

УДК 523.681.8

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ НЕДАВНО ОБРАЗОВАННЫХ МАРСИАНСКИХ КРАТЕРНЫХ ПОЛЕЙ

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

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

Каталог недавно образованных мест падения метеороидов на Марсе дает возможность исследовать популяцию метеороидов общую для Земли и Марса. Для анализа данных каталога был применен кластерный анализ. Число выделяемых групп варьируется в зависимости от выбранного метода; при этом независимо от метода в отдельные группы выделяются кластеры с доминирующим главным кратером и кластеры с большим количеством относительно небольших кратеров. Третья часто выделяющаяся группа – это группа, в которой есть два сравнимых больших кратера. Построенные кумулятивные распределения кратеров в кластерах по массе показали, что наклон распределения значительно отличается для группы с небольшими кратерами. Кластерный анализ предложил разделение на группы, коррелирующее с ранее предложенными классификациями кластеров. Попытки найти разбиение на группы, отражающее связь между высотой над средней поверхностью и средним размером кластера, не привели к положительному результату, также не просматривается зависимость числа кратеров от высоты над средней поверхностью.

Ключевые слова: Марс, кластер кратеров, классификация, кластерный анализ.

Для цитирования: 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](https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_1_65)

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]. Сталкиваясь с Землей, большая часть космических тел метрового размера разрушается в атмосфере, и эти фрагменты крайне редко достигают поверхности Земли как метеориты. Поэтому состав этой популяции плохо определен, и существующие оценки заметно расходятся.

Статистика подтвержденных падений метеоритов показывает преобладание обыкновенных хондритов (~ 80%), углистые хондриты составляют менее 7% падений (*Meteoritical Bulletin Database*). Материал кометных тел метрового диапазона, по-видимому, никогда не достигал поверхности Земли. Доля кометных тел в потоке метеороидов 0.1–1 м, входящих в атмосферу Земли, по болидным данным оценивается с большим разбросом – 10–30% [Ceplecha et al., 1998; Brown et al., 2016].

Более низкие оценки кометной компоненты получаются в моделях околоземных объектов – порядка 2–10% или даже меньше [Nesvorny et al., 2023; Granvik et al., 2018]. Недавние модели, рассматривающие источники различных типов хондритов [Broz et al., 2024a,b; Marsset et al., 2024], оценивают состав метеороидов на входе в атмосферу Земли. Их результаты предполагают, что популяция метровых тел на входе в атмосферу состоит из обыкновенных и углистых хондритов, что не оставляет места для объектов кометного происхождения.

На Марсе при входе в гораздо более разреженную атмосферу эта популяция метеороидов разрушается частично (62% ударников [Daubar et al., 2013; 2019; Podobnaya et al., 2025]) и приводит к образованию кластеров кратеров. 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].

Можно предположить, что эти заметно различающиеся кластеры образованы ударниками различной природы и/или их разнообразие свидетельствует о различных сценариях фрагментации. Было сделано несколько попыток построить классификацию кластеров [Подобная и др., 2023; Podobnaya et al., 2025], применяя различные критерии в ожидании выделить группы кластеров со схожими характеристиками. При построении классификации явно выделялись как минимум три разных типа кластеров: первая группа объединяет кластеры с одним крупным кратером, дополненным несколькими гораздо меньшими кратерами; вторая – включает в себя густонаселенные кластеры с более чем 20 кратерами; последняя группа объединяет малозаселенные кластеры (менее 20 кратеров), которые имеют 2 или более сравнимых крупных кратера [Podobnaya et al., 2025]. Различные предложенные группы могут соответствовать различным сценариям фрагментации и/или различным свойствам метеороидов.

