

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.02.138>УДК 551.558, 551.596,
534.221

Л. Ф. ЧЕРНОГОР, Н. Б. ШЕВЕЛЕВ

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,

PACS numbers: 93., 96.30.Ys пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

ГЛОБАЛЬНАЯ СТАТИСТИКА БОЛИДОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Предмет и цель работы: Получение и анализ распределений числа падений метеороидов (миниастероидов) по их энергиям свечения, скорости, высоте области максимального свечения и географическому месту расположения.

Методы и методология: С использованием спутниковой базы данных о свечении тормозившихся в атмосфере Земли 693 миниастероидов получены основные статистические характеристики их параметров.

Результаты: Подтверждено, что число падений миниастероидов быстро убывает при увеличении их энергии свечения. Средняя скорость космических тел была около 17.9 км/с. Высота максимального свечения чаще всего составляла $28 \div 40$ км. Закон распределения числа вторгающихся в атмосферу Земли космических тел по долготе и широте (после исключения широтной зависимости), обусловленный геометрией, близок к равномерному.

Заключение: С использованием достаточно большого массива данных наблюдений оценены основные статистические характеристики метеороидов (миниастероидов).

Ключевые слова: болиды, астероиды метрового размера, скорость миниастероидов, высота области максимального свечения, статистические распределения

1. 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, [1–4]). Как известно, при этом возмущаются все подсистемы, входящие в систему Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (см., например, [4–7]). Следовательно, появляется возможность выявить недостаточно изученные прямые и обратные, положительные и отрицательные связи между подсистемами. Немалую роль играет также количество притока космического вещества на Землю, приносимого миниастероидами.

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 долларов США. Начальная кинетическая энергия Челябинского метеороида составляла около $1.44 \cdot 10^{14}$ Дж, а энергия свечения – $3.75 \cdot 10^{14}$ Дж, начальная масса – около 11 кг, а размер – около 18 м [8–12].

Оказывается, ощутимый ущерб землям могут наносить и менее крупные космические тела. Например, взрыв Витимского космического тела на высоте около 30 км над сибирской тайгой 24 сентября 2004 г. привел к частичному повреждению леса на площади около 300 км² [12]. Если бы подобное событие произошло над городской местностью, травмирования и даже смертей его жителям вряд ли удалось бы избежать. А ведь начальная кинетическая энергия миниастероида была всего лишь около 10^{13} Дж, энергия свечения – около 10^{12} Дж, начальная масса – около 50 т и размер – около 3 м. Более того, при определенных условиях возможно достижение поверхности Земли космическими телами размером $d \geq 2$ м (см., например, [13]). При этом возможны образование кратера диаметром $(5 \div 10)d$ и глубиной около $2d$, а также частичные разрушения в радиусе до 10 км и более.

Большой интерес представляют также физико-химический и геохимический анализы найденных метеоритов. Они позволяют не только уточнить процессы взаимодействия космического тела

с атмосферой Земли, но и пролить свет на процессы, относящиеся к моментам образования вещества в Солнечной системе.

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.

2. Общие сведения

Для статистического анализа использовалась база наблюдательных данных НАСА [<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>]. Она получена при помощи глобальной спутниковой системы контроля космического пространства, разработанной в США [14]. При помощи инфракрасных датчиков система позволяет обнаруживать свечение миниастероидов с энергией свечения E_r 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 $0.3 \div 1$ м в зависимости от их состава и объемной плотности.

В базе данных за 1994–2016 гг. имеется 693 случая регистрации ярких болидов. Энергия E_r в этих регистрациях изменяется от $2 \cdot 10^{10}$ Дж (всего 18 случаев) до $3.75 \cdot 10^{14}$ Дж (1 случай – вторжение Челябинского космического тела).

Как оказалось, плотность распределения падающих космических тел существенно зависит от географических координат (рис. 1). Из рис. 1 видно, что наибольшая плотность имеет место вблизи географического экватора. По мере удаления от экватора плотность заметным образом убывает. Долготное распределение близко к равномерному.

В интервале времени, равном 23 годам, наблюдалось вторжение в атмосферу Земли не менее 693 космических тел. (Некоторые обнаруживаемые с помощью спутников метеороиды по заявлению НАСА в базе данных отсутствуют.) Среднее ежегодное число событий при такой статистике близко к 30, реально оно было, по-видимому, несколько больше. Если исключить широтную зависимость, то оказывается, что плотность распределения падающих тел в среднем будет неизменной – около 0.06 год^{-1} на площади 1 млн км^2 , т. е.

