

Введение

Скорость разлета фрагментов при разрушении определяет размер поля рассеяния метеоритов и/или размер кратерного поля. Эта скорость v_T возникает в момент разрушения за счет взаимодействия ударных волн фрагментов и определяется как

$$V_T = C * V * (\rho_{atm} / \rho_{proj})^{0.5}$$

где C - коэффициент, определяющий величину скорости поперечного разлета V_T , V - скорость метеороида, ρ_{atm} - плотность атмосферы, ρ_{proj} - плотность ударника (Passey&Melosh 1989).

Коэффициент пропорциональности C , входящий в эту зависимость, оценивается разными способами с большой неопределенностью. Оценка для разлета поперек траектории впервые была предложена в работе (Passey&Melosh 1989) при анализе разброса земных кратеров, коэффициент C был оценен как 0,02-1,52 с наиболее вероятным значением $C=1,2$. При газодинамическом моделировании разрушения на два одинаковых фрагмента коэффициент C был оценен как $C=0,4$ (Artemieva&Shuvalov 2001). Для земных метеороидов и полей рассеяния метеоритов как правило принимают значение $C=1$ (Porova et al. 2003, 2007). Оценка скорости разлета фрагментов метеорита Моравка показала, что для части фрагментов значение коэффициента C должно превышать 1 (Borovička&Kalenda 2003). Коэффициент C для пар марсианских кратеров был оценен как $C=0,9-1,5$ (в зависимости от плотности ударника) (Ivanov et al. 2014), при предположении вертикального входа в атмосферу и оптимальной высоты разрушения. Collins et al. (2022) предложили увеличить коэффициент до 1,8 при рассмотрении кластеров на Марсе, число кратеров в которых больше пяти.

Пары кратеров на Марсе

В настоящее время опубликованы подробные данные для более чем 1200 недавних датированных мест падения метеороидов на Марсе (Daubar et al. 2022; Niedhart et al. 2023; Подобная и др. 2023), среди которых около 70 пар кратеров. Для 17 из них размеры кратеров близки друг другу (Рисунок 1). Близкие по размеру пары кратеров представляют наиболее неосложненный случай разрушения метеороида на два фрагмента, и являются идеальными наблюдательными данными для сравнения с теоретическими оценками.

Близкими мы считали кратеры с разницей в диаметрах не более 20% (для большинства вариантов разница не более 15%, что соответствует разнице в массах не более 50%). В этом случае фрагменты фактически одинаково движутся и тормозятся в атмосфере, и небольшими различиями можно пренебречь.

