

# On the Mass Distribution of Non-Evaporated Fragments of Meteoroids and Asteroids Destroyed in the Atmosphere

I. G. Brykina, L. A. Egorova

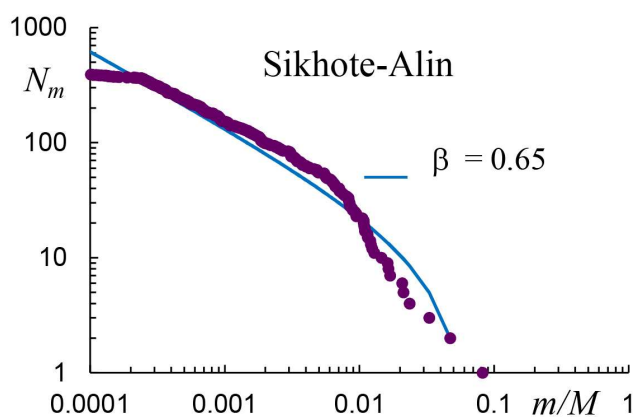
*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, 119192, Russia*

shantii@mail.ru

## Abstract

When modeling the interaction with the atmosphere of a cosmic body destructed by aerodynamic forces, it is necessary to know the masses of its fragments. The mass distribution of fragments can be judged by the distribution of non-evaporated fragments that fell to the ground – meteorites. In this paper, such distributions are constructed and analytically described for a number of meteoroids and asteroids of different sizes and compositions that have penetrated and destroyed in the atmosphere. For the analytical description of empirical distributions, the dependence of the cumulative number of fragments on the fragment mass relative to the total mass, the mass fraction of the maximum fragment, and the power index was used, derived on the assumption that the distribution density of the number of fragments over masses obeys a power law. The regularities and random factors in the distributions of meteorites are discussed. The question is being studied whether, based on the available incomplete collection of meteorites, it is possible to judge the distribution of fragments in a complete (ideal) collection characterizing the destruction of the original cosmic body.

Keywords: meteoroid, asteroid, fragmentation, mass distribution.



Distribution of Sikhote-Alin meteorites: cumulative number of fragments versus relative fragment mass. Dots and line correspond to the empirical and analytical distributions

УДК 533.6:523.6

# О распределении по массам неиспарившихся фрагментов разрушенных в атмосфере метеороидов и астероидов

И. Г. Брыкина, Л. А. Егорова

*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Россия, Москва, 119192, Мичуринский пр-т, 1  
shantii@mail.ru*

## Аннотация

При моделировании взаимодействия с атмосферой входящего в нее небесного тела, разрушающегося под действием аэродинамических сил, надо знать массы его фрагментов. О распределении фрагментов по массам можно судить по распределению выпавших на землю неиспарившихся фрагментов – метеоритов. В настоящей работе такие распределения построены и аналитически описаны для ряда пролетевших и разрушенных в атмосфере метеороидов и астероидов разного размера и состава. Для аналитического описания эмпирических распределений использовалась зависимость кумулятивного числа фрагментов от массы фрагмента, отнесенной к общей массе, массовой доли максимального фрагмента и степенного индекса, выведенная в предположении, что плотность распределения числа фрагментов по массам меняется по степенному закону. Обсуждаются закономерности и факторы случайности в распределениях метеоритов. Изучается вопрос, можно ли на основании доступной неполной коллекции метеоритов судить о распределении фрагментов в полной (идеальной) коллекции, характеризующей разрушение исходного космического тела.

Ключевые слова: метеороид, астероид, фрагментация, распределение по массам.

## 1. Введение

Основные процессы, влияющие на взаимодействие метеороидов и астероидов с атмосферой Земли, – это их разрушение и абляция. Абляция связана с их нагревом, плавлением и испарением под действием сильных тепловых потоков, в основном радиационных для крупных тел. Разрушение небесных тел связано с аэродинамическими нагрузками, возрастающими по мере их проникновения в плотные слои атмосферы. Для моделирования траектории входящего в атмосферу метеорного тела, его скорости, потери массы и энерговыделения, для оценки его начальной массы и поля рассеяния метеоритов нужны адекватные модели абляции и фрагментации. Развитие моделей абляции, задание соотношений для коэффициента теплопередачи и эффективной теплоты абляции, и исследование влияния модели абляции на различные характеристики взаимодействия небесного тела с атмосферой, рассчитываемые в рамках уравнений метеорной физики [1], проводились в работах авторов [2–7] при разных параметрах входа в атмосферу.

Разрушение космических тел в атмосфере – сложный процесс, зависящий от многих факторов: состава, структуры, плотности, наличия дефектов, размера и скорости, и поэтому может происходить по-разному. Обзоры существующих моделей фрагментации метеороидов приведены в работах авторов [8–9]. На первом этапе фрагменты разрушенного крупного метеорного тела (астероида) движутся с общей ударной волной, прежде чем разойтись на расстояние, достаточное для образования индивидуальных ударных волн. В работах авторов [3,

8, 9, 10] развита двухпараметрическая модель облака фрагментов, моделирующая разрушение астероида на этом этапе с учетом изменения формы и плотности облака, показаны ее преимущества перед простыми моделями, не учитывающими эти эффекты, проведено моделирование входа в атмосферу и энерговыделения Челябинского астероида, дана оценка его начальной массы и получено хорошее согласование с наблюдательными данными. Когда для моделирования траектории, абляции и энерговыделения разрушенного в атмосфере небесного тела используются модели, включающие в себя независимое движение фрагментов, необходимо знать их распределение по массам. В работах авторов [11–14] развита модель аналитического описания распределения фрагментов разрушенного тела по массам и проведена ее апробация для описания различных эмпирических распределений. В данной работе эта модель применяется для описания распределений неспарившихся фрагментов – метеоритов, выпавших в разное время на разных континентах после пролета и разрушения в атмосфере тринадцати метеороидов и астероидов. Обсуждаются закономерности и факторы случайности распределений по массам. Отмечаются преимущества предложенной модели.

## 2. Подходы к описанию распределений фрагментов по массам

Распределение фрагментов разрушенного тела по массам описывается функцией кумулятивного числа фрагментов  $N_m(m)$ , которая определяется как количество фрагментов с массой большей или равной  $m$ . Для аналитического описания распределения по массам фрагментов метеоритного дождя, найденных после разрушения небесного тела в атмосфере, использовались, в основном, три подхода. В первом подходе [15–18] для аппроксимации эмпирических кривых распределений метеоритов использовалась простая степенная зависимость кумулятивного числа фрагментов от массы (в [15] – от размера). К этому же подходу можно отнести работу [19], где используется степенной закон с экспоненциальным обрезанием, которое фактически означает обрезание (исключение) крупных фрагментов. Простой степенной закон, изображаемый графически в логарифмических координатах прямой линией, соответствует только части эмпирической кривой распределения метеоритов, не являющейся линейной. Второй подход основан на применении статистических методов. В [20] для описания распределения метеоритов Кошице использовались семь статистических моделей, включая бимодальные распределения Вейбулла, Грэди и логнормальное. Лучшим оказалось бимодальное распределение Вейбулла, имеющее пять свободных параметров. В [21] для описания распределений метеоритов Кошице, Саттерс – Милл и Уайткорт использовались экспоненциальное, бимодальное экспоненциальное,  $q$ -экспоненциальное и  $q$ -растянутое экспоненциальное распределения. Неудобством применения статистических методов для аппроксимации эмпирических кривых является их сложность, в частности, наличие в них нескольких свободных параметров, которые необходимо подбирать в каждом конкретном случае.

Авторами [11, 12] предложен новый, третий подход, в котором степенной закон предполагается не для кумулятивного числа фрагментов, а для плотности распределения числа фрагментов по массам. В этом подходе функция кумулятивного числа фрагментов определяется уравнением  $dN_m/dm \propto m^{-\alpha}$ . Часто это уравнение предполагается эквивалентным соотношению  $N_m \propto m^{-\beta}$  ( $\beta = \alpha - 1$ ). Это соотношение, т.е. простой степенной закон, используется не только для описания распределений метеоритов, но также для описания распределений по массам при исследовании других астрономических проблем. Например, для описания результатов ударных экспериментов, моделирующих фрагментацию астероидов при столкновениях в космическом пространстве [22–30], для определения индексов масс метеороидов для метеорных потоков и спорадических метеоров с помощью метеорных наблюдений [31–32], для оценки начальных спектров масс разных астрономических объектов (астероидов, звезд, галактик и др.) в ансамблях, образовавшихся в результате фрагментации [33–34]. В отличие от простого степенного закона, мы решали дифференциальное уравнение для функции  $N_m$  [12], вводя понятия массы наибольшего фрагмента и общей массы фрагментов, и

получили зависимость кумулятивного числа фрагментов от массы фрагмента, отнесенной к общей массе, массовой доли и числа наибольших фрагментов, а также от свободного параметра – степенного индекса.

Существенное различие между двумя описанными «степенными» подходами состоит в следующем. Общепринятый подход ( $N_m \propto m^{-\beta}$ ) в логарифмических координатах, обычно применяемых для представления распределения фрагментов по массам, дает линейную зависимость  $N_m$  от  $m$ , которая может аппроксимировать только часть эмпирической кривой, которая, как отмечается во многих экспериментальных работах [22–30], в большинстве случаев не является линейной. Поэтому обычно при описании экспериментальных результатов кривая распределения фрагментов по массам разбивается на два или три сегмента, которым соответствуют разные показатели степени, с более крутым наклоном для крупных фрагментов. Наш подход дает нелинейную зависимость  $N_m$  от  $m$  в логарифмических координатах, позволяющую описать всю эмпирическую кривую. Общепринятый подход, в котором  $N_m$  пропорционально  $m^{-\beta}$ , несмотря на кажущуюся простоту, при аппроксимации эмпирической кривой прямой линией, требует подбора двух параметров – степенного индекса, являющегося тангенсом угла наклона касательной ( $-\beta$ ) к некоторой средней части кривой, без учета мелких и крупных фрагментов, и точки приложения этой касательной. Во всех вышеупомянутых работах, где используется этот подход, существование второго параметра опускается, значение придается только степенному индексу, хотя наклон касательной зависит от точки ее приложения. В нашем подходе для аппроксимации эмпирической кривой используется действительно единственный свободный параметр – степенной индекс.

В отличие от других методов, как статистических, так и общепринятого «простого степенного», развитый нами метод показывает, что распределение фрагментов по массам определяется только безразмерными параметрами: массой, отнесенной к общей массе фрагментов и массовой долей максимального фрагмента.

### 3. Метод

Предложенный метод описания распределения фрагментов разрушенного тела по массам основан на предположении, что плотность распределения числа фрагментов по массам  $n_m(m)$  меняется по степенному закону. Это предположение означает, что функция кумулятивного числа фрагментов  $N_m(m)$  находится из дифференциального уравнения

$$\frac{dN_m}{dm} = -n_m = -Dm^{-(\beta+1)} \quad (1)$$

Здесь  $n_m dm$  означает число осколков в диапазоне масс от  $m$  до  $m + dm$ . Коэффициент  $D$  и степенной индекс  $\beta$  считаются постоянными ( $0 < \beta < 1$ ). Для решения уравнения (1) вводится понятие массы наибольшего фрагмента  $m_l$  ( $m_l$  или фрагментов, если имеется несколько максимальных фрагментов с одинаковой массой). Функции  $N_m(m)$  и  $n_m(m)$  предполагаются непрерывными функциями, определенными в диапазоне  $0 < m \leq m_l$ . Вводится также понятие суммарной массы всех фрагментов  $M$ , которая в случаях, когда известна масса разрушаемого тела, как, например, при разрушении образцов в ударных экспериментах, равна массе тела перед разрушением

$$M = \int_0^{m_l} n_m(m') m' dm' \quad (2)$$

После подстановки в это уравнение функции  $n_m$  из соотношения (1) и интегрирования можно найти коэффициент  $D$  как функцию параметров  $M$  и  $m_l$ :

$$D = M \frac{1-\beta}{m_l^{1-\beta}} \quad (3)$$

В результате интегрирования уравнения (1) от  $m$  до  $m_l$  с учетом уравнения (3) для функции кумулятивного числа фрагментов  $N_m(m)$  получается соотношение

$$N_m = \frac{1-\beta}{\beta \bar{m}_l^{1-\beta}} (\bar{m}^{-\beta} - \bar{m}_l^{-\beta}) + n_l \quad (4)$$

Здесь  $\bar{m} = m/M$  – безразмерная масса фрагмента (нормированная на общую массу);  $\bar{m}_l = m_l/M$  – массовая доля максимального фрагмента;  $n_l$  – количество максимальных фрагментов (в большинстве случаев  $n_l = 1$ ). Таким образом, функция кумулятивного числа фрагментов  $N_m$  зависит только от безразмерных параметров:  $\bar{m}$ ,  $\bar{m}_l$ ,  $n_l$ , и свободного параметра – показателя степени  $\beta$ . Массовая доля наибольшего фрагмента является важным параметром, характеризующим степень разрушения тела (см. следующий раздел).

Кумулятивное число фрагментов можно выразить и через размерные параметры

$$N_m = M \frac{1-\beta}{\beta m_l^{1-\beta}} (m^{-\beta} - m_l^{-\beta}) + n_l \quad (5)$$

Если, кроме массы максимального фрагмента, ввести еще массу  $m_s$  минимального фрагмента, тогда область определения функций  $N_m(m)$  и  $n_m(m)$  будет  $m_s \leq m \leq m_l$ . Повторив процедуру, аналогичную описанной выше, когда значение массы фрагмента снизу не ограничивалось, и проводя интегрирование от  $m_s$  до  $m_l$ , получим функцию  $N_m$  в зависимости от параметров  $\bar{m}$ ,  $\bar{m}_l$ ,  $n_l$ ,  $\bar{m}_s = m_s/M$  и  $\beta$

$$N_m = \frac{1-\beta}{\beta (\bar{m}_l^{1-\beta} - \bar{m}_s^{1-\beta})} (\bar{m}^{-\beta} - \bar{m}_l^{-\beta}) + n_l \quad (6)$$

Расчеты показали, что при малых  $m_s$  разница между этим решением и решением (3), где массы не ограничены снизу, невелика, поэтому для описания распределений фрагментов по массам можно использовать соотношения (4) и (5).

