

## ОЦЕНКИ ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ НЕДАВНИХ ИМПАКТОВ НА МАРСЕ

Е. Д. Подобная, О. П. Попова, Д. О. Глазачев  
*Институт динамики геосфер РАН им. академика М. А. Садовского*

Анализ небольших кратеров и кластеров кратеров на Марсе дает возможность исследовать популяцию метеороидов, попадающих в атмосферу планеты, и изучать детали фрагментации метеороидов, которые трудно выявить в земных условиях. Ранее было предложено описание модели кластера с помощью эллипсов рассеяния, что позволяет определить параметры траектории ударника. Проведенное построение эллипсов рассеяния и сравнение с кратерными выбросами дает возможность оценить точность и выявляет некоторые проблемы этого подхода.

## TRAJECTORY ESTIMATION FOR FRESH IMPACTS ON MARS

E. D. Podobnaya, O. P. Popova, D. O. Glazachev  
*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS*

The study of small craters and crater clusters on Mars makes it possible to study the population of meteoroids that enter the planet's atmosphere, and to examine the details of meteoroid fragmentation that are hard to detect in terrestrial conditions. It was suggested earlier that the description of a cluster model with a scattering ellipse allows one to estimate the meteoroids' trajectory. Construction of scattering ellipses and comparison with crater ejecta gives an opportunity to evaluate the accuracy and find out some problems of this approach.

## Введение

В течение последних лет на Марсе было обнаружено около 700 недавно образовавшихся мест падения метеороидов [1–3], приведших к образованию одиночных кратеров и кратерных полей с размерами кратеров от 1 до 50 м.

Благодаря разреженной (в сравнении с Землей) атмосфере Марса падающие метеороиды меньше фрагментируют, но при этом около 50 % метеороидов разрушаются в марсианской атмосфере и образуют кратерные поля (скопления кратеров, кластеры кратеров) [2–4]. На Земле, как правило, метеороиды наблюдаются во время короткого пролета через атмосферу, и только в редких случаях их фрагменты находят в виде метеоритов. Оценки свойств метеороидов зависят от используемых моделей фрагментации, откалиброванных на относительно небольшом числе событий. Поскольку плотность поверхности у поверхности Марса соответствует примерно 30 км высоте в земной атмосфере, то кратерные поля рассеяния на поверхности Марса дают уникальную возможность увидеть результаты менее существенной фрагментации, нежели в случае земных условий. Анализ наблюдений земных суперболидов дает возможность предположить, что в 40–50 % случаев аналогичные объекты привели бы к образованию кратерных полей на Марсе [4].

## Эллипсы рассеяния

В данной работе использовались данные по 69 кратерным полям (кластерам), которые содержат от 4 до 465 отдельных кратеров [2, 3]. Минимальный размер кратеров в кластерах составляет около 1 м, что обусловлено разрешением используемых камер, максимальный размер — 25 м. Соотношения подобия связывают размер кратера с размером ударника [5] и дают возможность оценить размеры ударников с точностью до двух раз [6]. Большинство метеороидов, образовавших кластеры, довольно небольшие, 0,2–3 м в диаметре [6]. На Земле такие тела отслеживаются болидными сетями и спутниковой системой регистрации.

Характеристики поля рассеяния или кластер кратеров зависят от многих факторов, включая размер ударника, его прочность и прочность его фрагментов, плотность, характер разрушения и др. [7]. Исследование кластеров может дать возможность определить эти характеристики. Подбор минимального эллипса рассеяния — один из первых подходов к описанию кластеров. Опираясь на оценку параметров эллипса рассеяния, можно оценить азимут траектории метеороида и угол его входа в атмосферу [3].

Нами рассматривались различные методы поиска эллипса минимальной площади, описывающего кратерное поле рассеяния, из которых были выбраны два лучших по покрытию поля рассеяния. Первым является алгоритм поиска минимального покрывающего эллипса (*Minimal Volume Ellipsoid*) [8], использованный в предыдущих оценках [3]. Второй метод — построение эллипса, покрывающего заданное число точек в заданном наборе, с помощью специальной функции в программе *Wolfram Mathematica*. Оба метода были направлены на поиск минимального по площади эллипса, покрывающего 90 % кратеров в кластере, поскольку предполагается, что наблюдаемое количество кратеров может быть неполным ввиду погрешностей при получении данных. Данные методы применялись для 55 рассматриваемых кластеров, содержащих более пяти кратеров.

