 kg (indicated by numbers). The length of line segments is proportional to the diameter of the corresponding fragment

В рассматриваемом варианте предполагалось, что фрагментация проходила в одну стадию, боковой разлет фрагментов происходил под случайным углом к траектории метеороида (дополнительная скорость разлета перпендикулярно к траектории возникает за счет начального взаимодействия ударных волн фрагментов сразу после разрушения [14]), разрушение метеороида происходило на высоте, где прочность метеороида достигала 0.1 МПа [15] (это значение соответствует разрушению на Земле примерно на высоте 60 км, на Марсе – 30 км). Во время фрагментации метеороид распадается на некоторое количество сферических фрагментов, количество и размеры которых определяются распределением по усеченному степенному закону с фиксированной массой максимального фрагмента [16]. 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 [16]. В данной работе было выбрано значение в 0.6 (60%).

Фрагменты рассматриваемого метрового метеороида на Земле (рис. 4) долетают до поверхности, но не образуют кратеров, разлет фрагментов вдоль траектории составляет примерно 5 км, поперек траектории – менее 100 м. 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, как и наблюдается в многочисленных земных полях рассеяния метеоритов [17].

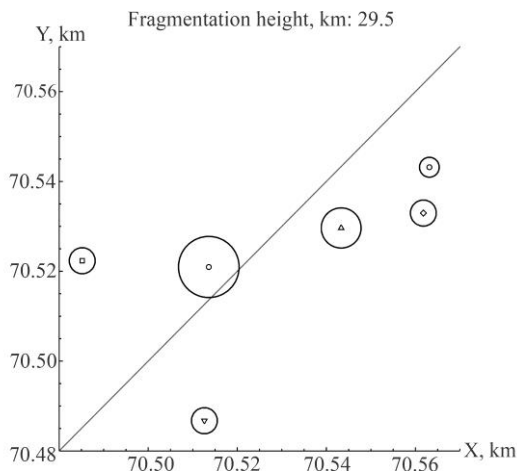


Рис. 5. Расположение кратеров (обозначены кругами в масштабе осей) от 1 м метеороида ($v_0 = 10$ км/с; $\rho = 2\,650$ кг/м³), входящего в атмосферу Марса под углом 45° и азимутом 45° и разрушающегося при давлении 0.1 МПа. Фрагменты долетают до поверхности Марса с массами от 30 кг до 735 кг. Линия обозначает траекторию ударника

Fig. 5. Location of craters (indicated by circles in the scale of the axes) made by a 1 m meteoroid ($v_0 = 10$ km/s; $\rho = 2650$ kg/m³), which enters the atmosphere of Mars at an angle of 45° and azimuth angle of 45°, and explodes at a pressure of 0.1 MPa. The mass of the fragments reaching the Mars surface ranges from 30 to 735 kg. The solid line indicates the impactor trajectory

В случае разрушения идентичного метрового метеороида в марсианской атмосфере (рис. 5) фрагменты достигают поверхности планеты со скоростью, достаточной для образования кратеров. Диаметр кратеров вычислялся исходя из соот-

ношений подобия [18] 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 размером поля рассеяния хорошо соответствуют реальному кластеру на Марсе: кластер ESP_037706_1765 с максимальным кратером диаметром 10 м имеет площадь примерно 75 м на 35 м (рис. 6), отношение диаметров кратеров к диаметру максимального кратера в модели и реальном кластере близки друг к другу. Направление полета для рассматриваемого реального кластера, полученное по эллипсам рассеяния и по кратерным выбросам, отличается на 190° , т.е. практически противоположно. Направление полета, полученное по выбросам, совпадает с заданным в моделировании кластера. В головной части поля рассеяния оказываются не наиболее крупные фрагменты, как происходит на Земле и как предполагалось при построении эллипсов рассеяния.

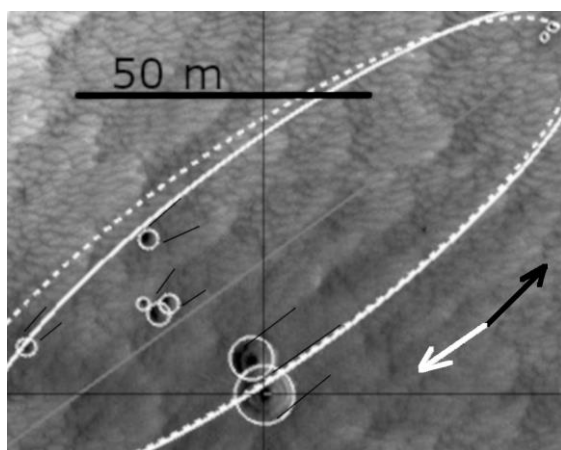


Рис. 6. Снимок камерой HiRISE кластера ESP_037706_1765 на поверхности Марса. Эллипсы рассеяния, построенные двумя различными способами [7, 8], показаны белой сплошной и пунктирной линиями. Стрелки показывают направление полета метеороида, полученное с помощью эллипсов рассеяния (белая стрелка) и по расположению выбросов из кратеров (черная стрелка); границы кратерных выбросов и кратеров отмечены черными линиями и белыми окружностями соответственно

