

УДК 523.681.8

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБНОВЛЕННОГО КАТАЛОГА НЕДАВНИХ МЕСТ ПАДЕНИЯ НА МАРСЕ

© 2023 г. Е. Д. Подобная*, О. П. Попова, Б. А. Иванов, Д. О. Глазачев

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

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

В последние десятилетия на Марсе были обнаружены свежие места падения космических тел метровых размеров. Примерно половина этих космических объектов разрушается в разреженной атмосфере Марса и приводит к образованию кратерных полей рассеяния (кластеров). Расширенный каталог мест падения космических тел включает данные о 1438 недавних датированных местах падения, образованных между 2007 и 2021 гг. В работе рассматривается большая часть расширенного каталога недавних датированных мест падения космических тел, для которой доступны данные о размере и расположении кратеров в кластерах. Данные расширенного каталога дали возможность оценить показатель степени в дифференциальном и кумулятивном инкрементальном распределении как 2.7 и 2.2. Полученная оценка степени в кумулятивном распределении ниже, чем предполагается в большинстве работ, но близка к оценкам, полученным по нерасширенному каталогу. Было предложено разделить места падения метеороидов на Марсе на 3 типа: первый – доминирующий главный кратер, второй – 2 наибольших кратера сравнимы и третий – 3 или более сравнимых наибольших кратера, все дополнены (или нет) значительно более мелкими кратерами. Мы предполагаем, что выделенные группы могут соответствовать различным типам ударников и (или) различным типам разрушения метеороида в атмосфере.

Ключевые слова: марсианские кратеры, космические тела, распределение по размерам, классификация.

Для цитирования: 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. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_4_72

Введение

На Земле космические тела (КТ) размером 1–10 м 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 находятся на поверхности планеты в качестве метеоритов.

Плотность атмосферы у поверхности Марса соответствует плотности атмосферы Земли на высоте ~ 30 км. Разрушается или нет тот или иной космический объект зависит как от профиля плотности атмосферы, так и от прочности и скорости входа самого объекта. Анализ данных по земным каменным КТ размером 1–10 м разного происхождения и состава показал, что их прочность главным образом лежит в диапазоне 0.1–10 МПа, и разрушение происходит в несколько стадий [Popova et al., 2011]. Данные Европейской болидной сети для обыкновенных хондритов дают возможность предположить, что их разрушение протекает в две основные стадии при значениях прочности 0.04–0.12 и 0.5–5 МПа [Borovicka et al., 2020]. Прочность зависит от состава и структуры КТ, и можно ожидать меньшую прочность у углистых хондритов. Но немногочисленные данные по падениям углистых хондритов показывают, что их прочность близка к прочности обыкновенных хондритов [Popova et al., 2011; Borovicka et al., 2019a], хотя, возможно, характер фрагментации отличается [Borovicka et al., 2019a]. Если говорить о телах кометного происхождения, то два крупных кометных тела были полностью разрушены на достаточно мелкие фрагменты при давлении около 0.1 МПа [Borovicka et al., 2019b], что соответствует разрушению КТ в атмосфере Земли на высоте примерно 60 км, а в атмосфере Марса – около 30 км.

При средней скорости входа КТ в атмосферу Марса порядка 10 км/с космические тела с прочностью менее 1.5 МПа должны разрушаться, падение более прочного тела приведет к образованию одиночного кратера. Разрушение при пролете должно приводить к образованию кратерных полей (кратерных кластеров) с характерным размером в десятки и сотни метров, и такие кластеры были обнаружены [Porova et al., 2003; 2007].

В общей популяции ударников, попадающих в атмосферы Марса и Земли, число тел метрового диапазона достаточно велико, и повторяющаяся съемка одной и той же области поверхности Марса орбитальной камерой (Mars orbiter camera) позволила найти 20 свежесформированных мест падений [Malin et al., 2006]. В рамках последующего проекта HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) повторяющиеся съемки поверхности и поиск новых мест падения выполнялись с 2006 по лето 2023 гг. [McEwen et al., 2023]. За это время было обнаружено более 1400 свежесформированных мест падений, больше половины (58%) падающих космических тел разрушаются в атмосфере и образуют кластеры кратеров [Daubar et al., 2013; 2019; 2022; Hartmann et al., 2018]. Размеры кластеров (определяемые как среднее из всех возможных расстояний между парами кратеров в кластере) варьируются от 2 м до 2 км со средним значением в 90 м и медианой 60 м [Daubar et al., 2022].

Анализ кластеров на Марсе позволяет изучать плохо различимые на Земле детали взаимодействия КТ с атмосферой. Хотя подавляющее большинство метровых КТ разрушаются при пролете через земную атмосферу, характеристики процесса разрушения (тип разрушения, количество и размеры фрагментов, число стадий разрушения и т.д.) остаются плохо определенными [Porova et al., 2011; Borovicka et al., 2020]. Свойства космических объектов оцениваются по наблюдательным данным при определенных предположениях и с не очень высокой точностью [Porova et al. 2011; 2019]; изучение марсианских кластеров дает уникальную возможность независимо оценивать параметры КТ, исследовать различные типы фрагментации тел различного состава и происхождения. Различные типы ударников и/или специфические особенности того или иного типа фрагментации могут проявлять себя в образующихся кластерах кратеров, для их распознавания прежде всего надо предложить классификацию наблюдаемых кластеров.

