

УДК 523.681.8

ЭЛЛИПСЫ РАССЕЙНИЯ ДЛЯ РАСШИРЕННОГО КАТАЛОГА НЕДАВНИХ МЕСТ ПАДЕНИЯ НА МАРСЕ

© 2025 г. Е. Д. Подобная*, О. П. Попова, Д. О. Глазачев

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: epodobnaya@idg.ras.ru*

За последние десятилетия на Марсе было обнаружено около 1400 мест недавних падений метеороидов, образовавших одиночные кратеры и кратерные поля рассеяния, с размерами кратеров до 70 м. Благодаря более разреженной (по сравнению с Землей) атмосфере Марса, метеороиды, входящие в атмосферу, меньше разрушаются. Тем не менее, около половины из них разрушаются в атмосфере и образуют кратерные кластеры. Исследование кластеров на Марсе позволяет изучать детали фрагментации космических тел, которые не могут быть обнаружены в земных условиях. Считается, что описание кластера с помощью эллипса рассеяния позволяет оценить параметры траектории метеороидов: угол входа в атмосферу и азимут. В работе рассмотрены эллипсы рассеяния для 105 кластеров. Для 89 из них независимые оценки направления полета были сделаны по выбросам из кратеров, в 54–56 случаях (в зависимости от метода построения эллипса рассеяния) кратерные выбросы ориентированы вдоль главной оси эллипса рассеяния, направление полета совпадает в 29–32 случаях. Для остальных кластеров направление кратерных выбросов ориентировано вдоль малой оси эллипса рассеяния вопреки интуитивным ожиданиям.

Ключевые слова: Марс, кластер кратеров, космические тела, эллипсы рассеяния, направление полета.

Для цитирования: Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О. Эллипсы рассеяния для расширенного каталога недавних мест падения на Марсе // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 1. С. 57–64. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_1_57

1. Введение

На Земле космические объекты диаметром в несколько метров обычно наблюдаются во время короткого пролета через атмосферу; большая часть их массы остается в атмосфере из-за разрушения и абляции, в редких случаях их фрагменты находят на поверхности планеты в качестве метеоритов. Плотность атмосферы у поверхности Марса соответствует плотности земной атмосферы на высоте примерно 30 км. Из-за более разреженной атмосферы Марса метеороиды метрового масштаба только примерно в половине случаев разрушаются и образуют кратерные кластеры [Daubar et al., 2013; 2019; 2022; Hartmann et al., 2018].

В начале 2000-х годов повторные съемки одних и тех же участков марсианской поверхности камерой Mars Orbiter Camera позволили обнаружить 20 свежесформированных мест падения космических тел [Malin et al., 2006]. В дальнейшем повторная съемка поверхности и поиск новых мест падения проводились в рамках проекта HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment*) с 2006 по лето 2023 гг. [McEwen et al., 2023]. С июля 2023 г. возникли технические проблемы со съемкой, из-за чего в середине изображения образовался пробел, на данный момент детальная съемка «новых» кратеров возможна на $\approx 75\%$ ширины рабочего кадра и непонятно, будет ли восстановлено полноценное функционирование. Места падений считаются «новыми», если орбитальные снимки ограничивают время их формирования: другими словами, существует не только снимок, показывающий область удара, но и хотя бы один предыдущий снимок до удара в этом месте [Daubar et al., 2022]. Принадлежность кратеров к кластеру определяется по

их расположению в зоне удара (обычно выделяемой по альбедо на снимке), характерной свежей морфологии кратеров и совпадающему направлению выбросов [Daubar et al., 2022].