Функция  $n_m(m)$ , определяющая плотность распределения фрагментов по массам, необходима для того, чтобы найти суммарное энерговыделение фрагментированного в атмосфере метеороида, его светимость и полную потерю массы за счет абляции путем интегрирования по всем начальным массам фрагментов [11]. Эта функция находится из уравнения (1) и для случаев, когда массы фрагментов не ограничены снизу и ограничены массой  $m_s$ , имеет соответственно вид:

$$n_m = \frac{1-\beta}{M \bar{m}_l^{1-\beta}} \bar{m}^{-\beta-1}, \quad (7)$$

$$n_m = \frac{1-\beta}{M (\bar{m}_l^{1-\beta} - \bar{m}_s^{1-\beta})} \bar{m}^{-\beta-1} \quad (8)$$

#### 4. Разрушение в экспериментах

Предложенный метод был применен [13, 14] для описания результатов ударных экспериментов [22, 24–26, 28–30], проводимых для моделирования фрагментации астероидов в космическом пространстве. Было показано, что формула (4) адекватно описывает экспериментальные распределения фрагментов по массам, полученные при разрушении мишеней из разных материалов (образцы метеоритов, базальты, гипс, пирофиллит, алюмооксидная керамика, цементные смеси, агрегаты) с разными размерами, формой, плотностью (от 1.1 до 3.6 г/см<sup>3</sup>) и пределом прочности на сжатие (от 3 до 2000 МПа), в широком диапазоне скоростей ударника  $V$  (от 300 м/с до 5.4 км/с) и для разных типов разрушения.

В [22, 23, 30] классифицировано несколько типов разрушения, наблюдаемых в экспериментах и определяемых в основном удельной энергией удара  $Q$  (кинетической энергией ударника с массой  $m_p$ , приходящейся на единицу массы мишени  $M$ )

$$Q = \frac{m_p V^2}{2M} \tag{9}$$

При высокоскоростных ударах ( $V \geq 1$  км/с) наблюдались четыре типа разрушения: (I) образование кратера, (II) переходный тип (образуется кратер и откалываются части боковой поверхности), (III) тип ядра (остаются один или два фрагмента из центральной части тела, значительно более крупные, чем остальные), (IV) полное разрушение на большое количество мелких фрагментов. В [17] для высокоскоростных соударений типы III и IV названы катастрофическим разрушением. При низкоскоростных ударах ( $V < 1$  км/с) наблюдались следующие типы разрушения: (I) отскок ударника с радиальным растрескиванием, (II) отскок с продольным раскалыванием, (III) конический тип (с противоположной удару стороны есть несколько фрагментов, значительно более крупных, чем остальные), (IV) катастрофическое, или полное разрушение. Более подробное описание типов фрагментации и их зависимость от значений  $Q$  приведены в [13].

Сравнение с результатами экспериментов показало, что формула (4) описывает эмпирические распределения для III и IV типов разрушения как при высокоскоростных, так и при низкоскоростных соударениях. Этим видам разрушения соответствуют значения удельной энергии  $Q$  более 1 кДж/кг. В случае полного разрушения, когда массы фрагментов меняются равномерно, без существенных промежутков, соотношение (4) применяется, начиная с первого фрагмента. В случае разрушения типа ядра или конического, когда один (или два) максимальных фрагмента превосходят по массе в несколько раз следующий, соотношение (4) применяется, начиная со второго (третьего) фрагмента.

Примеры сравнения аналитического распределения с экспериментальным для полного разрушения (IV тип) и разрушения типа ядра (III тип) показаны в логарифмических координатах на рис. 1, где представлены результаты экспериментов по разрушению образцов базальта Chamusu-уама из Японии [22] и базальта Linxi из Монголии [30]. Предел прочности образцов на сжатие составлял соответственно 480 и 185 МПа, плотность – 2.8 и 3 г/см<sup>3</sup>, а удельная энергия удара  $Q$  – 62 и 4 кДж/кг при скорости ударника 640 м/с и 3.7 км/с. Рисунок 1 показывает хорошее согласование аналитических распределений с экспериментальными для обоих типов разрушения.

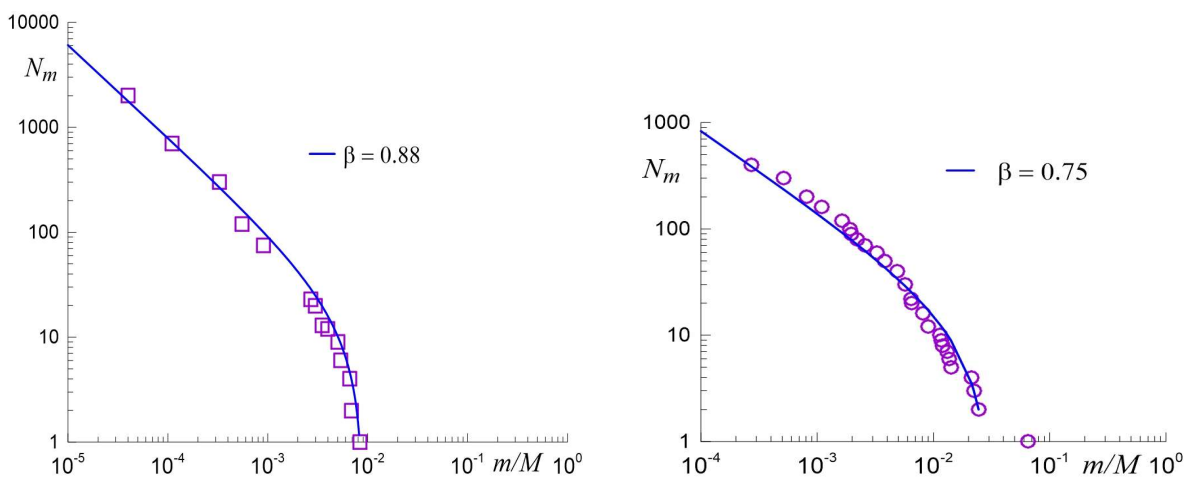


Рис. 1. Кумулятивное число фрагментов в зависимости от относительной массы. Маркеры – эксперименты по разрушению мишеней из базальта Chamusu-уама [22] (слева) и из базальта Linxi [30] (справа). Линия – формула (4)

## 5. Описание распределений неспарившихся фрагментов разрушенных в атмосфере небесных тел

Соотношение (4) было применено для описания распределений по массам неспарившихся фрагментов (метеоритов), выпавших на землю после пролета и разрушения в атмосфере метеороидов и астероидов разного размера и состава: Царев, Сихотэ-Алинь, Мбале, Бассикуну, Кошице, Челябинский, Альенде, Мурчисон, Тагиш-Лейк, Саттерс-Милл, Пуэрто-Лаписе, астероид 2008 TC<sub>3</sub> (Алмахата Ситта), Сарычичек.

### 5.1. Источники данных о массах метеоритов

Для построения распределений метеоритов по массам использовались данные из публикаций, коллекций музеев, планетариев и университетов, а также данные из частных коллекций. Публикации о каждом метеоритном дожде содержат данные конкретно для этого дожда. Однако музейные и частные коллекции содержат данные о фрагментах разных метеоритных дождей, поэтому на них приходится ссылаться неоднократно. Здесь приводятся краткие (на которые будут ссылки) и полные названия музеев и частных коллекций, а также их веб-сайты, если на них приведены данные о массах метеоритов.

#### Коллекции музеев, планетариев и университетов:

NMNH: Smithsonian National Museum of Natural History (Washington) <https://collections.nmnh.si.edu/search/ms>

FMNH: Field Museum of Natural History (Chicago) <https://meteorites.fieldmuseum.org/collection>

MMC: Monnig Meteorite Collection in Texas Christian University <https://monnigmuseum.tcu.edu>

NHM: Natural History Museum (London): данные из [35]

NBC: Naturalis Biodiversity Center (Leiden) <https://bioportal.naturalis.nl/>

RBINS: Royal Belgian Institute of Natural Sciences (Brussels) <https://virtualcollections.naturalsciences.be>

MNHN: French National Museum of Natural History (Paris)

<https://science.mnhn.fr/institution/mnhn/collection/gt/item/search>

MNA: Museo Nazionale dell'Antartide (Siena) <https://cataloghimnasiena.it/catalogo/meteoriti>

IGME: Geominero Museum of Geological and Mining Institute of Spain (Madrid)

<https://www.igme.es/museo>

UAb: University of Alberta <https://www.ualberta.ca/museums/museum-collections/meteorite-collection.html>

ROM: Royal Ontario Museum Collections <https://collections.rom.on.ca/>

MSNM: Civico Planetario and Museo Civico di Storia Naturale in Milan: данные из [36].

NMNHNASU National Museum of Natural History at National Academy of Science of Ukraine: данные из [37].

VM: Victoria Museums (Melbourne): данные из [38].

MUH: Museum of Universe History (Dedovsk, Moscow region) <https://museum-21.ru/catalogue>

CSU: Chelyabinsk State University: <https://www.csu.ru/science/chelyabinsk-meteor-study-center/database.aspx>

FMM: Fersman Mineralogical Museum of Russian Academy of Sciences (Moscow): личное посещение.

MP: Moscow planetarium: личное посещение.

ESM: Earth Science Museum of Moscow State University: личное посещение

#### Частные коллекции:

IMCA: International meteorite collectors association <http://encyclopedia-of-meteorites.com>

DMM: Decker Meteorite-Museum <https://www.meteorite-museum.de/>

PMS: Polish Meteorite Society <http://www.ptmet.org.pl/old/kat-1-met.htm>

SWML: Southwest meteorite laboratory <https://meteoritelab.com>

BC: Bruno Fectay and Carine Bidaut <http://www.meteorite.fr>

MF: Michael Farmer <http://meteoriteguy.com>

DG: Dave Gheesling <http://www.fallingrocks.com/>

WW: Woreczko Jan & Wadi <http://www.woreczko.pl/meteorites/collection-m.htm>

MSC: Meteorites Store Catalog <https://www.meteorites-for-sale.com/>

CRN: Chelyabinsk region news site

<https://www.lobl.ru/news/o-lyudyakh/foto-vtorogzmeru-oskolka-meteorita-chelyabinsk/>

## 5.2. Метеоритные дожди

### Обыкновенные хондриты:

Падение метеоритов *Царев* произошло 6 декабря 1922 г. в Волгоградской области, когда местные жители наблюдали интенсивное свечение и грохот, характерные для полета и разрушения крупного метеорного тела. Поиски метеоритов, организованные после этого события, не увенчались успехом. Первый фрагмент был случайно найден в 1968 году при вспашке сельскохозяйственных полей. Однако только в 1979 году электросварщик Никифоров из села Царев отправил в Комитет СССР по метеоритам посылку с камнем, который оказался внеземного происхождения и был классифицирован как обыкновенный хондрит L5. Позже Никифоров передал Комитету несколько крупных метеоритов [39]. В последующие годы экспедиции Комитета [40, 41] и других организаций, в частности, Музея землеведения МГУ [42], а также частные искатели нашли много новых фрагментов. Поиски продолжаются по настоящее время. Для построения распределения метеоритов Царев (рис. 2) использовались массы (69) из коллекции РАН [43] с наибольшим фрагментом весом 284 кг, а также из музейных и частных коллекций.

Падение метеоритов *Мбале* произошло 14 августа 1992 г. недалеко от города Мбале в Уганде. Результаты экспедиции, организованной для сбора свидетельств очевидцев и исследования поля рассеяния метеоритов, классифицированных как обыкновенные хондриты L5/6, представлены в [16]. В ходе экспедиции обнаружено 48 мест падения метеоритов и найдены фрагменты весом от 0.1 г до 27.4 кг; общая масса метеоритов, найденных к октябрю 1993 г., включая 437 фрагментов, купленных дилерами у местных жителей, оценивалась в ~ 150 кг. Распределение метеоритов Мбале (рис. 2), с общей массой 128.1 кг и наибольшей 27.4 кг, построено по данным [16] и разных коллекций.

Падение метеоритов *Бассикуну* произошло 16 октября 2006 г. недалеко от деревни Бассикуну в Мавритании, когда наблюдался яркий болид. Бюль и Баерманн [44] собрали информацию о найденных метеоритах от местных жителей, торговцев минералами, кураторов и коллекционеров; 108 фрагментов общим весом 62.38 кг описаны с массами и фотографиями, а 382 фрагмента весом 31.66 кг представлены на фотографиях в восьми дилерских лотах. Метеориты классифицированы как обыкновенные хондриты H5 [45]. Для построения распределения метеоритов Бассикуну (рис. 2) использовались массы из [44], включая несколько измеренных масс из лотов дилеров, и из разных коллекций, наибольший фрагмент весил 6.12 кг.

Яркий болид *Кошице* в Словакии был зафиксирован 28 февраля 2010 г. камерами наблюдения в Венгрии и камерами Европейской болидной сети [46]. Первые поиски метеоритов были организованы после того, как большая часть снега растаяла. В ходе официальных экспедиций в предполагаемом районе падения было обнаружено 78 метеоритов, 140 фрагментов с известной массой найдены частными искателями, и часть фрагментов была незаконно вывезена из Словакии; метеориты классифицированы как обыкновенные хондриты H5 [46, 47]. Для построения распределения метеоритов Кошице использовались 218 масс из [20, 47] и 12 из разных коллекций. Массы двух самых крупных фрагментов – 2.374 и 2.167 кг – примерно в семь раз превышают массу третьего, равную 0.318 кг. Поэтому фрагментацию мы относим к III типу и строим распределение, начиная с третьего фрагмента (рис. 2).