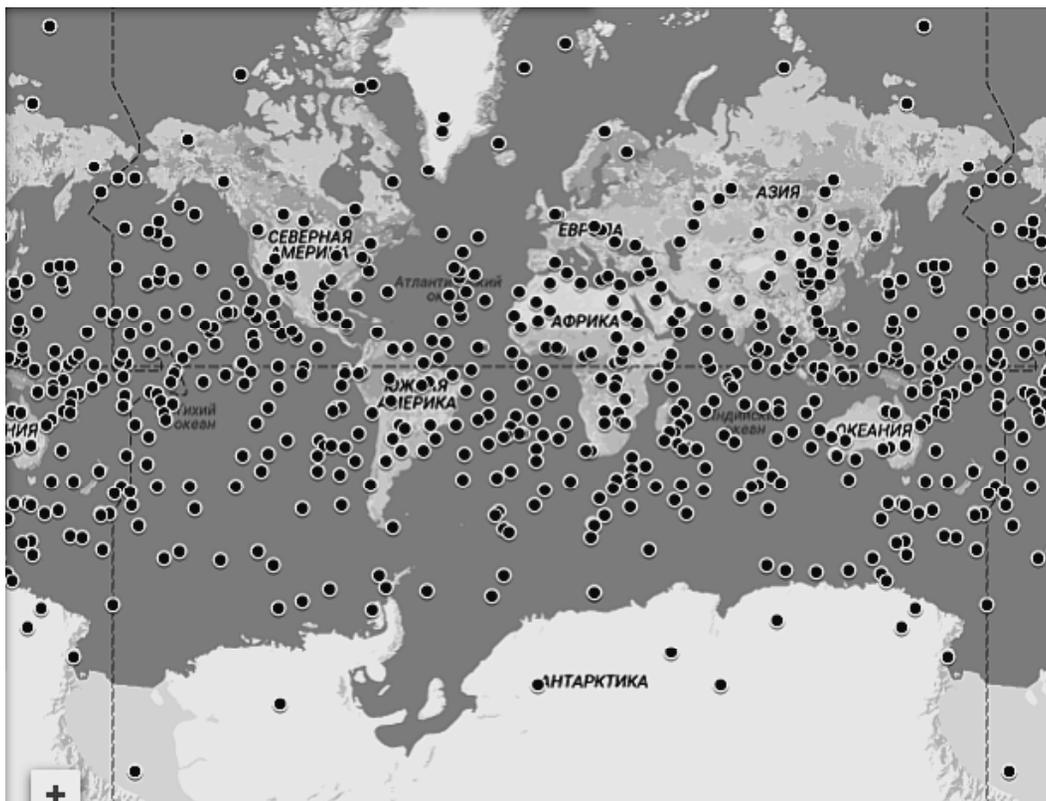


Рис. 1. Распределение мест падений космических тел метрового размера по земному шару

на площади, близкой к площади Украины. С учетом широтной зависимости плотность, например на широте 60° , вдвое меньше, чем на экваторе.

3. Зависимость числа событий от энергии свечения

Поскольку энергия свечения различных космических тел изменялась более чем на четыре порядка (от $2 \cdot 10^{10}$ до $3.75 \cdot 10^{14}$ Дж), а число их падений – более чем на два порядка, зависимость числа событий от их энергии свечения целесообразно представить в логарифмическом масштабе (рис. 2). Из рис. 2, *а* видно, что зависимость логарифма числа событий от логарифма энергии свечения космических тел в первом приближении может быть аппроксимирована прямой линией. Аппроксимирующее уравнение имеет вид

$$\lg n = -0.6875 \lg E_r + 1.1153.$$

При этом коэффициент достоверности $R \approx 0.9588$. Значения E_r даются в тераджоулях.

Зависимость $\lg n$ от $\lg E_r$ также можно аппроксимировать полиномом третьей степени (рис. 2, *б*) или нормальным законом (рис. 2, *в*). Соответствующие аппроксимации имеют вид:

$$\lg n = 0.1944 \lg^3 E_r + 0.0720 \lg^2 E_r - 0.9781 \lg E_r + 1.0939, \quad R \approx 0.9763;$$

$$\lg n = 2.0684 \exp\left\{-0.5[(\lg E_r + 1.4972)/1.3417]^2\right\}, \quad R \approx 0.9747.$$

Здесь E_r также измеряется в тераджоулях.