Кластерный анализ

В данной работе построение классификации и поиск характерных особенностей разных групп кластеров выполняется с помощью кластерного анализа. Кластерный анализ – это разбиение множества объектов на подмножества (кластеры) таким образом, чтобы объекты из одной группы были более похожи друг на друга, чем на объекты из других кластеров по какому-либо критерию. Каждый кластер включает максимально схожие между собой объекты. Для проведения кластерного анализа была создана программа в пакете *Wolfram Mathematica*, позволяющая рассматривать различные комбинации параметров кратерных полей и различные методы построения кластеров. Параметры кратерных полей, которые рассматриваются как входные переменные, включают в себя высоту кластера над средней поверхностью Марса H_{elev} , число кратеров в кластере N , средний размер кластера D_{med} , нормированные массы фрагментов (M_1/M_0 , M_2/M_0 и т.д., где M_i – масса фрагмента, а M_0 – суммарная масса всех фрагментов). Массы оцениваются по размеру ударника для каждого кратера в кластере, сам размер ударника определяется по соотношению подобия для кратеров с учетом прочности [Holsapple, Housen, 2007]. Исходные данные для анализа брались из каталога свежих мест падения на Марсе [Podobnaya et al., 2025]. Каталог содержит 830 кластеров, пары кратеров были исключены из кластерного анализа и рассматривались отдельно. Для нахождения разбиения на группы использовались данные 728 кратерных полей.

Методы кластерного анализа достаточно разнообразны, часть из них требует предварительного указания числа предполагаемых кластеров (методы *k-Means*, *k-Medoids* и т.д.), другие методы автоматически определяют наилучшее число кластеров для рассматриваемых данных (*GaussianMixture*, *Spectral* и др.). Пакет *Wolfram Mathematica* содержит целый набор методов кластерного анализа (*Wolfram Language & System Documentation Center. FindClusters*), отличающихся подходом к группировке данных и используемыми метриками. При анализе данных каталога использовались разные методы. Состав анализируемых характеристик (параметров) тоже варьировался.

Применение кластерного анализа к каталогу марсианских кластеров

Кластерный анализ позволяет группировать данные, принимая во внимание один или несколько параметров. Предварительный анализ данных показал, что можно выделить несколько групп кластеров (3–4), опираясь на соотношение M_1/M_0 . Поэтому при первом применении кластерного анализа (КА) этот параметр кластеров использовался в качестве входных данных. На рис. 1 приведено автоматическое разбиение на кластеры методом *Spectral* (*Wolfram Language & System Documentation Center; .Spectral (Machine Learning Method)*), число кластеров заранее не выбиралось. Хотя разделение на группы проводилось по M_1/M_0 , видно, что большая часть густозаселенных кластеров попадает в две

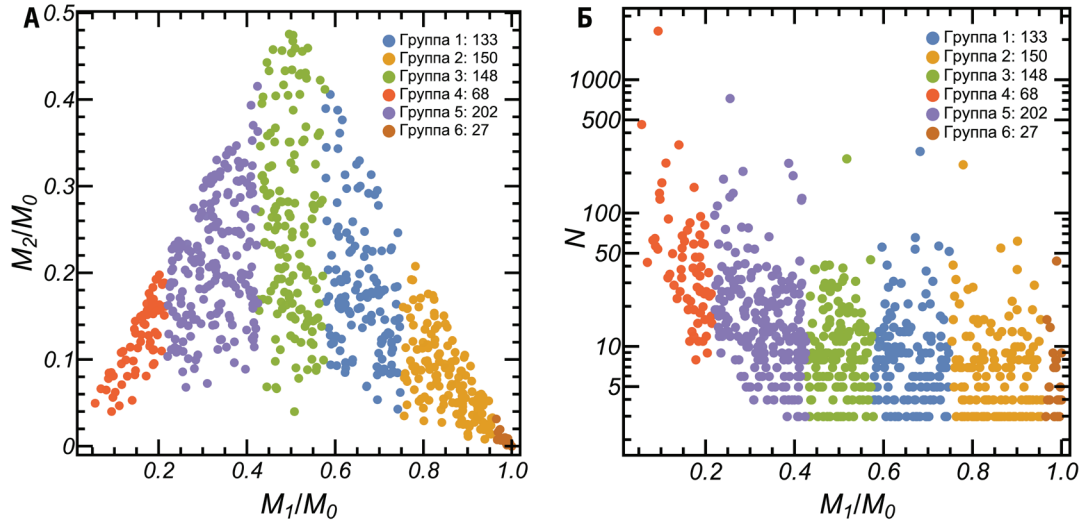


Рис. 1. Разбиение кластеров на группы при использовании одного параметра M_1/M_0 и метода *Spectral* с автоматическим выбором числа групп. Группы показаны в координатах M_1/M_0 и M_2/M_0 (А); M_1/M_0 и N (Б)