Целью данной работы является описание расширенного каталога недавних мест падения космических тел на Марсе и их классификация.

Снимки кластеров и методика обработки данных

Места падения КТ на Марсе считаются «новыми», если орбитальные снимки ограничивают время их образования: другими словами, существует не только снимок, на котором видна характерная зона удара, но и хотя бы один предыдущий снимок, на котором четко видно отсутствие удара в этом месте [Daubar et al., 2022].

Для выявления участков-кандидатов использовались изображения, полученные с помощью Context Camera (CTX; ~ 6 м/пикс) [Malin et al., 2007], которые сравниваются с предыдущими изображениями той же области. В тех случаях, когда снимки CTX недоступны, для определения интервала образования использовались другие орбитальные снимки [McEwen et al., 2023]. Затем каждое из новых мест падения рассматривалось на последующих снимках HiRISE [McEwen et al., 2007; 2023] с масштабом 0.25 м/пиксель для большинства снимков и 0.5 м/пиксель для остальных 2% снимков каталога (рис. 1), место падения измерялось и описывалось. При измерении кратеров размером меньше метра точность измерения теряется с уменьшением размера. Таким образом, при анализе измерений кратеров использовались только кратеры диаметром больше 1 м. Для обработки изображений применялись различные программы. Принадлежность кратеров к кластеру определялась по попаданию кратеров в зону удара (как правило выделяющуюся по своему альбедо на снимке), характерной свежей морфологией кратеров, совпадающему направлению выбросов [Daubar et al., 2022].

При измерении дополнительно найденных мест падения мы использовали программу JMARS. Бесплатная программа JMARS (Java Mission-planning and Analysis for Remote Sensing) [Christensen et

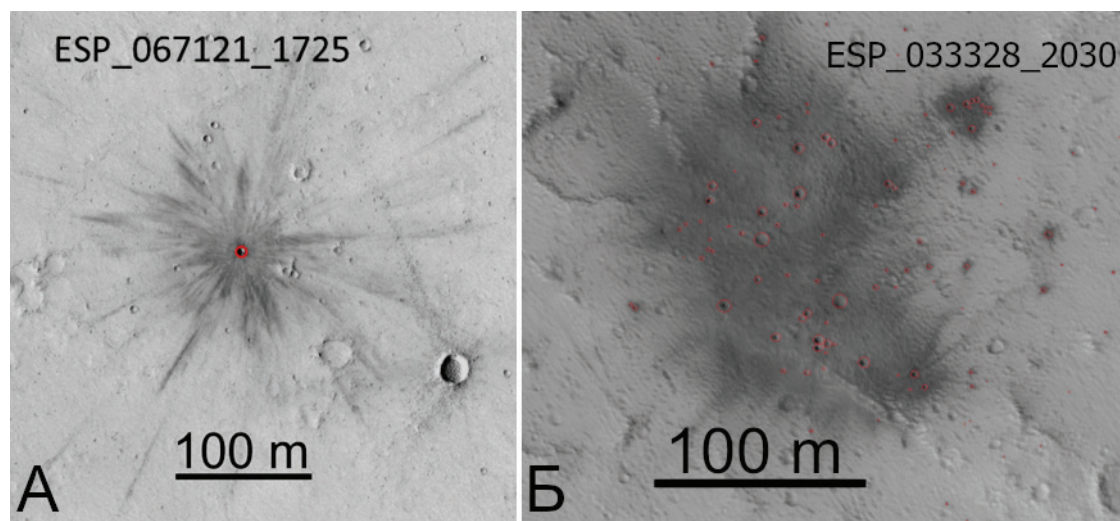


Рис. 1. А – пример одиночного кратера ESP_067121_1725 диаметром 6.5 м. Б – пример кластера ESP_033328_2030 (65 кратеров) на поверхности Марса

al., 2009] позволяет спроецировать снимок камеры на поверхность Марса, а затем измерить размер и координаты кратеров в кластере. Мы измеряли диаметр кратеров по трем точкам, этот метод позволяет нивелировать погрешность при измерении кратеров, у которых неровный вал или форма более эллиптическая, чем круглая. Диаметры кратеров, полученные таким образом, находятся в хорошем соответствии с диаметрами, полученными с помощью других методов (наложение на кратер круга, диаметр которого будет равен диаметру кратера; ручной подсчет количества пикселей, помноженных на масштаб снимка). Для 6 кластеров мы сравнили наши измерения диаметров кратеров с диаметрами, приведенными в ранее опубликованных независимых результатах [Daubar et al., 2022]. Разница между измерениями диаметра одного и того же кратера может достигать 35–40% в худших случаях, но в среднем близка к нескольким процентам. Некоторые места ударов, на первый взгляд имевшие вид одиночного кратера, на самом деле оказываются кластером, возникшим, когда разрушение метеороида произошло близко к поверхности. В этом случае кратеры кластера на поверхности Марса пересекаются, что выглядит как один большой кратер величиной около 100–150 м (рис. 2).