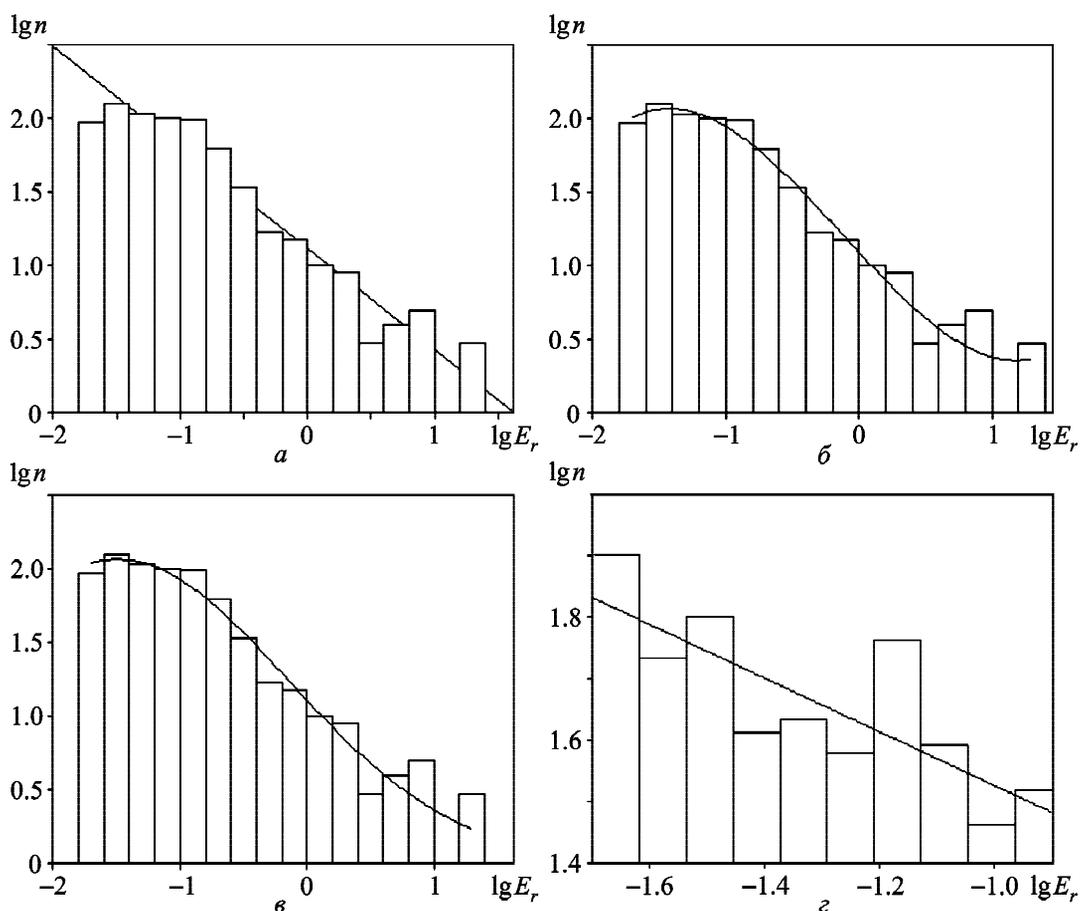


Рис. 2. Распределение логарифма числа событий в зависимости от логарифма энергии излучения космического тела (общее число событий – 693): *а* – аппроксимация степенной зависимостью $\lg n = -0.6875 \lg E_r + 1.1153$, $R = 0.9588$, $\sigma = 0.2007$; *б* – аппроксимация полиномом третьей степени $\lg n = 0.1944 \lg^3 E_r + 0.0720 \lg^2 E_r - 0.9781 \lg E_r + 1.0939$, $R = 0.9763$, $\sigma = 0.1649$; *в* – аппроксимация нормальным законом $\lg n = 2.0684 \exp\left\{-0.5[(\lg E_r + 1.4972)/1.3417]^2\right\}$, $R = 0.9747$, $\sigma = 0.1639$; *г* – аппроксимация степенным законом $\lg n = -0.4368 \lg E_r + 1.0888$, $R = 0.8083$, $\sigma = 0.0504$

4. Зависимость числа событий от составляющих скорости

Спутниковая система измеряла три проекции начальной скорости (до вхождения в атмосферу) космического тела (v_x , v_y и v_z) в 145 случаях. При этом использовалась декартова геоцентрическая система координат, в которой ось Oz направлена вдоль оси вращения Земли к Северному полюсу, ось Ox лежит в экваториальной плоскости Земли и направлена к нулевому меридиану, а ось Oy образует правую тройку соответствующих векторов.

