

УДК 550. 388

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТЕОРОИДОВ МЕТРОВОГО РАЗМЕРА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

**Л. Ф. Черногор, Н. Б. Шевелев**

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, факультет радиофизики, биомедицинской электроники и компьютерных систем, пл. Свободы 4, Харьков, 61077, Украина*

Поступила в редакцию 23 апреля 2017 г.

Рассмотрены статистические параметры 722 болидов, исходные данные о которых взяты из базы данных НАСА. Построены кумулятивные зависимости числа событий от начальной кинетической энергии, энергии свечения и распределение числа событий по массам. Установлены соответствующие эмпирические соотношения. Объяснено расхождение наблюдательных данных и аппроксимации. Показаны закономерности, подтверждающие статистику для большего числа вторжений космических тел в атмосферу Земли.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** падение космических тел, кумулятивная зависимость, аппроксимации статистических зависимостей

Наведено статистичні параметри 722 болідів, вихідні дані про які взяті з бази даних НАСА. Побудовані кумулятивні залежності числа випадків від початкової кінетичної енергії, енергії свчення та розподіл числа подій за масами. Встановлені відповідні емпіричні співвідношення. Роз'яснюється відмінність даних спостережень і апроксимації. Показано закономірності, що підтверджують статистику для більшого числа входжень космічних тіл в атмосферу Землі.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** падіння космічних тіл, кумулятивна залежність, апроксимації статистичних залежностей

This paper deals with 722 celestial body parameter statistics retrieved from the NASA database. The cumulative distributions of the yearly number of events for the initial kinetic energy, the radiated energy, and their mass are plotted. The corresponding empirical relations are fitted. The discrepancy between the observational data and their approximation is explained. The laws confirming the statistics for the larger number of celestial bodies intruding into Earth's atmosphere are determined.

**KEY WORDS:** celestial body passage, cumulative distribution, statistical dependence approximation

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование падений достаточно крупных космических тел, именуемых миниастероидами, на Землю является актуальной задачей, представляющей значительный научный и практический интерес.

Научный интерес заключается в изучении большого количества физических эффектов и процессов, сопровождающих вторжение космических тел в атмосферу Земли. Как известно, при этом возмущаются все подсистемы, входящие в систему Земля (внутренние оболочки) – атмосфера – ионосфера – магнитосфера [1]. Следовательно, при этом появляется возможность выявить недостаточно изученные прямые и обратные, положительные и отрицательные связи между подсистемами.

Практический интерес заключается в оценке частоты падений космических тел и возможных последствий таких событий. Важнейшим является своевременное предсказание столкновений метеороидов с нашей планетой. К сожалению, в настоящее время эта проблема находится в состоянии, далеком от ее решения. Так, падение Челябинского метеороида 15 февраля 2013 г. для жителей Челябинской области оказалось полной неожиданностью, в результате чего пострадало более 1600 человек, частично были разрушены постройки. Нанесенный ущерб превысил 30 млн долл. США. Начальная кинетическая энергия Челябинского метеороида составляла около  $1.88 \cdot 10^{15}$  Дж, а энергия свечения –  $3.75 \cdot 10^{14}$  Дж, начальная масса – около 11 кт, размер – около 18 м, а угол наклона траектории – около  $18^\circ$  [2, 3]. Если бы этот угол был больше  $60^\circ$ , последствия падения космического тела, как показало наше численное моделирование, были бы куда серьезнее.

Целью данной работы является построение кумулятивных зависимостей числа событий от начальной кинетической энергии и энергии свечения метеороидов, а также от массы космических тел.

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для построения указанных зависимостей использовалась база спутниковых данных НАСА [4], где информация о метеороидах сведена в таблицу. Представлены такие параметры болидов: место падения, высота области максимального свечения (км), начальная скорость и ее компоненты (м/с), энергия свечения  $E_r$  (Дж) и начальная кинетическая энергия  $E_k$  (кт ТНТ). При помощи инфракрасных датчиков спутниковая система позволяет обнаруживать свечение миниастероидов с энергией свечения не

менее  $2 \cdot 10^{10}$  Дж и удельной мощностью источника излучения не менее  $10^9$  Вт/ср. Этим параметрам свечения соответствуют минимальные размеры космических тел около 0.3–1 м в зависимости от их состава и объемной плотности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В статье [5] автор проанализировал 300 событий вторжения метеороидов в атмосферу Земли, которые имели место с февраля 1994 г. по сентябрь 2002 г., и получил кумулятивные зависимости числа столкновений подобных тел с Землей за 1 год. Данные, описанные в этой работе, не ограничивались только лишь спутниковыми регистрациями, наряду с ними автор привел и данные акустических и инфразвуковых наблюдений. Кроме того, в работе [5] произведена аппроксимация полученной зависимости степенным законом и вычислены характерные коэффициенты.