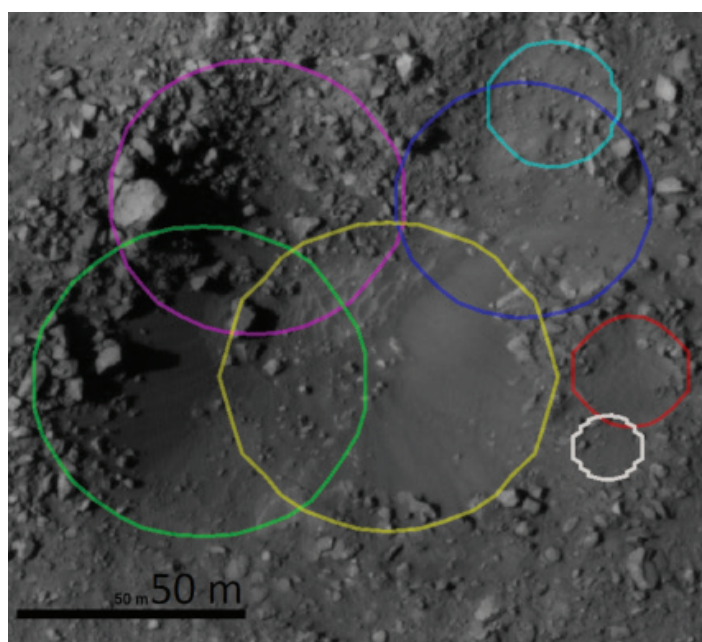


Рис. 2. Пример кластера PSP_007899_2015 с пересекающимися кратерами

На рис. 2 приведен кластер PSP_007899_2015, который выглядит как одиночный кратер диаметром 110 м, но на самом деле состоит из 7 кратеров диаметром от 15 до 73 м. Эффективный диаметр кластера равен 107.7 м, что примерно соответствует диаметру одиночного кратера, которым можно было бы описать данный кластер.

Расширенный каталог

В настоящее время в нашем распоряжении имеются данные о 1438 недавних датированных местах падения КТ, образованных между 2007 и 2021 гг. К ранее опубликованному каталогу (1203 места падения) [Daubar et al., 2022] мы добавили около 245 мест падения. Для части из них (1239) доступны данные о размере и расположении кратеров в кластерах. Каталог, включающий все найденные свежие места падения, будем называть расширенным каталогом.

Наш каталог организован следующим образом: он содержит имя места падения (название снимка, содержащее данные об орбите, с которой он был сделан), позволяющее в любой момент получить необходимые данные, координаты центра снимка, его масштаб в см/пиксель, дату релиза снимка, высоту области над средней поверхностью Марса, где расположен кластер, список имен других снимков, на которых имеется данный кластер, а также информацию о кратерах внутри кластеров – их размер и координаты. Нумерация кратеров в кластере соответствует убыванию их размеров.

Для описания кластеров и сравнения их с одиночными кратерами определяется эффективный диаметр кластера (1), т.е. диаметр кратера, который был бы образован на поверхности планеты неразрушенным метеороидом

$$D_{eff} = \left(\sum D_i^3 \right)^{1/3}. \quad (1)$$

Таким образом, при наличии данных о размере кратеров можно посчитать эффективный диаметр кластера. В данной статье рассматривается часть каталога, для которой имеются данные о размере и координатах кратеров в кластере (1239 мест падения). Добавка новых мест падения не сильно повлияла на соотношение одиночных кратеров и кластеров (процент кластеров среди мест падения уменьшился на 1%), размер кластеров соответствует предыдущим оценкам [Neidhart et al., 2023]. Диаметры одиночных кратеров варьируются от 1 до 58 м. Кластеры содержат от 2 до 2334 кратеров (в среднем 26 кратеров, медиана – 11 кратеров), а их эффективный диаметр варьируется от 1.7 до 48.7 м со средним значением примерно 8 м и медианным – 6 м.

Распределение малых тел в Солнечной системе по размерам (SFD), так же, как и распределение образованных ими кратеров, дает представление о происхождении и эволюции этих тел. Распределение кратеров по размерам описывают различными способами, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Кумулятивное распределение – это количество кратеров на единицу площади ($N(> D)$), диаметр которых превышает заданный диаметр (D). Дифференциальное распределение dN/dD показывает количество кратеров в диапазоне диаметров от D до $D + \delta D$, деленное на ширину ячейки δD . Еще одна форма представления SFD – инкрементальное распределение со стандартной шириной ячейки в $\log D$. Если D_L и D_R – левая и правая границы ячейки, то часто выбирается ширина ячейки такая, что $D_R/D_L = \sqrt{2}$. Логарифмически-дифференциальное распределение (инкрементальное) представляет степенные зависимости прямыми линиями, которые имеют тот же наклон, что и для кумулятивного распределения, в этом представлении наклон кумулятивного и дифференциального распределений совпадают [Hartmann, 1969].

Распределение малых тел в Солнечной системе часто описывают степенным законом (2) с показателем степени: $-k$ или $-b$

$$\frac{dN}{dD} \sim D^{-k}, \quad N(> D) \sim D^{-b}. \quad (2)$$

В случае использования линейных ячеек $k = b + 1$; для инкрементального распределения $k = b$ [Hartmann, 1969]. На рис. 3 приведены дифференциальные и кумулятивные распределения кластеров и кратеров по размерам. Использовались инкрементальные распределения. Рассматривались распределения как для диаметров одиночных кратеров отдельно, так и для всех ударов; для кластеров в качестве размера выбирался эффективный диаметр (рис. 3). Уменьшение числа кластеров/кратеров для небольших размеров D ($D \leq 4.8$ м) вызвано влиянием атмосферы на ударники [Ророва et al., 2003; Ivanov et al., 2014], кроме того, в этот эффект может вносить вклад наблюдательная селекция (потеря части мелких кратеров при обработке изображения).

