

Шестая Международная конференция

"Триггерные эффекты в геосистемах"

21-24 июня 2022 / Москва

Анализ расположения кратеров для недавно образовавшихся кратерных кластеров на Марсе

ПОДОБНАЯ Е., ПОПОВА О., ГЛАЗАЧЕВ Д.
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР РАН, МОСКВА, РОССИЯ



Введение

За последние годы на Марсе было обнаружено примерно 1200 свежих мест падения метеороидов (*Malin et al., 2006; Daubar et al., 2013, 2022*).

Это одиночные кратеры и кратерные поля (кластеры) с кратерами до 50 м. Их образовали метеороиды размером несколько метров. Такие объекты наблюдаются на Земле как суперболиды (*Hartmann et al., 2018*).

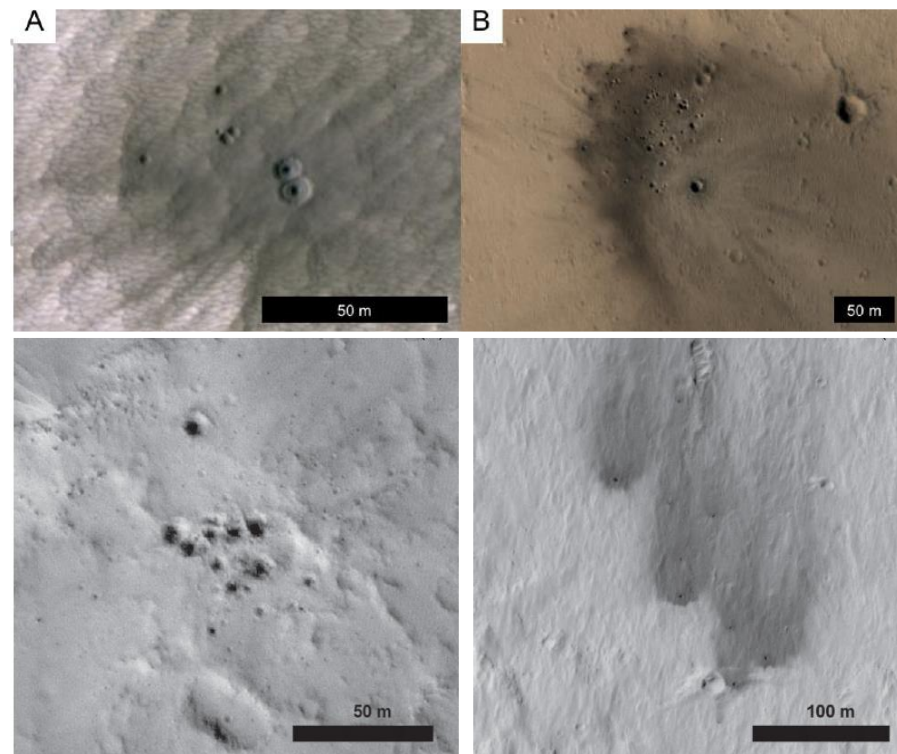
Метеороиды размером несколько метров в 40-50% случаев привели бы к образованию кратерных полей на Марсе (*Hartmann et al., 2018*).

Благодаря более разреженной атмосфере Марса (в сравнении с Землей) падающие метеороиды меньше разрушаются. Около 50% разрушаются в атмосфере Марса и создают кластеры.

Оценки свойств метеороидов зависят от моделей фрагментации, калиброванных на небольшом числе событий.

Уровень поверхности Марса соответствует 30 км высоте земной атмосферы.

Исследование кратеров на Марсе позволяет изучать детали фрагментации, которые не могут быть обнаружены в земных условиях.



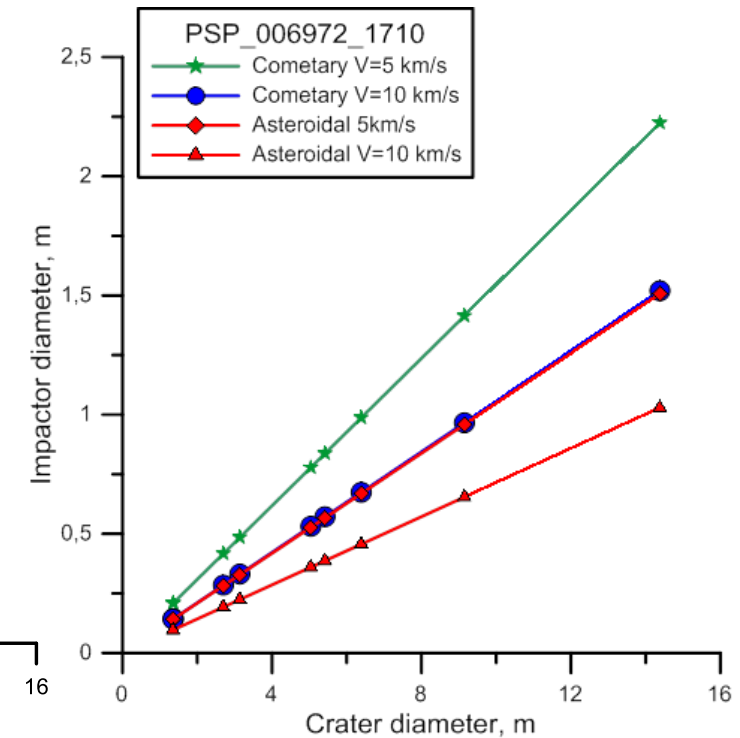
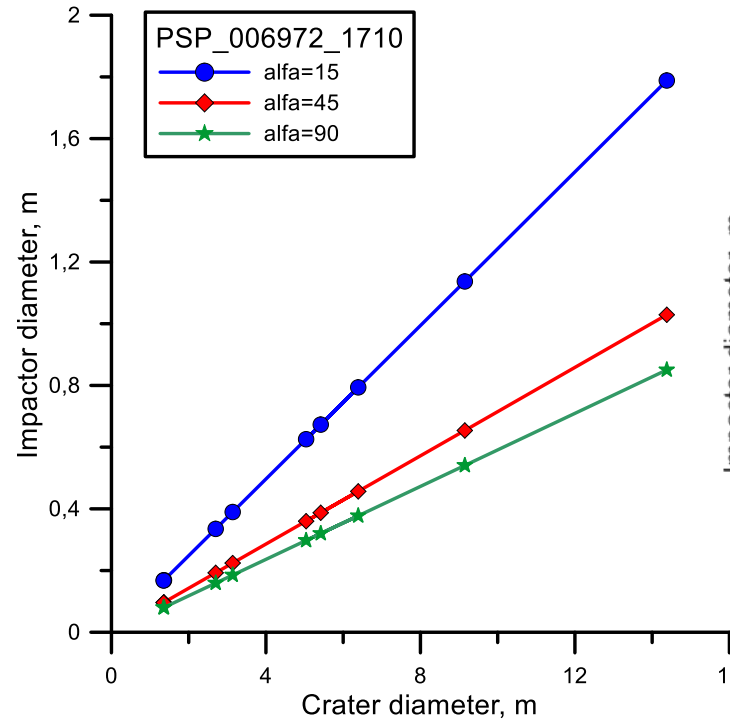
Примеры недавних импактов на Марсе (*Hartmann et al., 2018; Daubar et al., 2019*). Изображения получены камерой HiRISE (<https://www.uahirise.org/>).

