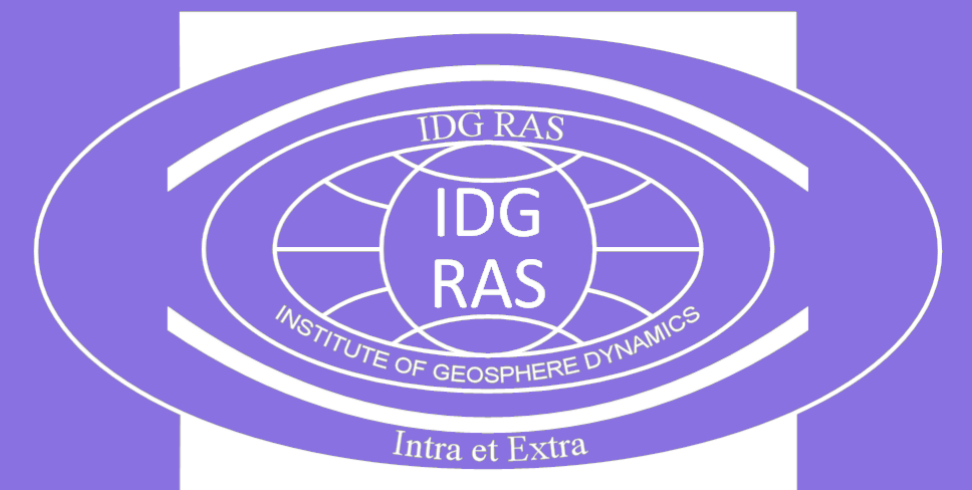


РАСШИРЕННЫЙ КАТАЛОГ НЕДАВНИХ МЕСТ ПАДЕНИЯ МЕТЕОРОИДОВ НА МАРСЕ

Е. Подобная, О. Попова, Б. Иванов, Д. Глазачев
Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва

e-mail: olga@idg.ras.ru; epodobnaya@idg.ras.ru



Введение

За последние десятилетия выполнялись повторяющиеся съемки поверхности Марса, позволившие найти новые датированные места падения космических тел (КТ) метрового размера. Появление на снимке темного пятна, образованного между проходами камеры определяет примерное время формирования кластера. С июля 2023 года в наблюдениях HiRISE наблюдаются технические неполадки, к тому моменту обнаружено более 1400 недавних мест падений [1]. Пока непонятно, восстановят ли полноценное функционирование.

Из-за разреженной атмосферы Марса, падающие объекты меньше фрагментируют, но при этом около 57% КТ разрушаются в атмосфере и образуют кратерные поля [2-4] с характерными размерами в десятки и сотни метров. На Земле КТ обычно наблюдаются во время короткого пролета через атмосферу, в редких случаях их фрагменты находят в виде метеоритов.

Анализ кластеров на Марсе позволяет изучать плохо различимые на Земле детали взаимодействия КТ с атмосферой. Изучение кластеров дает уникальную возможность независимо оценивать параметры КТ, исследовать различные типы фрагментации для объектов различного состава и происхождения.

Кратерные поля

В настоящее время имеются данные о 1440 недавних датированных местах падения КТ, образованных между 2007 и 2021 годом. К ранее опубликованному каталогу (1203 места, [5]) мы добавили около 245 мест. Каталог, включающий все найденные свежие места падения, будем называть расширенным каталогом, для его части (1239) доступны данные о размере и расположении кратеров в кластерах.

Для описания кластеров определяют эффективный диаметр, т.е. диаметр кратера, образованного неразрушенным КТ:

$$D_{eff} = (\sum D_i^3)^{1/3}$$

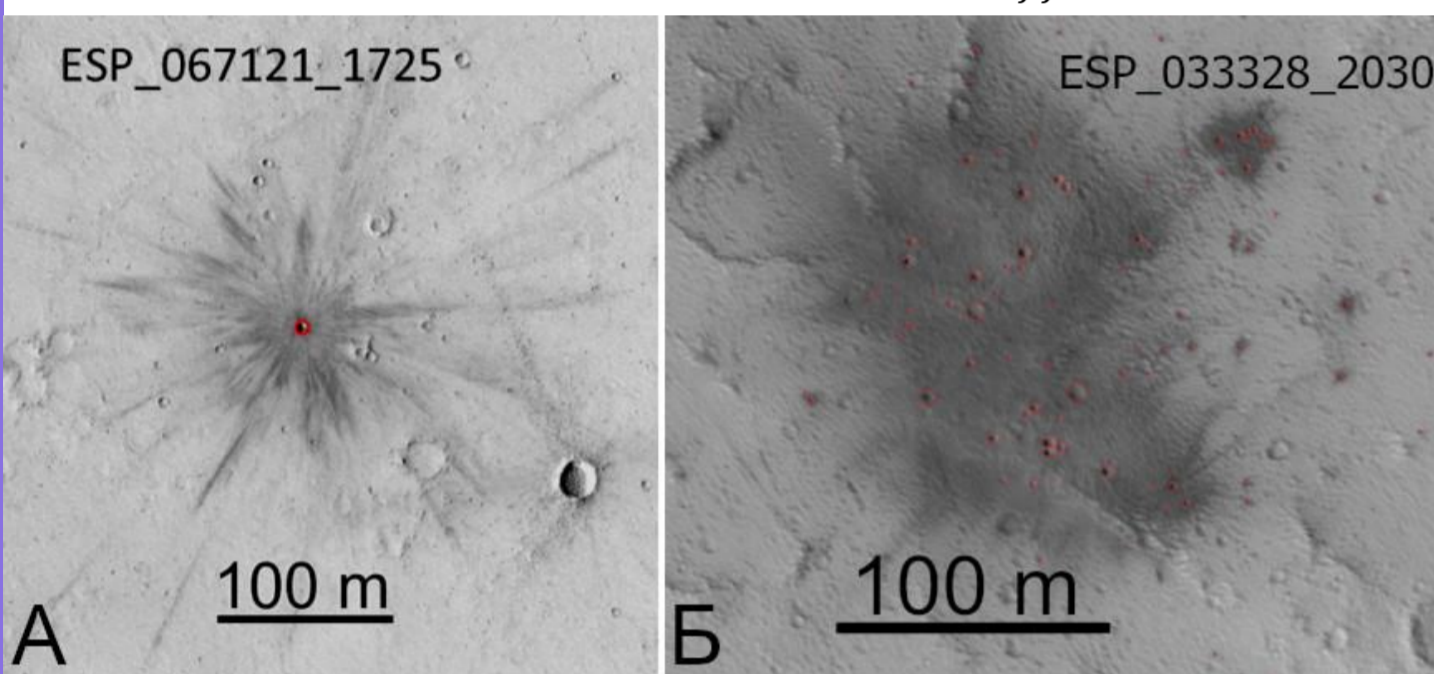


Рис. 1. Примеры мест падения:
А. Одиночный кратер, диаметр 6.5 м.
Б. Кластер $D_{eff} \approx 9$ м, 65 кратеров.

Распределение мест падения

- Распределение малых тел в Солнечной системе по размерам (SFD), как и распределение образованных ими кратеров, дает представление о происхождении и эволюции КТ.
- SFD описывается как $dN/dD \sim D^{-k}$, k варьируется от 2 до 3.5 [6,7]. Также могут использоваться промежуточные значения [e.g., 8,9]. У нас $k=2.1$.
- Уменьшение числа случаев при $D < 5-6$ м (рис. 2) возникает из-за влияния атмосферы и трудностей обнаружения малых кратеров. Кластеры и одиночные кратеры описываются одним распределением.
- По соотношениям подобия [10] был оценен размер КТ, соответствующий одиночным кратерам: 0.2-15 м (комета) и 0.1-9 м (астероид) кластерам: 0.3-12 м (комета) и 0.2-7 м (астероид)