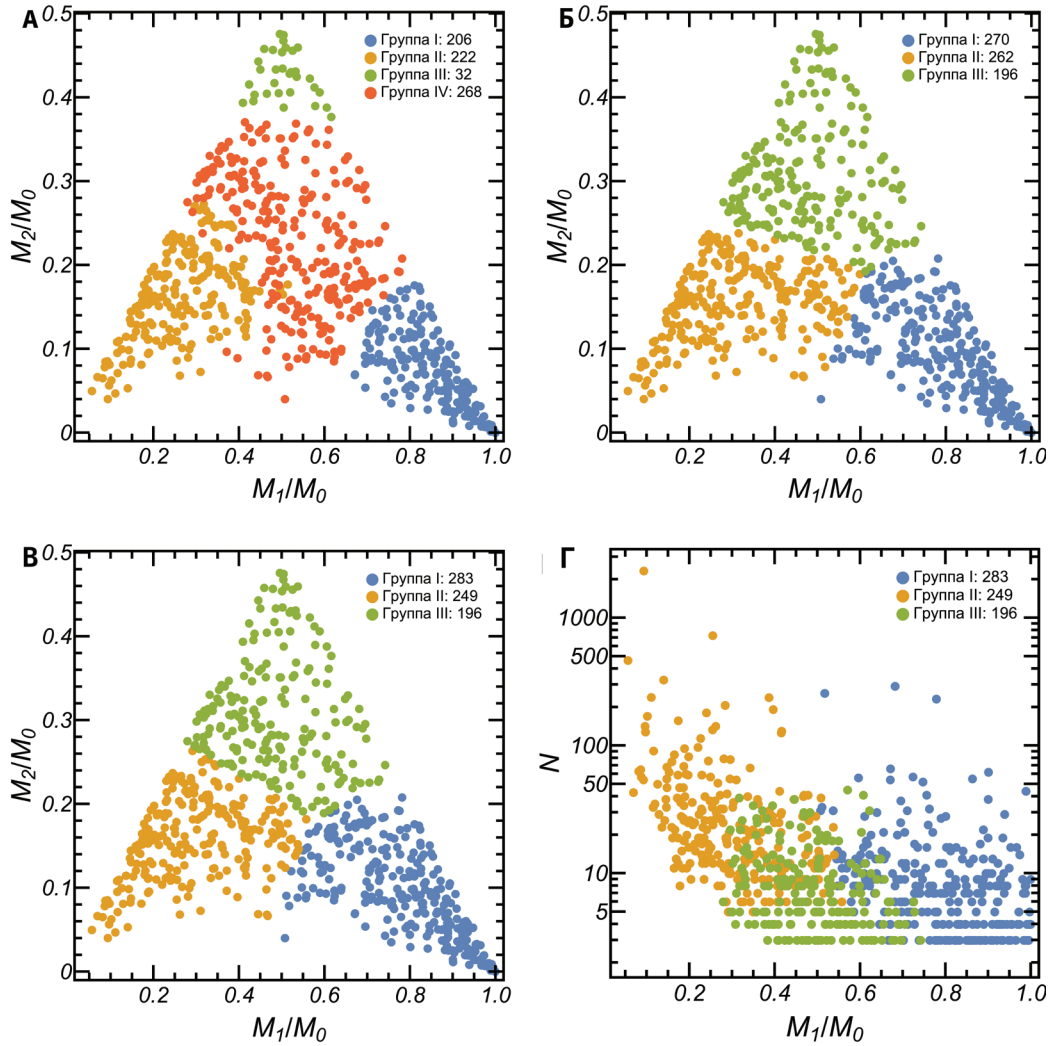


Рис. 2. Разбиение кластеров на группы при использовании двух параметров (M_1/M_0 и M_2/M_0) и трех методов (*Spectral* (А), *k-Means* (Б) и *GaussianMixture* (В, Г)) с заданным числом групп (3) для *k-Means* и автоматическим выбором числа групп для *Spectral* и *GaussianMixture*. Группы показаны в координатах: M_1/M_0 , M_2/M_0 (А, Б, В); M_1/M_0 и N (Г)

группы с наименьшими значениями M_1/M_0 . Следует помнить, что КА не дает единственного решения, но может предложить различные разбиения в зависимости от используемой методом метрики. Методы *k-Means* и *k-Medoids* приводят к такому же разбиению, если выбрать число групп равное 6. Другие методы с автоматическим выбором числа групп объединяют данные в 2–8 групп, во всех разбиениях сохраняется граница $M_1/M_0 \sim 0.55$. Уменьшение числа групп до 3–4 в методах *Spectral* и *k-Medoids* приводит к близким, хотя и не идентичным группам.