Импакторы

Основываясь на размере кратера, можно оценить соответствующий размер образовавшего его ударника, используя соотношения подобия для кратеров (Housen and Holsapple, 2007). Для каждого кратера в кластере был рассчитан соответствующий размер фрагмента ударника.

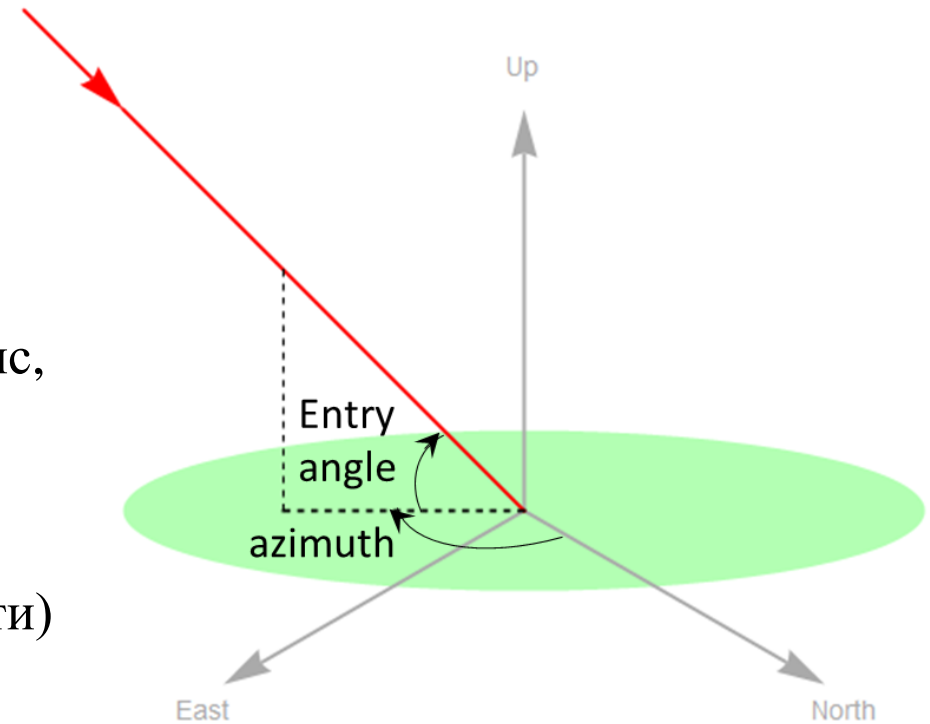
- За счет торможения в атмосфере импактор (D, V, α) создает кратеры различных размеров в зависимости от высоты поверхности Марса.
- Оценка размера импактора D_{imp} по размеру кратера D_{cr} неточна (2-3 раза).
- Импакторы в среднем 0.2-3 м в диаметре. Такие импакторы на Земле отслеживаются болидной сетью и системой спутниковой регистрации.

Разброс в расчете размера ударника, возникающий из-за неопределенности
А. Угла входа
В. Скорости и плотности ударника



Кратерные поля рассеяния

- Поле рассеяния зависит от многих параметров, включая параметры импактора, фрагментации и других. Изучение кластеров позволяет определить эти характеристики.
- Поля рассеяния можно описать эллипсом (*Daubar et al., 2019*), его параметры позволяют определить траекторию метеороида. Выбраны два алгоритма, покрывающие 90% кратеров в кластере.
- Первый алгоритм (**MVE**) аналогичен используемому *Daubar et al. (2019)*. Следующий алгоритм (далее **Stat**) – статистический эллипс, встроенный в ПО Wolfram Mathematica.
- Ориентация траектории ударника в пространстве определяется: углом входа (угол наклона траектории к горизонтальной плоскости) и углом наклона проекции траектории на плоскости (азимут). Азимут траектории = направление полета метеороида.



Углы, определяющие траекторию в пространстве

Кратерные поля рассеяния II

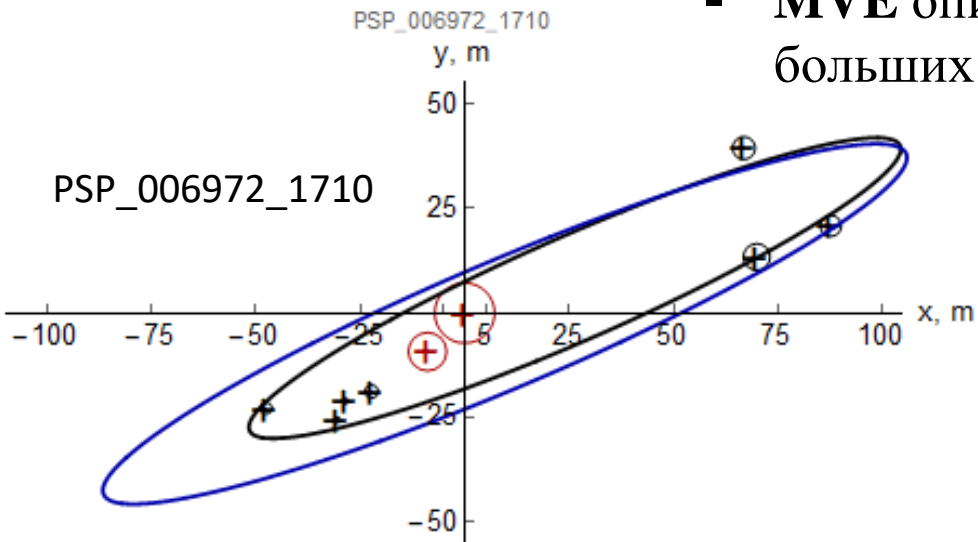
Большая полуось **85 м**; **104 м**

Малая полуось **15 м**; **15 м**

Азимут **245°**; **250°**

Угол входа **80°**; **80°**

Покрывает **26**; **27** из 28 кратеров



Примеры расположения кратеров в кластере. Красные точки: кратеры максимального **квартиля**. Эллипсы рассеяния построены методами **Stat** и **MVE**. Наибольший кратер в кластере расположен в центре координат.