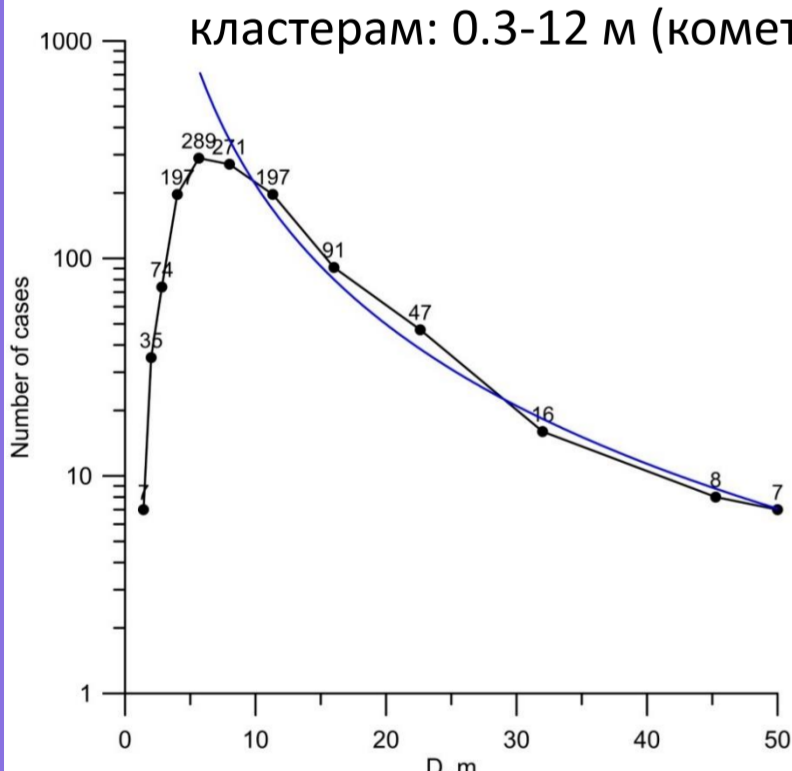


Рис. 2. SFD недавних кратерных полей. Для кластеров использован D_{eff} . Синяя линия показывает степенной фит с показателем степени $k=-2.13$.

Первая классификация

Классификация и деление на группы должны позволять выявлять закономерности в существующих кластерах. Ранее, когда статистика составляла ≈ 20 случаев, было предложено сгруппировать их на 4 типа [11]:

- Кластеры с главным кратером и несколькими (< 9) гораздо меньшими (включая одиночные кратеры и пары) - Тип 0, 6 случаев (32%).
- Кластеры с главным кратером и множеством меньших (> 9) - Тип 1, 6 случаев (32%).
- Кластеры с несколькими сравнимыми наибольшими кратерами (включая пары) - Тип 2, 2 случая (10%).
- Густонаселённые кластеры (> 400 кратеров) - Тип 3, 5 случаев (26%).

Мы применили предложенную классификацию к расширенному каталогу:

- Большая часть мест - в 2х группах, другие 2 - составляют лишь 2%. Эта классификация не описывает всего многообразия кластеров.
- Можно ожидать, что в популяции ударников присутствуют достаточно крупные группы тел с различными свойствами, которые разрушаются по-разному. Это должно найти свое отражение в свойствах кластеров.
- Для группировки кластеров по новым критериям, мы рассмотрели некоторые зависимости для одиночных кратеров, пар кратеров и кластеров (≥ 3 кратеров).