Предложенные ранее классификации каталога используют также размер второго по величине кратера, т.е. M_2/M_0 в используемых здесь координатах. Пример разбиения на группы при использовании двух параметров (M_1/M_0 и M_2/M_0) и автоматическом выборе числа групп показан на рис. 2. Число групп варьируется в зависимости от выбранного метода, но в формировании групп можно отметить сходство, не зависящее от метода – в отдельные группы выделяются кластеры со значениями M_1/M_0 близкими 0.8–1 (при этом M_2/M_0 мало, в основном не превышает 0.2). Это группа I, которая соответствует одному главному кратеру в кластере. Вторая, явно выделяющаяся группа, – это группа, где M_1/M_0 и M_2/M_0 невелики, не превышают 0.2–0.4 (здесь и далее группа II). Это кластеры с большим количеством относительно небольших кратеров (см. рис. 2В).

Замена одного из параметров на H_{elev} или D_{med} сохраняет две указанные группы, несколько уменьшая их численность. Кластеры, выбывшие из этих групп, объединяются в группы в зависимости от нового параметра, независимо от разделения по M_1/M_0 . Такое механическое разделение не добавляет понимания особенностей кластеров. Добавление дополнительных параметров к двум ранее рассматриваемым параметрам приводит к тому же результату.

Попытки найти разбиение на группы, отражающее связь между высотой над средним уровнем поверхности планеты H_{elev} и средним размером кластера D_{med} (который характеризует разброс фрагментов), не привели к положительному результату.

В качестве первого приближения мы остановились на разбиении, полученном методом *GaussianMixture*, которое предполагает разделение на три группы кластеров.

Распределение по размерам кластеров из предполагаемых групп

Для дополнительной оценки сходства кластеров, попадающих в одну группу, были построены распределения кратеров в кластерах по размерам и оценен наклон степенной аппроксимации.

В качестве переменной, по которой строится распределение, был выбран параметр D^3 . Использовалась сетка с отношением ячеек, равным целочисленным степеням $\sqrt{2}$. Для каждого кластера строилось кумулятивное распределение, которое аппроксимировалось степенной функцией $N_{cum}(> D^3) = a(D^3)^k$, кратеры с размером $D < 1$ м не учитывались при построении аппроксимаций из-за неполноты данных. Примеры распределений приведены на рис. 3 для 10 случайно выбранных кластеров из групп I и II. Оценивалось среднее значение степени k для всей группы кластеров, в данном представлении степень k соответствует распределению по массе, при сравнении с распределениями по размеру следует использовать значения $3k$. Аналогичные распределения были построены для всех трех групп разбиения, представленных на рис. 2В. Для рассматриваемого разбиения на три группы получились следующие средние степени k : группа I: -0.51 ± 0.01 , группа II: -0.71 ± 0.01 , группа III: -0.47 ± 0.01 (для двух первых групп примеры распределений приведены на рис. 3). Можно заметить, что по параметру k группа II отличается от групп I и III, для которых разница не столь значительна.

Как уже отмечалось выше, для группы II отношения M_1/M_0 и M_2/M_0 невелики – не превышают 0.2–0.4. Это кластеры с большим количеством относительно небольших кратеров, это характеризует тип разрушения на большое количество относительно некрупных фрагментов. Возможно, это связано с особенностями материала ударника.

Показатели степени для групп I и III близки. Мы провели КА для набора кластеров, исключив кластеры группы II. Применение того же метода к обрезанному набору данных почти не изменило разбиение на группы при автоматическом выборе числа групп (рис. 4).

