

УДК 523.681.8

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРАТЕРОВ ПО РАЗМЕРУ В РАСШИРЕННОМ КАТАЛОГЕ НЕДАВНИХ КРАТЕРНЫХ ПОЛЕЙ НА МАРСЕ

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

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

Каталог кратеров, недавно образованных при падении метеороидов на поверхность Марса, дает возможность исследовать популяцию метеороидов, общую для Земли и Марса. Для кластеров из ранее выделенных групп (доминирующий главный кратер, густонаселенные кластеры и малонаселенные кластеры с несколькими сравнимыми по размеру наибольшими кратерами) были построены распределения кратеров по размерам и оценен средний наклон полученных аппроксимаций. Приближение обычным степенным законом позволило оценить средний показатель степени как 0.8, 2 и 1.5 для рассматриваемых групп. При использовании усеченной степенной аппроксимации средние наклоны варьируются в меньшем диапазоне (0.8–1.1). Предполагается, что выделенные группы могут соответствовать различным типам ударников и (или) различным типам разрушения метеороида в атмосфере.

Ключевые слова: Марс, кластер кратеров, классификация, распределение по размеру.

Для цитирования: Подобная Е.Д., Попова О.П. Распределение кратеров по размеру в расширенном каталоге недавних кратерных полей на Марсе // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 94–106. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_94

Введение

Метеороиды, попадающие в атмосферы Земли и Марса, относятся к одной популяции малых космических тел Солнечной системы, вращающихся вокруг Солнца в пределах орбиты Юпитера [Adolfsson et al., 1996]. На Земле метеороиды метрового масштаба теряют большую часть своей массы и энергии в атмосфере, иногда их фрагменты могут быть обнаружены в виде метеоритов. Состав популяции метровых тел плохо определен, существующие оценки существенно различаются. На Марсе, из-за более тонкой атмосферы, такие объекты образуют на поверхности ударные кратеры или кратерные поля (кластеры). Эти кластеры предоставляют уникальную возможность увидеть результаты фрагментации на высоте ≈ 30 км в земной атмосфере, что дает уникальную возможность оценить параметры метеороидов.

Повторяющаяся съемка поверхности Марса в течение последних десятилетий [McEwen et al., 2023] позволяет идентифицировать недавно образовавшиеся кратерные поля. Появление на снимке темного пятна, образовавшегося между двумя пролетами космического аппарата с камерой над одним и тем же участком, позволяет определить приблизительное время образования кратерного поля. Место падения считается «новым», если имеется как его свежий снимок, так и хотя бы одно предыдущее изображение этого места, полученное до падения [Daubar et al., 2022].

Принадлежность кратеров к кластеру определяется тремя факторами: кратеры находятся в зоне падения (часто идентифицируемой по изменению альбедо на повторяющихся снимках), имеют характерную свежую морфологию и совпадающее направление выбросов из кратеров [Daubar et al., 2022].

Цель данной статьи – представить классификацию свежих Марсианских кратерных полей и подкрепить ее распределениями размеров кратеров по размеру (SFD) для различных типов кластеров, выделенных с использованием различных подходов. Эта работа продолжает предыдущее исследование

[Podobnaya et al., 2025]. Мы предполагаем, что различные выделенные группы могут соответствовать различным сценариям разрушения ударника и/или свойствам его материала.

Кратерные поля

На сегодняшний день обнаружено более 1400 недавно образованных (датированных) мест падения на Марсе. В данной работе анализируется обработанная часть расширенного каталога новых мест падения на Марсе (1337 мест падения) [Podobnaya et al., 2025; Подобная и др., 2023]. Более половины мест падения из каталога (62%) представляют собой кратерные поля (кластеры). Диаметр наибольшего кратера в кластере составляет от 1 до 73 м. Самый густонаселенный кластер содержит 2334 распознаваемых кратера, в среднем $N_{cr} \sim 26$ кратеров в одном кластере. Размеры кластеров (среднее значение всех возможных расстояний между двумя кратерами в кластере) варьируются от 2 м до 2 км со средним значением 90 м [Podobnaya et al., 2025]. Можно предположить, что эти существенно различающиеся кластеры были образованы ударниками разной природы и/или что их разнообразие указывает на разные сценарии фрагментации. Для распознавания различных типов ударников и/или различных сценариев фрагментации необходимо предложить классификацию наблюдаемых кластеров.

Было предпринято несколько попыток построения классификации кластеров [Подобная и др., 2023; Podobnaya et al., 2025; Попова и др., 2025] с использованием различных критериев в надежде выделить группы кластеров со схожими характеристиками. Предложенные классификации приводят к похожему разделению на группы, при этом средние значения параметров различаются незначительно, а сами группы схожи.

Во всех классификациях выделяются кластеры с доминирующим крупным кратером и несколькими значительно более мелкими кратерами, в качестве критерия их отнесения в данную группу использовалось отношение диаметра второго кратера D_2 к диаметру наибольшего кратера D_1 , с граничной величиной $D_2/D_1 = 0.4$. В эту группу вошли около 120 кластеров (14%). Принимая во внимание предположение о том, что разрушение на множество фрагментов может быть связано со свойствами материала ударника и/или соответствовать определённому характеру фрагментации, была выделена группа густонаселенных кластеров. В качестве критерия рассматривалось различное минимальное количество кратеров, и было выбрано $N_{cr} = 20$. В каталоге 161 кластер (19%), подходящий под этот критерий. Оставшиеся 551 кластер составили группу малонаселенных кластеров, в которых как минимум 2 наибольших кратера сравнимы по размеру. Данная классификация была представлена в работе [Podobnaya et al., 2025] и кажется нам наиболее подходящей для дальнейших исследований типов марсианских кластеров (рис. 1).