На данный момент имеются данные о более чем 1400 недавно сформированных местах падения метеороидов на поверхности Марса (рис. 1). К ранее опубликованным данным (1203 места падения [Daubar et al., 2022; Neidhart et al., 2023]) мы добавили 243 новых места падения. Каталог, включающий все найденные свежие места падения, будем называть расширенным каталогом. Часть из ранее опубликованных данных была дополнена мелкими кратерами диаметром 0.7–1 м. В данной работе рассматриваются кластеры из расширенного каталога, для которых имеются данные о размере и расположении кратеров в кластерах (1337 мест падения [Подобная и др., 2023]). Размер максимального кратера в кластере варьируется от 1 до 73 м. Самый густонаселенный кластер содержит 2334 кратера, в среднем в кластер входит 26 кратеров (медиана – 11 кратеров). Среднее попарное расстояние между кратерами характеризует размер кластера и варьируется от 2 м до 2 км (среднее значение 90 м, медианное – 60 м) [Daubar et al., 2022], расширение каталога не изменило средний размер кластера.

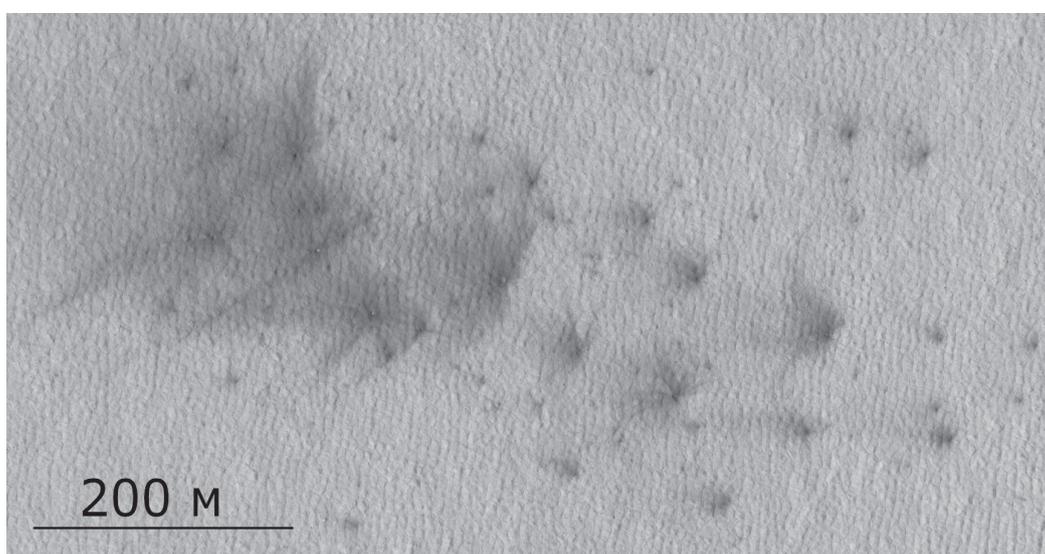


Рис. 1. Пример кластера PSP_009978_2265 (26 кратеров размером от 5 до 1 м)

Для описания полей рассеяния и оценки параметров входа космических объектов в атмосферу (угол входа и азимут) ранее было предложено [Daubar et al., 2019] использовать эллипсы рассеяния – эллипс минимальной площади, покрывающий 90% кратеров в кластере. Другим способом оценки направления полета метеороида является определение направления кратерных выбросов на изображениях кластеров [Burleigh et al., 2012; Ivanov et al., 2010].

Разрушение метеороидов – сложный и многоступенчатый процесс, оценка траектории космического тела и изучение расположения кратеров внутри кластеров позволяют получить информацию о процессе разрушения. Поле рассеяния метеоритов или кластер кратеров зависят от многих факторов, включая размер ударника, его прочность и прочность его фрагментов, плотность, характер разрушения и других [Ivanov et al., 2008]. Исследование кластеров может дать возможность определить эти характеристики; построение эллипсов рассеяния – один из основных способов описания кластеров.

Целью данной работы является сравнение различных способов определения траектории полета ударников, образовавших рассматриваемые места падения. В разделе 2 приведена оценка направления полета, основанная на построенных эллипсах рассеяния, в разделе 3 обсуждается сравнение этих оценок с направлением полета, полученным по выбросам из кратеров, в разделе 4 рассматриваются полученные оценки угла входа в атмосферу.