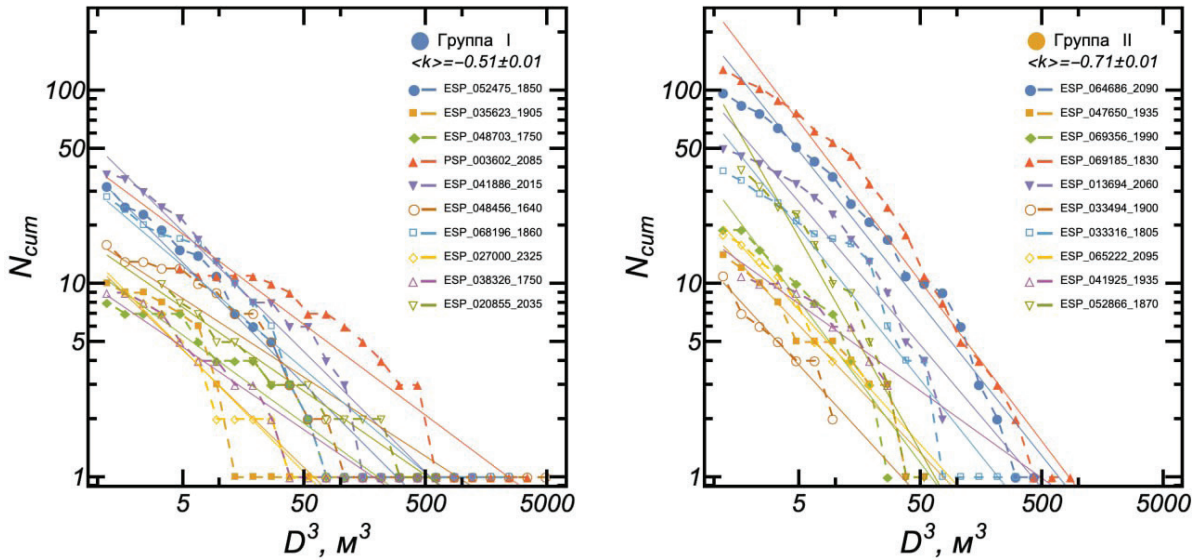


Рис. 3. Распределение по размерам для 10 случайно выбранных кластеров из группы I (левая панель) и группы II (правая панель), полученных при разбиении методом *GaussianMixture* с автоматическим выбором числа групп при использовании параметров – M_1/M_0 и M_2/M_0 . Точками и пунктиром показано наблюдаемое кумулятивное распределение кратеров в кластерах по параметру D^3 , прямые линии соответствуют найденному приближению степенной функцией