Зависимость числа событий от проекций скорости и модуля скорости показана на рис. 3. Из рис. 3, *а* видно, что значения v_x обычно изменяются примерно от -20 до $+20$ км/с, а среднее значение $\bar{v}_x \approx 6.9$ км/с, стандартное отклонение $\sigma \approx 6.0$ км/с. Лишь в нескольких случаях значения v_x близки к -30 км/с.

Примерно в таких же пределах изменяются и значения v_y и v_z (см. рис. 3, *б* и 3, *в*). При этом $\bar{v}_y \approx 9$ км/с, $\sigma = 10.1$ км/с, а $\bar{v}_z \approx 12$ км/с,

$\sigma \approx 10.0$ км/с. В двух случаях значения v_y достигают примерно -40 км/с.

Зависимость числа событий от модуля скорости v показана на рис. 3, *г*. Из рисунка видно, что значения v чаще всего изменяются в пределах $12 \div 20$ км/с, но в двух случаях достигают 44.8 и 49.0 км/с.

Зависимость $n(v)$ можно аппроксимировать следующим соотношением:

$$n(v) = a(v - v_0)^2 e^{-b(v - v_0)}, \quad (1)$$

где $a \approx 7.5073$, $b = 0.3766$, $v_0 \approx 9.193$ км/с.

5. Зависимость числа событий от высоты области максимального свечения

Высота области максимального свечения болида z_p близка к высоте почти полного разрушения космического тела и его наиболее интенсивного торможения. Зависимость n от z_p показана на рис. 4. Видно, что высота области максимального свечения изменяется примерно от 15.2 до 74 км, но

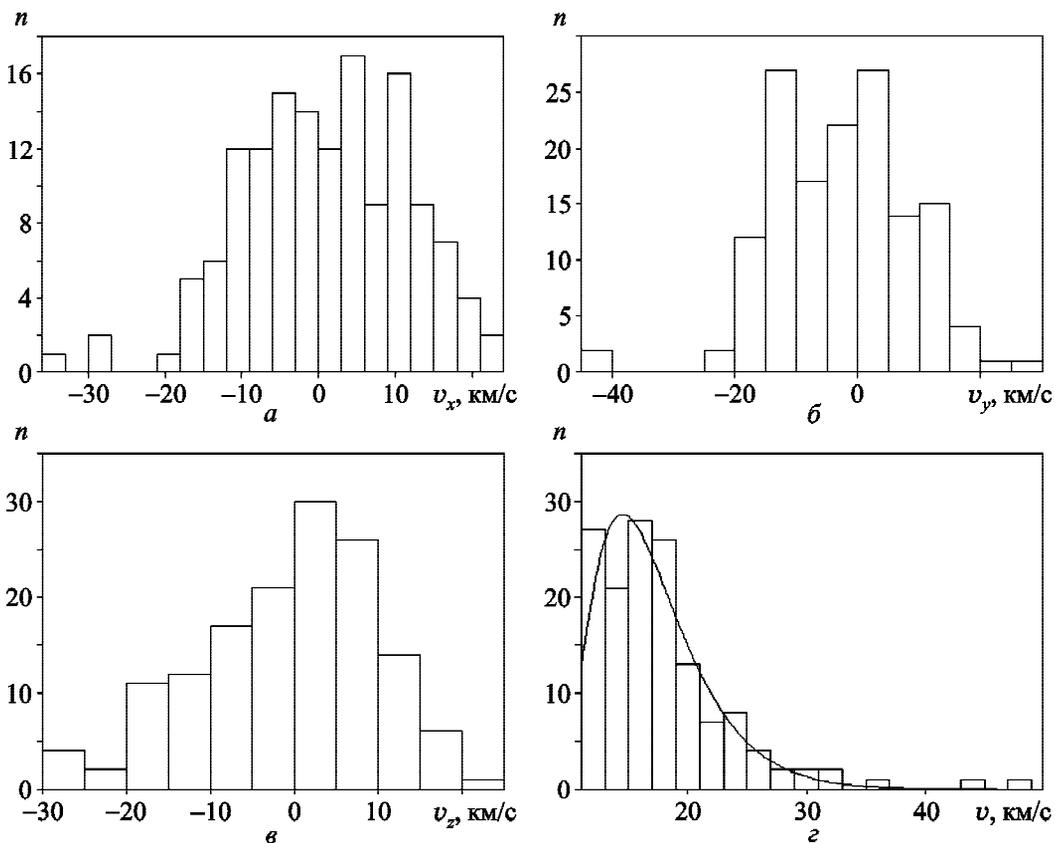


Рис. 3. Распределение числа событий по компонентам скорости и модулю скорости космического тела (145 событий): *а* – $n(v_x)$; *б* – $n(v_y)$; *в* – $n(v_z)$; *г* – $n(v)$ (сплошная линия – аппроксимация законом (1), $R = 0.9588$, $\sigma = 3.0169$)