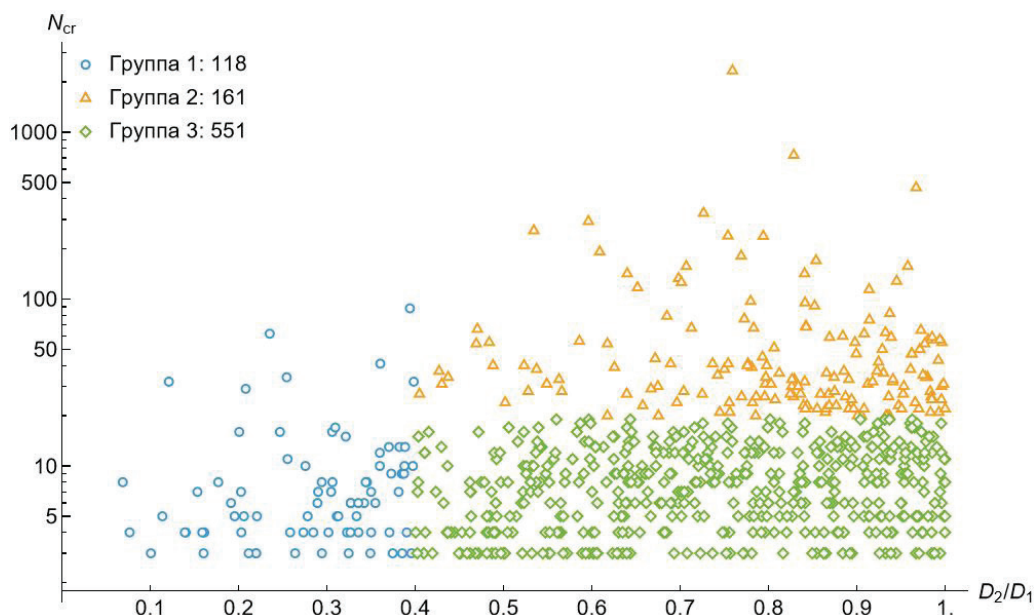


Рис. 1. Предложенные группы кластеров (доминирующий кратер, дополненный несколькими гораздо меньшими кратерами (группа 1), густонаселенные кластеры (группа 2) и малонаселенные кластеры с двумя или более сопоставимыми кратерами (группа 3)). По осям указаны соотношение двух максимальных кратеров и количество кратеров в кластере

При различных подходах к классификации кластеров выделенные типы кратерных полей остаются неизменными [Попова и др., 2025]. Средние характерные значения параметров могут немного отличаться от использованных в данной классификации, но сами группы похожи.

Распределение кратеров в кластерах по размеру

Распределение по размеру малых тел в Солнечной системе, а также распределение образованных ими кратеров дает представление о происхождении и эволюции этих тел [Иванов, 2005]. Кумулятивное инкрементное распределение (число кратеров ($N(> D)$), чей диаметр превышает заданный диаметр (D)) было построено для каждого кластера, ширина ячейки определялась по соотношению $D_R/D_L = \sqrt{2}$, где D_L и D_R – левая и правая границы ячейки.

Кумулятивное распределение малых тел обычно описывается степенным законом (1) с показателем степени b ($b > 0$):

$$N(> D) \sim D^{-b}. \quad (1)$$

Применимость степенного закона может быть ограничена из-за порога чувствительности приборов или физических границ системы. Исходя из того, что данные ограничены на больших размерах объектов, более подходящим законом распределения может быть усеченный сверху степенной закон [Burroughs, Tebbens, 2001; Corral, Gonzalez, 2019], который показывает «спад» относительно обычного степенного закона. Распределение размеров марсианских кратеров в кластерах ограничено размером самого большого кратера.

Усеченный сверху степенной закон имеет дополнительную переменную, которая ограничивает распределение на больших значениях:

$$N(> D) = a \cdot (D^{-b} - D_T^{-b}), \quad (2)$$

где D_T приблизительно соответствует максимальному наблюдаемому размеру [Maschberger, Kroupa, 2009]. Коэффициент пропорциональности a однозначно определяется через переменные D_T и b [Aban et al., 2006] по методу максимального правдоподобия:

$$a = N_{cr} \cdot \frac{D_{\min}^b}{1 - \left(\frac{D_{\min}}{D_T} \right)^b}, \quad (3)$$

где D_{\min} – геометрическое среднее интервала, содержащего минимальный диаметр кратера в кластере.

Ранее, в работе [Podobnaya et al., 2025], мы проанализировали распределение кратеров по размеру для трех выделенных групп, где рассматривались кратерные поля с $N_{cr} > 4$ (569 случаев). По наблюдательным данным для каждой предложенной группы были построены кумулятивное распределение кратеров в кластерах и его аппроксимации обычным и усеченным степенным законами. Полученные оценки усеченным степенным законом имели большие ошибки, привели к значительному разбросу показателей степени для кластеров одной и той же группы, поэтому было решено продолжить рассмотрение распределений по размерам для данной классификации, улучшив процедуры нахождения аппроксимаций. Мы надеемся, что усовершенствование метода оценки позволит получить более качественные аппроксимации, анализ которых даст возможность усовершенствовать предложенную классификацию.

Для анализа кластеров, попадающих в каждую группу, были построены кумулятивные распределения и оценен наклон аппроксимаций, построенных по-обычному и усеченному степенному законам. Поиск оценок параметров производился автоматически с помощью программы, написанной в среде Wolfram Mathematica, параметры аппроксимации определяются минимизацией

невязки. Для оценки качества полученных приближений использовалась стандартная ошибка для логарифмически преобразованных данных. Рассматривались кластеры, для которых распределение по размерам имеет более 3-х точек.

В заметном количестве кластеров число кратеров невелико, ошибки аппроксимаций достаточно велики. Поэтому мы использовали разные подходы, позволяющие компенсировать недостаточность данных. Первый метод – это процедура бутстрэппинга [Efron, Tibshirani, 1986], при которой строится многократная псевдовыборка данных одного размера. Следующий метод представляет собой рассмотрение всех возможных подмножеств исходных данных. В последнем методе мы последовательно варьировали положение левой и правой границ данных, после чего отбирали подмножества, содержащие более половины точек.