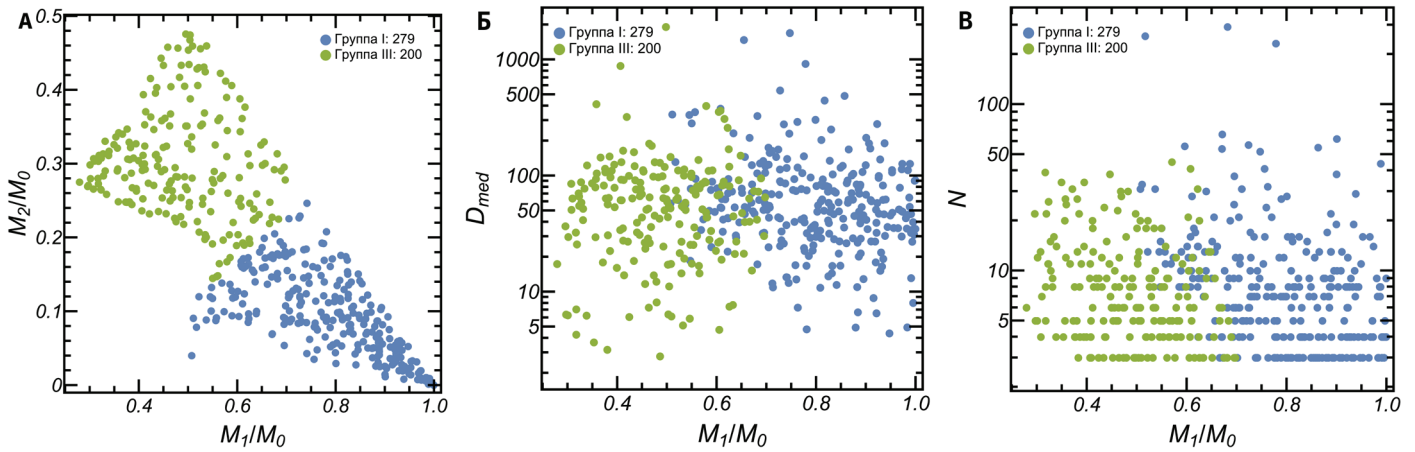


Рис. 4. Разбиение фильтрованного набора данных на группы при использовании параметров M_1/M_0 и M_2/M_0 методом *GaussianMixture* с автоматическим выбором числа групп. Группы показаны в координатах M_1/M_0 , M_2/M_0 (А); M_1/M_0 , D_{med} (Б); M_1/M_0 и N (В)

В этих двух группах распределение кратеров по массам близко друг к другу ($k = -0.5 \pm 0.01$ для группы I, и $k = -0.48 \pm 0.01$ для группы III), достаточно близки друг к другу и остальные рассматриваемые параметры (рис. 4 показывает распределение среднего размера кластеров и числа кластеров в этих группах). Основное отличие этих групп лежит в тех параметрах, по которым они и были выделены – M_1/M_0 и M_2/M_0 . Группа I, как и раньше, объединяет кластеры с доминирующим главным фрагментом (кратером), его масса в среднем составляет $0.8M_0$, второй фрагмент заметно меньше, в среднем $M_2 \sim 0.09M_0$. Для группы III масса главного фрагмента в среднем составляет $0.48M_0$, второй фрагмент сравним с ним – в среднем $M_2 \sim 0.3M_0$. Кроме этого, значительно различаются массы третьего и четвертого фрагментов. Таким образом, эти группы представляют собой кластеры с одним доминирующим фрагментом (оранжевые) и с двумя сравнимыми крупными кратерами. Возможно, это связано с типом разрушения.

Сравнение с предыдущими классификациями кластеров

Первоначальная классификация кластеров, входящих в расширенный каталог, опиралась на соотношение размеров кратеров в кластере, основную роль играло соотношение между главным и следующим по величине кратером [Подобная и др., 2023]. Все кластеры (на тот момент 633 кластера) были поделены на три категории: кластеры с доминирующим главным кратером (50 случаев, $\approx 8\%$); два близких наибольших кратера (183 случая, $\approx 29\%$); три или более сравнимых наибольших кратеров (400 кластеров, $\approx 63\%$).

Для случайных выборок по 20 кластерам из каждой предложенной категории были построены кумулятивные инкрементальные распределения кратеров в кластере по размерам, которые можно описать степенным законом с показателем степени $3k$. Для большей достоверности оценок в выборки включались только кластеры с числом кратеров $N > 5$. Средний наклон распределений для первой категории был оценен как $3k \sim -1.2$ ($k \sim -0.4$), для второй категории среднее значение $3k \sim -1.7$, для третьей – $3k \sim -1.8$. Вторая и третья категории близки по среднему показателю степени, используемый критерий их разделения возможно требует пересмотра.

При следующем подходе к классификации был использован другой критерий. Предполагалось, что разрушение на множество фрагментов может быть связано со свойствами материала метеороидов и/или соответствовать определенному типу фрагментации. Среднее значение числа кратеров в кластерах каталога $N \sim 10$, поэтому $N = 20$ было выбрано как минимальное число кратеров в густонаселённых кластерах. Первая категория (кластеры с доминирующим главным кратером) была оставлена неизменной.

Вторая классификация разделила расширенный каталог (рассматривалось 569 кратерных полей с $N > 4$) на три группы: кластеры с доминирующим главным кратером (51 кластер, 9%); густонаселенные кластеры ($N \geq 20$; 161 кластер, 28%), и малонаселенные кластеры ($N < 20$) с двумя или более сравнимыми наибольшими кратерами (357 кластеров, 63%) [Podobnaya et al., 2025]. Средние показатели степени распределения кратеров по размерам ($3k$) для выборок кластеров из этих групп составили -1.2, -2 и -1.4 соответственно. Группа с доминирующим кратером существенно отличается по значению среднего показателя степени k от группы густонаселенных кластеров и мало отличается от группы малонаселенных кластеров.