Пролет *Челябинского* астероида через атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. был зафиксирован наземными и спутниковыми системами наблюдения, а также видеокамерами в разных населенных пунктах [48, 49]. Тысячи мелких метеоритов обнаружены в ходе официальных поисков, частными искателями и местными жителями. Результаты первых поисков, организованных с 19 по 25 февраля, а затем после таяния снега, и описание извлечения метеоритов приведены в [49]. Метеориты классифицированы как обыкновенные хондриты LL5, многие хранятся в институтах и музеях, самый крупный из озера Чебаркуль весом 505 кг – в Государственном историческом музее Южного Урала. Масса второго по величине зарегистрированного фрагмента (без учета осколков фрагмента из озера Чебаркуль) равна 3.4 кг. Однако, на сайте новостей Челябинской области (CRN) представлена информация о том, что 1 декабря 2013 г. краеведы нашли фрагмент Челябинского астероида весом 24.3 кг, похожий по форме и структуре на фрагмент из озера Чебаркуль, и приведены его фотографии. Эта информация подтверждается в [50] именами людей, обнаруживших этот фрагмент, и дополнительными фотографиями. Мы полагаем, что найденный камень соответствует наблюдаемому фрагменту F2 [48] и что в интервале между 24.3 и 3.4 кг имеются четыре ненайденных или незарегистрированных фрагмента, соответствующих наблюдаемым фрагментам F3, F4, F5, F6 (Fig. 6 [48]). При построении распределения метеоритов (рис. 2) мы учитываем эти гипотетические фрагменты и фрагмент 24.3 кг и относим фрагментацию к III типу (максимальный фрагмент примерно в 20 раз больше второго).

### Углистые хондриты

Падение метеоритов *Альенде* произошло 8 февраля 1969 г. Яркий болид наблюдался над мексиканским штатом Чиуауа, и свет был виден от южной Аризоны до южной Мексики [51]. Тысячи метеоритов выпали на обширной территории северной Мексики, а один камень весом в 15 кг упал и разбился в городке Пуэблито-де-Альенде. История поисков метеоритов, описание и фотографии многих образцов, хранящихся в NMNH, приведены в [52]; метеориты классифицированы как углистые хондриты CV3. Много фрагментов было вывезено частными искателями, и основываясь на информации от дилеров, авторы [52] пришли к выводу, что было собрано около двух тонн метеоритов. Альенде – это крупнейшее зарегистрированное падение углистых хондритов, и многие образцы были распределены в лаборатории для изучения. Распределение 2748 метеоритов с наибольшим, весом 18.54 кг, построено по данным NMNH (в основном) и других коллекций (рис. 2).

Падение метеоритов *Мурчисон* произошло 28 сентября 1969 г. в окрестностях города Мурчисон на севере штата Виктория в Австралии. Яркий болид наблюдался из разных мест, слышались шум и раскаты грома [53]. Около ста килограммов метеоритов было найдено студентами Мельбурнского университета в ходе организованных поисков, а также местными жителями [54]. Метеориты классифицированы как углистые хондриты CM2, большинство из них находится в коллекциях AMNH, NMNH и VM. Распределение 919 метеоритов Мурчисон с общей массой 59.1 кг и наибольшей 1.8 кг показано на рис. 2.

Падение метеоритов *Тагши-Лейк* произошло 18 января 2000 г. в горной местности Британской Колумбии, когда яркий болид наблюдался над Аляской, Юконом и Британской Колумбией [17, 55]. Первые 50 фрагментов были извлечены с поверхности замерзшего озера Дж. Бруком 25 и 26 января (до того, как снег помешал дальнейшим поискам), помещены в пластиковые пакеты, заморожены и сохранены в целости [17]. Метеориты классифицированы как углистые хондриты C2, с низкой плотностью и высокой пористостью, и как наиболее минералогически примитивные и физически слабые метеориты, доступные для изучения [55, 56]. С 20 апреля по 8 мая 2000 г. организованная экспедиция обнаружила много фрагментов на поверхности льда и под ним, пока тающий и ломающийся лед озера не стал слишком опасным для поиска; описание поиска, извлечения и обращения с метеоритным материалом приведено в [17]. Многие образцы были найдены вмержшими в лед, большинство из них после намокания превратились в грязь и не могли быть извлечены. Собранные фрагменты

находились в различном состоянии, многие были найдены в виде порошка или мелких разбросанных осколков, в то время как некоторые оказались неповрежденными. Массы большинства фрагментов из-за трудностей поиска и извлечения были оценены лишь приблизительно [17]. Поэтому сначала мы построили распределение метеоритов Тагиш-Лейк только для измеренных масс из [17] и коллекций, с наибольшей, равной 176.3 г (рис. 2). Затем мы построили распределение с добавлением приблизительно оцененных масс [17], с наибольшей, равной 2 кг (рис. 7).

Падение метеоритов *Саттерс-Милл* произошло 22 апреля 2012 г. в Калифорнии, недалеко от Саттерс-Милл (место, связанное с началом «золотой лихорадки»), когда яркий болид наблюдался над большей частью Калифорнии и Невады [57]. Первые три метеорита были найдены 24 апреля, и за следующие два месяца было зарегистрировано 77 фрагментов весом 943 г, при этом общая масса метеоритов оценивалась примерно в 1.7 кг; метеориты классифицированы как углистые хондриты CM [57]. Распределение 105 метеоритов Саттерс-Милл с общей массой 1.14 кг и наибольшей, равной 204.6 г, приведено на рис. 2.

### Ахондриты

Падение метеоритов *Пуэрто-Лаписе* произошло 10 мая 2007 г. недалеко от одноименного городка в Кастилии-Ла-Манча. Яркий болид, сопровождавшийся грохотом, наблюдали сотни людей по всей Испании [58]. Поле рассеяния оказалось очень большим, поиск метеоритов осложнялся крупными камнями, посадками виноградников и оливковых деревьев, а также вспаханymi полями; несмотря на трудности, официально обнаружено и описано 67 фрагментов [58]. Метеориты классифицированы как ахондриты, брекчиевидные эвкриты [59]. Распределение 78 метеоритов Пуэрто-Лаписе (рис. 2), с общей массой 480.7 г и наибольшей, равной 89.1 г, построено по данным [58] и частных коллекций.

7 октября 2008 г. небольшой астероид (размером  $3 \div 5$  м) под названием *2008 TC<sub>3</sub>* вошел в атмосферу Земли и разрушился над пустыней Нубия в северном Судане [60]. В [61] описываются экспедиции в пустыню, в ходе которых организованные и частные искатели обнаружили 662 в основном небольших фрагмента, названных *Алмахата Ситта*, что в переводе с арабского означает "Шестая станция" (название железнодорожной станции). Большинство найденных метеоритов – ахондриты уреилиты, многие из них – полимиктовые уреилиты, тогда как другие метеориты – хондриты; поскольку все фрагменты были относительно свежими и собраны в предсказанном поле рассеяния, предполагается, что они были частью астероида 2008 TC<sub>3</sub> [61, 62]. Распределение 717 метеоритов Алмахата Ситта с наибольшим фрагментом 0.379 кг показано на рис. 2.

Падение метеоритов *Сарычичек* произошло 2 сентября 2015 г. недалеко от одноименной деревни в провинции Бингол в Турции. Яркий болид наблюдался визуально и был зафиксирован несколькими видеокамерами, небольшие метеориты упали на крыши домов в Сарычичеке, а на следующее утро люди обнаружили крошечные метеориты на улице и во дворах [63]. В ходе организованных поисков были найдены новые фрагменты, всего зарегистрировано 343 метеорита, классифицированных как говардиты [64]. Распределение 399 метеоритов с самым крупным фрагментом 1.47 кг показано на рис. 2.

### Железные метеориты

*Сихотэ-Алинский* железный метеоритный дождь выпал 12 февраля 1947 г. на западных отрогах гор Сихотэ-Алинь, покрытых Уссурийской тайгой. Мощные явления: огненный шар с клубящимся пылевым следом, громopodobный шум, вырванные с корнем деревья и разбитые окна наблюдались в радиусе  $300 \div 400$  км. Место падения метеоритов было обнаружено 15 февраля летчиками, заметившими выделявшиеся на снегу кратеры среди деревьев. С 24 по 26 февраля это место было обследовано геологами, которые обнаружили первые кратеры и метеориты, а также огромные разрушения в тайге, выкорчеванные кедры, радиально лежащие вокруг крупных кратеров. С апреля 1947 по 1950 год Комитет СССР по метеоритам

организовал четыре экспедиции в этот район, и для оказания помощи было выделено подразделение саперов. Подробное описание экспедиций, найденных кратеров, метеоритов и их исследований представлены в [65]. Было обнаружено 122 кратера диаметром от 0.5 до 26.5 м и глубиной до 6 м, 78 воронок размером менее 0.5 м и 175 поверхностных падений. Всего было собрано 8282 экземпляра весом 23.2 т, самый крупный из них весил 1745 кг. Метеориты классифицированы как железные группы ПАВ. С 1967 по 1978 год было организовано еще 11 экспедиций [66, 67], в ходе которых было собрано 5470 образцов весом 1465 кг, значительно меньших, чем найденные в 1947–1950 гг. Еще 915 метеоритов были найдены во время экспедиций в 1983 и 1985 гг. [68]. В последующие годы было организовано еще несколько экспедиций, в ходе которых собрано много мелких фрагментов. В общей сложности экспедициями Академии наук собрано около 27 т метеоритов, а их общая масса оценивалась в [69] в  $70 \div 80$  т. На протяжении многих лет и по сей день метеориты собирали также частные искатели. Для построения распределения Сихотэ-Алинских метеоритов мы использовали массы 583 фрагментов весом 20909 кг из каталога первых четырех экспедиций [65], когда были найдены крупные фрагменты. К сожалению, из некрупных фрагментов менее 5 кг мы смогли использовать только 58 (весом 109 кг), так как массы 7684 таких фрагментов (весом 2300 кг) не указаны индивидуально. Мы добавили 840 масс из разных коллекций и построили распределение 1423 метеоритов весом 21243 кг с максимальным фрагментом 1745 кг (рис. 2).

### 5.3. Распределения метеоритов

Характеристики рассматриваемых коллекций метеоритов приведены в табл. 1: дата и страна падения, классификация, количество и общая масса фрагментов, тип фрагментации, определяемый разницей между массами наибольших фрагментов, и источники данных о массах. Видно разнообразие метеоритных коллекций, например, число фрагментов меняется от 78 до 2748, а их масса – от 0.481 до 21243 кг.

Таблица 1

Коллекции метеоритов

Метеоритный дождь	Дата падения, страна	Тип метеорита	Количество	Масса, кг	Тип фрагментации	Источники данных
Царев	06.12.1922 Россия	обыкновенный хондрит L5	118	1500	III	[43, 50], NMNH, FMNH, RBINS, MMC, МУН, FMM, MP, NMNHNASU, ESM, IMCA, PMC, SWML, MSC
Мбале	14.08.1992 Уганда	обыкновенный хондрит L5/6	248	128	IY	[16], NBC, NMNH, MMC, RBINS, MNHN, MNA, NHM, IMCA, SWML, PMS
Бассикуну	16.10.2006 Мавритания	обыкновенный хондрит H5	258	84.4	IV	[44], MMC, MNHN, RBINS, IMCA, PMS, MF, DG, MSC
Кошице	28.02.2010 Словакия	обыкновенный хондрит H5	230	11.5	III	[20], FMNH, MMC, IMCA
Челябинск	15.02.2013 Россия	обыкновенный хондрит LL5	2257	142	III	[48, 49], CSU, NMNH, FMNH, MMC, RBINS, UAb, IMCA, DMM, PMS, CRN
Альенде	08.02.1969 Мексика	углистый хондрит CV3	2748	401	IV	NMNH, FMNH, MMC, NBC, MNHN, RBINS, NHM, MSNM, IMCA, DMM, PMS, B&C, MF, MSC
Мурчисон	28.09.1969 Австралия	углистый хондрит CM2	918	59, 1	IV	[53], NMNH, FMNH, MMC, VM, NHM, MNHN, MNA, RBINS, NBC, MSNM, ROM, IMCA, UAb, MF, B&C, PMS,
Тагиш-Лейк	18.01.2000 Канада	углистый хондрит C2 ungrouped	102	1.9	IV	[17], UAb, ROM, RBINS, IMCA, PMS, WW
Саттерс-Милл	22.04.2012 США	углистый хондрит CM	105	1.14	III	[57], NMNH, FMNH, MMC, IMCA, DG
Пуэрто-Лапесе	10.05.2007 Испания	ахондрит эвкрит брекчиевидный	78	0.481	III	[58], IMCA, MF, DG, B&C
Алмахата Ситта	7.10.2008 Судан	ахондрит полимиктовый уреилит аномальный	717	10.8	IV	[61], NMNH, FMNH, MMC, IMCA, DMM
Сарычичек	02.09.2015 Турция	ахондрит говардит	399	15.1	IV	[64], FMNH, MMC, UAb, IMCA, DMM
Сихотэ-Алинь	12.02.1947 Россия	железный метеорит ПАВ	1423	21243	III	[50, 65], NMNH, FMNH, MMC, NBC, DG, MNHN, RBINS, IGME, ROM, NHM, MNA, MP, ESM, NMNHNASU, MSNM, IMCA, PMS, DMM, SWML, B&C, MF, WW, MSC

Тип фрагментации в табл. 1. относится к рассматриваемой коллекции метеоритов, а не к разрушению исходного метеороида. Это связано с тем, что максимальный фрагмент, или фрагменты с массой между массой этого фрагмента и следующими могут быть не найдены, или наибольший фрагмент мог разбиться при падении на землю, поэтому учитываются только его осколки. Так, в случае Альенде самые крупные экземпляры были обнаружены расколотыми при ударе о землю [52]. Тип фрагментации нужен для аналитического описания эмпирических распределений: в случае IV типа формула (4) применяется, начиная с первого фрагмента, а в случае III типа – со второго или третьего фрагмента.

Построенные распределения по массам фрагментов метеоритных коллекций из табл. 1, а также их аналитическое описание представлены на рис. 2.