Полученные оценки сравнивались с ранее опубликованными результатами [3]. Все рассмотренные методы показывают примерно одинаковое значение азимута траектории метеороидов, образовавших рассматриваемые кластеры, различие составляет не более 15° в большинстве случаев. Угол входа метеороида в атмосферу определяется из отношения полуосей эллипса рассеяния, его оценки для различных методов отличаются не более чем на 15° от оценок, представленных в работе [3]. Сравнение эллипсов рассеяния (по числу покрываемых кратеров и по площади), полученных с помощью разных методов, показывает, что построенные эллипсы рассеяния примерно в 1.4–1.7 раза больше ранее опубликованных оценок [3].

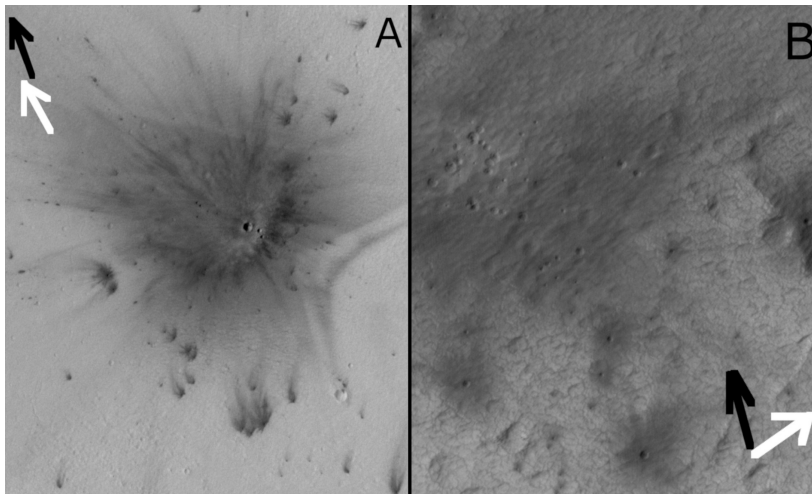
Алгоритмы построения эллипсов рассеяния были применены к данным о фрагментации двух метеороидов на Земле — метеоритов Озерки и Челябинск [6]. Было показано, что можно довольно точно оценить азимут и угол входа для крупных фрагментов при косом ударе, падение которых мало зависит от ветра. Поле рассеяния мелких фрагментов метеороида с почти вертикальной траекторией входа определяется в основном ветровым сносом.

## Выбросы из кратера

Выбросы из кратера в некоторых случаях дают возможность оценить направление полета. При косых ударах выбросы из образующегося кратера распределены асимметрично и более выражены по направлению полета [9]. Кроме того, в некоторых случаях для определения азимута можно использовать пылевые следы на поверхности Марса — параболические элементы, которые рассматриваются как поверхностные записи взаимодействия атмосферных ударных волн [10, 11]. Изображения Марса, представленные проектом HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment*), позволяют детально

рассмотреть выбросы кратеров для ряда кластеров и найти соответствующие направления азимутов.

Оценки азимутов по выбросам из кратеров были получены для 42 из 55 рассмотренных кластеров. Примеры сравнения траектории метеороида для двух различных кластеров показаны на рисунке.



Изображения, полученные проектом HiRISE для двух кластеров. Стрелки показывают направление полета метеороида, полученное с помощью эллипса рассеяния (черная стрелка) и по расположению выбросов из кратера (белая стрелка): А — кластер ESP\_024646\_1890; В — кластер ESP\_026009\_1920

Направление полета, определяемое выбросами, сравнивалось с оценками, полученными по эллипсам рассеяния. Кластер ESP\_024646\_1890 (рис. А) демонстрирует хорошую корреляцию оценок азимута: азимут, полученный по эллипсам рассеяния, составляет  $340^\circ$ , тогда как, исходя из расположения выбросов, направление полета составляет  $330^\circ$ . Оценки, полученные для кластера ESP\_026009\_1920 (рис. В), различаются на  $70^\circ$ , то есть полученные оценки направления полета расположены практически перпендикулярно.