Наклон главной оси - азимут траектории. Направление полета - в сторону от центра эллипса, где суммарный размер кратеров больше. Угол входа зависит от отношения осей эллипса.

- Рассматриваются 77 кластеров. От 2 до 465 кратеров.
- Для 55 кластеров (> 5 кратеров) были построены эллипсы рассеяния.
- По эллипсам находились параметры траектории.
- **MVE** и **Stat** покрывают в среднем 88% от всех кратеров в кластере.
- **MVE** и **Stat** плохо описывают кластеры с меньше, чем 10 кратерами.
- **MVE** описывает кластеры эллипсами меньшей площади, чем **Stat**. Для больших кластеров **MVE** покрывает > 90% кратеров.

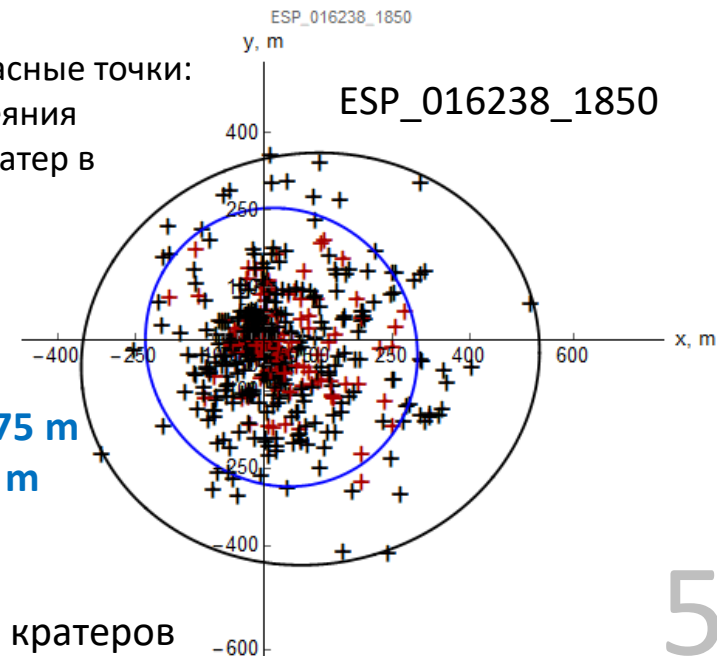
Большая полуось **450 м**; **275 м**

Малая полуось **400 м**; **260 м**

Азимут **260°**; **325°**

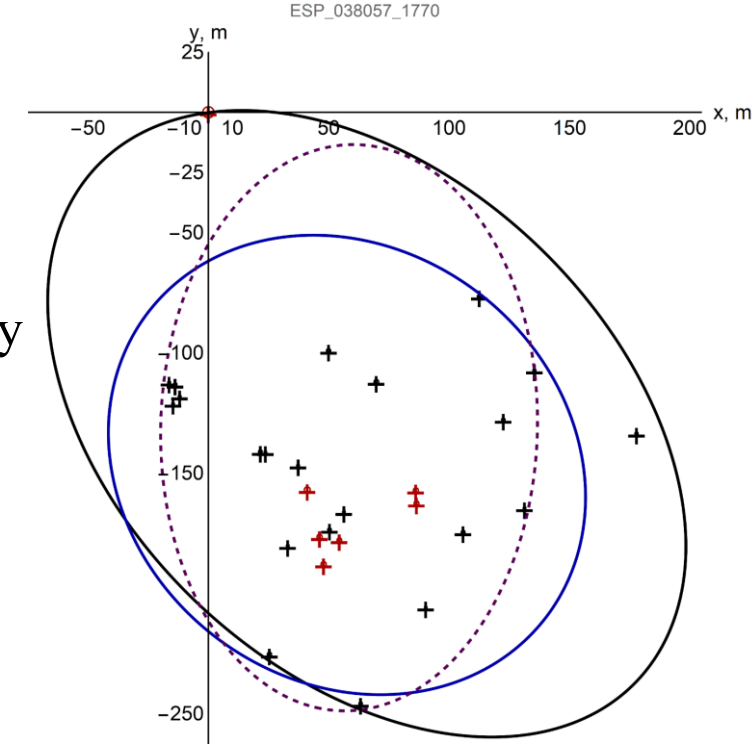
Угол входа **30°**; **20°**

Покрывает **462**; **417** из 465 кратеров

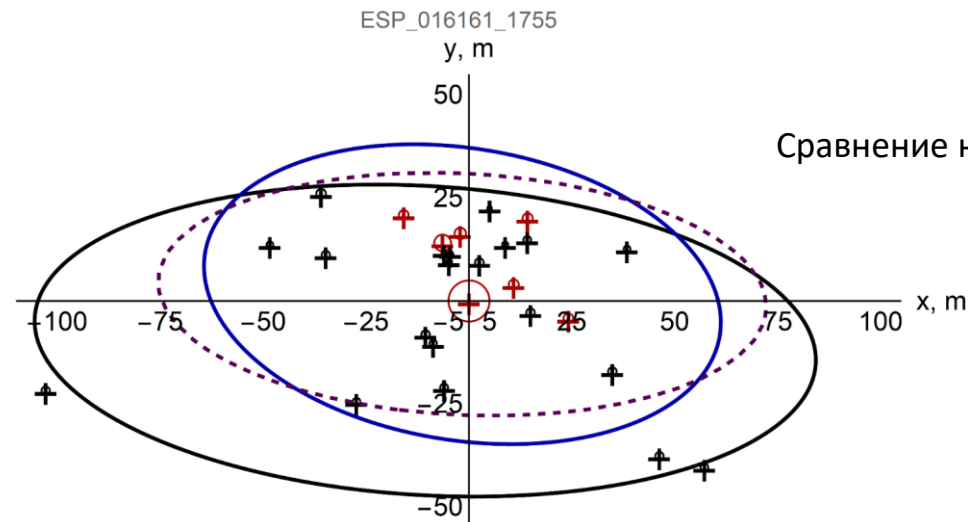


Сравнение с предыдущими работами

- Среднее отличие от эллипсов из Daubar et al. (2019): **MVE** – 1.65; **Stat** – 1.43 раз больше.
- **MVE** и **Stat** совпадают в оценках углов с точностью 10° между собой.
- Оценки угла входа в атмосферу показывают различие в не более 20° между **MVE**, **Stat** и Daubar et al. (2019) в большинстве случаев.
- Для 40% кластеров различие в оценках азимута с Daubar et al. (2019) не более 20° ; в половине случаев отличается направление полета ($180^\circ \pm 30^\circ$).