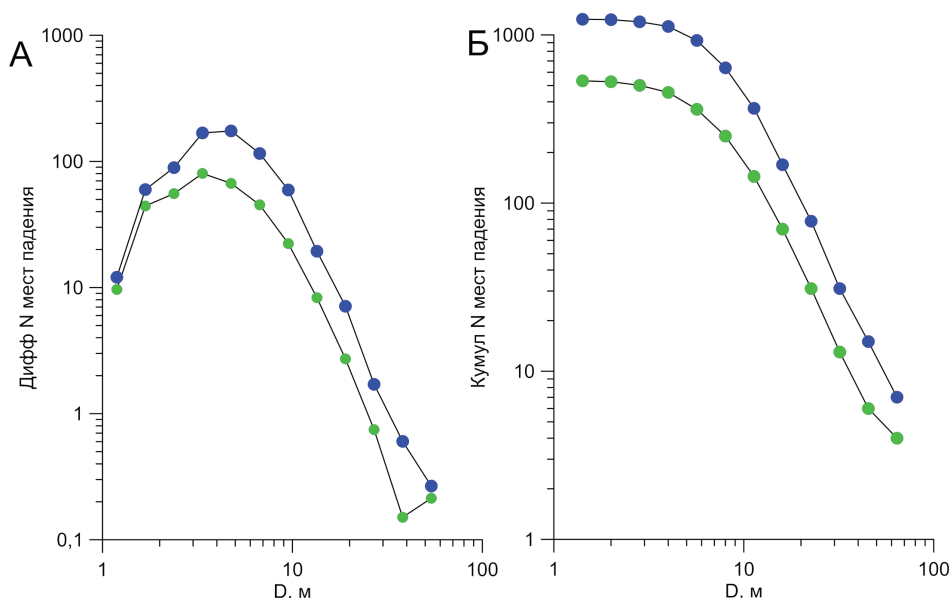


Рис. 3. Дифференциальное (А) и кумулятивное (Б) распределения рассматриваемых мест падений по размерам: синие точки – всех рассматриваемых мест падений (1240 шт.), зеленые – одиночных кратеров

Убывающая ветвь дифференциального распределения по размерам одиночных кратеров (рис. 3А) может быть аппроксимирована с показателем степени $b = 2.75$ для кратеров больших примерно $D \geq 4.8$ м. Для одиночных кратеров и кластеров наклон аппроксимации составил $b = 2.9$ при $D \geq 4.8$ м, что находится в хорошем соответствии с результатом для одиночных кратеров. Кумулятивные распределения для одиночных кратеров и всех рассматриваемых мест падений приведены на рис. 3Б. Аппроксимация показала коэффициент наклона $b = 2.1$ и $b = 2.2$ соответственно. Разрушенные и неразрушенные метеороиды описываются одним распределением.

Оценки по 1203 местам падения, полученные Daubar et al. (2022), показывают, что при $D > 8$ м дифференциальное инкрементальное распределение описывается степенной функцией с показателями $b = 2.9$, а кумулятивное: $b = 2.2$ [Daubar et al., 2022]. Наша оценка для примерно 1240 рассматриваемых мест падения при $D > 8$ м для дифференциального инкрементального распределения составила $b = 3.2$, что находится в соответствии с оценками Daubar et al. (2022). В теории показатели степени для дифференциального и кумулятивного инкрементальных распределений должны быть одинаковы, но на практике они отличаются.

Если считать, что размер метеороида линейно пропорционален размеру кратера [Ivanov et al., 2001], то показатель степени в распределении кратеров по размерам должен соответствовать показателю степени в распределении метеороидов [Ivanov et al., 2001; Neukum et al., 2001]. Стандартные оценки коэффициента k дифференциального распределения метеороидов по размеру с логарифмической ячейкой варьируются в пределах 2.95–3.5 [Neukum et al., 2001]. Collins et al. (2022) использовали кумулятивное распределение масс ударников по размерам, полученных по данным наблюдений земных болидов, с показателем степени 0.93, что дает $b = 2.79$ для распределения по размерам.

Полученные оценки для кумулятивного распределения кратеров несколько меньше, чем использованные в [Hartmann, 2005] при построении изохрон для Марса. Hartmann (2005) опирался на оценки Neukum et al. (2001) для распределения кратеров с размерами $D < 250$ м и показателем степени 3.2 для кумулятивного распределения. Hartmann (2005) также учел в первом приближении влияние атмосферы Марса, что привело к уменьшению наклона распределения до $b = 2.9$ для кратеров $D < 100$ м. Ivanov (2006a) уточнил, что показатель степени $b = 2.93$ лучше описывает кумулятивное распределение небольших кратеров на Марсе и данных о земных болидах. Следует отметить, что оценки распределения по разным выборкам из данных каталога приводят к заметному разбросу в показателе степени b – от 1.18 до 2.73 (см. Table 2 в [Daubar et al., 2022]).

Для кратеров метрового порядка на безатмосферной Луне Ivanov (2006b) определил показатель степени в кумулятивном распределении как $b = 2.93$. Более поздняя работа [Speyerer et al., 2016] значительно увеличила наклон распределения – $b = 4.6$.

Предполагается, что популяция метеороидов на Земле и Марсе общая [Adolfsson et al., 1996], но значительное расхождение оценок для Луны и Марса пока не нашло своего объяснения. В [Daubar et al., 2022] обсуждаются возможные причины расхождения в оценках распределений по размерам, которые могут включать возможные неточности в данных – отличающиеся популяции болидов, эффекты, связанные с различием поверхностей или присутствием атмосферы на Марсе.