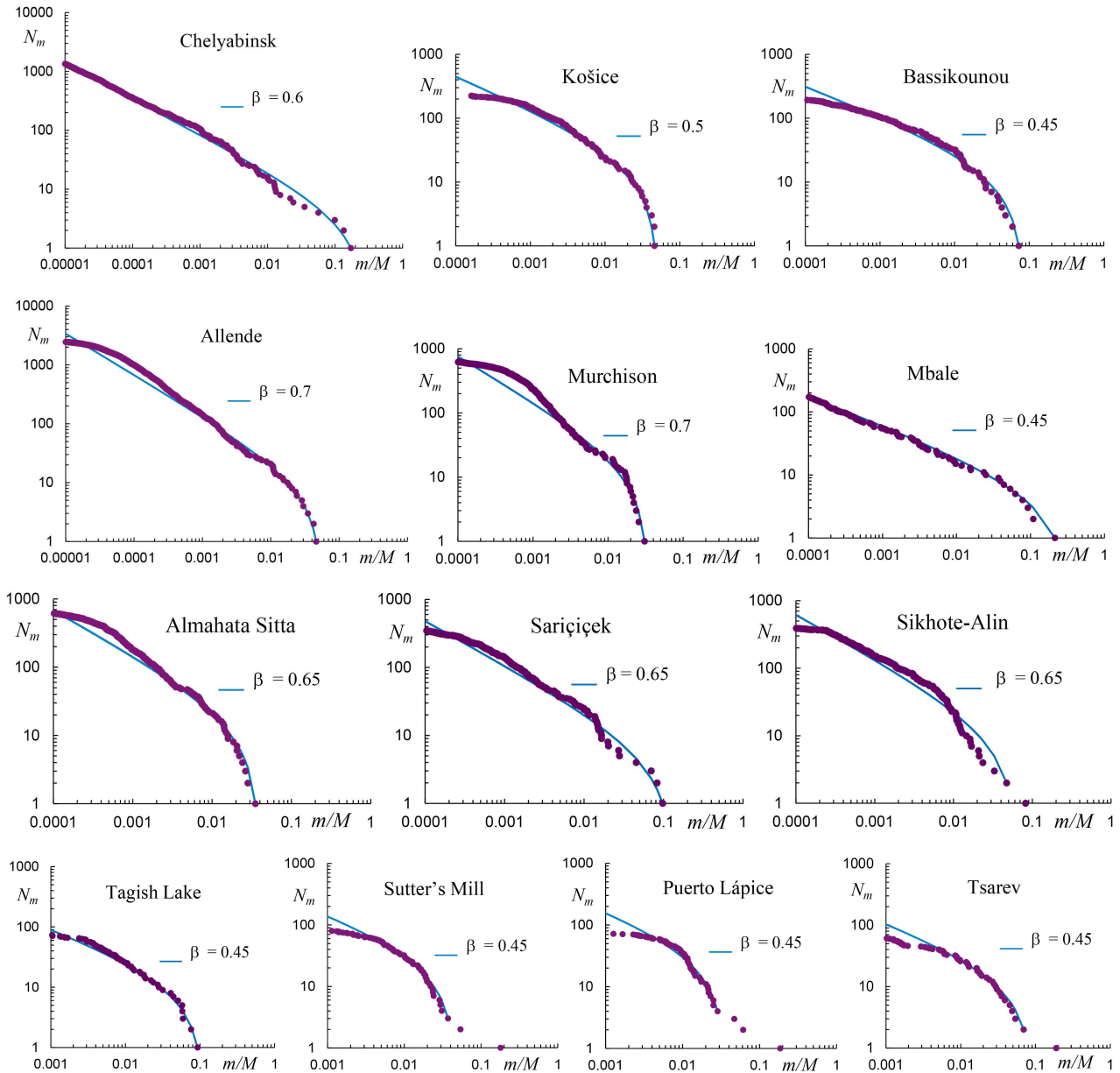


Рис. 2. Кумулятивное число фрагментов в зависимости от относительной массы для 13 метеоритных дождей, описанных в табл. 1. Точки – распределения метеоритов, линии – формула (4)

Значения свободного параметра – степенного индекса  $\beta$  подбирались для наилучшего соответствия эмпирическим распределениям. Однако значения  $\beta$  на рис. 2 допускают некоторые вариации. Интервал допустимых значений  $\beta$  зависит от количества фрагментов, точнее,

от диапазона рассматриваемых масс. Для Челябинских метеоритов формула (4) хорошо описывает их распределение до масс  $m/M \approx 10^{-6}$ , при этом  $\beta = 0.6$  допускает вариации не более 1 %, для метеоритов Альенде – до  $m/M \approx 10^{-5}$ , и подходят значения  $\beta$  от 0.7 до 0.72 (3 %). В случаях Кошице, Сарычичек, Алмахата Ситта, Мурчисон, Сихотэ-Алинь, Бассикуну и Мбале массы  $m/M$  менялись примерно до  $10^{-4}$ , при этом значения  $\beta$  допускают вариации до 5 % для первых пяти метеоритных дождей и до  $6 \div 7$  % – для двух последних. Для метеоритов Царев, Пуэрто-Лаписе, Саттерс-Милл и Тагиш-Лейк с наименьшим диапазоном масс ( $m/M$  до  $10^{-3}$ ), интервал приемлемых значений  $\beta$  самый большой:  $0.4 \div 0.5$ . Объяснение состоит в том, что в коротком диапазоне масс (малое число фрагментов) аналитические решения (4) близки друг к другу при  $\beta = 0.4 \div 0.5$ , они расходятся лишь при меньших массах. Чтобы описать более длинные эмпирические кривые в большем диапазоне масс, из-за расхождения аналитических кривых нужно более точно подбирать значение  $\beta$ .

## 6. Обсуждение

Анализируя распределения, представленные на рис. 2, можно увидеть некоторые закономерности. Значение  $\beta$  зависит от количества метеоритов в коллекции, иными словами, оно зависит от степени разрушения исходного метеороида в атмосфере. Чем больше степень разрушения (число фрагментов), тем больше значение  $\beta$ . Например, при числе фрагментов около 100 (Царев, Пуэрто-Лаписе, Саттерс-Милл и Тагиш-Лейк),  $\beta$  равно 0.45. При числе фрагментов от 200 до 250 (Мбале, Бассикуну и Кошице),  $\beta$  лежит в интервале  $0.45 \div 0.5$ . В случае метеоритных дождей Сарычичек, Алмахата Ситта, Сихотэ-Алинь и Челябинского с числом фрагментов от 400 до 2000,  $\beta$  меняется от 0.6 до 0.65. Для Альенде с максимальным числом фрагментов  $\beta = 0.7$ . Эта тенденция увеличения значений  $\beta$  с увеличением числа фрагментов является общей для различных метеоритных дождей. Отметим, что низкое  $\beta$  может указывать не только на фрагментацию метеороида, как в случае Саттерс-Милл, Пуэрто-Лаписе, Мбале и Бассикуну, но и на существенную неполноту собранной коллекции метеоритов, как в случае Тагиш-Лейк и Царев (см. раздел 5.2); в каждом конкретном случае надо учитывать условия поиска метеоритов.

Согласование аналитического распределения с эмпирическим тем лучше, т.е. распространяется на меньшие массы, чем больше число фрагментов в коллекции метеоритов. Например, формула (4) описывает распределение метеоритов Тагиш-Лейк, Саттерс-Милл, Царев и Пуэрто-Лаписе до масс  $m$ , составляющих примерно  $0.1 \div 0.3\%$  от общей массы  $M$ , Кошице и Бассикуну – до  $m \sim 0.03 \div 0.05\%$  от  $M$ , Мбале, Сарычичек, Алмахата Ситта и Сихотэ-Алинь – до  $m \sim 0.01 \div 0.02\%$  от  $M$ , а в случае Альенде и Челябинска – до  $m \sim 0.001$  и  $0.0001\%$  от  $M$ . Разница между аналитическим решением и распределением метеоритов при малых массах естественна и должна быть, так как практически невозможно найти все мелкие частицы.

Сравнение распределений фрагментов разных метеоритных дождей показано на рис. 3. Эти распределения далеки друг от друга при построении их в зависимости от размерной массы из-за большой разницы в общей массе фрагментов. Распределения, построенные в зависимости от безразмерной массы, довольно близки, что и позволяет описать их единой формулой (4), разброс наблюдается в основном в массовой доле максимального фрагмента. Такой разброс наблюдался также при разрушении тел в экспериментах: при проведении экспериментов в одинаковых условиях, например, в [30], максимальные фрагменты в каждом случае были различны, но формы экспериментальных кривых распределения и значения  $\beta$  были близки [13]. Результаты экспериментов [27] по разрушению образцов обыкновенного хондрита L6 тоже показали, что если в каждом эксперименте игнорировать один или два наиболее крупных фрагмента, то «все распределения удивительно похожи по форме». Иными словами, некоторая случайность в распределениях по массам фрагментов разрушенного тела связана в основном с максимальным фрагментом.

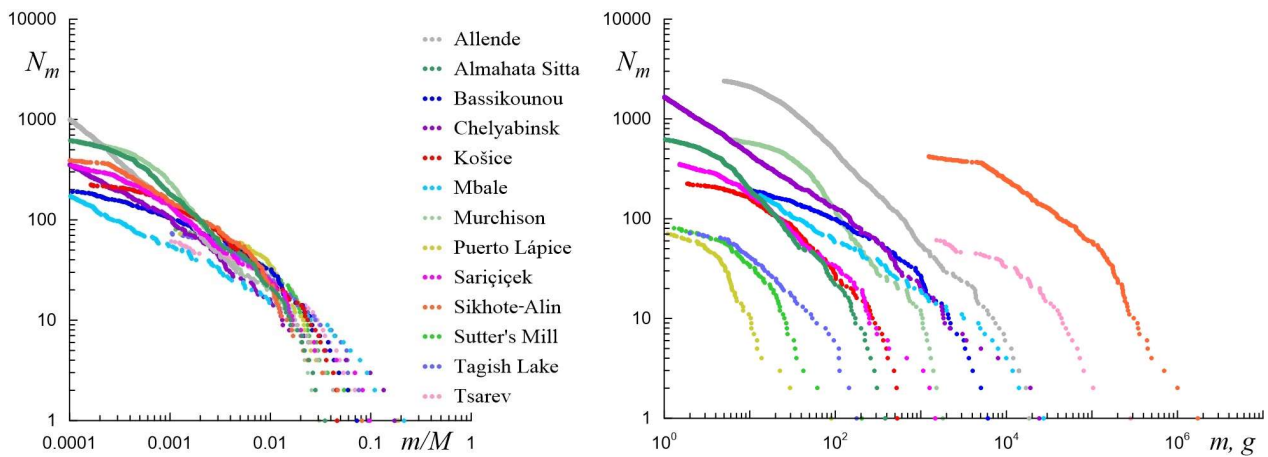


Рис. 3. Распределение по массам найденных метеоритов для 13 метеоритных дождей, описанных в табл. 1, в зависимости от нормированной и размерной масс

При изучении и описании распределений фрагментов тел, разрушенных в атмосфере, возникают проблемы, отсутствующие при изучении распределений фрагментов тел, разрушенных в ударных экспериментах. Во-первых, удастся обнаружить только часть упавших на землю фрагментов (из-за большого поля рассеяния, труднодоступных мест, погодных условий, растительности и т.д.). Особенно это касается мелких частиц, найти которые чрезвычайно проблематично. Во-вторых, только часть найденных фрагментов официально регистрируется. В-третьих, только часть информации о зарегистрированных метеоритах, хранящихся в разных местах, доступна. В-четвертых, иногда метеориты при падении на землю раскалываются, и осколки фрагментов вносятся в каталоги наряду с целыми. Поэтому построенное распределение метеоритов дает лишь приблизительное представление о реальном распределении неиспарившихся фрагментов разрушенного метеороида. Естественно, возникает вопрос, насколько оно приблизительно, можно ли на основании доступной неполной (случайной) коллекции метеоритов судить о распределении фрагментов в полной (идеальной) коллекции, характеризующей разрушение метеороида.

Этот вопрос изучается на примере метеоритных дождей Мбале, Бассикуну и Челябинского. На рис. 4 сравниваются два распределения метеоритов Мбале и их аналитические описания: первое построено для 50 фрагментов из работы [16], второе построено для в 5 раз большего числа фрагментов (248) с добавлением данных из музейных и частных коллекций (табл. 1, рис. 2).

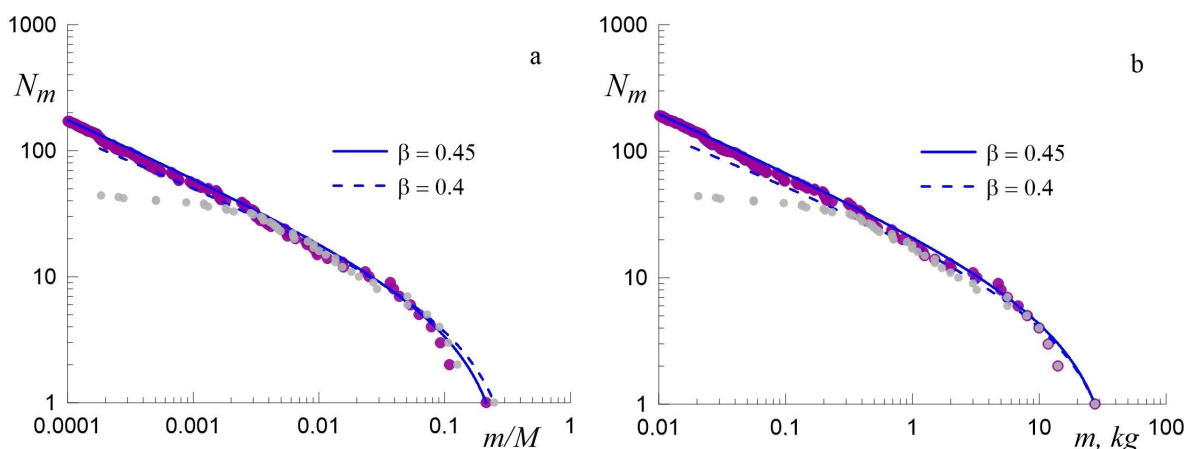


Рис. 4. Распределение метеоритов Мбале в зависимости от относительной и размерной массы. Фиолетовые и серые точки: 248 и 50 фрагментов,  $m_l = 27.4$  кг. Сплошные и штриховые линии: описание распределений 248 и 50 фрагментов формулами (4) (a), (5) (b)



Максимальный фрагмент весом 27.4 кг в обоих случаях один и тот же. Распределения приведены в зависимости от нормированной массы, где массовые доли наибольшего фрагмента разные из-за разных общих масс, а также в зависимости от размерной массы, где массы наибольших фрагментов совпадают.