Сравнение получившихся по выбросам из кратера оценок угла проекции траектории коррелирует с оценками этого угла, рассчитанными по эллипсу рассеяния для 80 % кластеров. Для половины из этих 80 % случаев направление полета не совпадает. В остальных 20 % кластеров выбросы направлены перпендикулярно большой оси эллипса рассеяния. Это показывает необходимость рассмотрения других методов определения направления полета. Следующим шагом будет моделирование полей рассеяния.

## Заклучение

Исследование кластеров может дать возможность определить различные характеристики метеороидов, включая размер ударника, характер его фрагментации, прочность и т. д. Одним из первых подходов к описанию кластера является построение эллипса рассеяния, полуоси которого, как предполагают [3], дают возможность оценить

азимут траектории метеороида и угол его входа в атмосферу. Использование различных алгоритмов построения эллипса рассеяния показало хорошее совпадение параметров эллипсов рассеяния (площадь и процент покрытия кластера) оценок параметров входа метеороидов в атмосферу (угол входа и азимут) с первоначальной оценкой [3]. Применение этих же методов к земным полям рассеяния двух недавних падений метеороитов показало, что возможности оценки азимута и угла входа по эллипсу рассеяния сильно ограничены. Сопоставление азимутов траекторий, полученных по эллипсам рассеяния для марсианских кратеров, с направлениями полета метеороида, оцененными по выбросам из кратера, показало, что между ними возможны значительные расхождения. Требуется дальнейшие исследования для получения более точных оценок траектории метеороидов и других их свойств.

## Библиографические ссылки

- [1] *Malin M. C., Edgett K. S., Posiolova L. V. et al.* Catalog of new impact sites on Mars formed May 1999–March 2006. Malin Space Science Systems. — Inc., San Diego, California. — 2006. [https://www.msss.com/mars\\_images/moc/2006/12/06/craters/Crater\\_Catalog\\_2006.pdf](https://www.msss.com/mars_images/moc/2006/12/06/craters/Crater_Catalog_2006.pdf).
- [2] *Daubar I. J., McEwen A. S., Byrne S. et al.* The Current Martian Cratering Rate // 41st Annual Lunar and Planetary Science Conference : Lunar and Planetary Science Conference. — 2010. — P. 1978.
- [3] *Daubar I. J., Banks M. E., Schmerr N. C., Golombek M. P.* Recently formed crater clusters on Mars // *J. Geophys. Res.* — 2019. — Vol. 124, № 4. — P. 958–969.
- [4] *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. — Vol. 53, № 4. — P. 672–686.
- [5] *Holsapple K. A., Housen K. R.* A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact // *Icarus.* — 2007. — Vol. 191, № 2. — P. 586–597.
- [6] *Подобная Е. Д., Попова О. П., Глазачев Д. О.* Эллипсы рассеяния для недавно образованных кластеров кратеров на Марсе. — 2020.
- [7] *Ivanov B. A., Melosh H. J., McEwen A. S., HiRISE Team.* Small Impact Crater Clusters in High Resolution HiRISE Images // 39th Annual Lunar and Planetary Science Conference : Lunar and Planetary Science Conference. — 2008. — P. 1221.
- [8] *Öliker N., Ostfeld A.* Minimum volume ellipsoid classification model for contamination event detection in water distribution systems // *Environmental modelling & software.* — 2014. — Vol. 57. — P. 1–12.
- [9] *Shuvalov V. V.* Ejecta deposition after oblique impacts: An influence of impact scale // *Meteoritics & Planetary Science.* — 2011. — Vol. 46, № 11. — P. 1713–1718.
- [10] *Ivanov B. A., Melosh H. J., McEwen A. S., HiRISE Team.* New Small Impact Craters in High Resolution HiRISE Images - III // 41st Annual Lunar and Planetary Science Conference : Lunar and Planetary Science Conference. — 2010. — P. 2020.
- [11] *Burleigh K. J., Melosh H. J., Tornabene L. L. et al.* Impact airblast triggers dust avalanches on Mars // *Icarus.* — 2012. — Vol. 217, № 1. — P. 194–201.