ESP_038057_1770
Большая полуось **118 m**; 155 m; **104 m**
Малая полуось **78 m**; 103 m; **90 m**
Азимут **0°**; 135°; **130°**
Угол входа **50°**; 50°; **30°**
Покрывает **26**; **27**; **25** из 28 кратеров



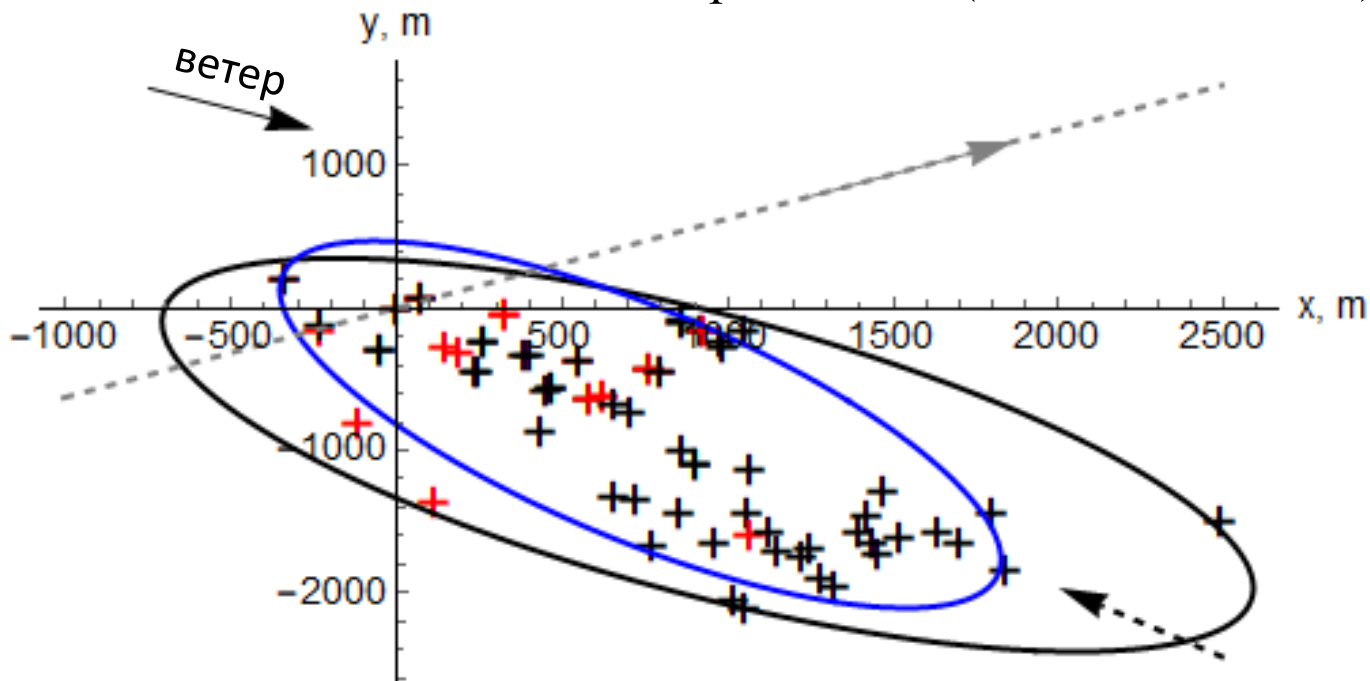
Сравнение наших результатов (**MVE** и **Stat**) с Daubar et al. (2019).

ESP_016161_1755
Большая полуось **74 m**; 95 m; **63 m**
Малая полуось **29 m**; 38 m; **35 m**
Азимут **90°**; 90°; **100°**
Угол входа **70°**; 70°; **60°**
Покрывает **24**; **25**; **24** из 27 кратеров

Эллипсы рассеяния на Земле I

Метеорит Озерки:

- ❖ 21 июня 2018 года, Липецкая область, Россия
- ❖ 76 фрагментов, максимальный – 740 г
- ❖ Высота максимальной яркости 27.2 ± 0.9 км
- ❖ Параметры: диаметр 4 м, скорость 15 км/с, плотность 3240 кг/м^3
- ❖ Наблюдаемый азимут полета $58^\circ \pm 3^\circ$, это сильно отличается от наших оценок (307° - 320°)
- ❖ Угол входа составил 78° от горизонтали (по видеозаписям), наши оценки 33 - 35°