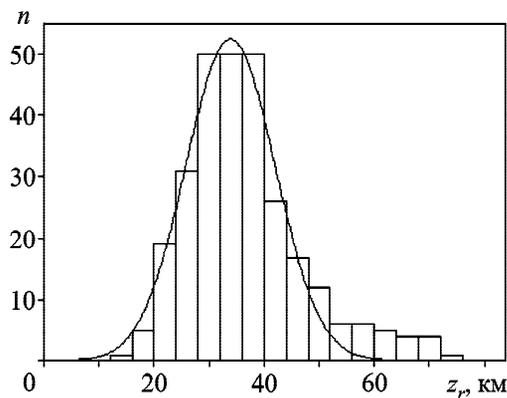


Рис. 4. Распределение числа событий по высоте области максимального свечения космического тела (288 событий). Сплошная линия – аппроксимация нормальным законом $n = 52.441 \exp\{-0.5[(z_r - 33.8964)/8.1143]^2\}$, $R = 0.9796$, $\sigma = 3.9168$

чаще всего – от 28 до 40 км. Для последнего диапазона высот общее число событий составляет 150, или 52 %.

Зависимость $n(z_r)$ можно аппроксимировать нормальным законом:

$$n = 52.4410 \exp\{-0.5[(z_r - 33.8964)/8.1143]^2\}.$$

Значения z_r даются в километрах. Наиболее вероятная высота близка к 34 км, а ее стандартное отклонение – к 8 км.

Добавим, что нормальный закон заметно занижает значения n при $z_r > 48$ км. Скорее всего, это связано с отличием в структуре разрушающихся космических тел. При $z_r < 48$ км тела, по-видимому, были каменными, а при $z_r > 48 \div 50$ км – ледяными. Прочность последних существенно меньше прочности каменных тел, а высота их разрушения и свечения заметно больше.

6. Зависимость высоты области максимального свечения космического тела от энергии свечения

Корреляционное поле “высота области максимального свечения – энергия свечения” изображено на рис. 5. 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 z_r от 26 до 42 км. Наибольшее число событий регистрировалось в диапазоне высот $26 \div 42$ км, им соответствует энергия свечения примерно от 30 до 500 ГДж.

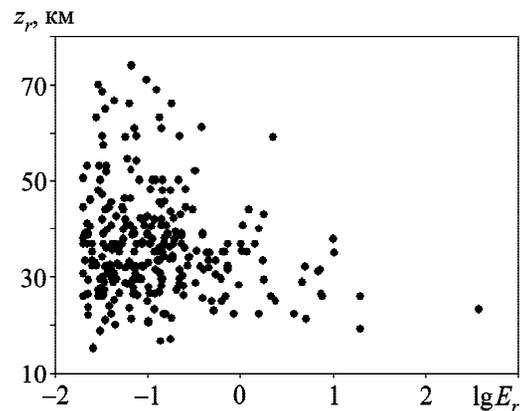


Рис. 5. Корреляционное поле “высота области максимального свечения – логарифм энергии свечения космического тела” (288 событий)

7. Зависимость квадрата начальной скорости космического тела от энергии свечения

Квадрат начальной скорости v^2 космического тела пропорционален его начальной кинетической энергии. Корреляционное поле “квадрат скорости – энергия свечения” приведено на рис. 6. Из рис. 6 видно, что значительная корреляция имеет место при $v^2 \approx 150 \div 400$ (км/с)² и $E_r \approx 30 \div 500$ ГДж.

8. Обсуждение

Анализ рис. 1 показал, что закон распределения числа падений космических тел по долготе близок к равномерному. Этого и следовало ожидать,

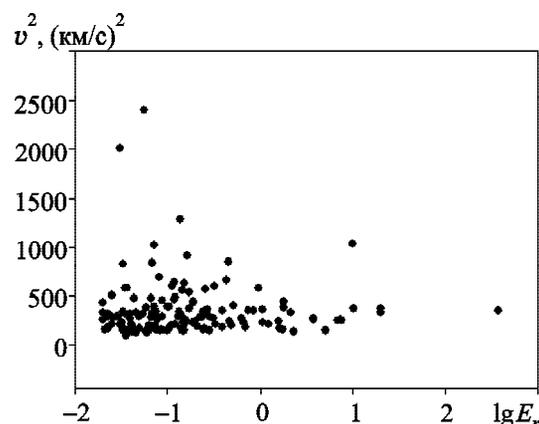


Рис. 6. Корреляционное поле “квадрат начальной скорости – логарифм энергии свечения космического тела” (145 событий)

так как нет выделенного участка поверхности Земли.