Fig. 6. Image made by a HiRISE camera for ESP_037706_1765 cluster on the Martian surface. Scattering ellipses (white solid and dashed lines) are constructed by two different methods [7, 8]. The meteoroid flight direction obtained from scattering ellipses (white arrow) and from crater ejecta location (black arrow) are shown; areas of crater ejecta and craters are indicated by black lines and white circles, respectively

На Марсе эффект атмосферной сортировки выражен слабо, поле рассеяния в основном определяется фрагментацией и боковым разлетом осколков. Сравнение результатов моделирования фрагментации для Земли и Марса показало, что благодаря различию в плотности атмосфер при одинаковых исходных данных ударник образует на Марсе кратерное поле, во много раз меньшее, чем поле рассеяния метеоритов на Земле, и с кратерами размером до 13.5 м.

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

Заключение

Основным результатом представленной работы является демонстрация работоспособности модели фрагментации, ее применимости к марсианским кластерам и отличия характера полей рассеяния на Земле и на Марсе (атмосферная сортировка и разлет фрагментов за счет начального взаимодействия их ударных волн).

Проведенное численное моделирование показало, что примененная модель описывает кластеры на Марсе и дает возможность определить параметры ударника, образовавшего кластер. Площадь моделированного кластера описывается с точностью около 10%, размер максимального кратера – с точностью около 35%. Отношение диаметров кратеров к диаметру максимального кратера в модели и реальном кластере близки к друг другу. В будущем планируется провести серийное применение численного моделирования с различными начальными данными и сравнить его результаты с рассмотренными в предыдущих работах реальными кластерами на Марсе. Это позволит предложить более точные методы определения направления полета метеороида и определить свойства ударников, в том числе плотность и прочность.

Список источников

1. 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. San Diego, CA : Malin Space Science Systems. Inc., 2006.
2. Daubar I.J., McEwen A.S., Byrne S., Dundas C.M., Kennedy M., Ivanov B.A. The current Martian cratering rate // 41th Lunar and Planetary Science Conference. 2010. Abstract 1978.
3. Daubar I.J., Banks M.E., Schmerr N.C., Golombek M.P. Recently formed crater clusters on Mars // Journal of Geophysical Research 2019. V. 124 (4). P. 958–969. doi: 10.1029/2018JE005857
4. 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 (7). e2021JE007145. doi: 10.1029/2021JE007145
5. 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 (4). P. 672–686. doi: 10.1111/maps.13042
6. Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S. and the HiRISE team. New small impact craters in high resolution HiRISE images – IV // 45th Lunar and Planetary Science Conference. 2014. Abstract 1812.
7. Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О. Эллипсы рассеяния для недавно образованных кластеров кратеров на Марсе // Динамические процессы в геосферах. 2020. № 12. С. 89–98. doi: 10.26006/IDG.2020.24.10.011
8. 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 (3). P. 241–248. doi: 10.31577/caosp.2021.51.3.241
9. Shuvalov V.V. Ejecta deposition after oblique impacts: An influence of impact scale // Meteoritics & Planetary Science. 2011. V. 46 (11). P. 1713–1718. doi: 10.1111/j.1945-5100.2011.01259.x
10. Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S., Team HiRISE. New small impact craters in high resolution HiRISE images – III // 41th Lunar and Planetary Science Conference. 2010. Abstract 2020.

11. Burleigh K.J., Melosh H.J., Tornabene L.L., Ivanov B.A., McEwen A.S., Daubar, I.J. Impact airblast triggers dust avalanches on Mars // *Icarus*. 2012. V. 217 (1). P. 194–201. doi: 10.1016/j.icarus.2011.10.026
12. Adolfsson L.G., Gustafson B.Å., Murray C.D. The Martian atmosphere as a meteoroid detector // *Icarus*. 1996. V. 119 (1). P. 144–152. doi: 10.1006/icar.1996.0007
13. Baldwin B., Sheaffer Y. Ablation and breakup of large meteoroids during atmospheric entry // *Journal of Geophysical Research*. 1971. V. 76 (19). P. 4653–4668. doi: 10.1029/JA076i019p04653
14. Passey Q.R., Melosh H.J. Effects of atmospheric breakup on crater field formation // *Icarus*. 1980. V. 42 (2). P. 211–233. doi: 10.1016/0019-1035(80)90072-X
15. Popova O., Borovička J., Hartmann W.K., Spurný P., Gnos E., Nemtchinov I., Trigo-Rodríguez J.M. Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids // *Meteoritics & Planetary Science*. 2011. V. 46 (10). P. 1525–1550. doi: 10.1111/j.1945-5100.2011.01247.x
16. Popova O., Borovička J., Campbell-Brown M. Modelling the entry of meteoroids // Meteoroids, sources of meteor on Earth and beyond / G. Ryabova, D. Asher, M. Campbell-Brown (eds). New York : Cambridge University Press, 2019. P. 9–36.
17. Frost M.J. Size and spacial distribution in meteoritic showers // *Meteoritics*. 1969. V. 4 (3). P. 217–232. doi: 10.1111/j.1945-5100.1969.tb01270.x
18. Holsapple K.A., Housen K.R. A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact // *Icarus*. 2007. V. 191 (2). P. 586–597. doi: 10.1016/j.icarus.2006.08.035