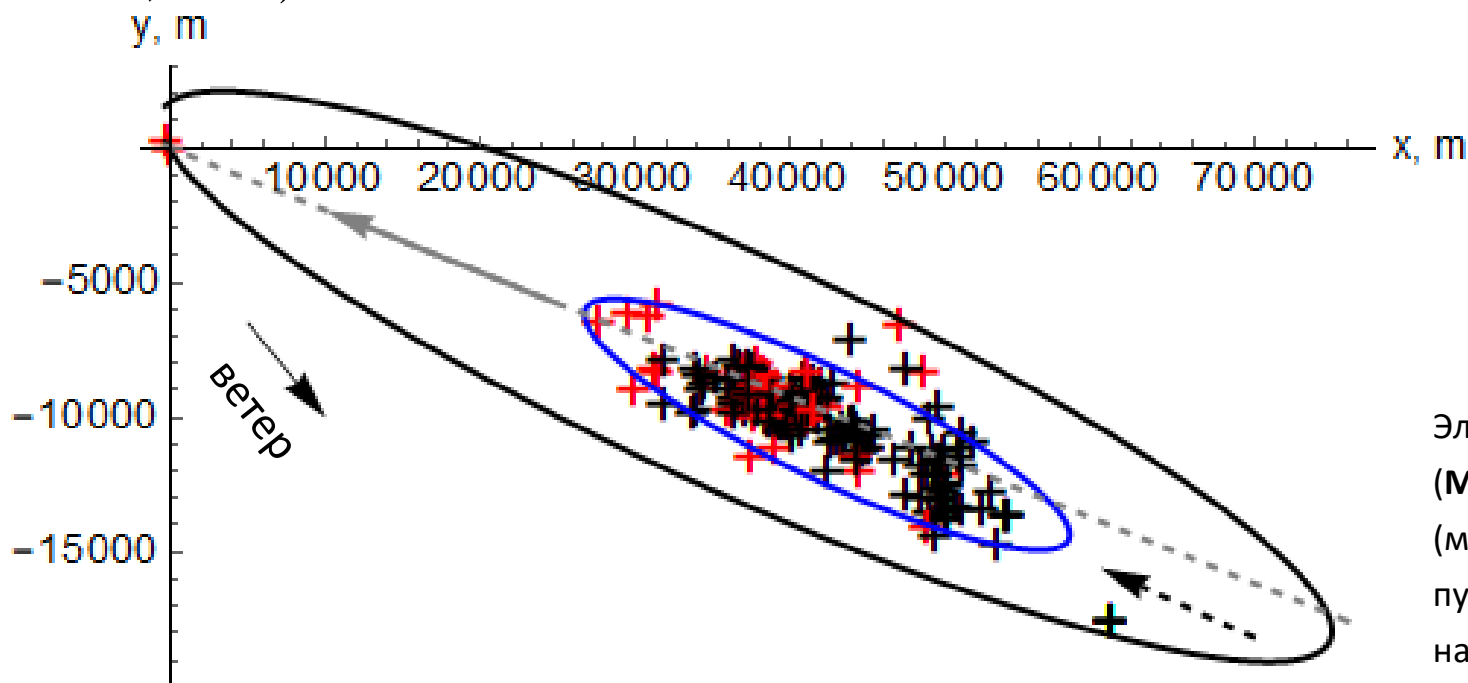


Эллипсы рассеяния, покрывающие найденные фрагменты (**MVE** и **Stat**). Плюсы – расположение фрагментов (максимальный **квантиль** отмечен красным). Черная пунктирная стрелка – средний азимут. Серая стрелка – направление полета по Kartashova et al. (2020).

Эллипсы рассеяния на Земле II

Челябинский метеорит:

- ❖ 15 Февраля 2013 года, Челябинск, Россия
- ❖ 180 фрагментов, максимальный – 600 кг
- ❖ Параметры: диаметр 19 м, скорость 19 км/с, плотность 3300 кг/м³
- ❖ Угол входа оценен в 18° от горизонтали при наших оценках в 7-8°
- ❖ Азимут нами оценен как 284-285°, что совпадает с независимым источником (Popova et al., 2013; Borovička et al., 2013)



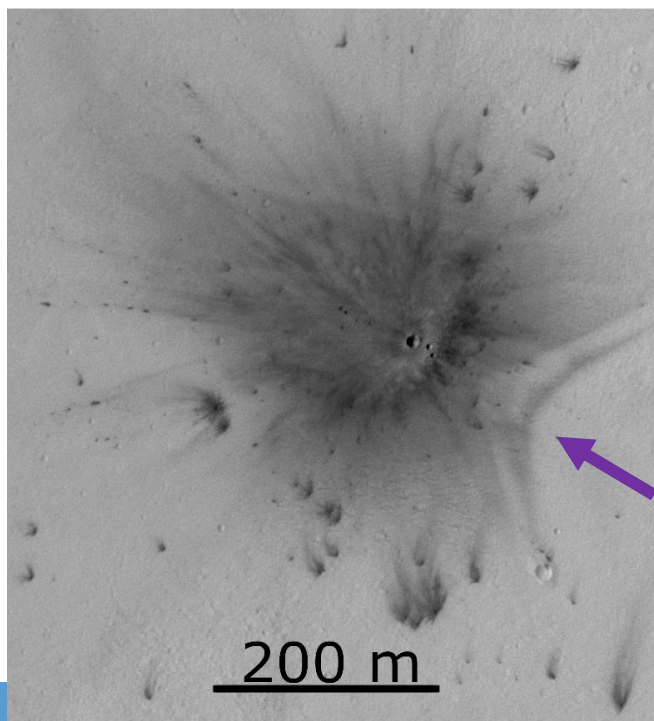
Данный подход позволяет оценить азимут и угол входа в атмосферу с точностью до 15° при достаточном количестве крупных фрагментов в случае косоугольного входа в атмосферу, на чье падение не сильно влияет ветровой снос.

Эллипсы рассеяния, покрывающие найденные фрагменты (MVE и Stat). Плюсы – расположение фрагментов (максимальный **квантиль** отмечен красным). Черная пунктирная стрелка – средний азимут. Серая стрелка – направление полета по Popova et al. (2013).

Выбросы из кратеров I

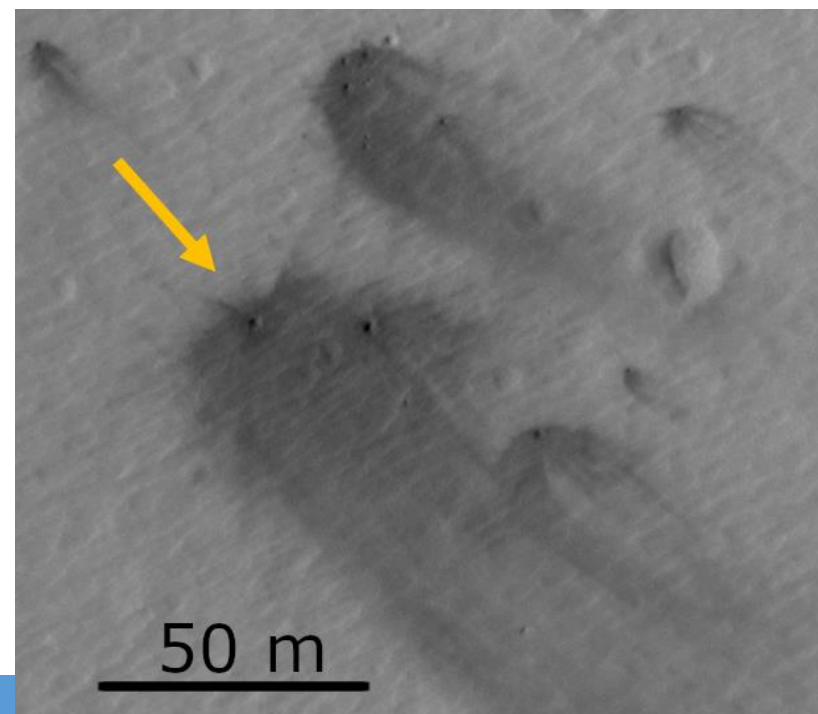
HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) – камера, которая делает снимки Марса в высоком разрешении. Благодаря ей мы можем рассмотреть выбросы для ряда кластеров.