Авторы данной работы предприняли попытку построить аналогичную зависимость за такой же период и аппроксимировать ее похожим законом. Результаты аппроксимации приведены на рис. 1. Видно, что для 211 событий вторжения тел в атмосферу Земли  $n \sim E_k^{-0.8844}$  (Здесь и далее в работе  $n$  – кумулятивное число событий, т.е. общее число событий, отнесенное к интервалу времени  $\tau$ ).

Из рис. 2 видно, что  $n \sim E_k^{-0.8551}$ , т.е. эта зависимость лишь незначительно отличается от зависимости, приведенной на рис. 1, где  $n \sim E_k^{-0.8844}$ . Из этого рисунка можно также сделать вывод, что за 29.5 лет – с 1988 по 2017 гг. – из 722 регистраций болидов было лишь одно событие, у которого  $\lg E_k \approx 2.64$  или  $E_k \approx 440$  кт ТНТ – пролет и взрыв Челябинского космического тела [2, 3].

Распределение числа событий по энергии свечения приведено на рис. 3. Очевидно, что меньшим значениям энергии свечения соответствует большее число событий падений космических тел.

Рис. 4 и рис. 5 иллюстрируют изменение числа событий по массам. Масса болидов была определена по данным о  $E_k$  и  $v$ , где  $E_k$  – начальная кинетическая энергия тел,  $v$  – их скорость при вхождении в плотные слои атмосферы Земли. Поскольку последняя была определена лишь в 158 случаях (что составляет приблизительно 22% от общего числа событий), большую часть регистраций пришлось исключить из рассмотрения. Следует также отметить, что временной интервал, рассматриваемый авторами работы, для этих зависимостей составляет 19.75 лет, а не 29.5 лет, как это было на предыдущих рисунках. Связано это прежде всего с тем, что скорость впервые была измерена 4 января 1998 г., ранее измерений скорости не было. Видно, что  $n \sim m^{-0.6032}$ .

Для сравнения, на рис. 6 показано распределение числа событий по массам, полученное в работе [16] по 56 событиям падений космических тел. Они были зарегистрированы сетью наблюдательных камер MORP, расположенных в западной Канаде [6]. Промежуток времени регистрации составлял 11 лет – с 1974 по 1985 г. В указанной работе были проанализированы массы фрагментов (в г) метеороидов и построены зависимости в логарифмическом масштабе. Для удобства сравнения массы фрагментов метеороидов, приведенные в работе [6], были переведены в тонны. Результаты распределения числа событий по массам, опираясь на исходные данные [6], приведены на рис. 5.

Из рис. 4, 5 видно, что масса Челябинского космического тела более чем на порядок отличается от массы остальных тел, поэтому авторами работы была предпринята попытка анализа всех известных масс космических тел без учета Челябинского метеороида. Результаты приведены на рис. 7, 8. Из рис. 7 следует, что  $n \sim m^{-0.6355}$ .

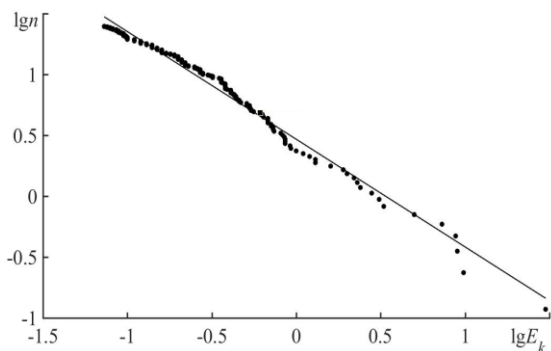


Рис. 1. Распределение числа событий по начальной кинетической энергии (кт ТНТ) метеороидов по данным [5] в интервале времени с февраля 1994 по сентябрь 2002 г. Интервал времени  $\tau \approx 8.5$  лет.

