

ГЛОБАЛЬНАЯ СТАТИСТИКА БОЛИДОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Л.Ф. Черногор, Н.Б. Шевелев

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

GLOBAL STATISTICS OF METER-SIZE METEOROIDS

L.F. Chernogor, N.B. Shevelev

V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Аннотация. Изложены результаты анализа распределений числа падений метеороидов от их энергии свечения, скорости, высоты области максимального свечения и географического места расположения, а также корреляционных полей высота области максимального свечения – логарифм энергии свечения космического тела и логарифм квадрата начальной скорости – логарифм энергии свечения космического тела. В качестве исходной использовалась спутниковая база данных NASA о свечении тормозящихся в атмосфере Земли 693 метеороидов.

Ключевые слова: метеороиды метрового размера, распределение числа падений, средние параметры, аппроксимации.

Abstract. The analysis of the distribution of the number of meteoroid (mini asteroid) falls as a function of their energy, velocity, the altitude of maximum glow, and geographic coordinates, as well as the correlation diagrams for (1) the altitude of maximum glow and the logarithm of celestial body glow and (2) the logarithm of square of the initial speed squared and the logarithm of the celestial body glow are presented. As a source, the NASA satellite database on the glow of 693 mini asteroids, which were decelerated in the terrestrial atmosphere, has been used.

Keywords: meter-size meteoroids. the distribution of the number of meteoroid, the mean parameters, approximations.

Введение

Исследование падений достаточно крупных космических тел (миниастероидов) на Землю является актуальной задачей, представляющей значительный научный и практический интерес. Научный интерес заключается в изучении большого количества физических (и не только физических) эффектов и процессов, сопровождающих вторжение космических тел в атмосферу Земли (см., например, [Стулов и др., 1995; Катастрофические..., 2005; Астероидно-кометная..., 2010; Черногор, 2012; Черногор, Шевелев, 2017]). Практический интерес заключается в оценке частоты падений космических тел и возможных последствий таких событий.

Целью настоящей работы является получение и анализ распределения числа падений крупных метеороидов (миниастероидов) по их энергиям свечения, начальной скорости, высоте области максимального свечения и географическому месту расположения.

Для статистического анализа использовалась база наблюдательных данных НАСА [<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>]. В базе данных за 1994–2016 гг. имеется 693 случая регистрации ярких болидов. Энергия E_T при этом изменялась от $2 \cdot 10^{10}$ Дж (всего 18 случаев) до $3.75 \cdot 10^{14}$ Дж.

Основные распределения

Зависимость числа событий от энергии свечения (рис. 1). Из рис. 1, а, з видно, что зависимость логарифма числа событий от логарифма энергии свечения космических тел в первом приближении может быть аппроксимировано прямой линией. Зависимость $\lg n$ от $\lg E_T$ также можно аппроксимировать полиномом третьей степени (рис. 1, б) или нормальным законом (рис. 1, в).

Зависимость числа событий от составляющих скорости. Спутниковая система измеряла три проекции начальной скорости космического тела (v_x , v_y и v_z) в 145 случаях. При этом использовалась декартова геоцентрическая система координат. Зависимость числа случаев от проекций скорости и модуля скорости показана на рис. 2. Из рис. 2, а видно, что значения v_x обычно изменялись примерно от -20 до $+20$ км/с, а среднее значение $\bar{v}_x \approx 6.9$ км/с, $\sigma \approx 6.0$ км/с. Лишь в нескольких случаях значения v_x были близки к -30 км/с. Примерно в таких же пределах изменялись и значения v_y и v_z (см. рис. 2, б, в). При этом $\bar{v}_y \approx 9$ км/с, $\sigma \approx 10.1$ км/с, а $\bar{v}_z \approx 12$ км/с, $\sigma \approx 10.0$ км/с. В двух случаях значения v_y достигали примерно -40 км/с. Зависимость числа событий от модуля скорости v показана на рис. 2, г. Из рисунка видно, что значения v чаще всего изменялись в пределах $12-20$ км/с, но в двух случаях достигали 44.8 и 49.0 км/с.