Для каждого из полученных наборов данных были построены усеченные и обычные степенные аппроксимации, после чего их параметры были усреднены, что минимизировало влияние случайных вариаций. Для обеих рассмотренных аппроксимаций (уравнения (1) и (2)) методы бутстрэппинга и подмножеств показывают близкие оценки как среднего показателя степени, так и диапазона его значений. При использовании метода варьирующихся границ интервал, в который попадает показатель степени, оказался несколько смещен относительно интервалов, полученных другими методами, но средний наклон близок к значениям, полученным при использовании остальных методов. Параметры a (оцененный исходя из D_T и b) и сам D_T – близки для всех методов. Поскольку все обсуждаемые методы обработки данных дали схожие результаты, ниже приведены оценки для метода бутстрэппинга. Для каждой группы были рассчитаны средние показатели степени и их стандартная ошибка.

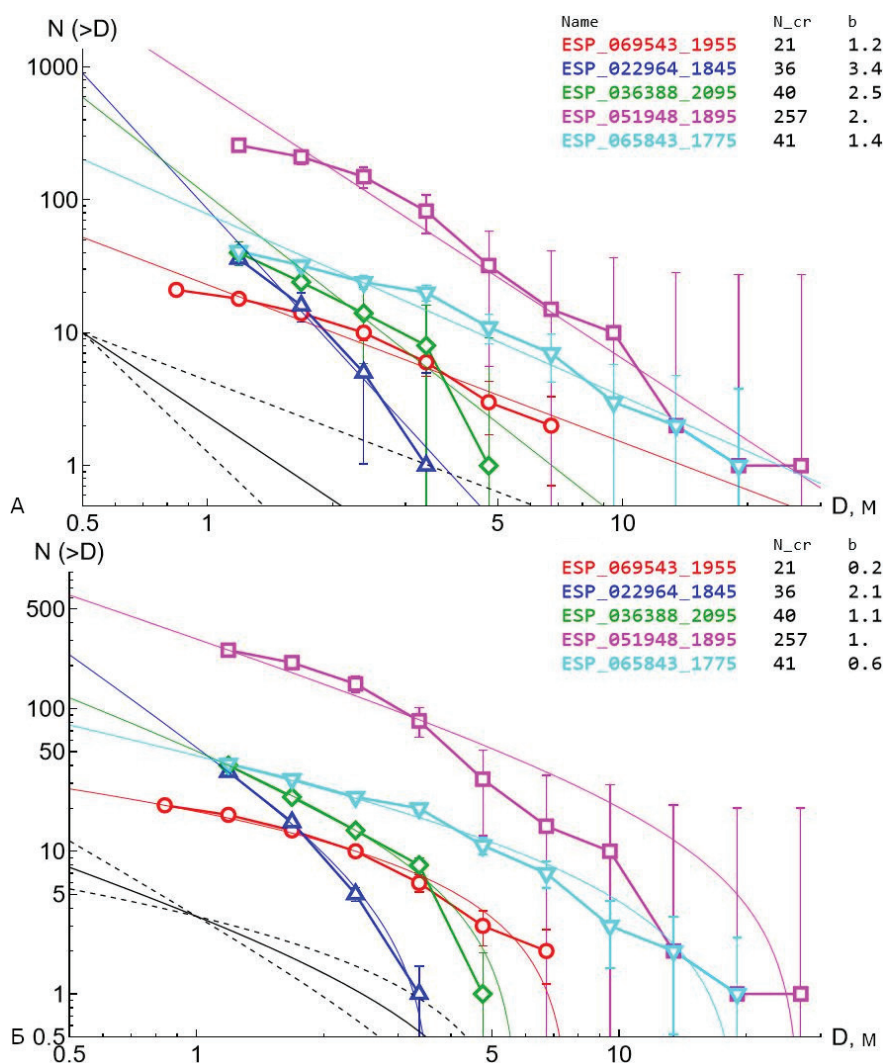


Рис. 2. Распределение кратеров по размеру для группы густонаселенных кратеров (группа 2), аппроксимации показаны цветными линиями. Для уменьшения влияния случайных вариаций использовалась процедура бутстрэппинга. Черная сплошная линия демонстрирует средний наклон аппроксимации, пунктирные черные линии отличаются от среднего наклона на его стандартное отклонение. На легенде указано количество кратеров и полученный показатель степени аппроксимации для каждого кластера. Аппроксимация построена обычным степенным распределением (А), усеченным степенным (Б)

При аппроксимации обычным степенным законом показатель степени для группы 1 (доминирующий главный кратер) находится в диапазоне от 0.2 до 2 со средним значением 1 ± 0.05 . Степени, полученные по усеченному степенному распределению варьируются в большем интервале (0.1–2.9), его среднее значение выше (1.3 ± 0.07). В качестве дополнительной проверки рассматривалась подгруппа с $N_{cr} > 5$, в этом случае интервал показателя степени несколько уменьшается, среднее значение показателя степени составило 1.3 ± 0.05 для обеих аппроксимаций.

Показатель степени для группы 2 (густонаселенные кластеры) варьируется в больших интервалах от 0.8 до 3.4 (среднее 2 ± 0.04) при описании обычным степенным законом и от 0.05 до 3.7 (среднее 0.95 ± 0.05) – для усеченного. На рис. 2 представлены распределение кратеров по размеру для нескольких кластеров из этой группы, аппроксимированное обычным (рис. 2А) и усеченным степенным законами (рис. 2Б). Кластеры в данной группе содержат наибольшее число кратеров и, следовательно, их аппроксимации наименее подвержены возможным проблемам, вызванным ограниченностью данных.

В качестве дополнительной проверки результатов для группы 2 мы рассмотрели подгруппу с $N_{cr} > 50$. В этом случае интервалы показателей степени при аппроксимации обоими степенными законами сужаются, а средние значения составляют 2.2 ± 0.06 и 1.2 ± 0.07 соответственно.

Группа малонаселенных кластеров (группа 3) демонстрирует максимальный разброс значений показателей степени при аппроксимации обычным степенным законом (0.3–3.8), средний наклон степенной аппроксимации в этом случае 1.4 ± 0.03 . Для усеченного степенного закона интервал оценок степени составляет от 0.05 до 3.8 со средним значением 0.7 ± 0.04 . Данный интервал близок к интервалу показателя степени для усеченной степенной аппроксимации для группы 2, но имеет меньшее среднее значение. Рассмотрение подмножества кластеров с $N_{cr} > 5$ несколько увеличивает средний показатель степени до 1.6 (обычный степенной закон) и 0.8 (усеченный степенной закон).