В то же время закон распределения числа событий по широте не является равномерным. По мере удаления от экватора число событий уменьшается, что обусловлено не астрономическими, а чисто геометрическими причинами. Такое поведение связано с уменьшением площади поверхности, подверженной падениям космических тел. Геометрические соображения показывают, что эта площадь пропорциональна $\cos \varphi$, где φ – широта наблюдения болида, которая в процессе полета тела изменяется незначительно. Действительно, число событий n пропорционально элементу площади $dS = 2\pi R_E^2 \cos \varphi d\varphi$, где R_E – радиус Земли.

Зависимость числа событий от логарифма энергии свечения может быть аппроксимирована рядом функций (см. рис. 2). Наиболее удачной ($R \approx 0.9763$) является полиномиальная аппроксимация, но она не имеет наглядного физического истолкования. Почти такой же коэффициент достоверности ($R \approx 0.9747$) имеет аппроксимация нормальным законом (см. рис. 2, в). Из-за большого стандартного отклонения ($\sigma_n \approx 1.34$), сравнимого с $|\lg \bar{E}_r| \approx 1.50$, этому закону также трудно дать физическое объяснение, хотя для него значение $\sigma \approx 0.1639$ оказалось минимальным.

Наиболее простое истолкование имеет степенной закон $n \sim E_r^{-0.6875}$ (см. рис. 2, а). Чем больше энергия свечения, тем меньше число тел с такой энергией, вторгающихся в атмосферу Земли. В то же время число тел с энергией $E_r \approx 0.02 \div 0.13$ ТДж при дискрете $\lg E_r = 0.2$ остается практически неизменным в этом диапазоне энергий ($n \approx 100$ при $\lg E_r \approx -1.7 \div -0.9$). Относительная доля таких тел составляет около 67 %. Степенная аппроксимация является удовлетворительной при $\lg E_r \approx -1 \div 1$, т. е. при $E_r \approx 0.1 \div 10$ ТДж. Если же дискрету уменьшить до 0.08, то можно заметить некоторое уменьшение $\lg n$ при увеличении $\lg E_r$ (рис. 2, з). При этом $\lg n = -0.4368 \lg E_r + 1.0888$.

Аппроксимация зависимости числа событий от модуля скорости нормальным законом не является вполне удовлетворительной, поскольку этот закон плохо описывает наблюдаемое распределение по скоростям при $v < 12$ км/с и особенно при $v > 25$ км/с. Закон в виде соотношения (1) не имеет простого физического истолкования.

На еще большие трудности наталкивается объяснение каких-либо аппроксимаций зависимостей $n(v_x)$, $n(v_y)$ и $n(v_z)$.

Сглаживание эмпирической зависимости $n(z_r)$ нормальным законом является вполне удовлетворительным для $z_r \approx 20 \div 48$ км. Заметные расхождения наблюдаются как при $z_r < 20$ км, так и при $z_r > 48$ км. Как уже отмечалось, это связано со значительным изменением плотности космических тел. На высоты $z_r < 20$ км проникают тела повышенной прочности. Наименее прочные объекты, скорее всего, состоящие из льда, разрушаются на высотах более 50 ÷ 60 км.

Корреляционное поле, приведенное на рис. 5, свидетельствует о присутствии заметной связи между z_r и $\lg E_r$. Существует большая связь между v^2 и $\lg E_r$, т. е. между кинетической энергией тела и энергией его свечения (рис. 6).

9. Выводы

1. С использованием спутниковой базы данных о свечении тормозящихся в атмосфере Земли 693 миниастероидов получены основные статистические характеристики их параметров. Закон распределения числа падений космических тел метрового размера по долготе близок к равномерному. Закон распределения числа падений по широте пропорционален косинусу соответствующей широты.

2. Число космических тел, вторгающихся в атмосферу Земли с энергиями свечения в диапазоне 20 ÷ 150 ГДж, остается практически неизменным. Доля таких тел близка к 72 %. При увеличении энергии от 125 до 3000 ГДж предпочтительнее степенной закон распределения падения космических тел.

3. Большинство (70.13 %) космических тел имеет начальную скорость примерно от 12.5 до 20 км/с. Значения скорости от 45 до 49 км/с наблюдались лишь в двух случаях.