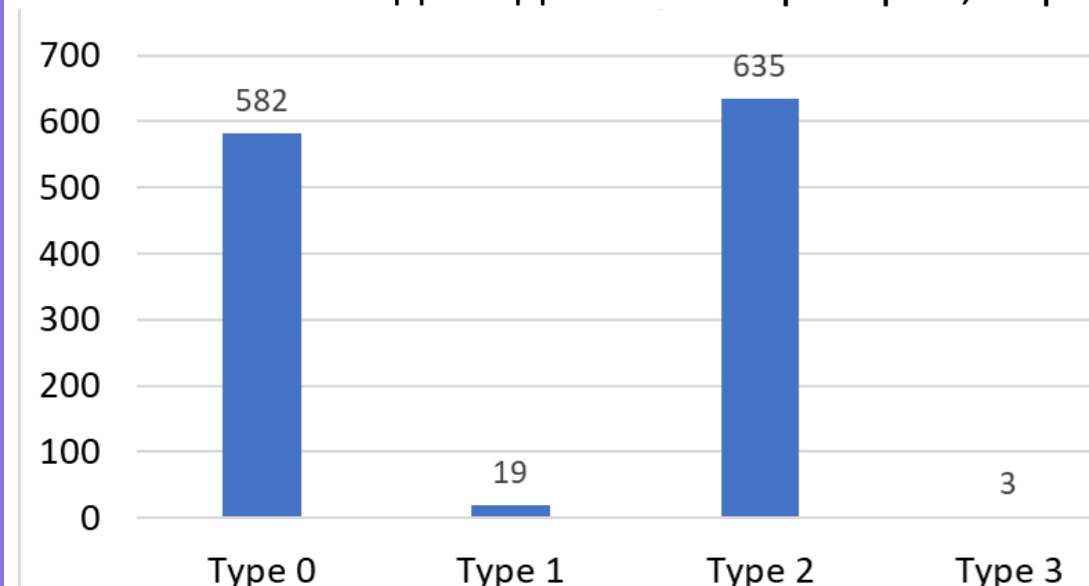
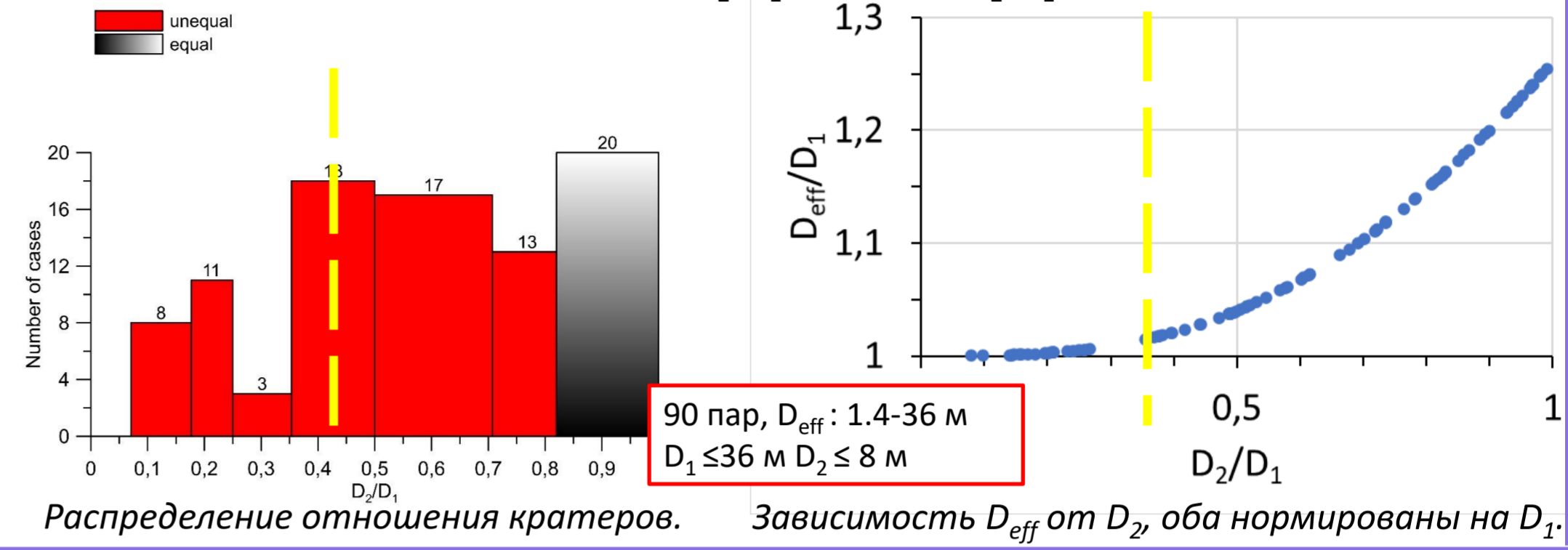


Рис. 3. Применение классификации из [11] к расширенному каталогу.