Для обычного степенного закона средний наклон аппроксимаций для группы 1 существенно отличается от группы 2, оценка показателя степени для группы 3 имеет промежуточное значение. Для аппроксимации усеченным степенным законом средние значения степени имеют близкие значения для всех групп и варьируются в небольшом диапазоне 0.8–1.1.

Распределение показателей степени в аппроксимациях

Показатели степени b , полученные для одного и того же кластера при обычных и усеченных аппроксимациях, во многих случаях заметно различаются. Большое количество показателей степени ниже, чем 0.15 для аппроксимаций, построенных по усеченному степенному закону (170 случаев, для большинства из них $b < 0.1$) вызвало вопросы, поскольку для обычного степенного закона только один кластер имеет значение $b < 0.3$. В основном низкие показатели степени имеют малонаселенные кластеры (группа 3). Мы предположили, что столь низкие показатели степени ($b < 0.15$) могут быть обусловлены слишком большими интервалами в распределении кратеров по размерам и, как следствие, отсутствием достаточного количества точек для хорошей аппроксимации усеченным степенным законом.

Распределения кратеров по размеру были построены с меньшим соотношением между соседними ячейками ($2^{1/4}$). Это позволило получить более качественные аппроксимации усеченным распределением для 70 кластеров. Следует отметить, что уменьшение отношения интервалов плохо работает с кластерами, в которых два самых крупных кратера не попали в одну и ту же или в соседние ячейки (образовывается горизонтальная линия на распределении, «полочка», длиной более 2-х ячеек). При уменьшении соотношения между границами ячеек для таких кластеров количество ячеек с частотой, равной $N(D_{\max})$, увеличивалось, «полочка» удлинялась, и показатель степени оставался низким. Такая ситуация наблюдалась более чем в 100 кластерах, поэтому изменение соотношения между ячейками для них не применялось. Следует отметить, что проведенная модификация распределения по размеру слабо повлияла на оценку показателя степени, полученную для обычного степенного закона для большинства кластеров.

Как уже упоминалось, разброс показателя степени и его среднее значение различаются для обычного и усеченного распределений. На рисунках 3–5 приведены распределения показателей степени для каждой группы кластеров. Формы полученных распределений отличаются как между различными выделенными группами, так и между двумя типами аппроксимаций.

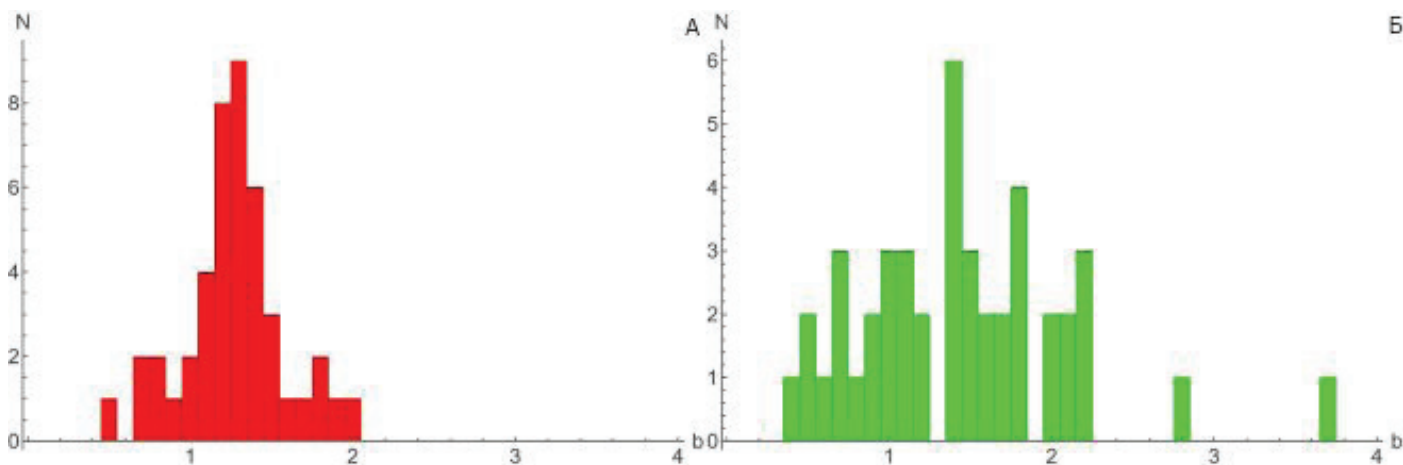


Рис. 3. Распределение оценок степеней для кластеров с $N_{cr} > 5$, соответствующее группе 1 (доминирующий главный кратер, дополненный более мелкими) для аппроксимаций, построенных по обычному (А) и усеченному степенному (Б) законам