Аппроксимация степенным законом:

$$\lg n = -0.8844 \lg E_k + 0.4676, \quad R \approx 0.9922, \\ \sigma \approx 0.05177, \quad N \approx 211.$$

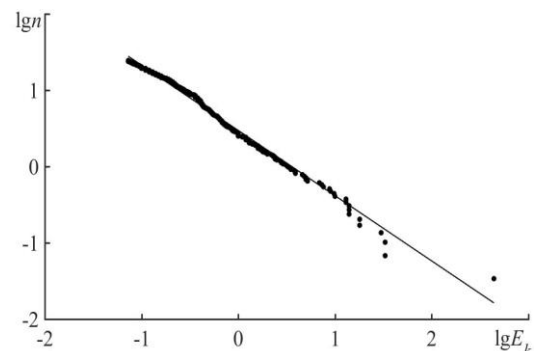


Рис. 2. Зависимость числа событий от начальной кинетической энергии (в кт ТНТ) метеороидов. Интервал времени  $\tau \approx 29.5$  лет, аппроксимация степенным законом:

$$\lg n = -0.8551 \lg E_k + 0.4726, \quad R \approx 0.9946, \\ \sigma \approx 0.04442, \quad N \approx 722.$$

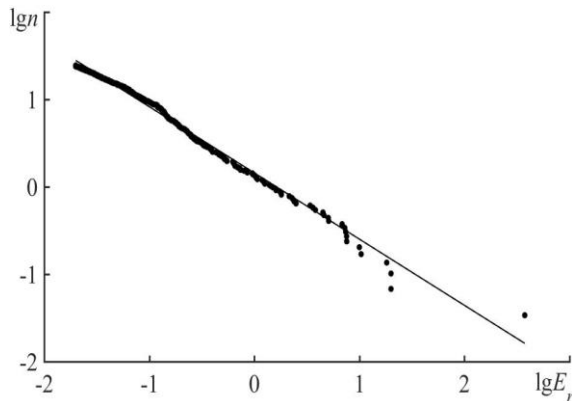


Рис. 3. Зависимость числа событий от энергии свечения болидов (ТДж). Интервал времени  $\tau \approx 29.5$  лет, аппроксимация степенным законом:  $\lg n = -0.7578 \lg E_r + 0.1588$ ,  $R \approx 0.9947$ ,  $\sigma \approx 0.04368$ ,  $N \approx 722$ .

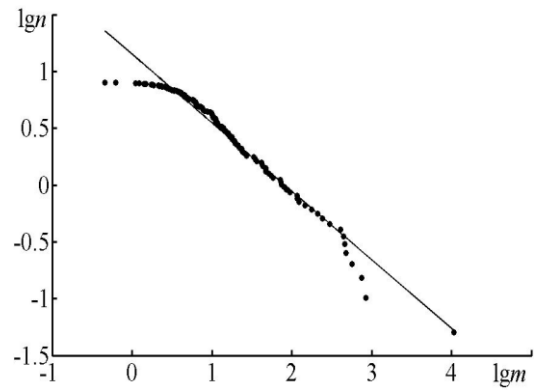


Рис. 4. Зависимость числа событий от начальной массы космических тел (в т). Интервал времени  $\tau \approx 19.75$  лет, аппроксимация степенным законом:  $\lg n = -0.6032 \lg m + 1.1497$ ,  $R \approx 0.9808$ ,  $\sigma \approx 0.08039$ ,  $N \approx 158$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на достаточно высокий коэффициент достоверности аппроксимации  $R \approx 0.9808$ , наблюдается заметное отклонение экспериментальных данных от закона аппроксимации в интервалах  $\lg m \in [-0.3; +0.3]$  и  $\lg m \in [2.7; 3.0]$  (рис. 4). Первое расхождение связано с высокими скоростями (от 29 вплоть до 49 км/с) и относительно малой массой метеороидов (0.11 – 0.18 кт ТНТ). Второе отклонение, вероятнее всего, связано с тем, что масса Челябинского метеороида составила около 11 кт, а  $\lg m \approx 4.03$ , в силу чего в результате построения степенной зависимости пренебрегалось массой меньших метеороидов, у которых  $\lg m \in [2.7; 3.0]$ , и прямая прошла через точку  $[0; 4.03]$ . Как и в предыдущих случаях, здесь наблюдается обратная пропорциональность, т.е. с ростом массы уменьшается число событий.

Из рис. 5, где показано распределение числа событий по массам, видно, что аппроксимация полиномом второй степени несколько улучшает коэффициент достоверности и уменьшает погрешность. Это видно из уменьшения среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  примерно на 20%.