References

1. Malin M.C., Edgett K.S., Posiolova L.V., McColley S.M., Noe Dobrea E.Z. (2006) *Catalog of New Impact Sites on Mars Formed May 1999–March 2006*. Malin Space Science Systems Inc.: San Diego, California.
2. Daubar I.J., McEwen A.S., Byrne S., Dundas C.M., Kennedy M., Ivanov B.A. (2010) The current Martian cratering rate. *41th Lunar and Planetary Science Conference*. Abstract 1978.
3. Daubar I.J., Banks M.E., Schmerr N.C., Golombek M.P. (2019) Recently formed crater clusters on Mars. *Journal of Geophysical Research*. 124(4). pp.958–969. doi: 10.1029/2018JE005857
4. 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. (2022) New Craters on Mars: An Updated Catalog. *Journal of Geophysical Research (Planets)*. 127(7). doi: 10.1029/2021JE007145
5. Hartmann W.K., Daubar I.J., Popova O.P., Joseph E.C.S. (2018) Martian cratering 12. Utilizing primary crater clusters to study crater populations and meteoroid properties. *Meteoritics & Planetary Science*. 53(4). pp. 672–686. doi: 10.1111/maps.13042
6. Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S., the HiRISE team (2014) New small impact craters in high resolution HiRISE images—IV. *45th Lunar and Planetary Science Conference*. Abstract 1812.
7. Podobnaya E.D., Popova O.P., Glazachev D.O. (2020) Ellipsy rasseyaniya dlya nedavno obrazovannykh klasterov kraterov na Marse [Scattering ellipses for fresh clusters of craters on Mars]. *Collection of scientific papers IDG RAS. Dynamic processes in geospheres*. 12. pp. 89–98. doi: 10.26006/IDG.2020.24.10.011
8. Podobnaya E.D., Popova O.P., Glazachev D.O. (2021) Trajectory estimation for fresh impacts on Mars. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. 51(3). pp. 241–248. doi: 10.31577/caosp.2021.51.3.241
9. Shuvalov V.V. (2011) Ejecta deposition after oblique impacts: An influence of impact scale. *Meteoritics & Planetary Science*. 46(11). pp. 1713–1718. doi: 10.1111/j.1945-5100.2011.01259.x
10. Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S., the HiRISE team (2010) New small impact craters in high resolution HiRISE images—III. *41th Lunar and Planetary Science Conference*. Abstract 2020.

11. Burleigh K.J., Melosh H.J., Tornabene L.L., Ivanov B.A., McEwen A.S., Daubar, I.J. (2012) Impact airblast triggers dust avalanches on Mars. *Icarus*. 217(1). pp. 194–201. doi: 10.1016/j.icarus.2011.10.026
12. Adolfsson L.G., Gustafson B.Å., Murray C.D. (1996) The Martian atmosphere as a meteoroid detector. *Icarus*. 119(1). pp. 144–152. doi: 10.1006/icar.1996.0007
13. Baldwin B., Sheaffer Y. (1971) Ablation and breakup of large meteoroids during atmospheric entry. *Journal of Geophysical Research*. 76(19). pp. 4653–4668. doi: 10.1029/JA076i019p04653
14. Passey Q.R., Melosh H.J. (1980) Effects of atmospheric breakup on crater field formation. *Icarus*. 42(2). pp. 211–233. doi: 10.1016/0019-1035(80)90072-X
15. Popova O., Borovička J., Hartmann W. K., Spurný P., Gnos E., Nemtchinov I., Trigo-Rodríguez J.M. (2011) Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids. *Meteoritics & Planetary Science*. 46(10). pp. 1525–1550. doi: 10.1111/j.1945-5100.2011.01247.x
16. Popova O., Borovicka J., Campbell-Brown M. (2019) Modelling the entry of meteoroids. In: *Meteoroids, Sources of Meteor on Earth and Beyond*. Cambridge University Press, New York. pp. 9–36.
17. Frost M.J. (1969) Size and spacial distribution in meteoritic showers. *Meteoritics*. 4(3). pp. 217–232. doi: 10.1111/j.1945-5100.1969.tb01270.x
18. Holsapple K.A., Housen K.R. (2007) A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact. *Icarus*. 191(2). pp. 586–597. doi: 10.1016/j.icarus.2006.08.035

Сведения об авторах:

Подобная Елена Дмитриевна – младший научный сотрудник Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия. E-mail: epodobnaya@gmail.com

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

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

Information about the authors:

Podobnaya Elena D. (Junior Researcher, Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation). E-mail: epodobnaya@gmail.com

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

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

Статья поступила в редакцию 09.06.2022; принята к публикации 01.12.2022

The article was submitted 09.06.2022; accepted for publication 01.12.2022