2. Эллипсы рассеяния

В настоящей работе рассматриваются эллипсы рассеяния, построенные двумя методами [Подобная и др., 2020] для 105 кластеров из расширенного каталога, содержащих более 4 кратеров (рис. 2). Первый способ построения эллипсов – MVE – повторяет алгоритм Хачияна [Oliker, Ostfeld, 2014], используемый Daubar et al. (2019), дополненный процедурой бутстрэппинга [Efron, Tibshirani, 1986], позволяющей усреднить эллипс (путем построения множества случайных эллипсов, описывающих данные [Подобная и др., 2020]) и, тем самым, компенсировать возможную неполноту данных. Следующий метод Stat (*Wolfram Language & System Documentation Center*) – статистический эллипс, встроенный в пакет данных *Wolfram Mathematica* (описывающий 90% точек), полученный с помощью квантиля из многомерного нормального распределения [Paindaveine, Šiman, 2012]. Ранее было показано, что эллипсы, построенные данными методами, имеют примерно равную площадь и процент описываемых точек [Подобная и др., 2020].

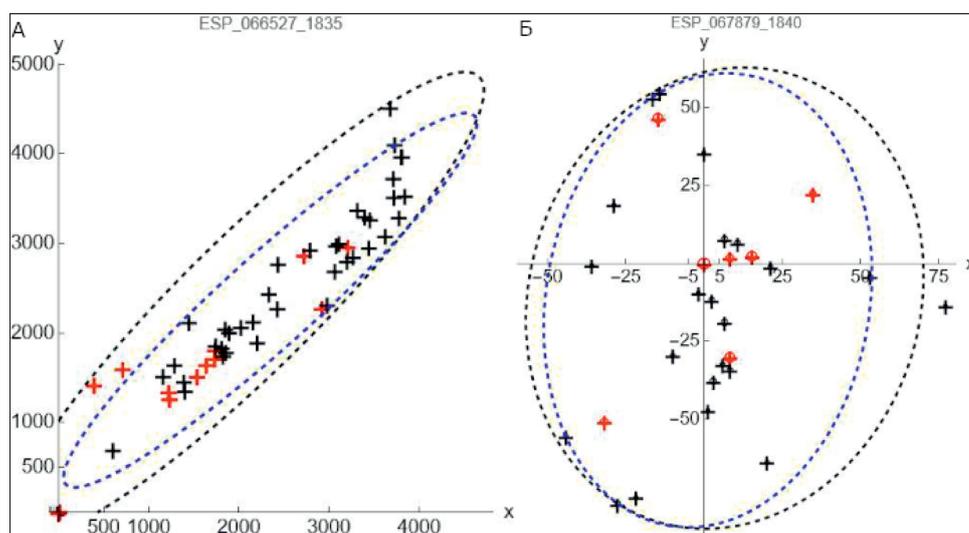


Рис. 2. Эллипсы минимальной площади, покрывающие 90% кратеров в кластере, построенные двумя различными способами: черный – метод MVE, синий – Stat. Плюсами показано расположение центров кратеров внутри кластера, красным отмечены кратеры, входящие в квантили; А – ESP_066527_1835 (52 кратера), Б – ESP_067879_1840 (29 кратеров)

Ориентация траектории ударника в пространстве определяется углом входа (угол между траекторией ударника и вертикалью) и азимутом (наклон проекции траектории на плоскости). Азимут отсчитывается от направления на север по часовой стрелке и указывает направление откуда летит метеороид. Угол входа метеороида в атмосферу определялся по соотношению осей эллипса рассеяния, азимут оценивался по наклону главной оси эллипса [Daubar et al., 2019]. Направление полета оценивалось двумя различными методами: по расположению максимального кратера (центра эллипса) относительно точки пересечения осей, а также исходя из того, с какой стороны от центра эллипса находится большее количество кратеров из первого квантиля (четверть наибольших кратеров в кластере). Такой выбор направления связан с тем, что в земных условиях атмосферная сортировка фрагментов приводит к расположению крупных кратеров/фрагментов в голове поля рассеяния [Frost, 1969].