- При косых ударах выбросы из кратера расположены несимметрично и более выражены в направлении полета (Shuvalov, 2011).
- Для некоторых кластеров следы УВ могут указывать направление полета метеороида (Burleigh et al., 2012; Ivanov et al., 2010).
- Эти особенности использовались для определения направления полета метеороида.

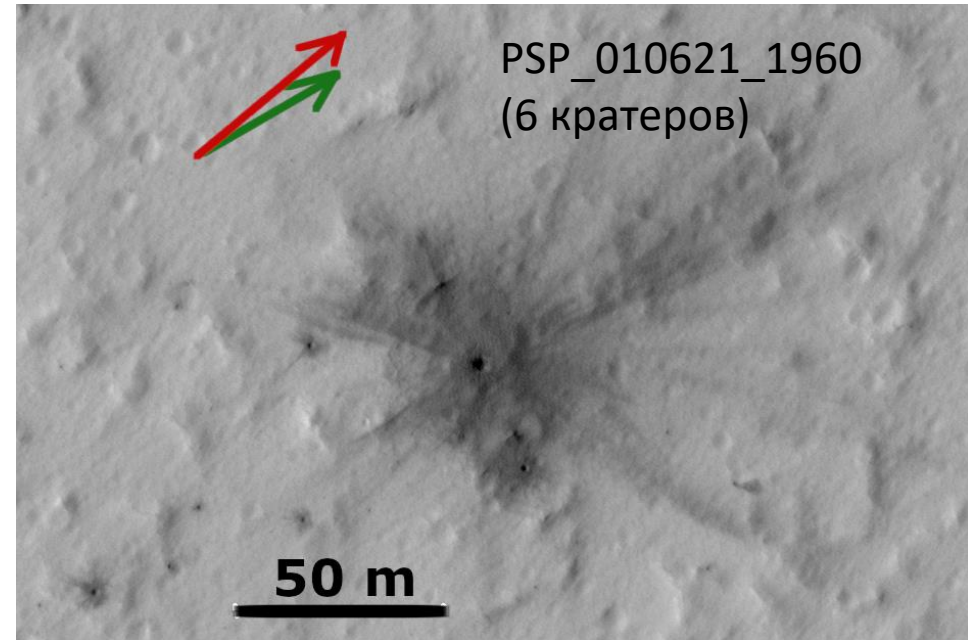


Кластер ESP_024646_1890 (состоит из 8 кратеров) с сильно выраженной **параболическим следом**, который является следом УВ.

Кластер ESP_036426_2105 (состоит из 12 кратеров) с сильно выраженным **асимметричным** расположением выбросов.



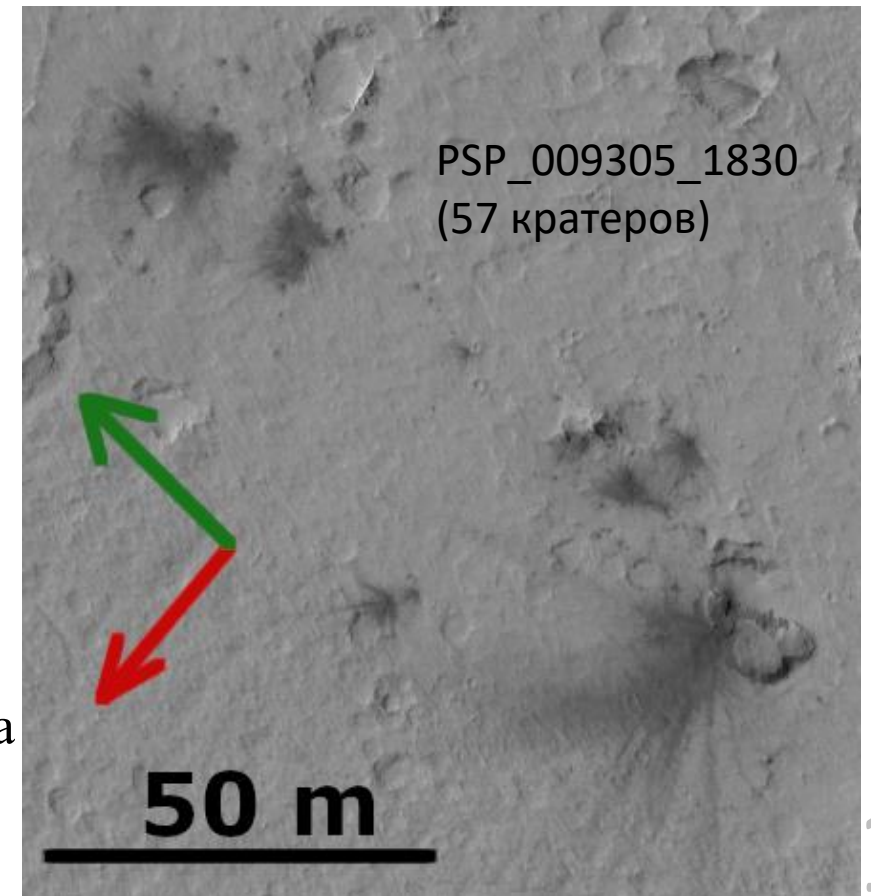
Выбросы из кратеров II



- Для 42 из 55 кластеров можно определить направление полета по расположению кратерных выбросов.

Изображения HiRISE для двух кластеров. **Зеленые** стрелки показывают азимут метеороида (средний между MVE и Stat); **красный** – направление полета по кратерным выбросам.

- Сравнение направления полета метеороидов по выбросам из кратеров с азимутами по эллипсам рассеяния: для 12 кластеров разница не более 45° , для 19 кластеров результаты различаются направлением ($180^\circ \pm 45^\circ$). Другие результаты не коррелируют.
- Плохая корреляция результатов означает необходимость рассмотрения других способов определения направления полета метеороида. Следующим шагом будет моделирование полей рассеяния.