Зависимость числа событий от высоты области максимального свечения. Высота области максимального свечения болида z_T близка к высоте почти полного разрушения космического тела и его наиболее интенсивного торможения. Зависимость n от z_T показана на рис. 3. Видно, что высота области максимального свечения изменялась примерно от 15.2 до 74 км, но чаще всего – от 28 до 40 км. Для последнего диапазона высот общее число случаев составило 150 или 52% . Нормальный закон заметно занижает значения n при $z_T > 48$ км. Скорее всего, это связано с отличием в структуре разрушающихся космических тел. При $z_T < 48$ км тела, по-видимому, были каменными, а при $z_T > 48-50$ км – ледяными. Прочность последних существенно меньше прочности каменных тел, а высота их разрушения и свечения – заметно больше.

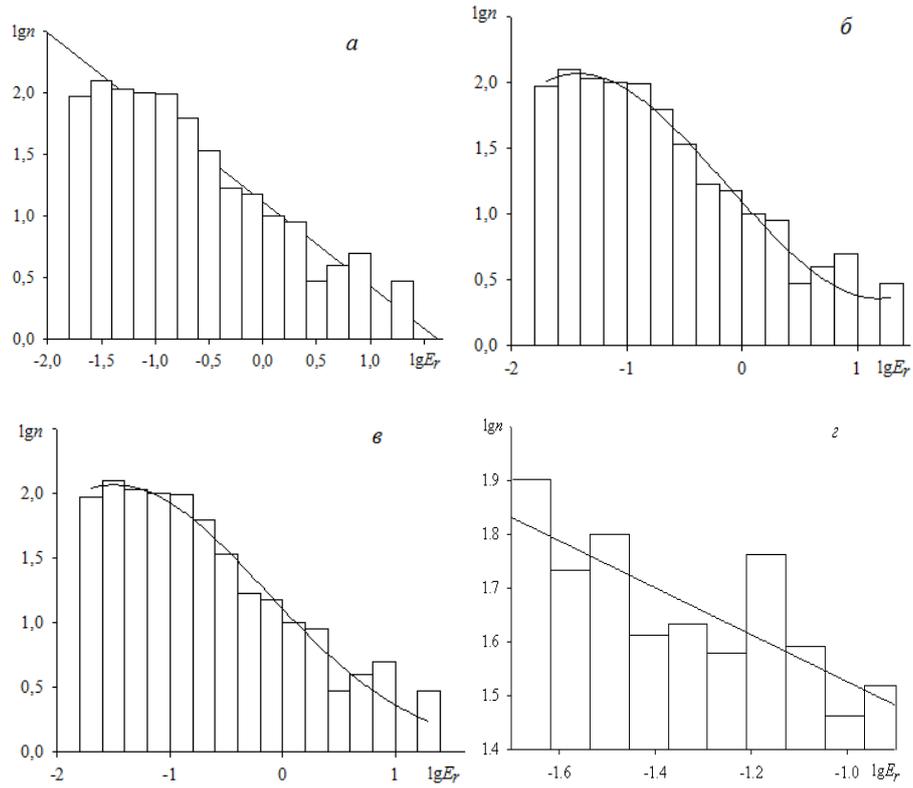


Рис. 1. Распределение логарифма числа случаев по логарифму энергии излучения (в ТДж) космического тела (общее число случаев $N=693$): а: $\lg n = -0.68752 \lg E_r + 1.1153$, $R \approx 0.9588$, $\sigma \approx 0.2007$; б: $\lg n = 0.19441 \lg^3 E_r + 0.07201 \lg^2 E_r - 0.97811 \lg E_r + 1.0939$, $R \approx 0.9763$, $\sigma \approx 0.1649$; в: $\lg n = 2.0684 \exp(-0.5((\lg E_r + 1.4972)/1.3417)^2)$, $R \approx 0.9747$, $\sigma \approx 0.1639$; г: $\lg n = -0.43681 \lg E_r + 1.0888$, $R \approx 0.8083$, $\sigma \approx 0.0504$.