Для обоих видов эллипсов направление полета, полученное различными методами, совпадает почти в 90% случаев. Оценки угла проекции траектории (азимут без направления) для MVE и Stat эллипсов совпадает с точностью до 15° в 94% случаев, для остальных кластеров отличается направление полета.

3. Выбросы из кратера и направление полета

Выбросы из кратера позволяют оценить направление полета в некоторых случаях. При косых ударах кратерные выбросы асимметричны и более выражены в направлении полета [Shuvalov, 2011]. Изображения, сделанные камерой HiRISE, предоставляют возможность детально рассмотреть кратерные выбросы [Burleigh et al., 2012; Ivanov et al., 2010] для 89 из 105 рассматриваемых кластеров.

Направление полета, определенное по выбросам, определялось приближенно, с точностью $\pm 30^\circ$, затем результаты сравнивались с оценками, полученными по эллипсам рассеяния, в которых направление полета определялось исходя из расположения наибольшего кратера. В связи с тем, что результаты применения обоих методов определения направления полета близки, сравнение проводилось только с результатами, полученными одним методом. Примеры сравнения оценок траекторий метеороидов для двух кластеров приведены на рис. 3.

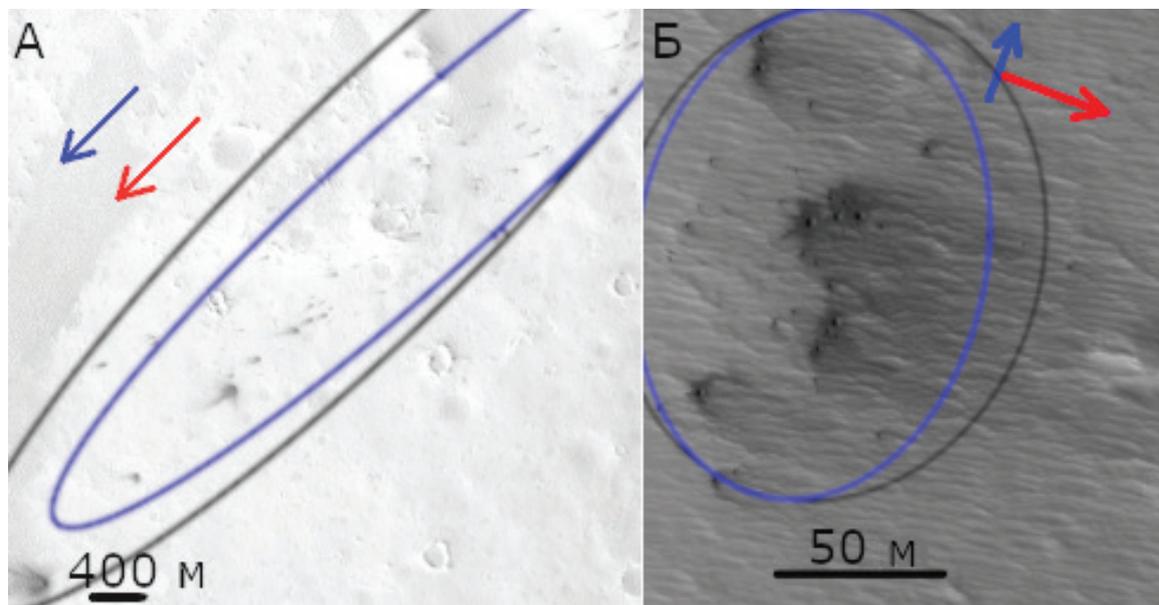


Рис. 3. Изображения HiRISE для двух кластеров и построенные для них эллипсы рассеяния (черный – MVE, синий – Stat). Стрелками показано направление полета метеороида по эллипсам рассеяния: синие стрелки – для продемонстрированных эллипсов углы наклона совпадают с точностью до $\approx 5^\circ$, и исходя из расположения кратерных выбросов – красные стрелки. А – ESP_066527_1835 (52 кратера, оценки направления полета совпадают). Б – ESP_067879_1840 (29 кратеров, оценки направления полета перпендикулярны)

Азимут, полученный по выбросам из кратера, согласуется с рассчитанным по эллипсам рассеяния только в 34–36% в зависимости от используемого эллипса рассеяния (с точностью до 45° , рис. 3А), В 27% случаев направления полета противоположны ($180^\circ \pm 45^\circ$). В оставшихся 39–37% случаев направления перпендикулярны, выброс направлен вдоль малой оси эллипса рассеяния (т.е. поперек поля рассеяния, рис. 3Б).