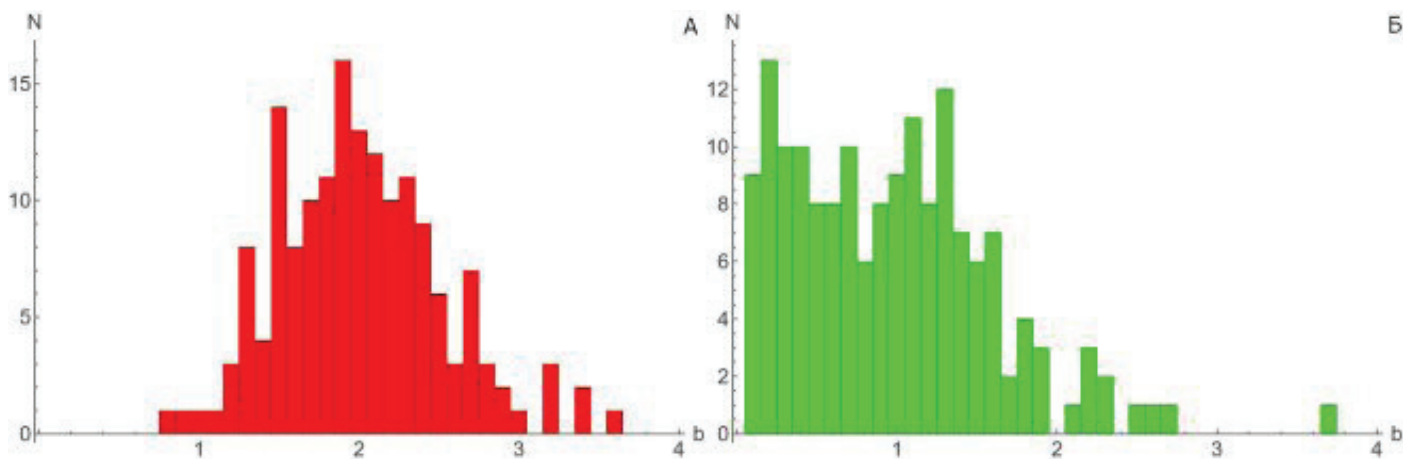


Рис. 4. Распределение оценок степеней для кластеров, соответствующее группе 2 (густонаселенные кластеры) для аппроксимаций, построенных по обычному (А) и усеченному степенному (Б) законам

Группа с доминирующим главным кратером (группа 1) имеет наиболее схожую форму распределений для двух степенных законов. Диапазон полученных оценок степеней варьируется от 0.5 до 2 для обычной степенной аппроксимации для выборки с $N_{cr} > 5$ (рис. 3А). Усеченный степенной закон показывает более широкий диапазон оценок (0.4 до 3.7, рис. 3Б). Средние показатели степени для этой группы близки для обычной и усеченной аппроксимации (0.8 и 1.1 соответственно). Пики распределений коррелируют между собой, в обоих распределениях четко выделяется наибольший пик.

Распределения показателей степени двух используемых законов для группы 2 (густонаселенные кластеры) имеют большее количество пиков и различаются заметнее. Для обычного степенного закона среднее значение $b = 2$, а интервал значений составляет 0.8–3.6 (рис. 4А). Оценки показателя степени b , полученные по усеченной степенной аппроксимации, варьируются в более широком промежутке (0.05–3.7) со средним значением 1 (рис. 4Б).

Для выборки кластеров с $N_{cr} > 5$ для группы 3 (малонаселенные кластеры) интервалы оценок степени составляют 0.3–4.3 и 0.05–3.8 для обычного степенного закона и для усеченного соответственно (рис. 5). Средние значения показателей степени b заметно различаются (1.7 и 0.8). Пик на распределении b для усеченного закона соответствует минимально возможным степеням и, вероятно, имеет большую погрешность.

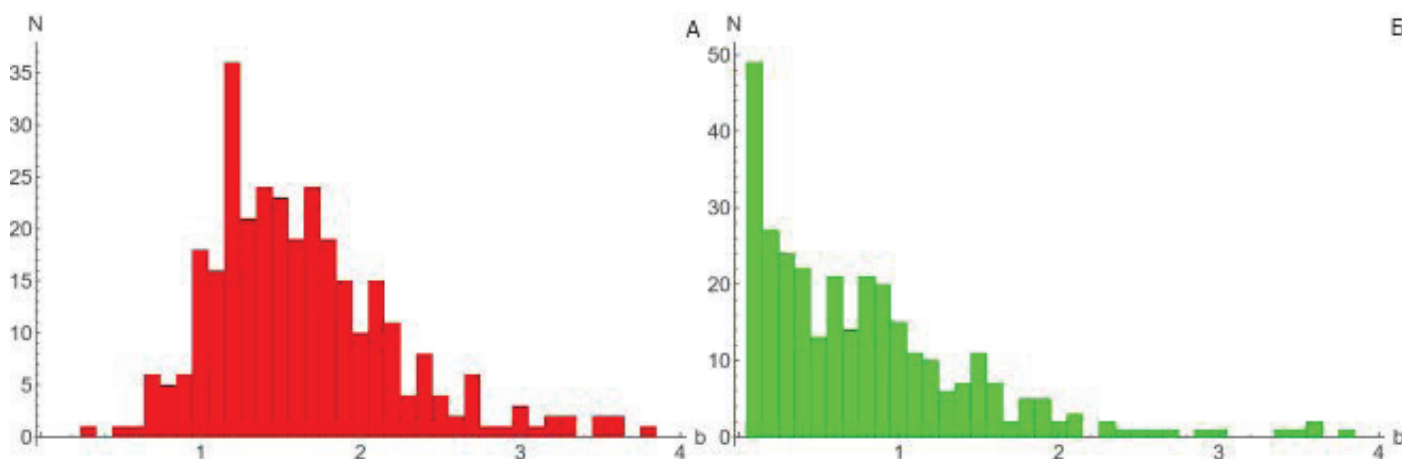


Рис. 5. Распределение оценок степеней для кластеров, соответствующее группе 3 (малонаселенные кластеры) с $N_{cr} > 5$ для аппроксимаций, построенных по обычному (А) и усеченному степенному (Б) законам

Как показано разными авторами, применение обычного степенного закона (без учета верхнего предела) к данным, имеющим усечение, приводит к более высокому значению показателя степени, чем показатель степени, полученный при использовании усеченного степенного закона [Burroughs, Tebbens, 2001; Aban et al., 2006; Maschberger, Kroupa, 2009].

Схожая форма построенных распределений показателя степени, а также наличие хорошо выделяющегося пика на обычном и усеченном степенном распределениях, позволяет сделать вывод, что группа с доминирующим главным кратером (группа 1), по-видимому, является наиболее хорошо выделенной. Распределения показателей степени для двух других выделенных типов кластеров имеют несколько пиков, сравнимых по размеру с максимальным, что позволяет предположить, что эти группы выделены менее четко.