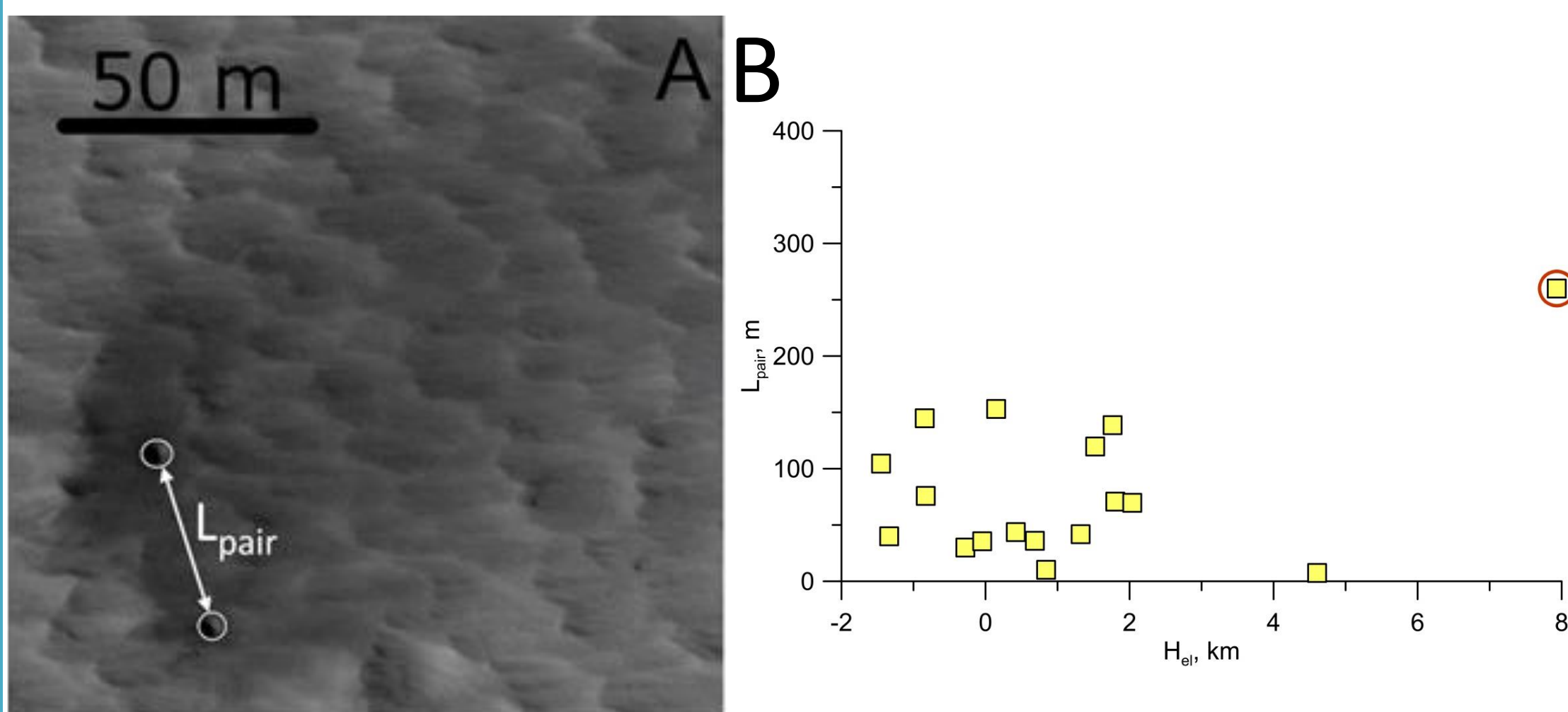