Аналогичное сравнение распределений для двух коллекций метеоритов Бассикуну с разным числом фрагментов и одним и тем же максимальным фрагментом весом 6.12 кг показано на рис. 5. Первое распределение построено для 108 фрагментов массой 62.4 кг из работы [44], второе – для в 2.4 раза большего числа фрагментов (258) массой 84.4 кг с добавлением данных из разных коллекций (табл. 1, рис. 2). Эмпирические и аналитические распределения приведены в зависимости от нормированной и размерной масс. Из рис. 4 и 5 видно, что распределения для коллекций с малым числом фрагментов и для более полных коллекций, где число фрагментов в несколько раз больше, в случаях, когда максимальные фрагменты одинаковы, близки друг к другу до масс около 0.1% от общей массы. При учете дополнительных фрагментов, особенно мелких, левая часть эмпирической кривой поднимается и согласие аналитического распределения с эмпирическим улучшается, распространяясь на меньшие массы. Значение  $\beta$  немного увеличивается от 0.4 до 0.45 для более полных коллекций метеоритов Мбале и Бассикуну.

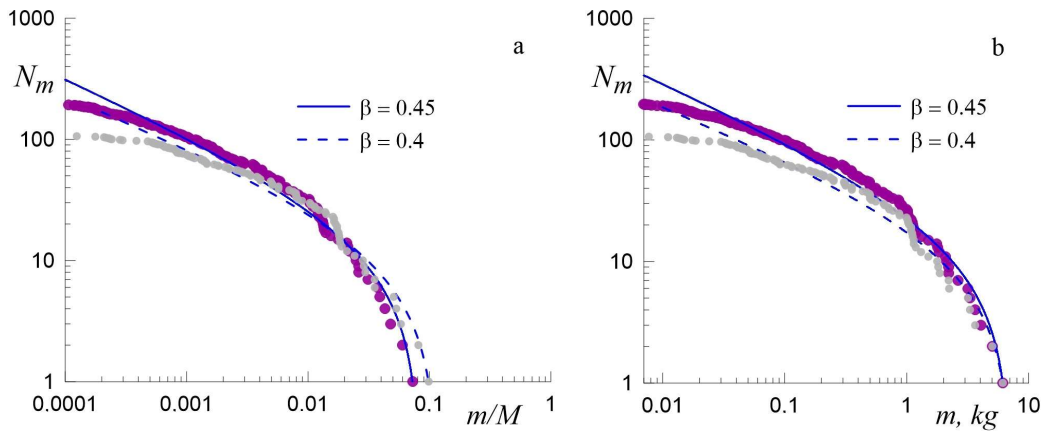


Рис. 5. Распределение метеоритов Бассикуну в зависимости от относительной и размерной массы. Фиолетовые и серые точки: 258 и 108 фрагментов,  $m_i = 6.1$  кг. Сплошные и штриховые линии: описание распределений 258 и 108 фрагментов формулами (4) (а), (5) (б)

Распределения с разными максимальными фрагментами сравниваются на рис. 6 для Челябинских метеоритов.

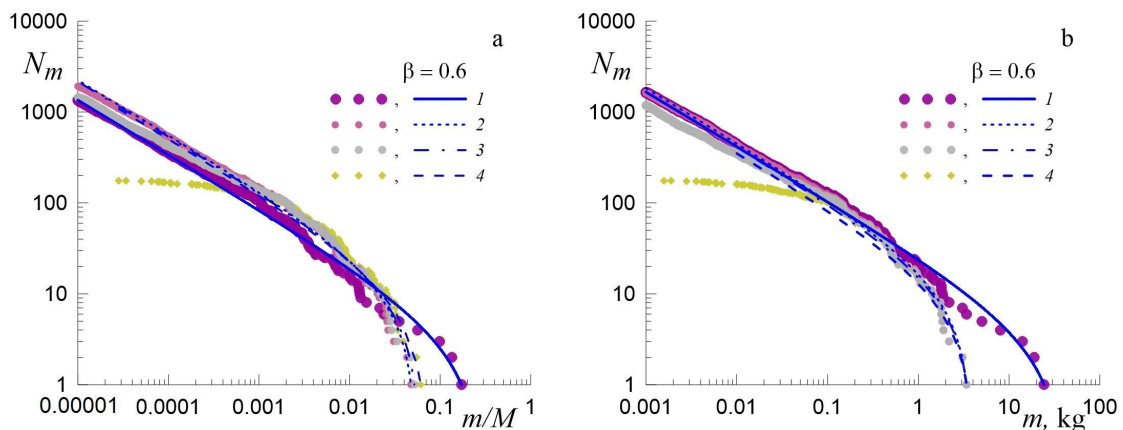


Рис. 6. Распределение Челябинских метеоритов в зависимости от относительной и размерной массы. Метеориты (точки) и формулы (4), (5) (линии): 4, 3 и 2 – коллекции из 177 ([49]), 1696 ([49], CSU) и 2252 ([49], CSU, NMNH, FMNH, MMC, RBINS, UAб, IMCA, DMM, PMS) фрагментов,  $m_i = 3.4$  кг; 1 – 2257 фрагментов: к коллекции 2 добавлены данные [48] и CRN;  $m_i = 24.3$  кг

Распределения 2, 3, 4 соответствуют коллекциям с разным числом фрагментов и одним и тем же максимальным фрагментом 3.4 кг. Коллекция 4 включает 177 фрагментов [49] массой 55.7 кг, коллекция 3 с добавлением данных CSU включает 1696 фрагментов массой 65.3 кг, коллекция 2 содержит 2252 фрагмента массой 71.4 кг (добавлены данные из музейных и частных коллекций). Коллекция 1, с добавлением незарегистрированного фрагмента 24.3 кг и четырех фрагментов с массами в интервале 3.4–24.3 кг из наблюдений [48] (раздел 5.2), содержит 2257 фрагментов массой 141.7 кг (табл. 1, рис. 2). Масса наибольшего фрагмента коллекции 1 в 7 раз превышает массу наибольшего фрагмента коллекций 2, 3, 4. Отметим, что  $\beta = 0.6$  подходит для описания (формулами (4) и (5)) рассмотренных распределений Челябинских метеоритов независимо от числа фрагментов и массы максимального фрагмента. Коллекция 4 из 177 фрагментов содержит большую часть крупных метеоритов, и добавление множества мелких фрагментов (около 1500) из базы данных CSU расширяет диапазон масс, поднимает левую часть эмпирической кривой, значительно улучшает согласие аналитического распределения с эмпирическим, но не влияет на значение  $\beta$ . Изменение числа фрагментов с 1696 до 2252 уже слабо влияет на распределение метеоритов, когда наибольший фрагмент остается прежним. Распределения с разными наибольшими фрагментами 3.4 кг и 24.3 кг (и эмпирические, и аналитические) становятся близки друг к другу при массах менее  $\sim 2$  кг.

Рисунки 4, 5 и 6 демонстрируют, что существует некоторая тенденция значений  $\beta$  относительно количества фрагментов, учитываемых для конкретного метеоритного дождя. При последовательном (по мере обнаружения новых источников данных) добавлении новых масс к исходному набору данных (обычно из публикации) для каждого метеоритного дождя (не только представленных на рис. 4, 5, 6), значение  $\beta$  либо не менялось, как в случае Челябинска, либо менялось слабо, примерно на 0.05, как в случае Мбале и Бассикуну. При этом согласие аналитического распределения с эмпирическим улучшалось, распространяясь на меньшие массы. С какого-то момента, при дальнейшем добавлении мелких фрагментов, значение  $\beta$  переставало меняться, т.е. существовало предельное  $\beta$  в каждом случае. Это дает основание полагать, что предельные значения  $\beta$ , показанные на рис. 2, близки к значениям, которые могли бы описать идеальные распределения, характеризующие разрушение исходных метеороидов в атмосфере.

На рис. 7 показано сравнение двух распределений метеоритов Тагиш-Лейк. Первое (табл. 1, рис. 2) построено для 102 измеренных масс фрагментов с общей массой 1.9 кг и наибольшей 176.3 г.

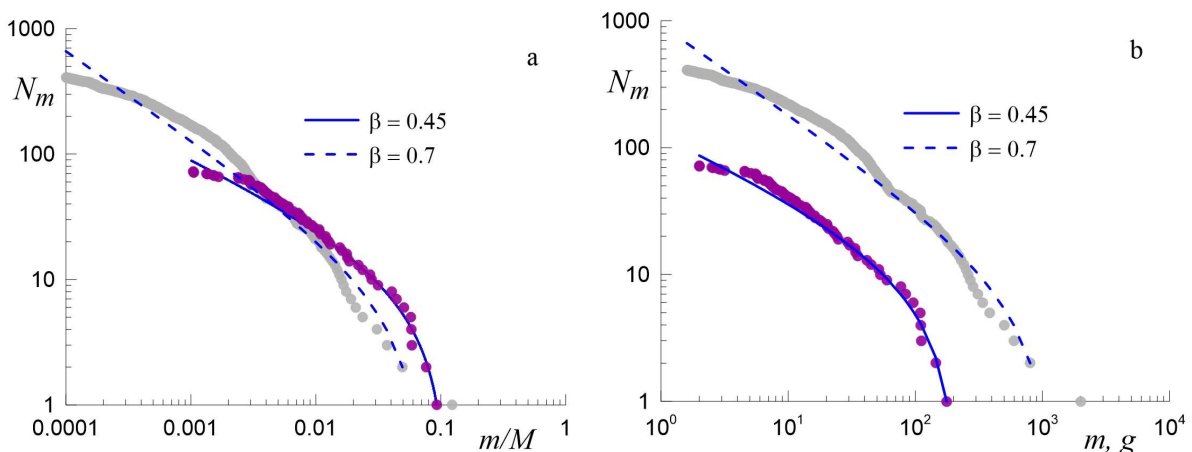


Рис. 7. Распределение метеоритов Тагиш-Лейк в зависимости от относительной и размерной массы. Фиолетовые и серые точки: 102 фрагмента с измеренными массами ([17], UAb, ROM, RBINS, IMCA, PMS, WW),  $m_l = 0.176$  кг, и 424 фрагмента: добавлены 322 приблизительно оцененных масс [17],  $m_l = 2$  кг. Сплошные и штриховые линии: описание распределений 102 и 424 фрагментов формулами (4) (a), (5) (b)



Второе – очень приближенное распределение, построенное для 424 фрагментов с общей массой 16.2 кг и наибольшей 2 кг. В этом распределении учитываются грубо, во многих случаях визуально, оцененные массы метеоритов [17] (раздел 5.2). При его построении использовалась кусочно-линейная аппроксимация в случае многих одинаковых оценок масс или интервалов масс. Мы строили и другие приближенные распределения, несколько варьируя массы фрагментов (например, полагая максимальную массу равной 2.5 кг), которые немного отличались, однако значение  $\beta$  при этом не менялось. Разница между двумя распределениями метеоритов Тагиш-Лейк на рис. 7 объясняется большой разницей, главным образом, в общей массе фрагментов (в 8.5 раза), а также в массе максимального фрагмента (в 11 раз), и это же является причиной разницы в значениях  $\beta$ . Заметим, что формулы (4) и (5) адекватно описывают оба распределения.

Отметим влияние материала тела на распределение фрагментов по массам. Из рис. 2 видно, что распределения обыкновенных хондритов представляют собой преимущественно гладкие кривые, хорошо описываемые формулой (4). Кривые распределения углистых хондритов Альенде и особенно Мурчисон, а также ахондритов Алмахата Ситта имеют некоторое «выпучивание». Это можно объяснить тем, что углистые хондриты имеют меньшую прочность на сжатие, чем обыкновенные хондриты [69], и легче раскалываются при падении на землю. (Отметим, что разрушение фрагментов зависит не только от их прочности, но и от твердости грунта и погодных условий, например, метеориты Кошице и Челябинские упали в снег). В самой большой коллекции метеоритов Мурчисон в музее FMNH не многие из них названы «полностью целым» или «почти целым», большинство названы «фрагментом». Отсюда можно сделать вывод, что большая часть метеоритов Мурчисон из FMNH являются результатом раскалывания неспарившихся фрагментов метеороида при ударе о землю, и при их добавлении на кривой распределения образовался «горбик». Прочность на сжатие углистых хондритов Саттерс-Милл (82 МПа) выше, чем прочность углистых хондритов Мурчисон (50 МПа) и Альенде (35.4 МПа) [69], и их кривая распределения более гладкая. Кривая распределения метеоритов Тагиш-Лейк (рис. 2) также гладкая, так как при ее построении использовались в основном целые фрагменты [17], а для расколотых фрагментов брались суммы масс их частей.

## 5. Заключение

Построены и аналитически описаны распределения по массам найденных фрагментов метеоритных дождей, выпавших в разных странах после пролета и разрушения в атмосфере метеороидов и астероидов разного состава: Царев, Мбале, Бассикуну, Кошице, Челябинский, Альенде, Мурчисон, Тагиш-Лейк, Саттерс-Милл, Пуэрто-Лаписе, Алмахата Ситта, Сарычичек и Сихотэ-Алинь. Выявлены некоторые закономерности и факторы случайности в распределениях метеоритов. Показано, что в большинстве случаев по доступной неполной коллекции метеоритов можно сделать вывод о распределении фрагментов в более полной коллекции, характеризующей разрушение небесного тела в атмосфере. Предложенный метод описания распределений проще статистических методов, так как имеет только один свободный параметр, точнее простого степенного метода и может быть применен для описания различных распределений фрагментов по массам в случаях III и IV типов разрушения. Кроме того, метод показывает, что распределение фрагментов по массам определяется не размерными, а только безразмерными параметрами: массой, нормированной на общую массу фрагментов и массовой долей максимального фрагмента. Формулы (7) и (8) для плотности распределения фрагментов по массам могут использоваться при моделировании энерговыделения, светимости и потери массы фрагментированного в атмосфере метеороида или астероида.

## Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (номер гос. регистрации АААА-А16-116021110205-0).

## Литература

1. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. Моделирование движения, абляции и энерговыделения метеороида в атмосфере с учетом криволинейности траектории // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2020. Т. 21. Вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-2/articles/903/>
2. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. Аппроксимационные формулы для радиационного теплового потока при больших скоростях // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 4. С. 123–134.
3. Брагин М.Д., Брыкина И.Г. О моделировании энерговыделения фрагментированного метеороида в атмосфере // Известия РАН. МЖГ. 2021. Т. 56. № 4. С. 114–124.
4. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О параметре абляции в задаче о входе метеорного тела в атмосферу // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22. Вып. 5. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-5/articles/959/>
5. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О влиянии эффективной теплоты абляции на моделирование взаимодействия метеороидов с атмосферой // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23. Вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-2/articles/995/>
6. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О неопределенности моделирования взаимодействия метеороида с атмосферой при разных скоростях входа // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24. Вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-1/articles/1034/>
7. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О неопределенности моделирования взаимодействия метеорного тела с атмосферой при разных углах входа // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2024. Т. 25. Вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-1/articles/1088>
8. Брыкина И.Г. О модели фрагментации крупного метеороида: моделирование взаимодействия Челябинского метеороида с атмосферой // *Астрономический Вестник*. 2018. Т. 52. № 5. С. 437–446.
9. Brykina I.G., Bragin M.D. On models of meteoroid disruption into the cloud of fragments // *Planetary and Space Science*. 2020. Vol. 187. № 104942. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104942>
10. Брыкина И.Г., Брагин М.Д. Об ограничении бокового расширения облака фрагментов разрушенного метеороида // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2020. Т. 21. Вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-1/articles/894>
11. Брыкина И.Г., Брагин М.Д., Егорова Л.А. О моделях фрагментации метеороидов в атмосфере // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т. 20. Вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-2/articles/822/>
12. Brykina I.G., Egorova L.A. On the mass distribution of fragments of an asteroid disrupted in the Earth's atmosphere // *Advances in Astron.* 2021. № 9914717. <https://doi.org/10.1155/2021/9914717>.
13. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О степенном законе для описания распределения фрагментов разрушенного космического тела по массам // *Астрономический вестник*. 2022. Т. 56. № 5. С. 356–368. <http://dx.doi.org/10.31857/S0320930X2204003X>
14. Brykina I.G., Egorova L.A. Describing the fragment mass distribution in meteorite showers // *Planetary and Space Science*. 2024. Vol. 241. № 105838. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2024.105838>
15. Frost M.J. Size and spacial distribution in meteoritic showers // *Meteoritics*. 1969. Vol. 4. № 3. Pp. 217–232.
16. Jenniskens P., Betlem H., Betlem J., Barifajjo E., Schlüter T., Hampton C., Laubenstein M., Kunz J., Heusser G. The Mbale meteorite shower // *Meteoritics*. 1994. V. 29. № 2. P. 246–254.

17. Hildebrand A.R., McCausland P.J., Brown P.G., Longstaffe F.J., Russell S.D., Tagliaferri E., Wacker J.F., Mazur M.J. The fall and recovery of the Tagish Lake meteorite. *Meteoritics Planet. Sci.* // 2006. Vol. 41. № 3. Pp. 407–431.
18. Бадюков Д.Д., Дудоров А.Е. Фрагменты Челябинского метеоритного дождя: распределение по массам, размерам и возможная масса максимального фрагмента // *Геохимия*. 2013. № 7. С. 643–643.
19. Oddershede L., Meibom A., Bohr J. Scaling analysis of meteorite shower mass distributions // *Europhys. Lett.* 1998. Vol. 43.
20. Gritsevich M., Vinnikov V., Kohout T., Toth J., Peltoniemi J., Turchak L., Virtanen J.A. comprehensive study of distribution laws for the fragments of Košice meteorite // *Meteorit. Planet. Sci.* 2014. Vol. 49. Pp. 328–345.
21. Betzler A.S., Borges E.P. Mass distributions of meteorites // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* 2020. Vol. 493. Pp. 4058–4064.
22. Takagi Y., Mizutani H., Kawakami S.I. Impact fragmentation experiments of basalts and pyrophyllites // *Icarus*. 1984. Vol. 59. Pp. 462–477.
23. Fujiwara A., Cerroni P., Davis D.R., Ryan, E., Di Martino M., Holsapple K., Housen K. Experiments and scaling laws for catastrophic collisions. In: *Asteroids II*, Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. Pp. 240–265.
24. Davis D.R., Ryan E.V. On collisional disruption: Experimental results and scaling laws // *Icarus*. 1990. V. 83. № 1. Pp. 156–182.
25. Ryan E.V., Hartmann W.K., Davis D.R. Impact experiments 3: Catastrophic fragmentation of aggregate targets and relation to asteroids // *Icarus*. 1991. Vol. 94. Pp. 283–298.
26. Nakamura A., Fujiwara A. Velocity distribution of fragments formed in a simulated collisional disruption // *Icarus*. 1991. Vol. 92. Pp. 132–146.
27. Cintala M.J., Horz F. Experimental impacts into chondritic targets, part I: Disruption of an L6 chondrite by multiple impacts // *Meteoritics Planet. Sci.* 2008. Vol. 43. Pp. 771–803.
28. Okamoto C., Arakawa M. Experimental study on the collisional disruption of porous gypsum spheres // *Meteoritics Planet. Sci.* 2009. Vol. 44. Pp. 1947–1954.
29. Flynn G.J., Durda D.D., Sandelc L.E., Kreftc J.W., Strait M.M. Dust production from the hypervelocity impact disruption of the Murchison hydrous CM2 meteorite: Implications for the disruption of hydrous asteroids and the production of interplanetary dust // *Planet. Space Sci.* 2009. V. 57. Pp. 119–126.
30. Michikami T., Hagermann A., Kadokawa T., Yoshida A., Shimada A., Hasegawa S., Tsuchiyama A. Fragment shapes in impact experiments ranging from cratering to catastrophic disruption // *Icarus*. 2009. Vol. 264. Pp. 316–330.
31. Blaauw R.C., Campbell-Brown M.D., Weryk R.J. A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar – III. Mass distribution indices of six major meteor showers // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* 2011. Vol. 414. Pp. 3322–3329.
32. Pokorný P., Brown P.G. A reproducible method to determine the meteoroid mass index // *Astron. & Astroph. V.* 592. A150.
33. Corbelli E., Palla F., Zinnecker H., eds. *The Initial Mass Function 50 years later*. Astrophys. Space Sci. Library. 2005. Vol. 327. Dordrecht, Netherlands: Springer. 571 p.
34. Шустов Б.М., Тутуков А.В. О начальном спектре масс астрономических объектов // *Астрономический журнал*. 2018. Т. 95. № 11. С. 765–774.
35. Grady M.M. *Catalogue of Meteorites*. Cambridge University Press. 2000. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000came.book....G/abstract>
36. Folco L., Peri F., Pezzotta F. The meteorite collection of the Civico Planetario and the Museo Civico di Storia Naturale in Milan, Italy // *Meteoritics Planet. Sci.* 2002. Vol. 37 (Supplement). Pp. B95–B103. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2002.tb00908.x>

37. Семененко В.П., Гирич А.Л., Русько Ю.А. Каталог метеоритов в национальном научно-естественном музее НАН Украины (на 1 января 2007 года) // *Мінералогічний журнал*. 2007. Т. 29. №. 2. С. 72–82. [https://museumkiev.org/public/katalog/geo/katalog\\_meteor\\_2008.pdf](https://museumkiev.org/public/katalog/geo/katalog_meteor_2008.pdf)
38. List of meteorite specimens in the collection of the National Museum of Victoria, September 1972. National Museum of Victoria, Melbourne. <https://archive.org/details/listmeteoritesp00nati>
39. Хотинюк Р.Л. Новые метеориты СССР: Царев, Кутаис, Бахардок // *Метеоритика*. 1982. Вып. 40. С. 6–9.
40. Зоткин И.Т., Цветков В.И. Рассеяние каменного метеоритного дождя Царев // *Метеоритика*. 1984. Вып. 43. С. 3–8.
41. Зоткин И.Т., Медведев Р.В., Горбачевич Ф.Ф. Прочностные характеристики метеорита Царев // *Метеоритика*. 1987. Вып. 46. С. 86–93.
42. Винник М.А., Коснырева А.А., Галушкин Ю.И., Галушкина Т.Н. Метеоритные экспедиции сотрудников Музея земледования в 2022 г. // *Жизнь Земли*. 2022. Т. 44. № 4. С. 487–497.
43. Слюта Е.Н. Форма малых тел Солнечной системы // *Астрономический вестник*. 2014. Т. 48. № 3. С. 234–234.
44. Buhl S., Baermann M. The Bassikounou meteorite fall – Descriptive catalog of the recovered masses. 2007. [https://www.meteorite-recon.com/wp-content/uploads/pdf/Buhl\\_Baermann\\_Catalog](https://www.meteorite-recon.com/wp-content/uploads/pdf/Buhl_Baermann_Catalog)
45. Connolly H.C. Jr., Smith C., Benedix G., Folco L., Righter K., Zipfel J., Yamaguchie A., Aoudjehane H.C. The Meteoritical Bulletin. № 92. 2007. September // *Meteoritics Planet. Sci.* 2007. Vol. 42. № 9. Pp. 1647–1694.
46. Borovička J., Tóth J., Igaz A., Spurny P., Kalenda P., Haloda J., Svoren J., Kornos L., Silber E., Brown P.G., Husarik M. The Košice meteorite fall: Atmospheric trajectory, fragmentation, and orbit // *Meteoritics Planet. Sci.* 2013. Vol. 48. Pp. 1757–1779.
47. Toth J., Svoreň J., Borovička J., Spurný P., Igaz A., Kornoš L., Vereš P., Husárik M., Koza J., Kučera A., Zigo P., Gajdoš Š., Világi J., Čapek D., Krišandová Z., Tomko D., Šilha J., Schunová E., Bodnárová M., Búzová D., Krejčová T. The Košice meteorite fall: Recovery and strewn field // *Meteoritics Planet. Sci.* 2015. Vol. 50. Pp. 853–863.
48. Borovička J., Spurný P., Brown P., Wiegert P., Kalenda P., Clark D., Shrbený L. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // *Nature*. 2013. V. 503. Pp. 235–237.
49. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Yu., Glazachev D., Mayer E.M., Gisler G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Snanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zolensky M., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J.I., Zhou Q., Li Z.-H., Liu Y., Tan G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M.K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk Airburst, Damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013. Vol. 342 (6162). Pp. 1069–1073. (Supplement).
50. Колисниченко С.В. Метеориты России. 2019. Изд-во Санарка. 304 с.
51. King E.A. Jr., Schonfeld E., Richardson K.A., Eldridge J.S. Meteorite fall at Pueblito de Allende, Chihuahua, Mexico: preliminary information // *Science*. 1969. Vol. 163 (3870). Pp. 928–929.
52. Clarke R.S. Jr., Jarosewich E., Mason B., Nelen J., Gomez M., Hyde J.R. Allende, Mexico, Meteorite Shower // *Smithsonian Contributions to the Earth Sciences*. 1971. Vol. 5. Pp. 1–53. <https://doi.org/10.5479/si.00810274.5.1>
53. Lovering J., Le Maitre R., Chappell B. Murchison C2 Carbonaceous Chondrite and its Inorganic Composition // *Nature Physical Science*. 1971. Vol. 230. Pp. 18–20.
54. Henry D.A. ‘Star Dust Memories’—A Brief History of the Murchison Carbonaceous Chondrite // *Publ. Astronomical Society of Australia*. 2003. Vol. 20. Pp. vii–ix. <https://doi.org/10.1071/AS03060>