Оценки параметров степенных аппроксимаций

В связи с распространенностью использования усеченного степенного распределения, кроме минимизации невязки существуют и другие оценки параметров распределения. В работах [Aban et al., 2006; Koen, 2006; Maschberger, Kroupa, 2009] используется метод максимального правдоподобия, в [Maschberger, Kroupa, 2009] приводится его модификация. Следует отметить, что авторы используют распределение, нормированное на параметр a . Для кластеров с $N_{cr} > 3$ кратеров, диаметры которых попадают как минимум в 3 разные ячейки в распределении по размерам, мы оценили показатель степени b в усеченном степенном законе по вышеуказанным методам. Это условие необходимо, так как в модифицированном методе максимального правдоподобия в уравнении для показателя степени используется множитель $1/(N_{cr} - 3)$.

В первом приближении, параметр D_T считается равным диаметру максимального кратера в кластере. Авторы оценивали степень усеченной степенной аппроксимации с помощью метода максимального правдоподобия [Aban et al., 2006; Koen, 2006; Maschberger, Kroupa, 2009], оценка показателя степени может быть получена исходя из решения нелинейного уравнения. Оценки степени аппроксимации для

всех кластеров из каталога с $N_{cr} > 3$, полученные методом максимального правдоподобия в этих работах совпадают и варьируются от $b \approx 0.01$ до $b \approx 4$, на распределении показателя степени b выделяются несколько пиков ($b \approx 0.45, 1.1, 1.4$), которые коррелируют с 3 из 4 наиболее выделяющихся пиков на распределении, полученных нами. В среднем полученные показатели степени на 40% выше наших оценок. Средние оценки показателя степени для усеченного степенного закона, полученные по методу максимального правдоподобия, составляют 1.4, 1, 1.1 для групп 1, 2, 3 соответственно, что совпадает или несколько выше полученных нами оценок (мы оценили показатели степени усеченного степенного распределения как 1.1, 1 и 0.8).

Оценки, полученные модифицированным методом максимального правдоподобия [Maschberger, Kroupa, 2009], отличаются от оценок, полученных не модифицированным методом, на множитель, пропорциональный количеству кратеров в кластере. Показатели степени, полученные по данному методу, варьируются в очень широком диапазоне ($b < 32$), для $\approx 7.5\%$ кластеров (из групп 1 и 3) оценка показателя степени превысила $b = 4$. Следует отметить, что количество интервалов в распределении по размерам для большинства из этих кластеров менее 5. Можно предположить, что данная оценка хорошо работает лишь для данных с большим количеством интервалов и/или кратеров. В среднем данная оценка превышает полученные нами примерно на 40%. Исходя из этой модифицированной оценки показателя степени усеченного распределения авторы предлагают получить соответствующую ему оценку параметра D_T . Оцененное значение хорошо согласуется с полученным нами при поиске усеченной степенной аппроксимации, ее отношение к полученному нами D_T составляет 0.6–1.2 со средним значением 0.8.

Для модифицированного метода максимального правдоподобия оценки средних показателей степени для обычного степенного распределения для групп 1, 2 и 3 составляют 2.7, 1.2, 1.9, что превышает наши оценки.

На рис. 6 приведено сравнение полученной нами усеченной степенной аппроксимации с оценками по работам разных авторов для одного из кластеров. Показано, что независимые оценки степени совпадают и хорошо согласуются с нашей аппроксимацией.

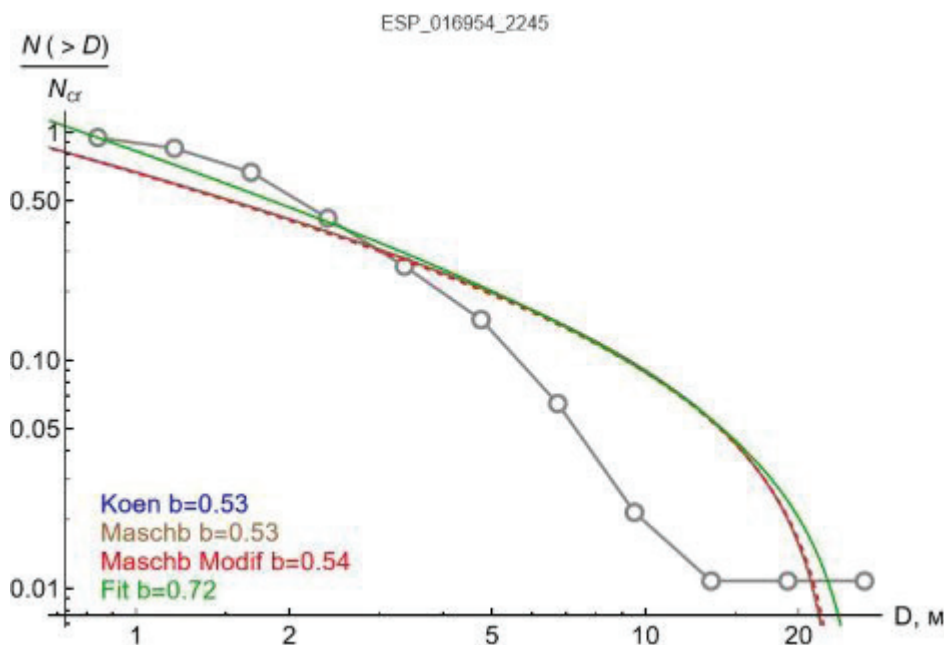


Рис. 6. Сравнение аппроксимации, полученной по усеченному степенному закону (зеленая линия), методом максимального правдоподобия [Koen, 2006; Maschberger, Kroupa, 2009] и его модификации [Maschberger, Kroupa, 2009] для кластера ESP_016954_2245 (группа 1). Частота нормирована на количество кратеров в кластере

В двух вышеуказанных работах наряду с оценкой для усеченного степенного распределения также приводятся оценки степени для обычного степенного закона. Оценки наклона степенного распределения, полученные для рассматриваемых кластеров по методу максимального правдоподобия [Koen, 2006], находятся в широких пределах от 0 до 5.4 со средним значением 0.9 и в среднем на

40% меньше полученных нами оценок. Распределение этих оценок показывает большое количество степеней ниже 0.25 и имеет четкий пик при $b \approx 0.75$, в распределении полученных нами оценок при этом значении показателя степени тоже присутствует пик, но менее выделяющийся по частоте.