Ранее такое же сравнение азимутов было проведено для другой выборки кластеров (41 кластер [Podobnaya et al., 2021]). Для объединенной выборки из 130 кластеров азимут траектории соответствующих метеороидов совпадает с направлением кратерных выбросов в 33–35% (в зависимости от типа эллипса) и для 32–30% оказывается – противоположным. В оставшихся 35% случаях направление кратерных выбросов перпендикулярно азимуту, полученному по эллипсам рассеяния. Ранее полученные оценки согласуются с полученными в данной работе.

Оценки направления полета по эллипсам рассеяния (использовались результаты, в которых направление полета определялось исходя из положения максимального кратера) охватывают весь диапазон возможных направлений (рис. 4А).

Рассматриваемые в данной работе кластеры с 4 и более кратерами составляют лишь часть от всех кратеров и кратерных полей на Марсе, что не дает возможности оценить распределение направления траектории метеороидов по азимуту, но предоставляет возможность сравнить оценки азимутов, полученные для исследуемых кластеров различными способами. Распределение оценок направления полета, оцененное по кратерным выбросам (рис. 4Б), заметно отличается от распределения,

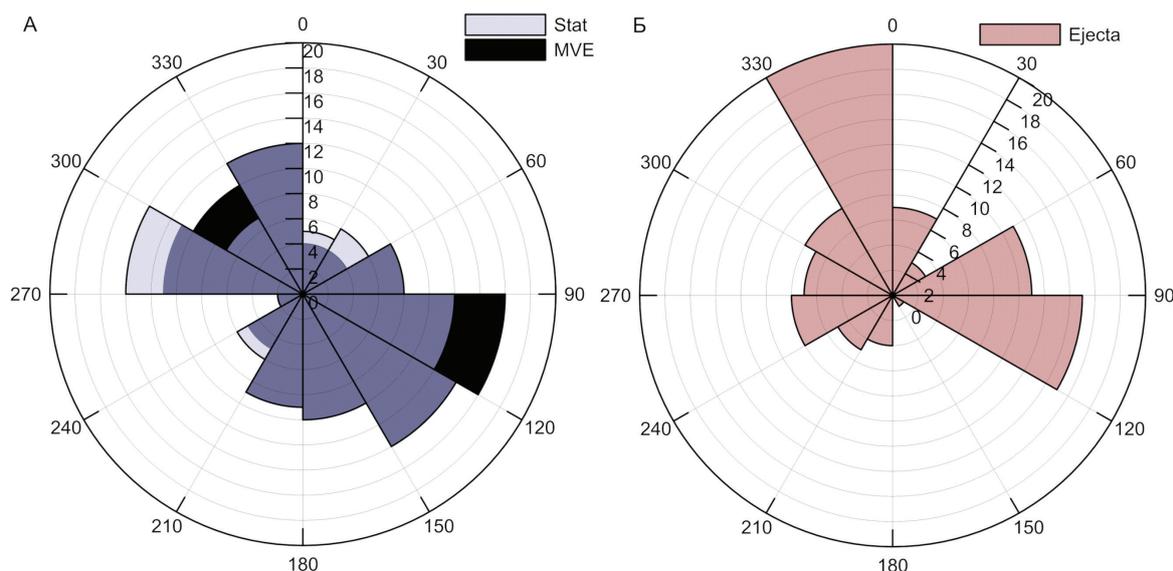


Рис. 4. Оценки частоты встречаемости азимута, соответствующего рассматриваемым кластерам: А – по эллипсам рассеяния (черная сплошная закрапка соответствует MVE эллипсам, синяя заштрихованная – Stat); Б – по направлению выбросов, что, вероятно, является более достоверной оценкой направления полета