Пары кратеров

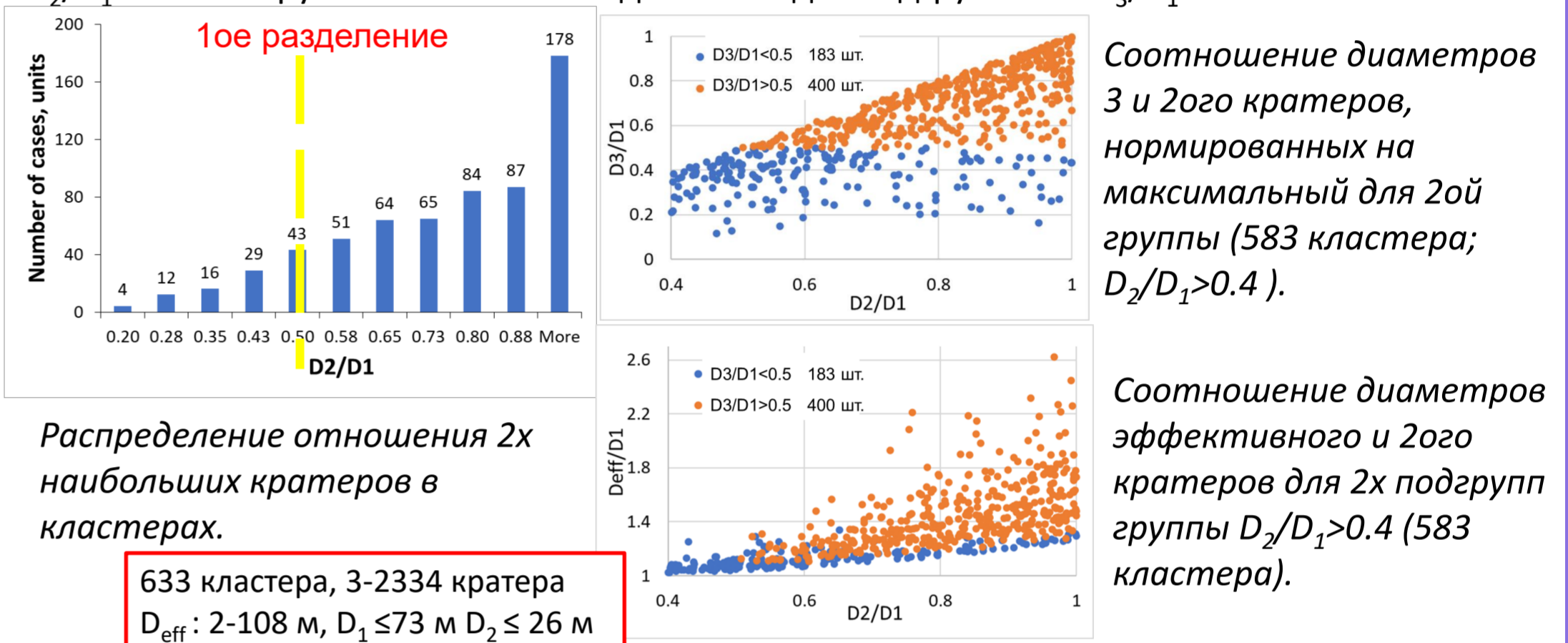
- Пары кратеров могут быть двух видов: сравнимые по размерам и доминирующий главный кратер в сопровождении гораздо более мелкого.
- Для определения границы деления, мы рассмотрели отношение между кратерами (D_2/D_1).
- Предлагается группировать пары по $D_2/D_1 = 0.4$ (эффективный кратер становится близок к главному). Итогом будет 2 набора: 20 ($D_2/D_1 < 0.4$) и 70 ($D_2/D_1 > 0.4$) пар.



Распределение отношения кратеров. Зависимость D_{eff} от D_2 , оба нормированы на D_1 .

Кластеры

По аналогии с парами мы разбили кластеры на 2 группы (50 и 583 кластера) по критерию $D_2/D_1 = 0.4$. 2ая группа может быть поделена на две подгруппы по $D_3/D_1 = 0.5$.



Соотношение диаметров 3 и 2ого кратеров, нормированных на максимальный для 2ой группы (583 кластера; $D_2/D_1 > 0.4$).

Соотношение диаметров эффективного и 2ого кратеров для 2х подгрупп $D_2/D_1 > 0.4$ (583 кластера).