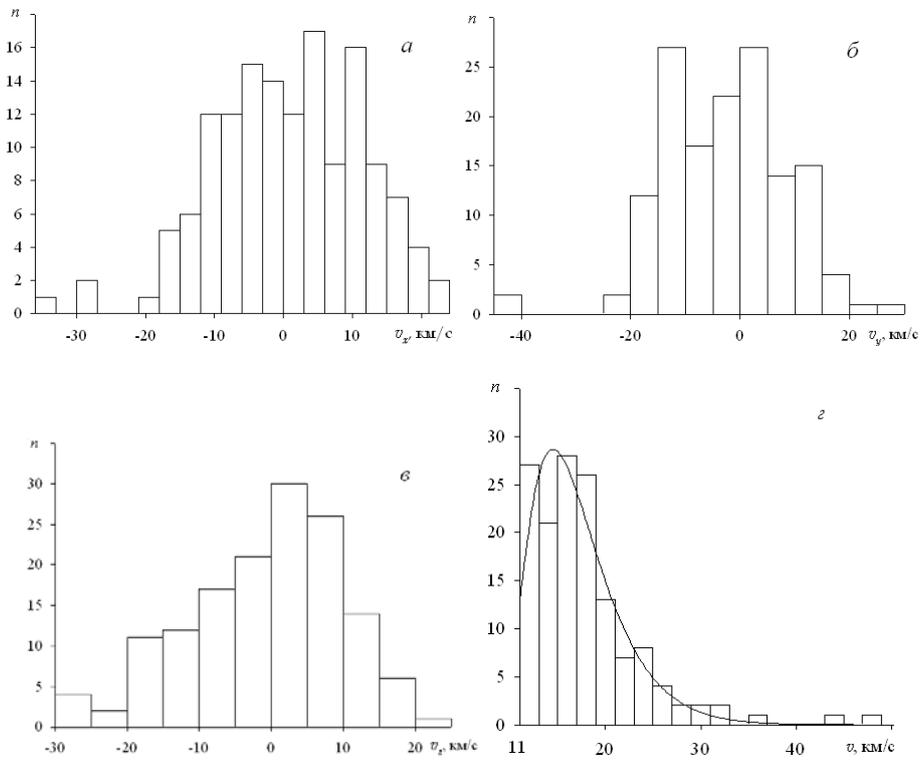


Рис. 2. Распределение числа случаев по компонентам скорости и модулю скорости космического тела ($N=145$): а — по v_x ; б — по v_y ; в — по v_z ; г — по модулю скорости (сплошная линия — аппроксимация законом $n(v) = a(v-v_0)^2 e^{-b(v-v_0)}$, где $a \approx 7.5073$, $b \approx 0.3766$, $v_0 \approx 9.193$ км/с, $v \geq 11.2$ км/с, $R \approx 0.9588$, $\sigma \approx 3.0169$).

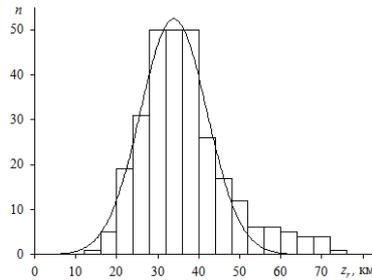


Рис. 3. Распределение числа случаев по высоте области максимального свечения космического тела ($N=288$) (сплошная линия — аппроксимация законом: $n=52.4410\exp(-0.5((z_r-33.8964)/8.1143)^2)$). Достоверность аппроксимации: $R\approx 0.9796$, $\sigma\approx 3.9168$.