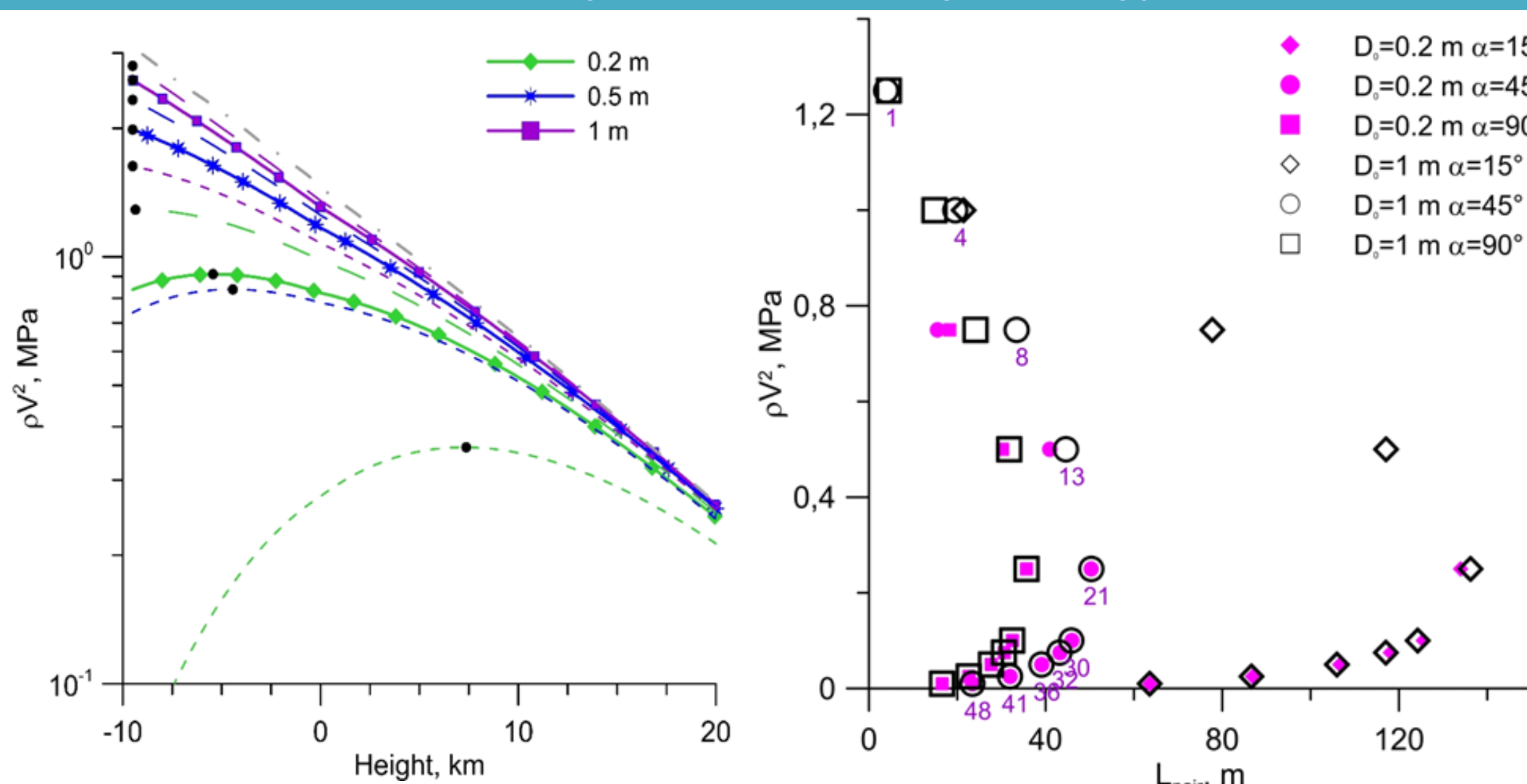