Применение кластерного анализа к 728 кластерам ($N \geq 3$) привело к разделению на три группы, описанные в предыдущих разделах. Группа I с доминирующим главным кратером объединяет кластеры, где доля максимального фрагмента по массе лежит в интервале 0.5–1 (в среднем 0.8), т.е. отношение размера главного кратера к эффективному размеру кластера $D_1/D_{eff} \sim 0.8$ –1 (в среднем 0.93). При этом доля второго фрагмента по массе в среднем составляет 0.09 и не превышает 0.2 (т.е. по отношению размеров в среднем $D_2/D_{eff} \sim 0.44$ и не превышает 0.6). Соответствующее отношение размеров двух наибольших кратеров составляет в среднем $D_2/D_1 \sim 0.48$ и может быть несколько больше. Это соотношение D_2/D_1 превышает выбранное ранее при построении первой классификации условие $D_2/D_1 = 0.4$ [Подобная и др., 2023; Podobnaya et al., 2025], поэтому группа с доминирующим главным кратером включает большее количество кластеров, чем в ранее предложенных классификациях (283 кластера, 38%).

Группа II (249 кластеров) объединяет кластеры с отношениями масс M_1/M_0 и M_2/M_0 , составляющими в среднем 0.3 и 0.16. Это кластеры с большим количеством относительно небольших кратеров, среднее значение числа кратеров $N \sim 47$ (медианное – 20), т.е. эта группа включает в себя большую часть группы густонаселенных кластеров и несколько расширяет ее за счет включения кластеров с небольшим количеством мелких кратеров. Как и в ранее предложенной второй классификации каталога [Podobnaya et al., 2025] показатель степени k в распределении кратеров по массе/размерам для группы II существенно отличается от среднего значения k в группе I. Средние значения размеров первых четырех кратеров мало отличаются друг от друга и составляют 0.67–0.43 D_{eff} .

Группа III включает в себя кластеры с относительно небольшим числом кратеров (среднее и медианное значения $N \sim 10$ и $N \sim 6$), в которых отношение масс M_1/M_0 и M_2/M_0 , составляет в среднем 0.48 и 0.3. Это группа с двумя сравнимыми наибольшими кратерами.

Кластерный анализ предложил разделение на группы, коррелирующее с обеими предыдущими классификациями. Средние характерные значения параметров немного отличаются от использованных в ранних классификациях, но сами группы похожи [Подобная и др., 2023; Podobnaya et al., 2025].

КА позволил убедиться в правильном подходе к выделению типов кластеров в предыдущих работах, а также более четко разделить их на группы.

Выводы

Впервые применен кластерный анализ к каталогу недавно образованных мест падения метеороидов на Марсе. Число выделяемых групп варьируется в зависимости от выбранного метода, но в формировании групп можно отметить сходство, не зависящее от метода – в отдельные группы выделяются кластеры со значениями M_1/M_0 близкими 0.8–1 (при этом M_2/M_0 мало, в основном не превышает 0.2). Эта группа соответствует одному главному кратеру в кластере. Вторая, явно выделяющаяся группа, где M_1/M_0 и M_2/M_0 невелики, не превышают 0.2–0.4. Это кластеры с большим количеством относительно небольших кратеров. Возможно, данное явление связано с особенностями материала ударника. Третья, часто выделяющаяся группа, – это группа, у которой есть два или более сравнимых кратера. Построенные кумулятивные распределения кратеров в кластерах по массе (по параметру D^3) показали, что наклон распределения значимо отличается для группы с мелкими фрагментами. Для двух других групп наклон распределения почти совпадает, но различается число крупных фрагментов; возможно, это связано с типом разрушения.

Попытки найти разбиение на группы, отражающее связь между высотой над средней поверхностью H_{elev} и средним размером кластера D_{med} (который определяется расхождением фрагментов), не привели к положительному результату, также не просматривается зависимость числа кратеров от высоты над средней поверхностью.

Кластерный анализ предложил разделение на группы, коррелирующее с обеими предыдущими классификациями. Средние характерные значения параметров немного отличаются от использованных в ранних классификациях, но сами группы похожи [Подобная и др., 2023; Podobnaya et al., 2025]. КА позволил убедиться в правильном подходе к выделению типов мест падения в предыдущих работах, а также более четко разделить их на группы.