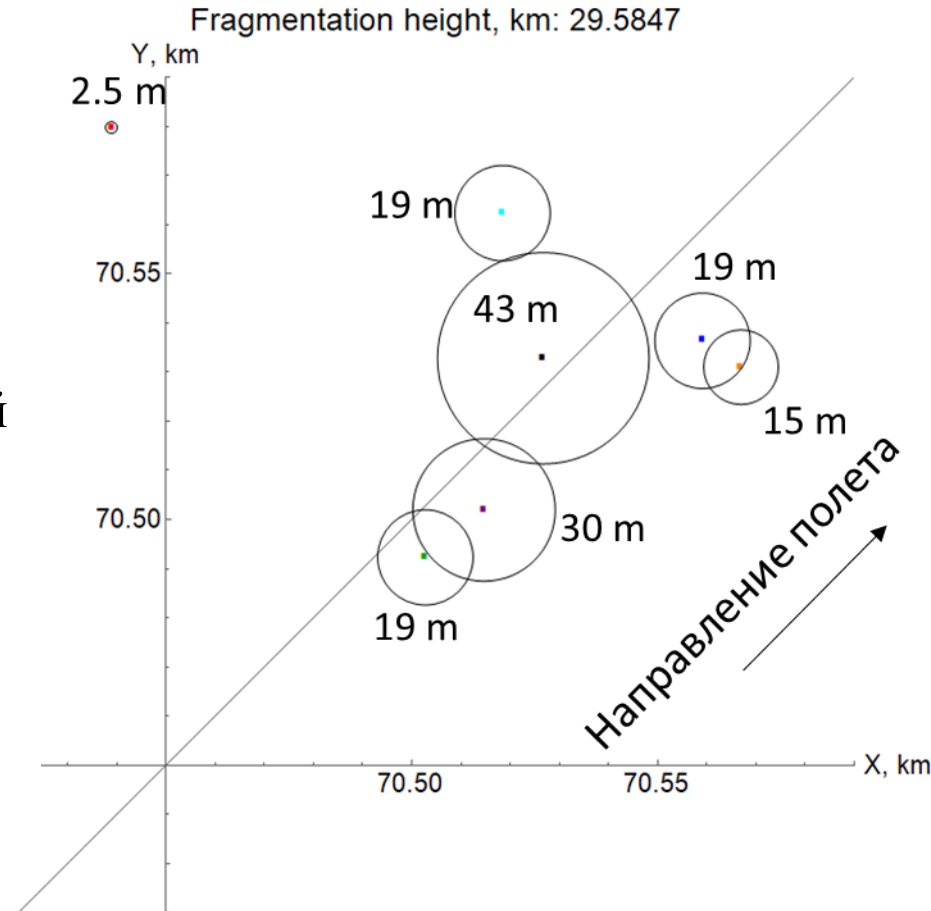


Моделирование полета фрагментов I

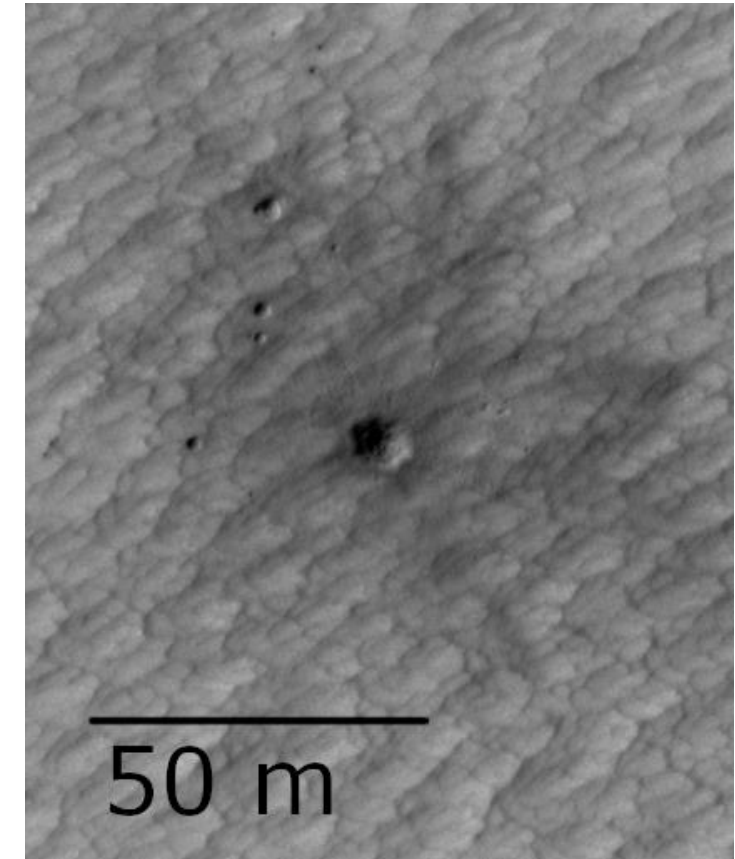
Расположение кратеров на Марсе

Пример кластера из 7 кратеров

- Фрагментация в одну стадию, учет бокового разлета под случайным углом к траектории.
- Сравнение моделирования кратерного поля на Марсе с реальным показало одинаковый размер поля рассеяния.
- В случае реального кластера импактор был меньше.