полученного по эллипсам рассеяния (рис. 4А). Направление полета, оцененное по кратерным выбросам, распределено неравномерно, присутствует большое количество случаев с азимутом 330°–360°, наблюдается пробел в данных 120°–180°. Как было сказано ранее, оценки азимута по эллипсам рассеяния и по направлению кратерных выбросов плохо согласуются, совпадают примерно в трети случаев. Для пар кратеров было показано, что в некоторых случаях кратерные выбросы могут быть направлены в противоположном направлении, чем были бы должны при атмосферной сортировке (от наибольшего кратера к меньшему). Вероятно оценки, полученные по кратерным выбросам, более достоверны, поскольку атмосферная сортировка на Марсе выражена гораздо слабее, чем в земных условиях. Расположение кратеров определяется взаимодействием фрагментов при разрушении, что согласуется с результатами численного моделирования.

4. Угол входа

Предполагается, что описание кратерного поля эллипсом рассеяния позволяет также оценить угол входа в атмосферу метеороида, образовавшего кластер [Daubar et al., 2019].

Распределение углов входа метеороида в атмосферу описывается законом $\sin(2\alpha)$ с наиболее вероятным значением $\alpha = 45^\circ$ [Love, Brownlee, 1991]. На рис. 5 приведены оценки угла входа в атмосферу, полученные для рассматриваемых эллипсов рассеяния. Угол входа α отсчитывался от вертикали и варьируется от 0° до 90°. Наши оценки показывают дефицит близких к вертикальным углов входа и смещение максимума распределения в сторону углов 60°–70°. Оценки, сделанные ранее по 55 кластерам [Daubar et al., 2019], показывают аналогичный сдвиг распределения. Следует отметить, что в предыдущих оценках [Daubar et al., 2019] отсутствуют углы входа в атмосферу менее 40°, тогда как наши оценки для 11 кластеров имеют углы входа 10°–40°. Daubar et al. (2019) предполагают, что дефицит близких к вертикальным углов входа в атмосферу может быть связан с несколькими факторами: наблюдательная погрешность (косые удары образуют более яркий пылевой след, по которому и определяется принадлежность кратеров к кластеру, а почти вертикальные удары имеют меньший пылевой след); при косом входе метеороиды испытывают большее аэродинамическое напряжение благодаря более длинному пролету через атмосферу. Последнее предположение кажется недостаточно обоснованным. Возможно, сама оценка угла входа по соотношению полуосей эллипсов неточна.