Коэффициенты при  $\lg m$ , а также свободные члены в нашем случае ( $-0.6032$ ) и в [16] ( $-0.6803$ ) отличаются незначительно, что свидетельствует о тесной взаимосвязи двух параметров (см. рис. 4 и 5). Подчеркнем, что в работе [6] был проведен статистический анализ именно по метеоритам, т.е. телам, упавшим на поверхность Земли, а в [4] база данных составлена по болидам, свечение которых в момент их вторжения в плотные слои атмосферы регистрировали инфракрасные датчики. Кроме того, база данных НАСА [4] содержит большее число событий ( $N \approx 722$ ), поэтому больший объем статистики по полетам болидов, несомненно, дает лучший результат. Тем не менее, угол наклона, характеризующий

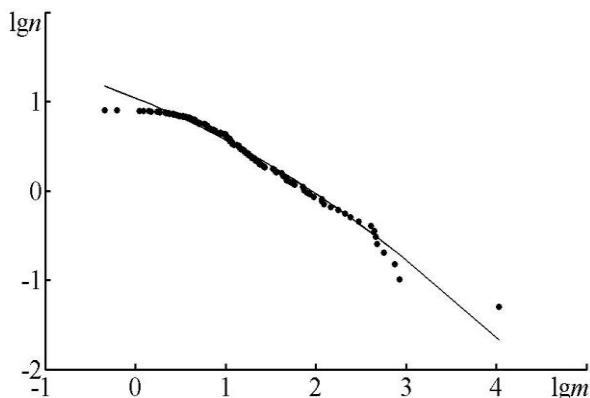


Рис. 5. Зависимость числа событий от начальной массы космических тел (в т). Интервал времени  $\tau \approx 19.75$  лет, аппроксимация полиномом 2 степени:  $\lg n = -0.0667 \lg^2 m - 0.4049 \lg m + 1.0412$ ,  $R \approx 0.9882$ ,  $\sigma \approx 0.06327$ ,  $N \approx 158$ .

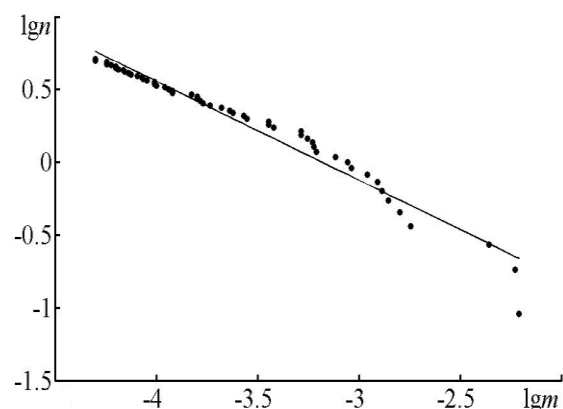


Рис. 6. Зависимость числа событий от начальной массы космических тел (в т) (по данным из работы [6]). Интервал времени  $\tau \approx 11$  лет, аппроксимация степенным законом:  $\lg n = -0.6803 \lg m - 2.1641$ ,  $R \approx 0.9795$ ,  $\sigma \approx 0.07919$ ,  $N \approx 56$ .

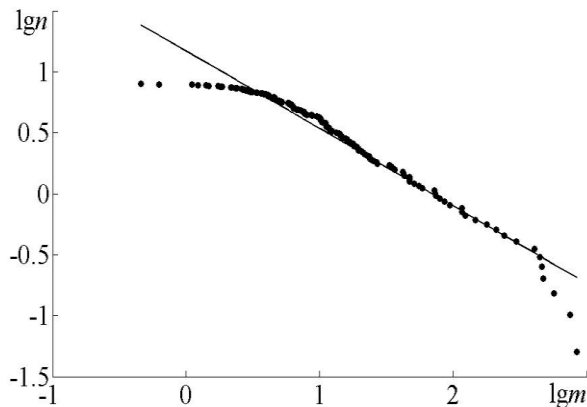


Рис. 7. Зависимость числа событий от начальной массы космических тел (в т) без учета Челябинского космического тела.