Данные нашего каталога дали возможность оценить показатель степени в дифференциальном и кумулятивном инкрементальном распределении как 2.7 и 2.2. Показатель степени b в кумулятивном распределении ниже, чем предполагается в большинстве работ, но близок к оценкам, полученным по нерасширенному каталогу.

Классификация

Ранее было предложено [Ivanov et al., 2008] разделить места падения на 4 типа, опираясь на имеющуюся на тот момент статистику (около 20 событий). Тип 0 объединяет одиночные кратеры и кластеры с главным кратером и несколькими (менее 9) намного меньшими. Кластеры с крупным кратером, дополненным многочисленными мелкими (более 10), были выделены как Тип 1. Кластеры, содержащие несколько сравнимых по размеру кратеров, были отнесены ко 2-му типу, а насыщенные кластеры (более 400 кратеров) были отмечены как 3-й тип. Мы применили предложенную классификацию для примерно 1240 рассматриваемых мест падения. Большая часть мест оказалась сконцентрирована в двух группах (Тип 0 и Тип 2), другие 2 группы составляют лишь 2% (суммарно в них вошли лишь 22 из 1240 мест падения). Классификация и разделение на группы должны позволять выявлять закономерности в существующих кластерах. Разделение всех мест ударов на фактически одиночные кратеры (Тип 0) и кластеры со сравнимыми кратерами явно не описывает всего имеющегося многообразия кластеров. Кроме того, можно ожидать, что в популяции ударников присутствуют достаточно крупные группы тел с различными свойствами, которые разрушаются по-разному, что должно найти свое отражение в свойствах кластеров.

Чтобы сгруппировать кластеры по новым критериям, мы отдельно рассмотрели одиночные кратеры, пары кратеров и кластеры, содержащие более трех кратеров. Для начала мы рассмотрели 72 пары кратеров, диаметр максимального кратера варьируется от 1.2 до 36 м, диаметр меньшего кратера доходит до 8 м, а эффективный диаметр находится в пределах 1.4–36 м. Пары кратеров могут быть двух видов: сравнимые по размерам и доминирующий кратер в сопровождении гораздо более мелкого. Для определения границы между этими видами пар кратеров мы рассмотрели зависимость эффективного диаметра D_{eff} от диаметра меньшего кратера D_2 , нормированных на главный кратер D_1 (рис. 4). Размер эффективного кратера близок к размеру главного кратера ($D_{eff}/D_1 \approx 1$) пока размер второго кратера в паре не превышает 30–50% от размера главного ($D_2/D_1 \approx 0.3–0.5$) (рис. 4). Мы разделили пары кратеров на две группы по соотношению диаметров D_2/D_1 равным 0.4. Получилось 55 пар со сравнимыми кратерами и 17 пар, в которых один кратер заметно больше другого.

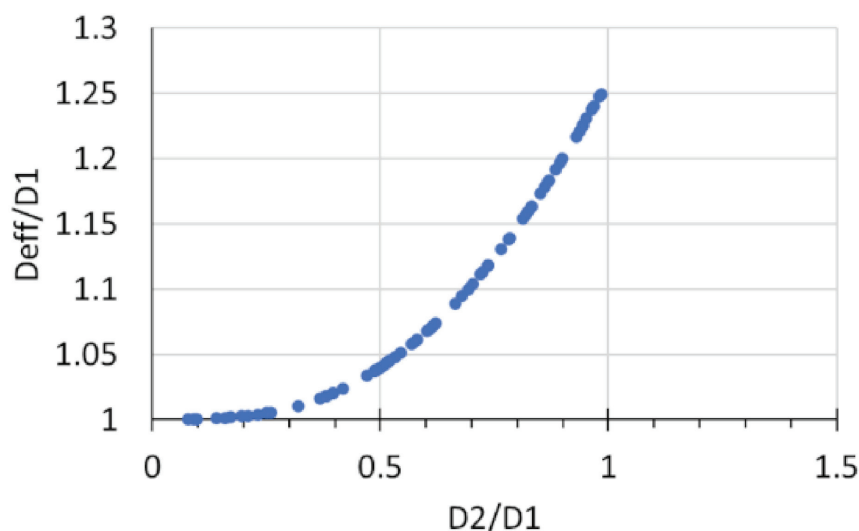


Рис. 4. Зависимость эффективного диаметра D_{eff} от диаметра меньшего кратера в паре D_2 , оба нормированы на главный кратер D_1

Рассматриваемый каталог содержит 633 кластера, содержащих более 3 кратеров, размер главного кратера D_1 варьируется от 1 до 43 м, размер эффективного кратера $D_{eff} \approx 2-49$ м. По аналогии с парами мы разделили кластеры по отношению второго кратера к максимальному $D_2/D_1 = 0.4$. В 50 случаев главный кратер заметно больше остальных. Остальные 583 кластера образуют собой группу, в которой несколько наибольших кратеров сравнимы. Мы пробовали разделить эту группу на подгруппы в зависимости от количества кратеров N_{cr} в кластерах (нами рассматривались варианты разделения $N_{cr} = 10/50/100$), но этот подход не позволил выявить какие-либо зависимости для соотношений кратеров в кластере. Поэтому мы выбрали другой подход. Эта группа может быть поделена на две подгруппы (рис. 5): два наибольших кратера в кластере сравнимы и дополнены одним (или больше) гораздо более мелким кратером (кратерами; третий кратер как минимум в 2 раза меньше максимального) и кластеры с тремя (и более) сравнимыми наибольшими кратерами (третий кратер D_3 не более чем в 2 раза меньше максимального). Данное разделение привело к подгруппам по 183 ($D_3/D_1 < 0.5$) и 400 кластеров ($D_3/D_1 > 0.5$).