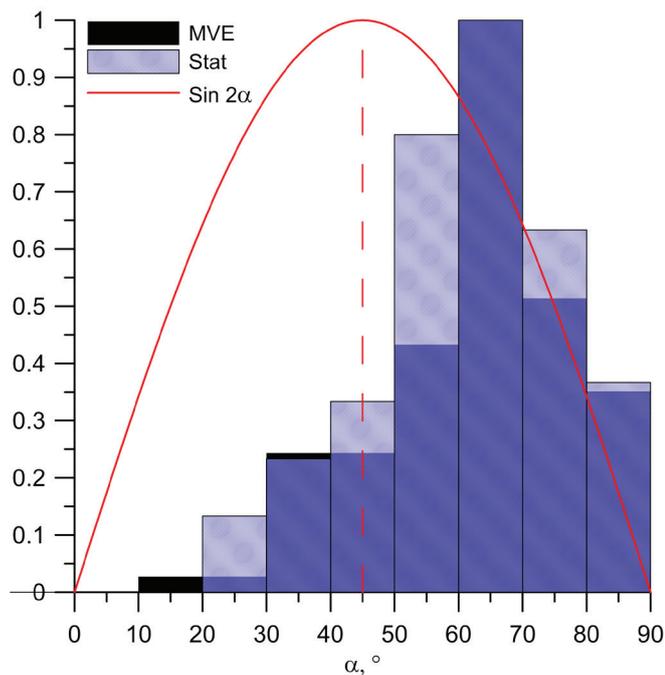


Рис. 5. Сравнение оценок угла входа в атмосферу (угол отсчитывается от вертикали), полученное для двух методов расчета эллипсов рассеяния (полупрозрачный синий – Stat метод, черный – MVE, ярко синий получается при наложении данных), нормированное на максимальное количество случаев для каждого метода. Красная кривая соответствует распределению углов входа метеороида в атмосферу [Love, Brownlee, 1991] с наиболее вероятным значением $\alpha = 45^\circ$ (красная пунктирная линия)

5. Заключение

Эллипсы рассеяния были использованы для описания недавних кратерных полей на Марсе. Предполагается, что такое описание позволяет оценить направление полета метеороида, сформировавшего кластер, а также угол входа в атмосферу.

Два метода построения эллипсов были использованы для 105 кластеров из расширенного каталога [Подобная и др., 2020; Podobnaya et al., 2021] мест падения метеороидов на Марсе, содержащих более 4 кратеров. Наклон главной оси эллипсов рассеяния позволил получить проекцию траектории на горизонтальную плоскость, направление полета метеороида определялось двумя способами – по расположению максимального кратера и наибольших кратеров в кластере, которые показали совпадение в большинстве случаев. Оба использованных метода дают примерно одинаковое значение азимута траектории метеороида (разброс в большинстве случаев не превышает 15°). Для небольшого количества случаев (6%) разные методы построения эллипсов показывают одинаковый угол наклона главной оси, но оценка направления полета отличается на 180° .

Для 89 кластеров азимут траектории метеороида был определен по выбросам из кратеров. В более 60% случаев кратерные выбросы ориентированы вдоль главной оси эллипса рассеяния (с точностью 45°), направление полета совпадает с оценкой, полученной по кратерным выбросам примерно в 35%. В оставшихся случаях направление кратерных выбросов направлено вдоль малой оси эллипса рассеяния. Несогласованность оценок азимута, полученных по эллипсам рассеяния и по кратерным выбросам показывает, что роль атмосферной сортировки на Марсе мала, в отличие от земных условий.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-27-00432).

Список литературы

Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О. Эллипсы рассеяния для недавно образованных кластеров кратеров на Марсе // Динамические процессы в геосферах. 2020. Т. 12. С. 89–98. <https://doi.org/10.26006/IDG.2020.24.10.011>

Подобная Е.Д., Попова О.П., Иванов Б.А., Глазачев Д.О. Классификация обновленного каталога недавних мест падения на Марсе // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 4. С. 72–82. https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_4_72