Финансирование

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

Список литературы

- 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
- 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>
- Brown P., Wiegert P., Clark D., Tagliaferri E. Orbital and physical characteristics of meter-scale impactors from airburst observations // Icarus. 2016. Vol. 266. P. 96–111. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.11.022>
- Brož M., Vernazza P., Marsset M., DeMeo F.E., Binzel R.P., Vokrouhlický D., Nesvorný D. Young asteroid families as the primary source of meteorites // Nature. 2024a. Vol. 634 (8034). P. 566–571. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08006-7>
- Brož M., Vernazza P., Marsset M., Binzel R.P., DeMeo F., Birlan M., Colas F., Anghel S., Bouley S., Blanpain C., Gattacceca J., Jeanne S., Jorda L., Lecubin J., Malgouyre A., Steinhäusser A., Vaubaillon J., Zanda B. Source regions of carbonaceous meteorites and near-Earth objects // Astron. & Astrophys. 2024b. Vol. 689. P. A183. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450532>

Cepilecha Z., Borovička J., Elford W.G., ReVelle D., Hawkes R.L., Porubčan V., Šimek M. Meteor phenomena and bodies // Space Sci. Rev. 1998. Vol. 84. P. 327–471. <https://doi.org/10.1023/A:1005069928850>

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>

Granvik M., Morbidelli A., Jedicke R., Bolin B., Bottke W.F., Beshore E., Vokrouhlický D., Nesvorný D., Michel P. Debaised orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects // Icarus. 2018. Vol. 312. P. 181–207. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.04.018>

Holsapple K.A., Housen K.R. A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact // Icarus. 2007. Vol. 191 (2). P. 586–597. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.08.035>

Marsset M., Vernazza P., Brož M., Thomas C.A., DeMeo F.E., Burt B., Binzel R.P., Reddy V., McGraw A., Avdellidou C., Carry B., Slivan S.M., Polishook D. The Massalia asteroid family as the origin of ordinary L chondrites // Nature. 2024. Vol. 634. P. 561–565. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08007-6>

Meteoritical Bulletin Database – справочная информация – URL: <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php> (дата обращения: 04.10.2024).

Nesvorný D., Deienno R., Bottke W.F., Jedicke R., Naidu S., Chesley S.R., Chodas P.W., Granvik M., Vokrouhlický D., Brož M., Morbidelli A., Christensen E., Shelly F.C., Bolin B.T. NEOMOD: a new orbital distribution model for near-earth objects // The Astron. J. 2023. Vol. 166 (2). P. 55. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ace040>

Podobnaya E., Glazachev D., Popova O., Ivanov B. Classification of craters clusters in the expanded catalog of fresh impact sites on Mars // Solar System Research. 2025. Vol. 59 (in print).

Wolfram Language&SystemDocumentationCenter. FindClusters – справочная информация – URL: <https://reference.wolfram.com/language/ref/FindClusters.html> (дата обращения: 04.10.2024).

Wolfram Language & System Documentation Center. Spectral (Machine Learning Method) – справочная информация – URL: <https://reference.wolfram.com/language/ref/method/Spectral.html> (дата обращения: 04.10.2024).

CLUSTER ANALYSIS OF RECENTLY FORMED MARTIAN CRATER FIELDS

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

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

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

The catalogue of recently formed meteoroid impact sites on Mars provides an opportunity to study the meteoroid population common to Earth and Mars. Cluster analysis was applied to analyse the catalogue data. The number of clusters varies depending on the method chosen; regardless of the method, clusters with a dominant major crater and clusters with a large number of relatively small craters are distinguished into separate groups. A third frequently distinguished group is one with two comparable large craters. The plotted cumulative distributions of craters in clusters by mass showed that the slope of the distribution was significantly different for the group with small craters. Cluster analysis suggested cluster partitioning correlated with previously proposed cluster classifications. Attempts to find a partitioning into groups reflecting the relationship between height above the mean surface and mean cluster size did not lead to a positive result, nor does the dependence of the number of craters on height above the mean surface.

Keywords: Mars, crater cluster, classification, cluster analysis.