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

5. Корреляционное поле “высота области максимального свечения – логарифм энергии свечения” свидетельствует о некотором увеличении связи между этими параметрами в диапазоне высот $26 \div 24$ км и интервале значений $\lg E_p \approx -(1.7 \div 0.6)$.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стулов С. П., Мирский В. Н., Вислый А. Н. Аэродинамика болидов. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 240 с.
2. Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2005. – 310 с.
3. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
4. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. – 556 с.
5. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
6. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Phys. Radio Astron. – 2008. – Vol. 13, No. 2. – P. 120–137.
7. Chernogor L. F. The Earth – Atmosphere – Geospace system: main properties and processes // Int. J. Remote Sens. – 2011. – Vol. 32, Is. 11. – P. 3199–3218. DOI: 10.1080/01431161.2010.541510
8. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovskiy V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang 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., and Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. – 2013. – Vol. 342, Is. 6162. – P. 1069–1073. DOI: 10.1126/science.1242642
9. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovskiy V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang 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., and Mikouchi T. Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. [Электронный ресурс]. – 2013. – vol. 342. Режим доступа: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1
10. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита “Челябинск” // Инженерная физика. – 2013. – № 8. – С. 23–40.
11. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // Доповіді Національної академії наук України. – 2013. – № 10. – С. 97–104.
12. Язев С. А., Антунин В. Г. По следам Витимского болида // Земля и Вселенная. – 2004. – № 5. – С. 59–72.
13. Brown P., ReVelle D. O., Silber E. A., Edwards W. N., Arrowsmith S., Jackson Jr. L. E., Tancredi G., and Eaton D. Analysis of a crater-forming meteorite impact in Peru // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113, Is. E9. – id. E09007. DOI: 10.1029/2008JE003105.
14. Tagliaferri E., Spalding R., Jacobs C., Worden S. P., and Erlich A. Detection of meteoroid impacts by optical sensors in Earth orbit / Hazards due to Comets and Asteroids / T. Gehrels, ed. – Tucson: Univ. Arizona Press, 1994. – P. 199–220.