Таким образом, мы разделили рассматриваемые места падения на 6 групп: одиночные кратеры, пары из двух сравнимых кратеров, пары с доминирующим главным кратером, кластеры с доминирующим главным кратером, кластеры с двумя сравнимыми наибольшими кратерами и кластеры с тремя и более сравнимыми наибольшими кратерами. Эти группы могут быть обобщены до трех типов мест падения: доминирующий главный кратер, 2 сравнимых наибольших кратера, 3 и более сравнимых наибольших кратера, все три типа могут быть (или нет) дополнены заметно меньшими кратерами.

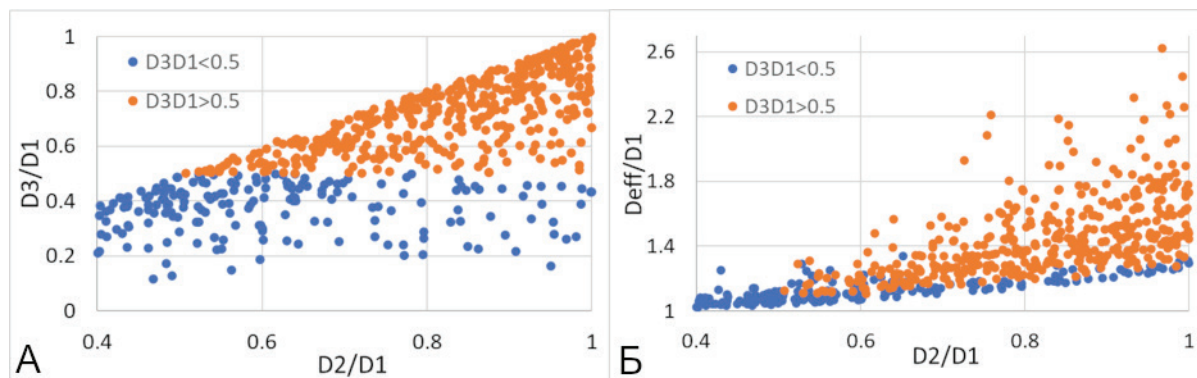


Рис. 5. А – зависимость между диаметрами 3 и 2 кратеров, нормированных на максимальный для группы с двумя и более сравнимыми кратерами. Б – Зависимость между диаметром эффективного и 2 кратера для группы с двумя и более сравнимыми кратерами

Для полученных трех типов мест падения были построены кумулятивные распределения кратеров в нескольких кластерах по размерам (рис. 6). Рассматривалась кумулятивная зависимость числа кратеров $N(>D)$ в интервалах $D_L < D < D_R$ при $D_R/D_L = \sqrt{2}$.