Средние оценки степени обычного степенного распределения, полученные методом максимального правдоподобия, для групп 1, 2, 3 составляют 0.8, 0.7 и 1.05 соответственно. Это коррелирует с нашей оценкой для группы 1 и заметно ниже наших оценок для других групп.

Maschberger, Kroupa (2009) модифицирует метод максимального правдоподобия. Оцененные по этой работе показатели степени имеют меньший разброс значений, до 3.8. Аналогично предыдущим результатам наблюдается большое количество низких степеней; на распределении этих оценок выделяется два пика ($b \approx 0.75, 1.45$), первый из которых коррелирует с предыдущей оценкой для показателя степени обычного степенного закона и полученными нами оценками, а второй – только с нашими оценками. Эта оценка в среднем на 60% ниже нашей и отличается от оценки Koen (2006) не более чем на треть в большинстве случаев. Для модифицированного метода максимального правдоподобия оценки средних показателей степени для обычного степенного распределения для групп 1, 2 и 3 составляют 0.6, 0.7 и 0.8 соответственно, что ниже полученных нами оценок (0.8, 2, 1.5).

На рис. 7 приведено сравнение полученной нами аппроксимации с оценками по работам разных авторов для одного из кластеров. Для этого кластера оценки хорошо согласуются с нашей аппроксимацией.

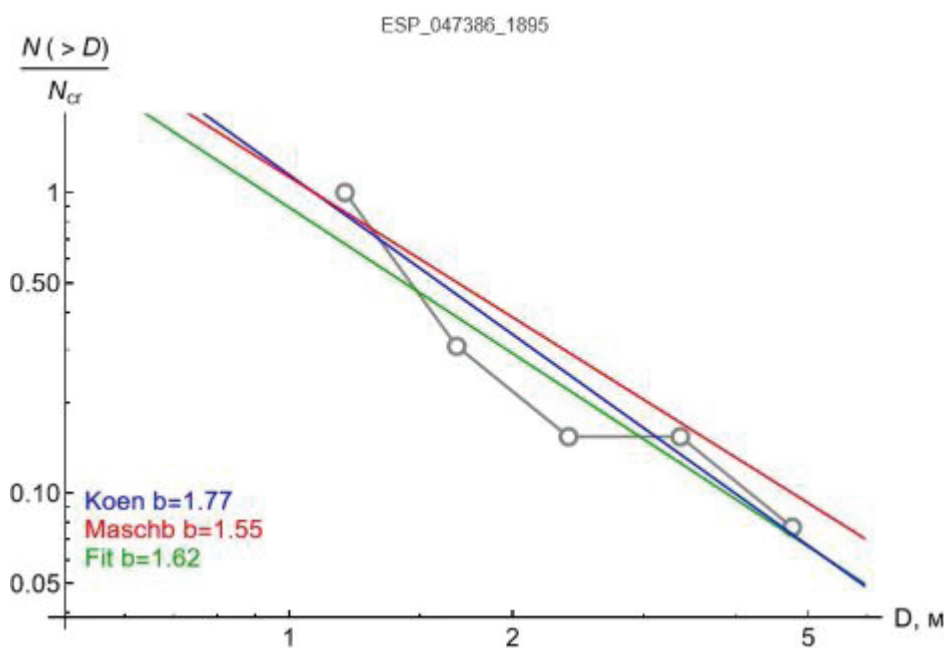


Рис. 7. Сравнение аппроксимации, полученной по обычному степенному закону (зеленая линия) с независимыми источниками [Koen, 2006; Maschberger, Kroupa, 2009] для кластера ESP_047386_1895 (группа 3). Частота нормирована на количество кратеров

Оценки, полученные по методу максимального правдоподобия и его модификации, в среднем хорошо коррелируют друг с другом и с нашими оценками, хотя и плохо работают для некоторых кластеров в связи с малым числом точек и/или неравномерностью данных. Следует отметить, что эти оценки создавались для данных не разбитых на интервалы и, что, несмотря на нормировку частоты, полученные степенные аппроксимации лучше описывают область маленьких диаметров, больший вес имеют точки с большой частотой.

Сравнение с другими работами

В работе [Brykina, Egorova, 2024] изучались ударные эксперименты, моделирующие фрагментацию астероидов в космическом пространстве. Оценивались средние показатели степени в аппроксимации модифицированного усеченного степенного закона по массе для экспериментов как $\beta = 0.78$. Кроме

того, было исследовано распределение по массам для тринадцати падений каменных и железных метеоритов. Распределение аппроксимировано усеченным степенным законом. Оцененный наклон зависит в основном от количества метеоритов, ударники с более чем 400 фрагментами могут быть описаны показателем степени $\beta = 0.6-0.7$, распределение массы для ударников с меньшим количеством фрагментов оценивается показателем степени $\beta = 0.4-0.5$. Оценки, полученные по ударным экспериментам и по распределению масс фрагментов метеоритов, согласуются. Следует отметить, что аппроксимации в этой работе подбирались вручную.

Оценки, полученные из распределения масс, можно пересчитать в оценки для распределения по диаметрам ($b = 3\beta$). Средняя степень аппроксимации, полученная в экспериментах ($b = 2.34$), заметно больше наших оценок для усеченного степенного распределения. Диапазоны оценок распределения по массам для земных ударников соответствуют $b = 1.8-2.1$ и $b = 1.2-1.5$, второй диапазон оценок немного выше полученных нами показателей степени. Здесь следует отметить, что фрагментация в атмосфере Земли имеет больше стадий и происходит на более длинном участке траектории метеороида под большей аэродинамической нагрузкой [Hartmann et al., 2018].

Daubar et al. (2022) оценили показатель степени в кумулятивном распределении по размерам для 1203 кратерных полей на Марсе как $b = 2.2$, что согласуется или несколько выше наших оценок для обычных степенных аппроксимаций.