55. Brown P.G., Hildebrand A.R., Zolensky M.E., Grady M., Clayton R.N., Mayeda T.K., Tagliaferri E., Spalding R., MacRae N.D., Hoffman E.L., Mittlefehldt D.W., Wacker J.F., Bird J.A., Campbell M.D., Carpenter R., Gingerich H., Glatiotis M., Greiner E., Mazur M.J., McCausland P.J.A., Plotkin H., Rubak-Mazur T. The fall, recovery, orbit, and composition of the Tagish Lake meteorite: a new type of carbonaceous chondrite // *Science* 2000. Vol. 290 (5490). Pp. 320–325.
56. Zolensky M.E., Nakamura K., Gounelle M., Mikouchi T., Kasama T., Tachikawa O., Tonui E. Mineralogy of Tagish Lake: An ungrouped type 2 carbonaceous chondrite // *Meteoritics Planet. Sci.* 2002. Vol. 37. № 5. Pp. 737–761.
57. Jenniskens P., Fries M.D., Yin Q.-Z., Zolensky M., Krot A.N., Sandford S., Sears D., Beauford R., Ebel D., Friedrich J., Nagashima K., Wimpenny J., Yamakawa A., Nishiizumi K., Hamajima Y., Caffee M., Welten K., Laubenstein M., Davis A., Simon S., Heck P., Young E., Kohl I., Thiemens M., Nunn M., Mikouchi T., Hagiya K., Ohsumi K., Cahill T., Lawton J., Barnes D., Steele A., Rochette P., Verosub K., Gattacceca J., Cooper G., Glavin D., Burton A., Dworkin J., Elsila J., Pizzarello S., Ogliore R., Schmitt-Kopplin P., Harir M., Hertkorn N., Verchovsky A., Grady M., Magao K., Okazaki R., Takechi H., Smith K., Silber E., Brown P., Albers J., Klotz D., Hankey M., Matson R., Fries J., Walker R., Puchtel I., Lee C.-T., Erdman M., Eppich G., Roeske S., Gabelica Z., Lerche M., Nuevo M., Girten B., Worden S.P. (the Sutter's Mill Meteorite Consortium). Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia // *Science*. 2012. Vol. 338. Pp. 1583–1587. (Supplement).
58. Trigo-Rodríguez J.M., Borovička J., Llorca J., Madiedo J.M., Zamorano J., Izquierdo J. Puerto Lápice eucrite fall: Strewn field, physical description, probable fireball trajectory, and orbit // *Meteoritics Planet. Sci.* 2009. Vol. 44. № 2. Pp. 175–186.
59. Llorca J., Casanova I., Trigo-Rodríguez J.M., Madiedo J.M., Roszjar J., Bischoff A., Ott U., Franchi I.A., Greenwood R.C., Laubenstein M. The Puerto Lápice eucrite // *Meteoritics Planet. Sci.* 2009. Vol. 44. № 2. Pp. 159–174.
60. Jenniskens P., Shaddad M.H., Numan D., Elsir S., Kudoda A.M., Zolensky M.E., Le L., Robinson G.A., Friedrich J.M., Rumble D., Steele A., Chesley S.R., Fitzsimmons A., Duddy S., Hsieh H.H., Ramsay G., Brown P.G., Edwards W.N., Tagliaferri E., Boslough M.B., Spalding R.E., Dantowitz R., Kozubal M., Pravec P., Borovička J., Charvat Z., Vaubaillon J., Kuiper J., Albers J., Bishop J.L., Mancinelli R.L., Sandford S.A., Milam S.N., Nuevo M., Worden S.P. The impact and recovery of asteroid 2008 TC3 // *Nature*. 2009. Vol. 458. Pp. 485–488.
61. Shaddad M.H., Jenniskens P., Numan D., Kudoda A.M., Elsir S., Riyad I.F., Ali A.E., Alameen M., Alameen N.M., Eid O., Osman A.T., Abubaker M.I., Yousif M., Chesley S.R., Chodas P.W., Albers J., Edwards W.N., Brown P.G., Kuiper J., Friedrich J.M. The recovery of asteroid 2008 TC3 // *Meteoritics Planet. Sci.* 2010. Vol. 45. Pp. 1557–1589.
62. Bischoff A., Horstmann M., Pack A., Laubenstein M., Haberer S. Asteroid 2008 TC3 — Almahata Sitta: A spectacular breccia containing many different ureilitic and chondritic lithologies // *Meteoritics Planet. Sci.* 2010. Vol. 45. Pp. 1638–1656.
63. Bouvier A., Gattacceca J., Grossman J., Metzler K., The meteoritical bulletin. № 105 // *Meteoritics Planet. Sci.* 2017. Vol. 52. № 11. Pp. 2411.
64. Unsalan O., Jenniskens P., Yin Q.-Z., Kaygisiz E., Albers J., Clark D., Granvik M., Demirkol I., Erdogan I.Y., Bengu A.S., Ozel M.E., Terzioglu Z., Gi N., Brown P., Yalcinkaya E., Temel T., Prabhu D.K., Robertson D.K., Boslough M., Ostrowski D.R., Kimberley J., Er S., Rowland D.J., Bryson K.L., Altunayar C., Rangelov B., Karamanov A., Tatchev D., Kocahan O., Oshtrakh M., Maksimova A.A., Karabanalov M.S., Verosub K.L., Levin E., Uysal I., Hoffmann V., Hiroi T., Reddy V., Ildiz G.O., Bolukbasi O., Zolensky M.E., Hochleitner R., Kaliwoda M., Ongen S., Fausto R., Nogueira B.A., Chukin A.V., Karashanova D., Semionkin V.A., Yesiltas M., Glotch T.D., Yilmaz A., Friedrich J.M., Sanborn M.E., Huyskens M., Ziegler K., Williams C.D., Schönbächler M., Bauer K., Meier M., Maden C., Busemann H., Welten K.C., Caffee M.W., Laubenstein M., Zhou Q., Li Q., Li X., Liu Y., Tang G.,

- Sears D., McLain H.L., Dworkin J.P., Elsilá J., Glavin D.P., Schmitt-Kopplin P., Ruf A., Le Corre L., Schmedemann N. (The Saricicek Meteorite Consortium). The Saricicek howardite fall in Turkey: Source crater of HED meteorites on Vesta and impact risk of Vestoids // *Meteoritics Planet. Sci.* 2019. Vol. 54. № 5. Pp. 953–1008.
65. Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь. Отв. ред.: Фесенков В.Г. Т. I. 1959, Т. II. 1963. М.: Изд-во АН СССР.
66. Кринов Е.Л., Цветков В.И. Сихотэ-Алинский метеоритный дождь как классическое метеоритное падение // *Метеоритика*. 1979. Вып. 38. С. 19–26.
67. Кринов Е.Л. Железный дождь. 1981. М.: Наука. 192 с.
68. Цветков В.И. Сихотэ-Алинский метеоритный дождь: дробление, рассеяние, траектория и орбита. *Метеоритика*. 1987. Вып. 46. С. 3–10.
69. Flynn G.J., Consolmagno G.J., Brown P., Macke R.J. Physical properties of the stone meteorites: Implications for the properties of their parent bodies // *Geochemistry*. 2018. Vol. 78, Iss. 3 Pp. 269–298.

## References

1. Brykina, I. G., Egorova, L. A., Modeling motion, ablation and energy deposition of meteoroid in the atmosphere taking account of the curved trajectory, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2020, Vol. 21, No 2 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-2/articles/903/>
2. Brykina, I. G., Egorova L. A., Approximation formulas for the radiative heat flux at high velocities, *Fluid Dyn.*, 2019, Vol. 54, pp. 562–574. <https://doi.org/10.1134/S0015462819040037>
3. Bragin, M. D., Brykina, I. G., On modeling energy deposition of a fragmented meteoroid in the atmosphere, *Fluid Dyn.*, 2021, Vol. 56, No 4, pp. 566–576. <http://dx.doi.org/10.1134/S0015462821040030>
4. Brykina, I. G., Egorova, L. A., On the ablation parameter in the problem of meteor body entering the atmosphere, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, Vol. 22, No. 5 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-5/articles/959/>
5. Brykina I. G., Egorova L. A. On the influence of the effective heat of ablation on modeling the interaction of meteoroids with the atmosphere, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, Vol. 23, No. 2 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-2/articles/995>
6. Brykina, I. G., Egorova, L. A., On the uncertainty of modeling the interaction of a meteoroid with the atmosphere at various entry velocities, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, Vol. 24, No 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-1/articles/1034/>
7. Brykina, I. G., Egorova, L. A., On uncertainty of modeling the interaction of a meteoroid with the atmosphere at various entry angles, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, Vol. 25, No. 1. [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-1/articles/1088>
8. Brykina, I. G., Large meteoroid fragmentation: Modeling the interaction of the Chelyabinsk meteoroid with the atmosphere, *Solar System Research*, 2018, Vol. 52, No 5, pp. 426–434. <http://dx.doi.org/10.1134/S003809461805002X>
9. Brykina, I. G., Bragin, M. D., On models of meteoroid disruption into the cloud of fragments, *Planet. Space Sci.*, 2020, Vol. 187, pp. 104942. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104942>
10. Brykina, I. G., Bragin, M. D., On Limiting the Lateral Expansion of the Cloud of Fragments of a Destructed Meteoroid, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2020, Vol. 21, No 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-1/articles/894>
11. Brykina, I. G., Bragin, M. D., Egorova, L. A., On Models of Meteoroids Fragmentation in the Atmosphere, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2019, vol. 20, No. 2 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-2/articles/822/>
12. Brykina, I. G., Egorova, L. A. On the mass distribution of fragments of an asteroid disrupted in the Earth's atmosphere, *Advances in Astron.*, 2021, No 9914717. <https://doi.org/10.1155/2021/9914717>

13. Brykina, I. G., Egorova, L. A., On the power law for describing the mass distribution of fragments of a disrupted cosmic body, *Solar System Research*, 2022, vol. 56, pp. 338–350. <https://doi.org/10.1134/S0038094622040037>
14. Brykina, I. G., Egorova, L. A., Describing the fragment mass distribution in meteorite showers, *Planet. Space Science*, 2024, Vol. 241, No 105838. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2024.105838>
15. Frost, M. J., Size and spacial distribution in meteoritic showers, *Meteoritics*, 1969, Vol. 4, No 3, pp. 217–232. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1969.tb01270.x>
16. Jenniskens, P., Betlem, H., Betlem, J., Barifajjo, E., Schlüter, T., Hampton, C., Laubenstein, M., Kunz, J., Heusser, G., The Mbale meteorite shower, *Meteoritics*, 1994, Vol. 29, No 2, pp. 246–254. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1994.tb00678.x>
17. Hildebrand, A. R., McCausland, P. J., Brown, P. G., Longstaffe, F. J., Russell, S. D., Tagliaferri, E., Wacker, J. F., Mazur, M. J., The fall and recovery of the Tagish Lake meteorite. *Meteoritics Planet. Sci.*, 2006, Vol. 41, No. 3, pp. 407–431. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2006.tb00471.x>
18. Badyukov, D. D., Dudorov, A. E., Fragments of the Chelyabinsk meteorite shower: Distribution of masses and sizes and constraints on the mass of the largest fragment, *Geochemistry International*, 2013, Vol. 51, pp. 583–586. <https://doi.org/10.1134/S0016702913070070>
19. Oddershede, L., Meibom, A., Bohr, J., Scaling analysis of meteorite shower mass distributions, *Europhys. Lett.*, 1998, Vol. 43, pp. 598–604. <https://doi.org/10.1209/epl/i1998-00403-3>
20. Gritsevich, M., Vinnikov, V., Kohout, T., Toth, J., Peltoniemi, J., Turchak, L., Virtanen, J., A comprehensive study of distribution laws for the fragments of Košice meteorite, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2014, Vol. 49, pp. 328–345. <https://doi.org/10.1111/maps.12252>
21. Betzler, A. S., Borges, E. P., Mass distributions of meteorites, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* 2020, Vol. 493, pp. 4058–4064. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa521>
22. Takagi, Y., Mizutani, H., Kawakami, S. I., Impact fragmentation experiments of basalts and pyrophyllites, *Icarus*, 1984, Vol. 59, pp. 462–477. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(84\)90114-3](https://doi.org/10.1016/0019-1035(84)90114-3)
23. Fujiwara, A., Cerroni, P., Davis, D. R., Ryan, E., Di Martino, M., Holsapple, K., Housen, K., Experiments and scaling laws for catastrophic collisions. In: *Asteroids II*, Tucson: Univ. Arizona Press, 1989, pp. 240–265. <http://adsabs.harvard.edu/full/1960AJ....65..318H>
24. Davis, D. R., Ryan, E. V., On collisional disruption: Experimental results and scaling laws, *Icarus*. 1990, Vol. 83, No. 1, pp. 156–182. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(90\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0019-1035(90)90012-X)
25. Ryan, E. V., Hartmann, W. K., Davis, D. R., Impact experiments 3: Catastrophic fragmentation of aggregate targets and relation to asteroids, *Icarus*, 1991, Vol. 94, pp. 283–298. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90228-L](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90228-L)
26. Nakamura, A., Fujiwara, A., Velocity distribution of fragments formed in a simulated collisional disruption, *Icarus*, 1991, Vol. 92 Pp. 132–146. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90040-Z](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90040-Z).
27. Cintala, M. J., Horz, F., Experimental impacts into chondritic targets, part I: Disruption of an L6 chondrite by multiple impacts, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2008, Vol. 43, pp. 771–803. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00684.x>
28. Okamoto, C., Arakawa, M., Experimental study on the collisional disruption of porous gypsum spheres, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2009, Vol. 44, pp. 1947–1954. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.tb02004.x>
29. Flynn, G. J., Durda, D. D., Sandelc, L. E., Kreftc, J. W., Strait, M. M., Dust production from the hypervelocity impact disruption of the Murchison hydrous CM2 meteorite: Implications for the disruption of hydrous asteroids and the production of interplanetary dust, *Planet. Space Sci.*, 2009, Vol. 57, pp. 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.09.005>
30. Michikami, T., Hagermann, A., Kadokawa, T., Yoshida, A., Shimada, A., Hasegawa, S., Tsuchiyama, A., Fragment shapes in impact experiments ranging from cratering to catastrophic disruption, *Icarus*, 2009, Vol. 264, pp. 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.09.038>