Аппроксимация степенным законом:  
 $\lg n = -0.6355 \lg m + 1.1712$ ,  $R \approx 0.9716$ ,  
 $\sigma \approx 0.09746$ ,  $N \approx 157$ , интервал времени  
 $\tau \approx 19.75$  лет

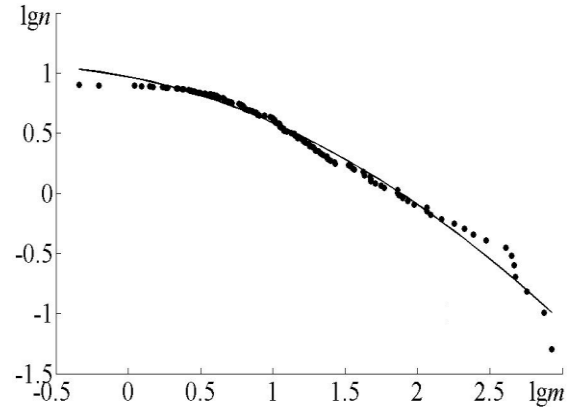


Рис. 8. Зависимость числа событий от начальной массы космических тел (в т) без учета Челябинского космического тела.

Аппроксимация полиномом 2 степени:  
 $\lg n = -0.1489 \lg^2 m - 0.2341 \lg m + 0.9687$ ,  
 $R \approx 0.9921$ ,  $\sigma \approx 0.05178$ ,  $N \approx 157$ , интервал  
 времени  $\tau \approx 19.75$  лет.

коэффициентом при  $\lg m$ , в обоих случаях достаточно близок. Для метеоритов свободный член в аппроксимации составляет около  $(-2.16)$  (см. рис. 6), а для метеороидов, проанализированных нами, он равняется  $(+1.17)$ , т.е. разница между ними составляет 3.31. Это означает, что в среднем число выявленных метеоритов на площади в  $10^6 \text{ км}^2$  меньше числа метеороидов, регистрируемых спутниковой системой, примерно в 2040 раз. При площади Земного шара  $5 \cdot 10^8 \text{ км}^2$  и приведение к площади  $10^6 \text{ км}^2$  указанное число уменьшится в 500 раз до 4.08. При этом число первых тел составляет около 24% от числа вторых тел.

Из рис. 7 видно, что коэффициент достоверности приблизительно такой же, как и в случае анализа с включением Челябинского космического тела. Поскольку из графика видно явно выраженную параболическую зависимость, целесообразным считалось аппроксимировать ее также полиномом второй степени. Результаты представлены на рис. 8. Видно, что такая аппроксимация улучшает  $R$ , однако наглядного физического смысла она не имеет.

Полученное распределение числа событий по кинетическим энергиям хорошо согласуется с результатами, полученными автором работы [5]. В нашем случае коэффициент наклона при  $\lg E_k$  составил  $0.88 \pm 0.03$ , в то время как в [5] он равен  $0.90 \pm 0.03$ . В то же время свободный коэффициент отличается не более чем на 20%. Также по большей выборке статистических данных ( $N \approx 158$ ) уточнены соотношения между числом падений космических тел и их массами, ранее полученные автором работы [6]. Показано, что коэффициент, отвечающий за угол наклона, отличается не более, чем на 12%.

## ВЫВОДЫ

На большем статистическом материале подтверждена достаточно сильная статистическая связь между числом событий и начальной кинетической энергией, числом событий и энергиями свечения, числом событий и начальной массой космического тела.

На большем статистическом материале уточнены эмпирические зависимости числа событий от кинетической энергии, энергии свечения и массы метеороидов с размером примерно 1 – 10 м.

Оценена доля числа метеоритов в числе метеороидов, фиксируемых спутников системой ( $\sim 24\%$ ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernogor L. F. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System / L. F. Chernogor, V. T. Rozumenko // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2008. – V. 13, № 2. – P. 120 – 137.
2. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization / O. P. Popova, P. Jenniskens, V. Emelyanenko [et. al.] // Science. – 2013. – V. 342. – P. 1069 – 1073.
3. Chernogor L. F. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage / L. F. Chernogor, V. T. Rozumenko // Problems of Atomic Science and Technology. – 2013. – Vol. 86, No 4. – P. 136 – 139.
4. <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>
5. Brown P. G. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth / P. Brown, R. E. Spalding, D. O. ReVelle, E. Tagliaferri // Nature. – 2002. – V. 420. – P. 294–296.
6. Halliday I., Blackwell A., Griffin A. The flux of meteorites on the Earth's surface / I. Halliday, A. Blackwell, A. Griffin // Meteoritics & Planetary Science. – 1989. – T. 24. – №. 3. – P. 173-178.