Рисунок 1. (А) почти равная пара кратеров (ESP_038396_2000) с $D_1=4,7$ м и $D_2=3,9$ м, расстояние между кратерами около 36 м; (В) Зависимость расстояния L_{pair} между почти равными кратерами от высоты над средней поверхностью Марса H_{el} . Случай, который не является парой кратеров дополнительно отмечен кружком.

Некоторые особенности разлета фрагментов

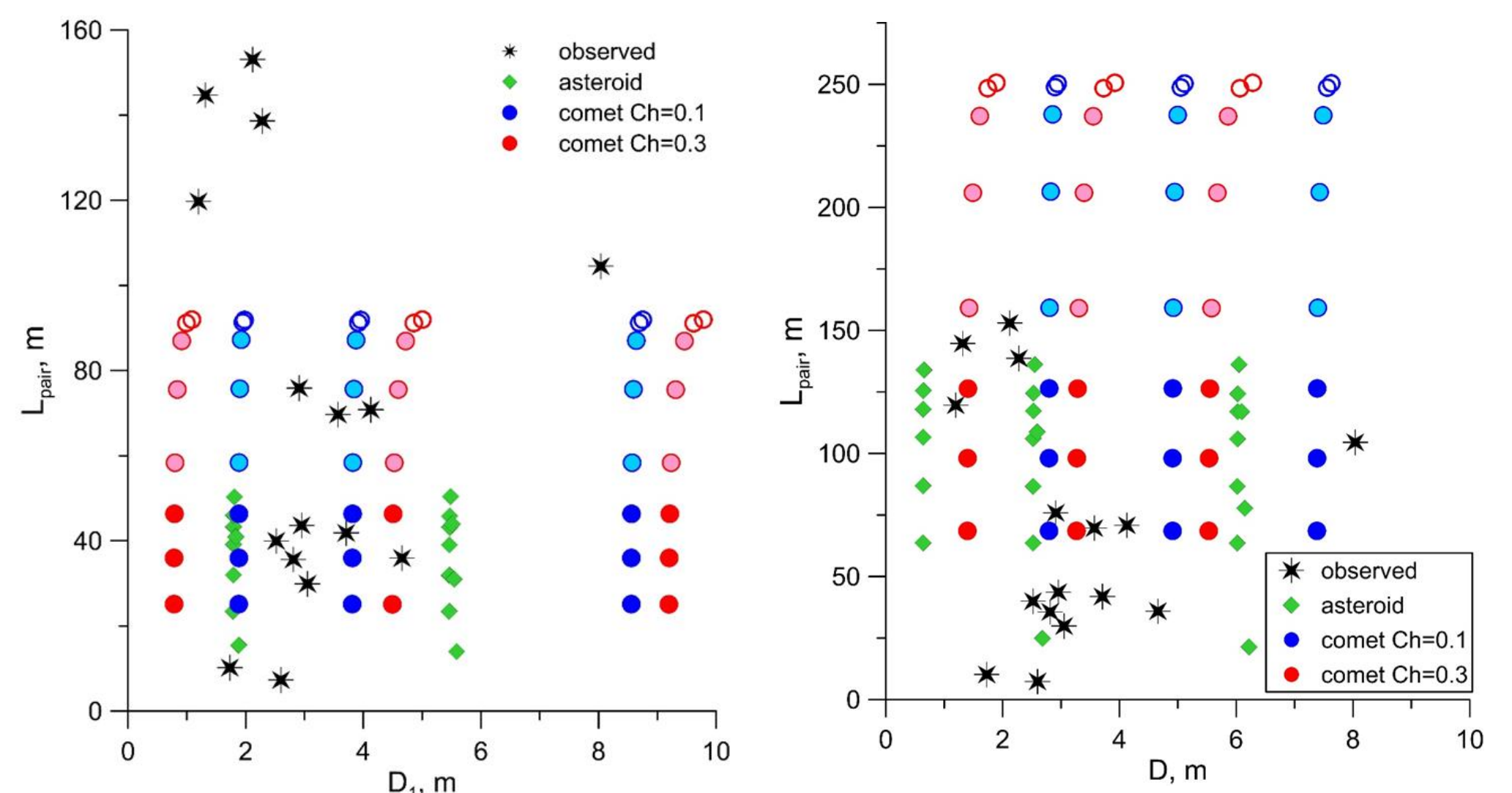


Аэродинамическая нагрузка в зависимости от высоты полета для астероидов размером 0,2-1 м и угла входа 45° (сплошные кривые с символами), 90° (длинный пунктир) и 15° (короткий пунктир). Черные точки - максимальная аэродинамическая нагрузка. Точечная пунктирная линия - без учета торможения.

Зависимость расстояния между кратерами от прочности каменного метеороида для различных углов входа и двух размеров. Соответствующие высоты фрагментации (в км) отмечены для ударника 1 м при угле входа 45° .

На Земле расположение метеоритных фрагментов/кратеров вдоль проекции траектории определяется атмосферной сортировкой, самый крупный фрагмент/кратер находится в голове поля рассеяния/кратерного поля (Frost 1969). Для равных пар кратеров/равных фрагментов атмосферная сортировка отсутствует, поэтому наблюдаемый разброс кратеров вызван только взаимодействием фрагментов. Для большинства кратеров этой группы расстояние между парами колеблется в пределах 7-76 м. Приведенная зависимость расстояния L_{pair} от прочности показывает, что в большинстве случаев расстояние между парами можно воспроизвести без специальных предположений. Есть пары кратеров с $L_{pairs} \sim 105-153$ м, что требует более пристального внимания. Есть экстремальный случай с $L_{pairs} \sim 260$ м, но дополнительный анализ изображения показывает, что это одиночный удар, а не пара.