ESP_017808_1755



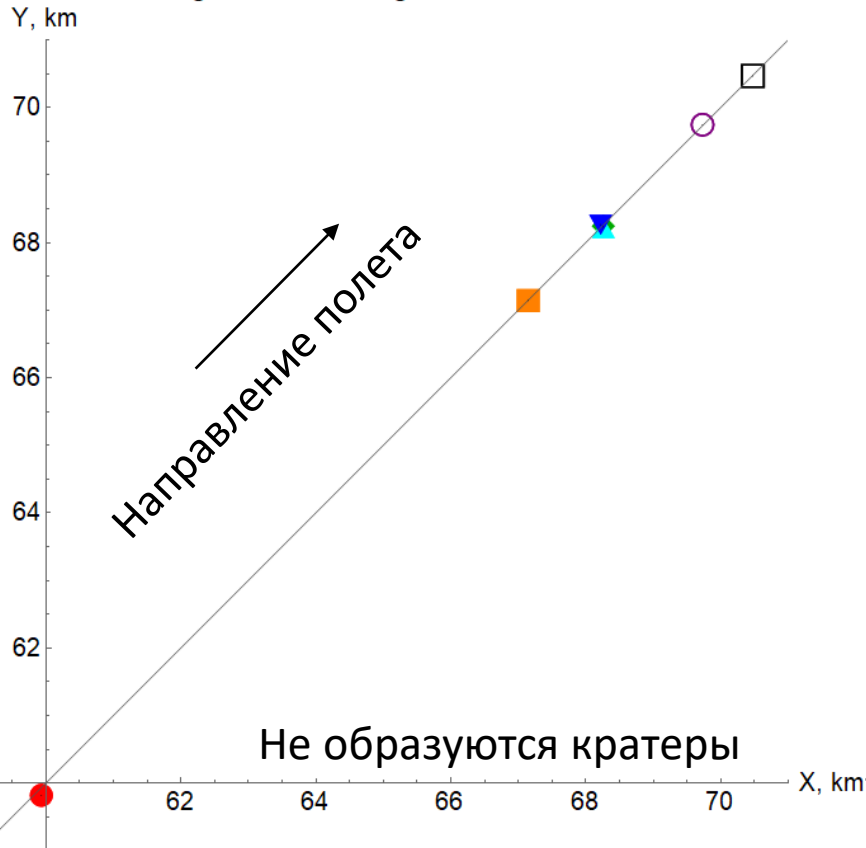
Результаты численного моделирования фрагментации 3 м метеороида. Разрушение происходило на высоте, где прочность достигала 0.1 МПа. Серая линия - траектория метеороида.

Моделирование полета фрагментов II

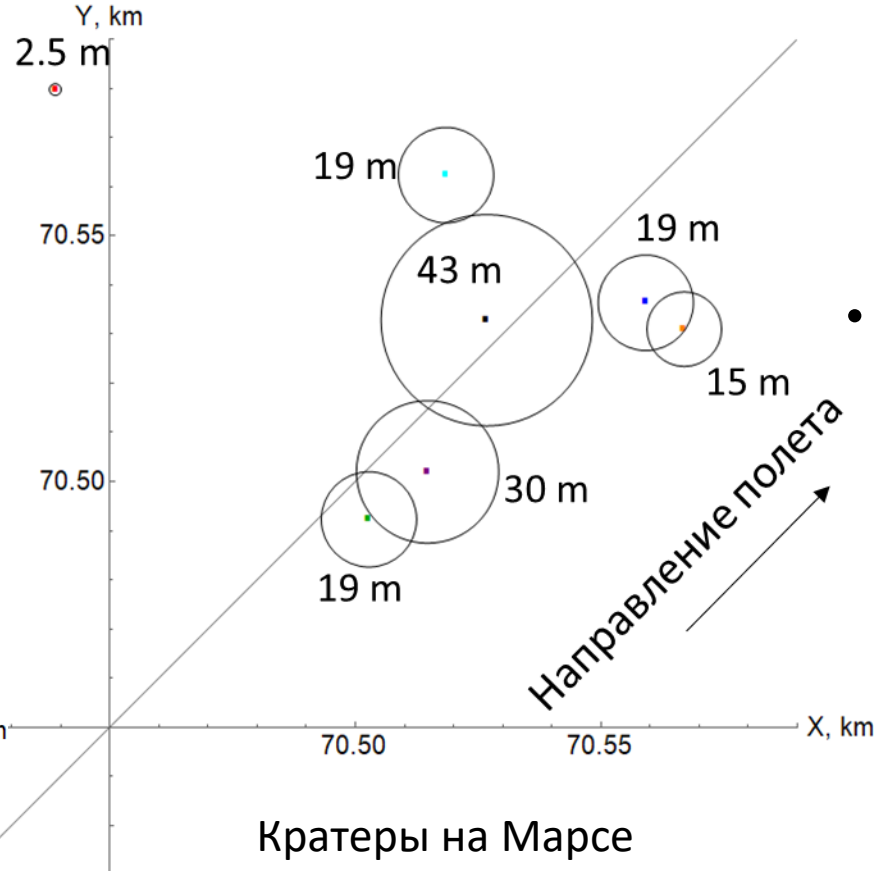
Результаты численного моделирования для фрагментации 3 м метеороида.
Разрушение метеороида происходило на высоте, где прочность метеороида достигала 0.1 МПа.

Серая линия - траектория метеороида.

Fragmentation height, km: 61.6658



Fragmentation height, km: 29.5847



- Благодаря различию в плотности атмосфер при одинаковых исходных данных (бралась средняя скорость входа для каждой планеты) ударник образует на Марсе кратерное поле во много раз меньше, чем поле рассеяния на Земле.
- На Земле: атмосферная сортировка фрагментов, на Марсе этот эффект слаб, поле рассеяния в основном определяется фрагментацией и боковым разлетом осколков.

Резюме

- ✓ Сравнение полученных эллипсов рассеяния с Daubar et al. (2019) показало отличие в площади примерно в 1.5 раза.
- ✓ Оценки углов траектории, полученные по эллипсам рассеяния сравнивались с Daubar et al. (2019): различие не более 20° ; направление полета совпадает в половине случаев.
- ✓ Построены эллипсы рассеяния земных метеоритов – Озерки и Челябинск. Показано, что можно оценить азимут и угол входа для больших фрагментов с плоской траекторией входа, чье падение мало зависит от ветра. Поля рассеяния для небольших фрагментов с почти вертикальной траекторией входа определяется ветровым сносом.
- ✓ Для 42 кластеров направление полета найдено по выбросам из кратера. Сравнение с эллипсами рассеяния показало, что в четверти случаев направление выбросов перпендикулярно предполагаемой траектории.
- ✓ Разработанная модель фрагментации позволяет описывать кратерные кластеры и в дальнейшем позволит предложить методы определения направления полета и свойств ударника.
- ✓ Предварительные результаты моделирования фрагментации показывают, что вопрос возможности определения азимута по кратерным кластерам не так очевиден, как казалось ранее.



Спасибо за
внимание!

Моделирование поля рассеяния Челябинского метеороида

Found meteorites (~170):

black points,

m range (kg) per length interval is given

Model: N (~20-2000), N(m) and locations vary from realization to realization (blue, grey, red):

-impact velocities are subsonic

-largest fragment (200-400 kg here) is able to reach Chebarkul lake (its flight time is in agreement with videorecord on the lakeshore)

-positions of 0.01-100 kg fragments are in agreement with observations

-red – corresponds to increased strength of fragments (largest survived at 16 MPa)

-Probably more fragments >kg still not found, or may be model overestimate number of fragments