Новая классификация

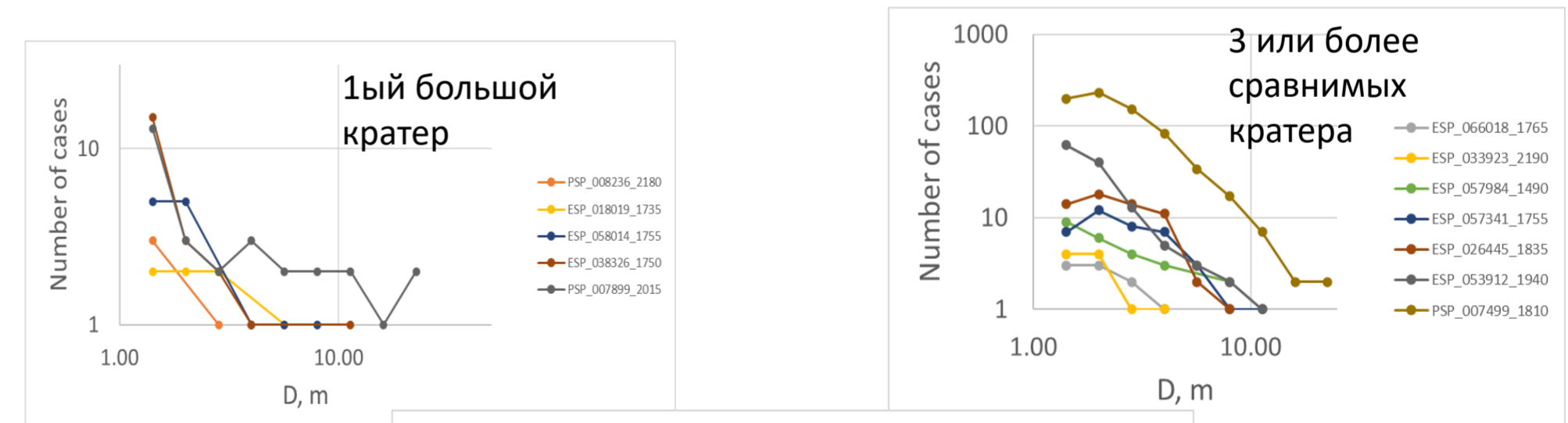
Всего 6 групп мест падения:

- одиночные кратеры
- пары из 2х сравнимых кратеров
- пары с доминирующим главным кратером
- кластеры с доминирующим главным кратером
- кластеры с двумя сравнимыми наибольшими кратерами
- кластеры с 3 и более сравнимыми наибольшими кратерами

Можно обобщить до 3х типов мест падения:

- 1 большой + есть/нет мелкие
Всего: 604 случая
- 2 сравнимых + есть/нет мелкие
Всего: 253 случая
- 3 или более сравнимых + есть/нет мелкие
Всего: 400 случаев

- Одиночные кратеры (534 шт.)
- Пары с доминирующим 1ым кратером (20 шт., $D_2/D_1 < 0.4$)
- Кластеры с доминирующим 1ым кратером (50 шт., $D_3/D_1 < 0.4$)
- Пары сравнимых (70 шт., $D_2/D_1 > 0.4$)
- Кластеры с ровно 2мя сравнимыми кратерами (183 шт., $D_2/D_1 > 0.4$ & $D_3/D_1 > 0.5$)
- Кластеры с 3 или более сравнимыми кратерами (400 шт., $D_2/D_1 > 0.4$ & $D_3/D_1 > 0.5$)



Различные предложенные группы могут соответствовать различным типам разрушения в момент входа метеороида в атмосферу.

SFD кратеров для нескольких кластеров из 3х обобщенных групп.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №23-27-00432.

Литература

- McEwen A.S., et al. 2007. JGR:Planets, V.112, No.E5.
- Daubar I.J., et al. 2010. LPSC Conf., LPI Contr. No.1533, P.1978.
- Daubar I.J., Banks M.E., Schmerr N.C., Golombek M.P. 2019. JGR:Planets, V.124, No.4, P.958-969.
- Hartmann W.K., Daubar I.J., Popova O., Joseph E.C.S. 2018. Meteor.&Plan. Sci., V.53, P.672-686.
- Daubar I.J., et al. 2022. JGR:Planets, V.127, e2021JE007145.
- Ivanov B.A. 2001. Space Sci. Reviews, V.96, No.1-4, P.87-104.
- Dohnanyi J. S. 1969. JGR, V.74, No.10, P.2531-2554.
- Cellino A., Zappalà V., Farinella P. 1991. Monthly Notices of the Royal Astron. Society, V.253, No.4, P.561-574.
- Davis D. R., Ryan E. V., Farinella P. 1994. Plan. and Space Sci., V. 42, No. 8, P. 599-610.
- Holsapple K.A., Housen K.R. 2007. Icarus, V.191, No.2, P.586-597.
- Ivanov B.A., Melosh H.J., McEwen A.S., HiRISE Team. 2008. LPSC Conf., LPI Contr., No.1221., P.1391.