Пары равных кратеров



Межкратерное расстояние L_{pair} в зависимости от размера большего кратера D_1 . Наблюдаемые пары показаны черными звездами, астероиды (размеры импакторов 0,2 и 0,5 м, $V=10$ км/с, 3320 кг/м³) - зелеными ромбиками; обычные кометы (размеры 0,75, 1 и 1,5 м; $V=20$ км/с; 1000 кг/м³) и мягкие кометы (размеры 2, 2,5 и 3 м; $V=20$ км/с; 1000 кг/м³) - синими и красными кружками. Для комет сплошные символы соответствуют прочности $\sigma \leq 0,05$ МПа, полупрозрачные - прочности $0,05$ МПа $\leq \sigma \leq 0,5$ МПа, а пустые - $0,5$ МПа $\leq \sigma \leq 1$ МПа. Рассматриваются угол входа 45° (А) и косой удар с углом входа 15° (Б).

Проводилось численное моделирование пролета и разрушения метеороидов в атмосфере Марса для каменных и кометных метеороидов. Рассматривалось два типа кометного материала, различающегося по способности к абляции: обычный и мягкий кометный материал в соответствии с классификацией Ceplecha et al. (1998). Прочность метеороидов принимается в интервале 0,01-1,5 МПа, рассматривается одиннадцать значений прочности. Для комет выделяются несколько возможных диапазонов прочности, учитывающие данные Европейской болидной сети и спутниковых наблюдений (Borovička et al. 2022; Brown et al. 2016). Импакторы одинакового размера и прочности будут приводить к разному межкратерному расстоянию в зависимости от предполагаемого вещества метеороида. Как и ожидалось, кометные объекты демонстрируют больший разброс фрагментов.

Номинальные астероидные и кометные удары способны описать около 2/3 наблюдаемых пар кратеров. Для объяснения больших расстояний ($L_{pair} \sim 100-150$ м, 5 случаев) должны быть задействованы дополнительные факторы.

Уменьшение угла входа до 15° позволяет описать все пары. Каменные метеороиды могут описать три из пяти случаев (105-139 м). Кометные импакторы покрыли бы все пять случаев при $\sigma \leq 0,1$ МПа.

Альтернативный вариант - рассмотреть меньшую плотность кометных импакторов. При 30° ударах кометные импакторы с плотностью 250-300 кг/м³ покрыли бы все пары при $\sigma \leq 0,1$ МПа.

Статистика невелика, тем не менее можно сказать, что большинство равных пар описываются стандартной моделью. Несколько случаев требуют дополнительных предположений и могут быть описаны в предположении о меньшей плотности ударника.

Работа выполнена в рамках госзадания ИДГ РАН №122032900176-3.

Литература

- Подобная Е.Д., Попова О.П., Иванов Б.А., Глазачев Д.О., 2023. Динамические процессы в геосферах, 15, 4, 72-82.
 Artemieva N.A., Shuvalov V.V., 2001. JGR: Planets, 106, E2, 3297-3309.
 Borovička J., Kalenda P., 2003. Meteorit. & Planet. Sci., 38, 7, 1023-1043.
 Borovička J., Spurný P., Šrbený L., 2022. Astron. & Astrophys., 667, A158.
 Brown P., Wiegert P., Clark D., Tagliaferri E., 2016. Icarus, 266, 96-111.
 Ceplecha Z., et al., 1998. Meteor phenomena and bodies. Space Sci. Rev., 84, 327-471.
 Collins G.S., et al., 2022. JGR: Planets, 127, 7, e2021JE007149.
 Daubar I.J., et al., 2022. JGR: Planets, 2022, 127, e2021JE007145.
 Frost M.J., 1969. Meteorit., 4, 3, 217-232.
 Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S. and the HiRISE team, 2014. LPI Contrib. 1777, 1812.
 Niedhart T., Sansom E.K., Miljković K., Collins G.S., Eschenfelder J., Daubar I.J., 2023. JGR: Planets, 128, 4, e2022JE007611.
 Passey Q.R., Melosh H.J., 1980. Icarus, 42, 2, 211-233.
 Popova O., Nemtchinov I., Hartmann W.K., 2003. Meteorit. & Planet. Sci., 38, 905-925.
 Popova O., Hartmann W., Nemtchinov I.V., Richardson D.C., Berman D.C., 2007. Icarus, 190, 50-73.