- Burleigh K.J., Melosh H.J., Tornabene L.L., Ivanov B., McEwen A.S., Daubar I.J.* Impact airblast triggers dust avalanches on Mars // *Icarus*. 2012. Vol. 217 (1). P. 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.10.026>
- Daubar I.J., McEwen A.S., Byrne S., Kennedy M.R., Ivanov B.* The current Martian cratering rate // *Icarus*. 2013. Vol. 225. P. 506–516. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.04.009>
- Daubar I.J., Banks M.E., Schmerr N.C., Golombek M.P.* Recently formed crater clusters on Mars // *Journal of Geophysical Research (Planets)*. 2019. Vol. 124 (4). P. 958–969. <https://doi.org/10.1029/2018JE005857>
- Daubar I.J., Dundas C.M. and 16 coauthors.* New Craters on Mars: An Updated Catalog // *Journal of Geophysical Research (Planets)*. 2022. Vol. 127. P. e2021JE007145. <https://doi.org/10.1029/2021JE007145>
- Efron B., Tibshirani R.* Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy // *Statistical Science*. 1986. Vol. 1 (1). P. 54–75. <https://doi.org/10.1214/ss/1177013815>
- Frost M.J.* Size and spacial distribution in meteoritic showers // *Meteoritics*. 1969. Vol. 4 (3). P. 217–232. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1969.tb01270.x>
- Hartmann W.K., Daubar I.J., Popova O., Joseph E.C.S.* Martian cratering 12. Utilizing primary crater clusters to study crater populations and meteoroid properties // *Meteoritics & Planetary Science*. 2018. Vol. 53. P. 672–686. <https://doi.org/10.1111/maps.13042>
- Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S.* HIRISE Team. Small impact crater clusters in high resolution HiRISE images: Lunar and Planetary Science Conference. LPI Contribution. 2008. No. 1221. P. 1391.
- Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S.* HiRISE Team. New Small Impact Craters in High Resolution HiRISE Images – III.: Lunar and Planetary Science Conference. LPI Contribution. 2010. No. 1533. P. 2020.
- Love S.G., Brownlee D.E.* Heating and thermal transformation of micrometeoroids entering the Earth's atmosphere // *Icarus*. 1991. Vol. 89 (1). P. 26–43. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90085-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90085-8)
- Malin M.C., Edgett K.S., Posiolova L.V., McColley S.M., Dobreá E.Z.N.* Present-day impact cratering rate and contemporary gully activity on Mars // *Science*. 2006. Vol. 314. P. 1573–1577. <https://doi.org/10.1126/science.1135156>
- McEwen A.S. and 30 coauthors.* The high-resolution imaging science experiment (HiRISE) in the MRO extended science phases (2009–2023) // *Icarus*. 2023. Vol. 419. P. 115795. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115795>
- Neidhart T., Sansom E.K., Miljković K., Collins G.S., Eschenfelder J., Daubar I.J.* Diversity of new Martian crater clusters informs meteoroid atmospheric interactions // *Journal of Geophysical Research (Planets)*. 2023. Vol. 128 (4). P. e2022JE007611. <https://doi.org/10.1029/2022JE007611>
- Oliker 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. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.03.011>
- Paindaveine D., Šiman M.* Computing multiple-output regression quantile regions // *Computational Statistics & Data Analysis*. 2012. Vol. 56 (4). P. 840–853. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2010.11.014>
- Podobnaya E.D., Popova O.P., Glazachev D.O.* Trajectory estimation for fresh impacts on Mars // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. 2021. Vol. 51 (3). P. 241–248. <https://doi.org/10.31577/caosp.2021.51.3.241>
- Shuvalov V.* Ejecta deposition after oblique impacts: An influence of impact scale // *Meteoritics & Planetary Science*. 2011. Vol. 46 (11). P. 1713–1718. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01259.x>
- Wolfram Language & System Documentation Center – справочная информация – URL: <https://reference.wolfram.com/language/MultivariateStatistics/ref/EllipsoidQuantile.html> (дата обращения: 29.11.2024)

SCATTERING ELLIPSES FOR AN EXTENDED CATALOGUE OF RECENT IMPACT SITES ON MARS

© 2025 E. Podobnaya*, O. Popova, D. Glazachev

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

**E-mail: epodobnaya@idg.ras.ru*

Over the past decades, about 1.400 recent meteoroid impact sites have been discovered on Mars, which include single craters and crater scattering fields, with crater sizes up to 70 m. Due to the more rarefied (in comparison with Earth) atmosphere of Mars, meteoroids entering the atmosphere are less destroyed. Nevertheless, about half of them fragment in the atmosphere and form crater clusters. Study of crater clusters on Mars reveals details of cosmic body fragmentation that cannot be detected in terrestrial conditions. Earlier it was suggested that the description of a cluster by an ellipse allows ones to estimate the parameters of the meteoroid trajectory, the entry angle and azimuth. In this paper, scattering ellipses for 105 clusters are considered. Independent estimates of the flight direction were made for 89 of these clusters using crater ejecta; in 54–56 cases (depending on the method of the ellipse constructing), the crater ejecta are oriented along the main axis of the scattering ellipse; the flight direction coincides in 29–32 cases. For the remaining clusters, crater ejecta are oriented along the minor axis of the scattering ellipse, counterintuitively.

Keywords: Mars, crater cluster, cosmic bodies, scattering ellipses, flight direction.