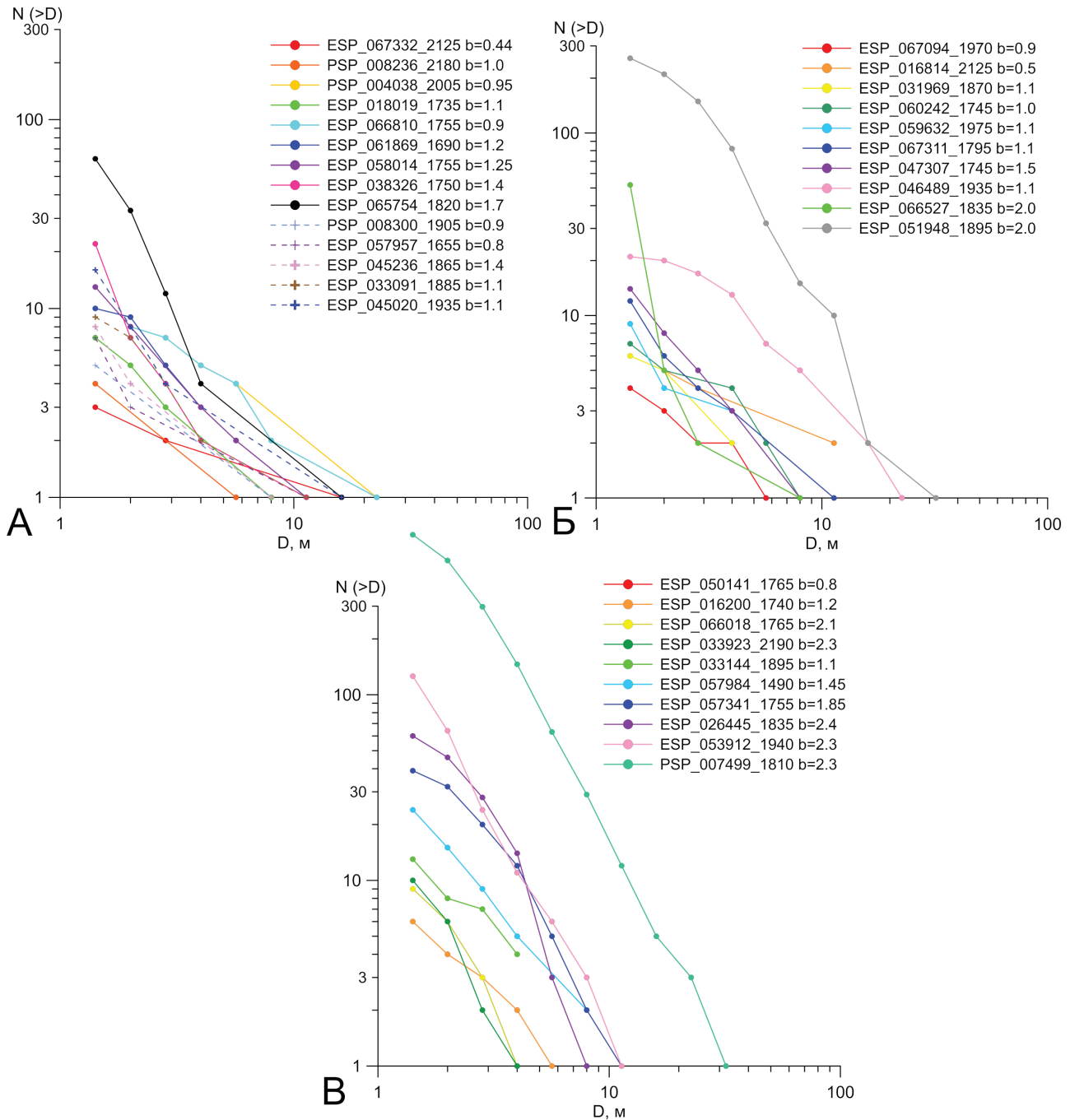


Рис. 6. Кумулятивные распределения размеров кратеров в кластерах для трех типов мест падений: А – доминирующий главный кратер; Б – два сравнимых наибольших кратера; В – 3 или более сравнимых наибольших кратера

Для аппроксимации получившихся кумулятивных распределений было использовано степенное приближение.

Группа с одним главным кратером, дополненным более мелкими, показывает наименьшие степени наклона кумулятивного распределения 0.4–1.9 со средним значением 1.1 и медианным – 1.2. Максимальные значения показывает группа с 3 (и более) наибольшими кратерами 0.8–2.4 при

среднем значении наклона 1.8 и медианном значении 2. Группа с двумя наибольшими кратерами, дополненными (или нет) более мелкими, имеет разброс степеней 0.5–2.1 и располагается между двумя другими группами как по разбросу значений, так и по среднему (1.3) и медианному (1.3) значению.

Мы предполагаем, что выделенные группы могут соответствовать различным типам ударников и (или) различным типам разрушения метеороида в атмосфере. Группы 1 и 3 заметно различаются между собой, в то же время кластеры из группы 2 по наклону распределения могли бы быть включены в группу 1 или 3. Группа с двумя наибольшими кратерами на данный момент выглядит неоднородной и требует дальнейшего анализа.

Выводы

Опубликованный ранее каталог мест падения на поверхности Марса был расширен до 1438 свежих мест падения ударников. На данный момент рассмотрена его часть (1240 мест), состоящая из 43% одиночных кратеров и 57% кластеров.

Данные нашего каталога дали возможность оценить показатель степени в дифференциальном и кумулятивном инкрементальном распределении кратеров по размерам как 2.7 и 2.2. Показатель степени b в кумулятивном распределении ниже, чем предполагается в большинстве работ, но близок к оценкам, полученным по нерасширенному каталогу.

Была рассмотрена возможность группировки мест падения на типы, выделенные ранее [Ivanov et al., 2008]. Большая часть кластеров оказалась сконцентрирована в двух группах (Тип 0 и Тип 2), другие 2 группы составили лишь 2%. Наш каталог не описывается подобной неравномерной классификацией.

Была предложена новая классификация для мест падения метеороидов на Марсе. Предложенные группы были обобщены до 3 типов мест падения: доминирующий главный кратер, 2 сравнимых наибольших кратера, 3 или более сравнимых наибольших кратера, все дополнены (или нет) значительно более мелкими кратерами. Мы предполагаем, что выделенные группы могут соответствовать различным типам ударников и (или) различным типам разрушения метеороида в атмосфере.

Финансирование

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00432).

Список литературы

- Adolfsson L.G., Gustafson B.Å., Murray C.D. The Martian atmosphere as a meteoroid detector // *Icarus*. 1996. Vol. 119 (1). P. 144–152. <https://doi.org/10.1006/icar.1996.0007>
- Borovička J., Popova O., Spurný P. The Maribo CM 2 meteorite fall—Survival of weak material at high entry speed // *Meteoritics & Planetary Science*. 2019a. Vol. 54 (5). P. 1024–1041. <https://doi.org/10.1111/maps.13259>
- Borovička J., Macke R.J., Campbell-Brown M.D., Levasseur-Regourd A.-C., Rietmeijer F.J.M., Kohout T. Physical and Chemical Properties of Meteoroids. In G. Ryabova, D. Asher, M. Campbell-Brown (Eds.), *Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond* // *Cambridge Planetary Science*. 2019b. P. 37–62. Cambridge : Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108606462.006>
- Borovička, J., Spurný, P., & Šrbený, L. Two strengths of ordinary chondritic meteoroids as derived from their atmospheric fragmentation modeling // *The Astronomical Journal*. 2020. Vol. 160 (1). P. 42. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab9608>
- Christensen P.R., Engle E., Anwar S., Dickenshied S., Noss D., Gorelick N., Weiss-Malik M. JMARS – A Planetary GIS // *American Geophysical Union Fall Meeting*. 2009. Abstract IN22A-06.
- Collins G.S., Newland E.L., Schwarz D., Coleman M., McMullan S., Daubar I.J., Miljković K., Neidhart T., Sansom E. Meteoroid fragmentation in the martian atmosphere and the formation of crater clusters // *Journal of Geophysical Research (Planets)*. 2022. Vol. 127 (7). P. e2021JE007149. <https://doi.org/10.1029/2021JE007149>