Попова и др. (2025) использовали кластерный анализ для классификации марсианских кластеров. На основе этого метода были выделены 3 группы кластеров. Первая группа – это группа кластеров с доминирующим главным кратером, немного более расширенная в сравнении с предлагаемой нами за счет увеличенного отношения D_2/D_1 , определяющего границу выборки группы ($D_2/D_1 < 0.48$). Вторая выделенная группа – это кластеры с большим количеством относительно небольших кратеров ($\langle N_{cr} \rangle = 47$), эта группа включает в себя большую часть густонаселенных кластеров и несколько расширяет ее за счет включения кластеров с небольшим количеством мелких кратеров. Последняя группа объединила кластеры с относительно небольшим количеством кратеров ($\langle N_{cr} \rangle = 10$) с двумя сопоставимыми максимальными кратерами. Для трех предложенных групп были построены распределения по массам ударников (D^3), которые затем аппроксимировались обычным степенным законом. Пересчет представленных оценок наклона распределения по массам в распределение по диаметрам позволил оценить средние показатели степени b как 1.53, 2.13 и 1.41, что коррелирует с оценками, предложенными в этой работе.

Исходя из построенных распределений показателей степени для обоих степенных законов, только группа 1 (доминирующий главный кратер) выделяется четко, остальные группы, вероятно, требуют доработки. Работа по выделению типов марсианских кластеров на основе классификации и распределений по размерам будет продолжена.

Выводы

Ранее было предложено разделить недавно образованные марсианские кластеры (всего 830 кластеров) на три группы: кластеры с доминирующим главным кратером, дополненным несколькими гораздо более мелкими кратерами (группа 1), густонаселённые кластеры (группа 2) и малонаселённые кластеры с несколькими сопоставимыми максимальными кратерами (группа 3). Кумулятивные распределения кратеров по размеру были построены и аппроксимированы двумя различными степенными законами (обычным и усечённым сверху) различными методами (процедура бутстрэппинга, рассмотрение всех возможных подмножеств исходных данных и варьирование левой и правой границ данных). Рассмотренные методы показали близкие результаты, в работе приводятся результаты, полученные методом бутстрэппинга.

Аппроксимация построенных распределений обычным степенным законом позволила нам оценить средний наклон показателя степени как 0.8, 2 и 1.5 для трех рассматриваемых групп. Средний наклон аппроксимации обычным степенным законом в группе 1 значительно отличается от группы 2,

показатель степени для группы 3 имеет промежуточное значение. При использовании усечённого степенного закона средние показатели варьируются в меньшем диапазоне (0.8–1.1).

Исходя из построенных распределений показателей степени для обоих степенных законов, группа 1 (доминирующий главный кратер) выделяется наиболее четко, остальные группы, вероятно, требуют доработки или переформирования. Оценки показателей степени, полученные по методу максимального правдоподобия и его модификации, в среднем хорошо коррелируют друг с другом и с полученными нами оценками, хотя и плохо работают для некоторых кластеров.

Различные предложенные группы кластеров могут соответствовать разным типам фрагментации метеороида в атмосфере и/или различным свойствам метеороида.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200624-5).

Список литературы

Иванов Б.А. Распределение ударных кратеров и астероидов по размерам. Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. Москва : ИКЦ «Академкнига». 2005. С. 79–97.

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

Попова О.П., Глазачев Д.О., Подобная Е.Д. Кластерный анализ недавно образованных марсианских кратерных полей // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17 (1). С. 65–73. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_1_65

Aban I.B., Meerschaert M.M., Panorska A.K. Parameter Estimation for the Truncated Pareto Distribution // Journal of the American Statistical Association. 2006. Vol. 101. P. 270–277. <https://doi.org/10.1198/016214505000000411>

Adolfsson L.G., Gustafson B.Å., Murray C.D. The Martian atmosphere as a meteoroid detector // Icarus. 1996. Vol. 119. P. 144–152. <https://doi.org/10.1006/icar.1996.0007>

Brykina I.G., Egorova L.A. Describing the fragment mass distribution in meteorite showers // Planetary and Space Science. 2024. Vol. 241. P. 105838. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2024.105838>

Burroughs S.M., Tebbens S.F. Upper-truncated power law distributions // Fractals. 2001. Vol. 9 (2). P. 209–222. <https://doi.org/10.1142/S0218348X01000658>

Corral A., Gonzalez A. Power Law Size Distributions in Geoscience Revisited // Earth and Space Science. 2019. Vol. 6. P. 673–697. <https://doi.org/10.1029/2018ea000479>

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>

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 // Meteoritical & Planetary Science. 2018. Vol. 53. P. 672–686. <https://doi.org/10.1111/maps.13042>

Koen C. On the upper limit on stellar masses in the Large Magellanic Cloud cluster R136 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2006. Vol. 365. P. 590–594. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09739.x>

Maschberger T., Kroupa P. Estimators for the exponent and upper limit, and goodness-of-fit tests for (truncated) power-law distributions // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2009. Vol. 395. P. 931–942. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14577.x>

McEwen A.S, Byrne S., Hansen C. and 12 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>

Podobnaya E., Popova O., Glazachev D., Ivanov B. Classification of Craters Clusters in the Expanded Catalog of Fresh Impact Sites on Mars // *Solar System Research*. 2025. Vol. 59 (46). <https://doi.org/10.1134/S003809462460207X>

DISTRIBUTION OF CRATER SIZES IN THE EXPANDED CATALOG OF RECENT CRATER FIELDS ON MARS

© 2025 г. Е. Д. Podobnaya*, О. П. Popova

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

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

A catalog of craters, which were recently formed by meteoroid impacts on the surface of Mars, provides an opportunity to study the meteoroid population, which is common to Earth and Mars. Crater size distributions were constructed for clusters from previously identified groups (a dominant main crater, densely populated clusters, and sparsely populated clusters with several largest craters of comparable size), and the average slope of the resulting approximations was estimated. Applying a standard power law resulted in mean exponents of 0.8, 2, and 1.5 for the considered groups of clusters. When using a truncated power law approximation, the average slopes vary within a narrower range (0.8–1.1). It is hypothesized that the identified groups may correspond to different types of impactors and/or different types of meteoroid breakup in the atmosphere.

Keywords: Mars, crater cluster, classification, size-frequency distribution.