31. Blaauw, R. C., Campbell-Brown, M. D., Weryk, R. J., A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar –III. Mass distribution indices of six major meteor showers, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.*, 2011, Vol. 414, pp. 3322–3329. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18633.x>
32. Pokorný, P., Brown, P.G., A reproducible method to determine the meteoroid mass index, *Astron. & Astroph.*, Vol. 592, pp. A150. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628134>
33. Corbelli, E., Palla, F., Zinnecker, H., eds, The Initial Mass Function 50 years later. *Astroph. Space Sci. Library*, 2005, Vol. 327. Dordrecht: Springer. 571 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3407-7>
34. Shustov, B. M., Tutukov, A. V., The initial mass spectra of astronomical objects, *Astron. Rep.*, 2018, Vol. 62. No. 11, pp. 724–732. <https://doi.org/10.1134/S1063772918110070>
35. Grady, M. M., *Catalogue of Meteorites*, Cambridge University Press. 2000. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000came.book.....G/abstract>
36. Folco, L., Peri, F., Pezzotta, F., The meteorite collection of the Civico Planetario and the Museo Civico di Storia Naturale in Milan, Italy, *Meteoritics Planet. Sci.* 2002, Vol. 37 (Supplement), B95–B103. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2002.tb00908.x>
37. Semenenko, V. P., Girich, A. L., Rus'ko, Yu. O., Catalogue of meteorites kept in the national museum of natural history of NAS of Ukraine (for January 1, 2007). *Mineralogical J.*, 2007, Vol. 29, No. 2, pp. 72–82. [https://museumkiev.org/public/katalog/geo/katalog\\_meteor\\_2008.pdf](https://museumkiev.org/public/katalog/geo/katalog_meteor_2008.pdf)
38. List of Meteorite Specimens in the Collection of the National Museum of Victoria, September 1972, National Museum of Victoria, Melbourne. <https://archive.org/details/listmeteoritesp00nati>.
39. Khotinok, R. L., New meteorites of the USSR: Tsarev, Kutais, Bakhardok, *Meteoritika*, 1982, No. 40, pp. 6–9. [in Russian] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982Metik..40....6K/abstract>
40. Zotkin, I. T., Tsvetkov, V. I., The scattering of the Tsarev stony meteorite shower, *Meteoritika*, 1984, No 43, pp. 3–8. [in Russian] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984Metik..43....3Z/abstract>
41. Zotkin, I. T., Medvedev, P. V., Gorbatshevich, F. F., The strength properties of the Tsarev meteorite, *Meteoritika*, 1987, No 46, pp. 86–93. [in Russian] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987Metik..46...86Z/abstract>
42. Vinnik, M. A., Kosnyreva, A. A., Galushkin, Yu. I., Galushkina, T. N., Meteorite expeditions of the personnel of the Museum of Earth Science in 2022, *Life of the Earth*, 2022, Vol. 44, pp. 487–497. [in Russian]. [https://doi.org/10.29003/m3123.0514-7468.2022\\_44\\_4/487-497](https://doi.org/10.29003/m3123.0514-7468.2022_44_4/487-497)
43. Slyuta, E. N., Shape of small Solar system bodies, *Solar Syst. Res.*, 2014, Vol. 48, pp. 217–238. <https://doi.org/10.1134/S0038094614030058>
44. Buhl, S., Baermann, M., The Bassikounou meteorite fall – Descriptive catalog of the recovered masses, 2007. [https://www.meteorite-recon.com/wp-content/uploads/pdf/Buhl\\_Baermann\\_Catalog](https://www.meteorite-recon.com/wp-content/uploads/pdf/Buhl_Baermann_Catalog)
45. Connolly H. C. Jr., Smith C., Benedix G., Folco L., Righter K., Zipfel J., Yamaguchie A., Aoudjehane H. C., The Meteoritical Bulletin, No 92, 2007 September, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2007, Vol. 42, No. 9, pp. 1647–1694. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2007.tb00596.x>
46. Borovička, J., Tóth, J., Igaz, A., Spurny, P., Kalenda, P., Haloda, J., Svoren, J., Kornos, L., Silber, E., Brown, P., Husarik, M., The Košice meteorite fall: Atmospheric trajectory, fragmentation, and orbit, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2013, Vol. 48, pp. 1757–1779. <https://doi.org/10.1111/maps.12078>
47. Toth, J., Svoren, J., Borovička, J., Spurný, P., Igaz, A., Kornoš, L., Vereš, P., Husárik, M., Koza, J., Kučera, A., Zigo, P. Gajdoš, Š., Világi, J., Čapek, D., Křišandová, Z., Tomko, D., Šilha, J., Schunová, E., Bodnárová, M., Búzová, D., Krejčová, T., The Košice meteorite fall: Recovery and strewn field, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2015, Vol. 50, pp. 853–863. <https://doi.org/10.1111/maps.12447>
48. Borovička, J., Spurný, P., Brown, P., Wiegert, P., Kalenda, P., Clark, D., Shrbený, L., The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor, *Nature*, 2013, Vol. 503, pp. 235–237. <https://doi.org/10.1038/nature12671>



49. Popova, O. P., Jenniskens, P., Emel'yanenko, V., Kartashova, A., Biryukov, E., Khaibrakhmanov, S., Shuvalov, V., Rybnov, Y., Dudorov, A., Grokhovsky, V. I., Badyukov, D. D., Yin, Q. Z., Gural, P. S., Albers, J., Granvik, M., Evers, L. G., Kuiper, J., Kharlamov, V., Solovyov, A., Rusakov, Y. S., Korotkiy, S., Serdyuk, I., Korochantsev, A. V., Larionov, M. Yu, Glazachev, D., Mayer, E. M., Gisler, G., Gladkovsky, S. V., Wimpenny, J., Snanborn, M. E., Yamakawa, A., Verosub, K., Rowland, D. J., Roeske, S., Botto, N. W., Friedrich, J. M., Zolensky, M., Le, L., Ross, D., Ziegler, K., Nakamura, T., Ahn, I., Lee, J. I., Zhou, Q., Li, Z.-H., Liu, Y., Tan, G.-Q., Hiroi, T., Sears, D., Weinstein, I. A., Vokhmintsev, A. S., Ishchenko, A. V., Schmitt-Kopplin, P., Hertkorn, N., Nagao, K., Haba, M. K., Komatsu, M., Mikouchi, T., Chelyabinsk Airburst, Damage assessment, meteorite recovery, and characterization, *Science*, 2013, Vol. 342 (6162), pp. 1069–1073. <https://doi.org/10.1126/science.1242642> (Supplement).
50. Kolisnichenko S. V., *Meteorites of Russia*, Sanarka, Chelyabinsk Region. 2019. 304 p. [in Russian].
51. King, E. A. Jr., Schonfeld, E., Richardson, K. A., Eldridge, J. S., Meteorite fall at Pueblito de Allende, Chihuahua, Mexico: preliminary information, *Science*, 1969, Vol. 163(3870), pp. 928–929. <https://doi.org/10.1126/science.163.3870.928>
52. Clarke, R. S. Jr., Jarosewich, E., Mason, B., Nelen, J., Gomez, M., Hyde, J. R., Allende, Mexico, Meteorite Shower, *Smithsonian Contributions to the Earth Sciences*, 1971, Vol. 5, pp. 1–53. <https://doi.org/10.5479/si.00810274.5.1>
53. Lovering, J., Le Maitre, R., Chappell, B., Murchison C2 Carbonaceous Chondrite and its Inorganic Composition, *Nature Physical Science*, 1971, Vol. 230, pp. 18–20. <https://doi.org/10.1038/physci230018a0>
54. Henry, D. A., 'Star Dust Memories'—A Brief History of the Murchison Carbonaceous Chondrite, *Publ. Astronomical Society of Australia*, 2003, Vol. 20, pp. vii–ix. <https://doi.org/10.1071/AS03060>
55. Brown, P., Hildebrand, A. R., Zolensky, M. E., Grady, M., Clayton, R. N., Mayeda, T. K., Tagliaferri, E., Spalding, R., MacRae, N. D., Hoffman, E. L., Mittlefehldt, D. W., Wacker, J. F., Bird, J. A., Campbell, M. D., Carpenter, R., Gingerich, H., Glatiotis, M., Greiner, E., Mazur, M. J., McCausland, P. J. A., Plotkin, H., Rubak-Mazur, T., The fall, recovery, orbit, and composition of the Tagish Lake meteorite: a new type of carbonaceous chondrite, *Science*, 2000, Vol. 290 (5490), pp. 320–325. <https://doi.org/10.1126/science.290.5490.320>
56. Zolensky, M. E., Nakamura, K., Gounelle, M., Mikouchi, T., Kasama, T., Tachikawa, O., Tonui, E., Mineralogy of Tagish Lake: An ungrouped type 2 carbonaceous chondrite, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2002, Vol. 37, No 5, pp.737–761. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2002.tb00852.x>
57. Jenniskens, P., Fries, M. D., Yin, Q.-Z., Zolensky, M., Krot, A. N., Sandford, S., Sears, D., Beauford, R., Ebel, D., Friedrich, J., Nagashima, K., Wimpenny, J., Yamakawa, A., Nishiizumi, K., Hamajima, Y., Caffee, M., Welten, K., Laubenstein, M., Davis, A., Simon, S., Heck, P., Young, E., Kohl, I., Thiemens, M., Nunn, M., Mikouchi, T., Hagiya, K., Ohsumi, K., Cahill, T., Lawton, J., Barnes, D., Steele, A., Rochette, P., Verosub, K., Gattececa, J., Cooper, G., Glavin, D., Burton, A., Dworkin, J., Elsila, J., Pizzarello, S., Oglione, R., Schmitt-Kopplin P., Harir, M., Hertkorn, N., Verchovsky, A., Grady, M., Magao, K., Okazaki, R., Takechi, H., Smith, K., Silber, E., Brown, P., Albers, J., Klotz, D., Hankey, M., Matson, R., Fries, J., Walker, R., Puchtel, I., Lee, C.-T., Erdman, M., Eppich, G., Roeske, S., Gabelica, Z., Lerche, M., Nuevo, M., Girten, B., Worden, S. P. (the Sutter's Mill Meteorite Consortium), Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia, *Science*, 2012, Vol. 338, pp. 1583–1587. <https://doi.org/10.1126/science.1227163> (Supplement).
58. Trigo-Rodríguez, J. M., Borovička, J., Llorca, J., Madiedo, J. M., Zamorano, J., Izquierdo, J., Puerto Lápice eucrite fall: Strewn field, physical description, probable fireball trajectory, and orbit, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2009, Vol. 44, No 2, pp. 175–186. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.tb00726.x>
59. Llorca, J., Casanova, I., Trigo-Rodríguez, J. M., Madiedo, J. M., Roszjar, J., Bischoff, A., Ott, U., Franchi, I. A., Greenwood, R. C., Laubenstein, M., The Puerto Lápice eucrite, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2009, Vol. 44, No 2, pp. 159–174. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.tb00725.x>

60. Jenniskens, P., Shaddad, M. H., Numan, D., Elsir, S., Kudoda, A. M., Zolensky, M. E., Le, L., Robinson, G. A., Friedrich, J. M., Rumble, D., Steele, A., Chesley, S. R., Fitzsimmons, A., Duddy, S., Hsieh, H. H., Ramsay, G., Brown, P. G., Edwards, W. N., Tagliaferri, E., Boslough, M. B., Spalding, R. E., Dantowitz, R., Kozubal, M., Pravec, P., Borovička, J., Charvat, Z., Vaubaillon, J., Kuiper, J., Albers, J., Bishop, J. L., Mancinelli, R. L., Sandford, S. A., Milam, S. N., Nuevo, M., Worden, S. P., The impact and recovery of asteroid 2008 TC3, *Nature*, 2009, Vol. 458, pp. 485–488.  
<https://doi.org/10.1038/nature07920>
61. Shaddad, M. H., Jenniskens, P., Numan, D., Kudoda, A. M., Elsir, S., Riyad, I. F., Ali, A. E., Alameen, M., Alameen, N. M., Eid, O., Osman, A. T., Abubaker, M. I., Yousif, M., Chesley, S. R., Chodas, P. W., Albers, J., Edwards, W. N., Brown, P. G., Kuiper, J., Friedrich, J. M., The recovery of asteroid 2008 TC3, *Meteorit. & Planet. Sci.*, 2010, Vol. 45, pp. 1557–1589. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2010.01116.x>
62. Bischoff, A., Horstmann, M., Pack, A., Laubenstein, M., Haberer, S., Asteroid 2008 TC3 —Almahata Sitta: A spectacular breccia containing many different ureilitic and chondritic lithologies, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2010, Vol. 45, pp. 1638-1656. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2010.01108.x>
63. Bouvier, A., Gattacceca, J., Grossman, J., Metzler, K., The meteoritical bulletin, No 105, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2017, Vol. 52, No 11, p. 2411. <https://doi.org/10.1111/maps.12944>
64. Unsalan, O., Jenniskens, P., Yin, Q.-Z., Kaygisiz, E., Albers, J., Clark, D., Granvik, M., Demirkol, I., Erdogan, I. Y., Bengu, A. S., Ozel, M. E., Terzioglu, Z., Gi N., Brown, P. G., Yalcinkaya, E., Temel, T., Prabhu, D. K., Robertson, D. K., Boslough, M., Ostrowski, D. R., Kimberley, J., Er, S., Rowland, D. J., Bryson, K. L., Altunayar, C., Rangelov, B., Karamanov, A., Tatchev, D., Kocahan, O., Oshtrakh, M., Maksimova, A. A., Karabanalov, M. S., Verosub, K. L., Levin, E., Uysal, I., Hoffmann, V., Hiroi, T., Reddy, V., Ildiz, G. O., Bolukbasi, O., Zolensky, M. E., Hochleitner, R., Kaliwoda, M., Ongen, S., Fausto, R., Nogueira, B. A., Chukin, A. V., Karashanova, D., Semionkin, V. A., Yesiltas, M., Glotch, T. D., Yilmaz, A., Friedrich, J. M., Sanborn, M. E., Huyskens, M., Ziegler, K., Williams, C. D., Schönbächler, M., Bauer, K., Meier, M., Maden, C., Busemann, H., Welten, K. C., Caffee, M. W., Laubenstein, M., Zhou, Q., Li, Q., Li, X., Liu, Y., Tang, G., Sears, D., McLain, H. L., Dworkin, J. P., Elsil, J., Glavin, D. P., Schmitt-Kopplin, P., Ruf, A., Le Corre, L., Schmedemann, N. (The Saricicek Meteorite Consortium), The Saricicek howardite fall in Turkey: Source crater of HED meteorites on Vesta and impact risk of Vestoids, *Meteoritics Planet. Sci.*, 2019, Vol. 54, No. 5, pp. 953–1008. <https://doi.org/10.1111/maps.13258>
65. Sikhote-Alin Iron Meteorite Shower. Eds.: Fesenkov V. G., Krinov E. L. Vol. I, 1959, Vol. II. 1963. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow. [in Russian].
66. Krinov, E. L., Tsvetkov V. I., 1979. The Sikhote-Alin meteorite shower as a classical meteorite fall. *Meteoritika*, 1979, No 38, pp. 19–26 [in Russian].  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979Metik..38...19K/abstract>
67. Krinov, E. L., *Iron Shower*, Nauka, Moscow. 1981. [in Russian].  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1981MoIzN....S....K/abstract>
68. Tsvetkov V. I., Sikhote-Alin meteorite shower: fragmentation, scattering, trajectory, orbit, *Meteoritika*, 1987, No 46, pp. 3–10. [in Russian] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987Metik..46....3T/abstract>
69. Flynn, G. J., Consolmagno, G. J., Brown, P., Macke, R. J., Physical properties of the stone meteorites: Implications for the properties of their parent bodies, *Geochemistry*, 2018, Vol. 78, No 3, pp. 269–298.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.04.002>

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2024 г.