Зависимость высоты области максимального свечения от энергии свечения. Корреляционное поле высота области максимального свечения – энергия свечения изображено на рис. 4. Из этого рисунка можно видеть, что корреляция между z_r и E_r несколько больше в интервале значений $\lg E_r$ от -1.7 до -0.6 и значений z_r от 26 до 42 км. Наибольшее число событий регистрировалось в диапазоне высот 26–42 км, им соответствовала энергия свечения примерно от 30 до 500 ГДж.

Зависимость квадрата начальной скорости от энергии свечения. Квадрат начальной скорости v^2 космического тела пропорционален его начальной кинетической энергии. Корреляционное поле квадрат скорости – энергия свечения приведено на рис. 5.

Выводы

1. С использованием спутниковой базы данных NASA о свечении тормозящихся в атмосфере Земли 693 миниастероидов, получены основные статистические характеристики их параметров.

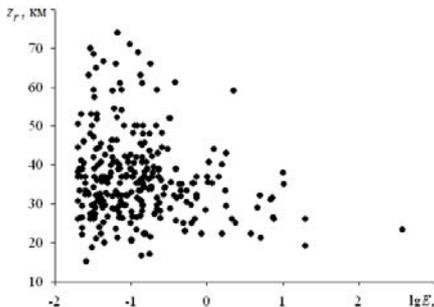


Рис. 4. Корреляционное поле высота области максимального свечения (в км) — логарифм энергии свечения космического тела (в ТДж) ($N=288$)

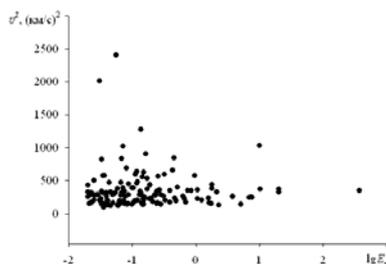


Рис. 5. Корреляционное поле квадрат начальной скорости (в км/с) — логарифм энергии свечения космического тела (в ТДж) ($N=145$)

2. Закон распределения числа падений космических тел метрового размера по долготе близок к равномерному. Распределение числа падений по широте убывает при увеличении широты, что обусловлено геометрическими, а не астрономическими причинами.

3. Число космических тел, вторгающихся в атмосферу Земли в диапазоне энергий свечения 20–150 ГДж, остается практически неизменным. Доля таких тел близка к 72 %. При увеличении энергии от 125 до 3000 ГДж предпочтителен степенной закон распределения.

4. Большинство (70.13 %) космических тел имело скорость примерно от 12.5 до 20 км/с. Значение скорости от 45 до 49 км/с наблюдалось лишь в двух случаях.

5. Зависимость числа космических тел от высоты области их максимального свечения хорошо аппроксимируется нормальным законом в диапазоне высот 20–48 км. Заметное отклонение от закона на высотах менее 20 и более 48 км объясняется сильным отличием прочности тел от типичной прочности, свойственной каменным космическим телам.

6. Корреляционное поле высота области максимального свечения – логарифм энергии свечения свидетельствует о некотором увеличении связи между этими параметрами в диапазоне высот 26–42 км и интервале значения $\lg E_r \approx (-1.7-0.6)$.

7. Наблюдается достаточно высокая статистическая связь между квадратом начальной скорости космического тела и логарифмом энергии свечения.

Список литературы

- Стулов С.П., Мирский В.Н., Вислый А.Н. Аэродинамика болидов. М.: Наука. Физматлит. 1995. 240 с.
- Катастрофические воздействия космических тел./ Под ред. В.В. Адушкина, И.В. Немчинова. М.: ИКЦ «Академкнига». 2005. 310 с.
- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: Физматлит. 2010. 384 с.
- Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. Харьков.: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2012. 556 с.
- Черногор Л.Ф., Шевелев Н.Б. Глобальная статистика болидов в атмосфере Земли // Радиопизика и радиоастрономия. 2017. Т. 22, № 2. С. 132–140.