REFERENCES

1. STULOV, V. P., MIRSKII, V. N., and VISLYI, A. I., 1995. *Aerodynamics of Bolides*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
2. ADUSHKIN, V. V. and NEMCHINOV, I. V. (eds), 2005. *Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies*. Moscow, Russia: ECC Akademkniga Publ. (in Russian).
3. SHUSTOV, B. M. and RYHLOVA, L. V. (eds.), 2010. *Asteroid-Comet Hazards: Yesterday, Today, and Tomorrow*. Moscow, Russia: Fizmatlit Publ. (in Russian).
4. CHERNOGOR, L. F., 2012. *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
5. CHERNOGOR, L. F., 2003. Physics of Earth, Atmosphere, and Geospace from the Standpoint of System Paradigm. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 8, no. 1, pp. 59–106 (in Russian).
6. CHERNOGOR, L. F., ROZUMENKO, V. T., 2008. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 13, no. 2, pp. 120–137.
7. CHERNOGOR, L. F., 2011. The Earth – Atmosphere – Geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sens.* vol. 32, is. 11, pp. 3199–3218. DOI: 10.1080/01431161.2010.541510
8. POPOVA, O. P., JENNISKENS, P., EMELYANENKO, 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., HARLAMOV, V., SOLOVYOV, A., RUSAKOV, Y. S., KOROTKIY, S., SERDYUK, I., KOROCHANTSEV, A. V., LARIONOV, M. Y., GLAZACHEV, D., MAYER, A. E., GISLER, G., GLADKOVSKY, S. V., WIMPENNY, J., SANBORN, M. E., YAMAKAWA, A., VEROSUB, K. L., ROWLAND, D. J., ROESKE, S., BOTTO, N. W., FRIEDRICH, J. M., ZOLENSKY, M. E., LE, L., ROSS, D., ZIEGLER, K., NAKAMURA, T., AHN, I., LEE, J. I., ZHOU, Q., LI, X. H., LI, Q. L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHEKHO, A. V., SCHMITT-KOPPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. vol. 342, is. 6162, pp. 1069–1073. DOI: 10.1126/science.1242642
9. POPOVA, O. P., JENNISKENS, P., EMELYANENKO, V., KARTASHOVA, A., BIRYUKOV, E., KHAIBRAKHMANOV, S., SHUVALOV, V., RYBNOV, Y., DUDOROV, A., GROKHOVSKY, V. I., BADIYUKOV, D. D., YIN, Q.-Z., GURAL, P. S., ALBERS, J., GRANVIK, M., EVERS, L. G., KUIPER, J., HARLAMOV, V., SOLOVYOV, A., RUSAKOV, Y. S., KOROTKIY, S., SERDYUK, I., KOROCHANTSEV, A. V., LARIONOV, M. Y., GLAZACHEV, D., MAYER, A. E., GISLER, G., GLADKOVSKY, S. V., WIMPENNY, J., SANBORN, M. E., YAMAKAWA, A., VEROSUB, K. L., ROWLAND, D. J., ROESKE, S., BOTTO, N. W., FRIEDRICH, J. M., ZOLENSKY, M. E., LE, L., ROSS, D., ZIEGLER, K., NAKAMURA, T., AHN, I., LEE, J. I., ZHOU, Q., LI, X. H., LI, Q. L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHEKHO, A. V., SCHMITT-KOPPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science* [online]. vol. 342. [viewed 30 January 2017]. Available from: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1
10. CHERNOGOR, L. F., 2013. Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite Chelyabinsk. *Inzhenernaya fizika*. no. 8, pp. 23–40 (in Russian).
11. CHERNOGOR, L. F., 2013. Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.* no. 10, pp. 97–104 (in Russian).
12. YAZEY, S. A. and ANTIPIN, V. G., 2004. Following the Vitimsk bolide wake. *Zemlya i Vseleennaya*. no. 5, pp. 59–72 (In Russian).
13. BROWN, P., REVELLE, D. O., SILBER, E. A., EDWARDS, W. N., ARROWSMITH, S., JACKSON JR., L. E., TANCREDI, G. and EATON, D., 2008. Analysis of a crater-forming meteorite impact in Peru. *J. Geophys. Res.* vol. 113, is. E9, id. E09007. DOI: 10.1029/2008JE003105
14. TAGLIAFERRI, E., SPALDING, R., JACOBS, C., WORDEN, S. P. and ERLICH, A., 1994. Detection of meteoroid impacts by optical sensors in Earth orbit. In: T. GEHRELS, ed. *Hazards due to Comets and Asteroids*. Tucson: Univ. Arizona Press, pp. 199–220.
- L. F. Chernogor and M. B. Shevel'ov
V. N. Kazarin Kharkiv National University,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine
- GLOBAL STATISTICS OF BOLIDES
IN THE TERRESTRIAL ATMOSPHERE
- Purpose:* Evaluation and analysis of distribution of the number of meteoroid (mini asteroid) falls as a function of glow energy, velocity, the region of maximum glow altitude, and geographic coordinates.
- Design/methodology/approach:* The satellite database on the glow of 693 mini asteroids, which were decelerated in the terrestrial atmosphere, has been used for evaluating basic meteoroid statistics.
- Findings:* A rapid decrease in the number of asteroids with increasing of their glow energy is confirmed. The average speed of the celestial bodies is equal to about 17.9 km/s. The altitude of maximum glow most often equals to 30–40 km. The distribution law for a number of meteoroids entering the terrestrial atmosphere in longitude and latitude (after excluding the component in latitudinal dependence due to the geometry) is approximately uniform.
- Conclusions:* Using a large enough database of measurements, the meteoroid (mini asteroid) statistics has been evaluated.
- Key words:* bolides, meter-size asteroid, mini asteroid velocity, altitude of maximum glow, statistics distributions.
- Л. Ф. Черногор, М. Б. Шевелев
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
- ГЛОБАЛЬНА СТАТИСТИКА БОЛІДІВ
В АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ
- Предмет і мета роботи:* Отримання та аналіз розподілів числа падінь метеороїдів (мініастероїдів) за їх енергіями світіння, швидкістю, висотою області максимального світіння та географічним місцем розташування.
- Методи і методологія:* З використанням супутникової бази даних про світіння 693 мініастероїдів, що гальмувалися атмосферою Землі, отримано основні статистичні характеристики їхніх параметрів.
- Результати:* Підтверджено, що число падінь мініастероїдів швидко спадає зі збільшенням їх енергії світіння. Середня швидкість космічних тіл була близькою до 17.9 км/с. Висота максимального світіння найчастіше складала 30 ÷ 40 км. Закон розподілу числа космічних тіл, що вторгаються до атмосфери Землі, за довготою та широтою (після виключення широтної залежності), обумовлений геометрією, є близьким до рівномірного.
- Висновки:* З використанням досить великого обсягу даних спостережень оцінено основні статистичні характеристики метеороїдів (мініастероїдів).
- Ключові слова:* боліди, астероїди метрового розміру, швидкість мініастероїдів, висота максимального світіння, статистичні розподіли

Статья поступила в редакцию 06.04.2017