- 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>
- Hartmann W.K. Terrestrial, lunar, and interplanetary rock fragmentation // *Icarus*. 1969. Vol. 10 (2). P. 201–213. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(69\)90022-0](https://doi.org/10.1016/0019-1035(69)90022-0)
- Hartmann W.K. Martian cratering 8: Isochron refinement and the chronology of Mars // *Icarus*. 2005. Vol. 174 (2). P. 294–320. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.11.023>
- 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. Mars/Moon cratering rate ratio estimates // *Space Science Reviews*. 2001. Vol. 96 (1–4). P. 87–104. <https://doi.org/10.1023/A:1011941121102>
- Ivanov B.A. Earth/Moon impact rate comparison: Searching constraints for lunar secondary/primary cratering proportion // *Icarus*. 2006a. Vol. 183 (2). P. 504–507. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.04.004>
- Ivanov B.A. Cratering rate comparisons between terrestrial planets: 37th Lunar and Planetary Science Conference. 2006b. LPI Contribution No.1320. P. 26–27.
- Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S., HIRISE team. Small impact crater clusters in high resolution HiRISE images: 39th Lunar and Planetary Science Conference. 2008. LPI Contribution No. 1221. P. 1391.
- 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. LPI Contribution No. 1777. P. 1812.
- Malin M.C., Edgett K.S., Posiolova L.V., McColley S.M., Dobrea 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>
- Malin M.C. and 13 coauthors. Context camera investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter // *Journal of Geophysical Research (Planets)*. 2007. Vol. 112 (E5). <https://doi.org/10.1029/2006JE002808>
- McEwen A.S. and 15 coauthors. Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE) // *Journal of Geophysical Research (Planets)*. 2007. Vol. 112 (E5). <https://doi.org/10.1029/2005JE002605>
- McEwen A.S. and 30 coauthors. The high-resolution imaging science experiment (HiRISE) in the MRO extended science phases (2009–2023) // *Icarus*. 2023. Vol. 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>
- Neukum G., Ivanov B. A., Hartmann W.K. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. In: *Chronology and Evolution of Mars: Proceedings of an ISSI Workshop, 10–14 April 2000, Bern, Switzerland* // Springer Netherlands. 2001. P. 55–86. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1035-0_3
- Popova O., Nemtchinov I., Hartmann W.K. Bolides in the present and past martian atmosphere and effects on cratering processes // *Meteoritics & Planetary Science*. 2003. Vol. 38. P. 905–925. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00287.x>
- Popova O., Hartmann W., Nemtchinov I.V., Richardson D.C., Berman D.C. Crater clusters on Mars: Shedding light on martian ejecta launch conditions // *Icarus*. 2007. Vol. 190. P. 50–73. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.02.022>
- 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. Vol. 46 (10). P. 1525–1550. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01247.x>
- Popova, O., Borovička, J., Campbell-Brown, M.D. Modelling the Entry of Meteoroids. *Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond*, eds: G.O. Ryabova, D.J. Asher, M.D. Campbell-Brown. Cambridge Univ. Press. 2019. P. 9–36. <https://doi.org/10.1017/9781108606462.005>
- Speyerer E.J., Povilaitis R.Z., Robinson M.S., Thomas P.C., Wagner R.V. Quantifying crater production and regolith overturn on the Moon with temporal imaging // *Nature*. 2016. Vol. 538 (7624). P. 215–218. <https://doi.org/10.1038/nature19829>

CLASSIFICATION OF THE UPDATED CATALOG OF RECENT IMPACT SITES ON MARS

© 2023 E. Podobnaya*, O. Popova, B. Ivanov, D. Glazachev

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

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

In recent decades, fresh impacts of meter-scaled cosmic bodies were discovered on Mars. Approximately half of these objects are destroyed in the rarefied atmosphere of Mars and their impacts lead to the formation of crater clusters (crater scattering fields). The expanded impact site catalog includes data on 1438 recent dated impact sites formed between 2007 and 2021. This paper considers a large part of the expanded catalog, for which data on the size and location of craters in clusters are available. Expanded catalog data provided an opportunity to estimate the exponent in the differential and cumulative incremental distribution as 2.7 and 2.2. The obtained estimate of the cumulative distribution exponent is lower than suggested in most studies, but it is close to the estimates obtained from the non-expanded catalog. In order to classify crater clusters, it was proposed to group them into 3 types: the first has a dominant main crater, the second collects 2 largest comparable craters, and the third has 3 or more comparable largest craters, in all cases largest craters may be supplemented (or not) by significantly smaller craters. We are assuming that the identified groups may correspond to different types of impactors and (or) different types of meteoroid destruction in the atmosphere.

Keywords: martian craters, cosmic bodies, size frequency distribution, classification.