

УДК 533.6.011.6+523.682

Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
пл. Свободы 4, г. Харьков, 61022, Украина
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Статистические характеристики параметров метеороидов в атмосфере Земли

По данным спутниковых наблюдений НАСА, выполненных в 1994—2016 гг., оценены статистические характеристики метеороидов с кинетической энергией от 0.1 до 440 кт ТНТ. Построены и проанализированы распределения числа падающих метеороидов по значениям их начальной кинетической энергии, начальной скорости, начальной массы, высоты и географических координат области максимального свечения, а также года падения. Построены корреляционные зависимости «масса — начальная кинетическая энергия», «высота области максимального свечения — начальная кинетическая энергия» и «высота области максимального свечения — начальная скорость» (квадрат начальной скорости).

Ключевые слова: метеороиды, статистические характеристики, основные параметры, аппроксимирующие зависимости.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно определению в работе [7] метеороидом называется движущийся в космосе твердый объект, размеры которого меньше 10 м, но больше 100 мкм. Тела размером более 10 м относятся к астероидам. Авторы работы [17], учитывая возросшие возможности средств наземных наблюдений, предлагают относить к метеороидам природные твердые объекты размером от 10 мкм до 1 м, движущиеся в межпланетном космическом пространстве. Мы будем ориентироваться на установившиеся понятия, введенные в работе [7].

Изучение вторжения в атмосферу Земли метеороидов с размером $d = 1 \dots 10$ м представляет значительный интерес. Для этого есть несколько причин. Оказывается, что такие метеороиды относятся к наименее изученным из всех тел Солнечной системы (см., например, [2]).

С другой стороны, они ответственны за формирование максимума в распределении притока массы космических тел на Землю по значениям их размеров [10]. Наконец, частота падения тел метрового диапазона на Землю близка к 30 год^{-1} . Ряд метеороидов может представлять реальную опасность [4, 6, 8].

Падение метеороидов метрового размера сопровождается яркой вспышкой (суперболидом) продолжительностью 1...3 с, а также генерацией ударной волны. Энергии ударных волн для самых крупных метеороидов (размером 3...10 м) достаточно, чтобы вызвать разрушения построек или повреждение насаждений и лесных массивов. Так, например, Витимский болид, вторгшийся в атмосферу Земли над Сибирью 24 сентября 2004 г. в 16:49 UT, имел начальную кинетическую энергию $E = 10^{13}$ Дж ≈ 2.4 кт ТНТ, массу около 50 т и размер около 3 м. Взорвавшись на высоте около 30 км, метеороид вызвал повреждение леса на площади около 300 км^2 [4, 6]. Доля сломанных деревьев изменялась в пределах 5...15 % [4, 6]. Взрыв тел размером 3...10 м над населенными пунктами может привести к разрушению построек и травмированию людей. Другим, еще более впечатляющим примером, может быть падение Каранкасского метеороида в Перу 15 сентября 2007 г. [8]. Космическое тело типа хондрита массой всего лишь около 3...9 т и диаметром около 1.3...1.8 м при ударе о поверхность земли образовало кратер диаметром около 13.5 м и глубиной около 4 м.

Перечисленные причины определяют научную и практическую значимость детального исследования падений метеороидов метрового размера на нашу планету.

На результатах регистрации интенсивностей свечения и ударных волн от метеороидов основаны методы их обнаружения. В разные годы в ряде стран функционировали специальные болидные сети, фотографирующие вспышки от падающих космических тел [2, 12]. Эти сети регистрировали более тысячи болидов. Возможности наземных сетей ограничены, так как они способны обзирать относительно небольшие площади (около 1 млн км^2). Например, Европейская болидная сеть способна охватить всего лишь 0.3 % поверхности Земли [12].

Ограниченные возможности также имеют и акустические болидные сети.

Совершенно другими возможностями обладает глобальная спутниковая система, которая охватывает наблюдениями всю планету [18]. Система принадлежит Министерству обороны США. Она предназначена для контроля космического пространства (обнаружения стартующих баллистических ракет, высотных ядерных взрывов и т. п.). Так что обнаружение вспышек от метеороидов является побочным продуктом этой системы. За время ее функционирования (с 1988 г.) зарегистрировано более 700 вспышек, вызванных метеороидами. Использование базы данных об этих вспышках позволяет оценить статистические характеристики космических тел метрового размера, вторгающихся в атмосферу Земли.

Целью настоящей работы является оценка числа падений метеороидов в зависимости от времени (года вторжения в атмосферу,) географических координат, начальной кинетической энергии, начальной скорости, начальной массы и высоты области максимального свечения по данным спутниковых наблюдений в 1994—2016 гг. (всего 693 события).

Оценки частоты падений космических тел в зависимости от их начальной кинетической энергии представлены в работах [9, 11, 16]. В работе [16] использовались акустические наблюдения, а в работах [9, 11] — данные спутниковых наблюдений в 1994—1996 гг. (всего 51 событие) и в 1994—2002 гг. (всего 300 событий) соответственно.

ДААННЫЕ И ИХ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для статистического анализа использовалась база данных, полученных при помощи глобальной спутниковой системы США [18]. База данных за 1994—2016 гг. представлена на сайте НАСА [<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs>].

Система образована рядом геостационарных спутников, расположенных на высоте около 36 тыс. км. Их конфигурация позволяет охватывать большую часть поверхности Земли (примерно до широты 83°). Для высотных объектов, естественно, эта широта увеличивается. Нетрудно показать, что взрыв метеороида эта система может обнаружить даже над полюсами, если высота взрыва составляет не менее 70 км. Важными преимуществами спутниковой системы является непрерывность ее функционирования, а также независимость от погодных условий. Главный недостаток этой системы заключается в отсутствии регистрации динамических данных. В течение 1988—2005 гг., как правило, отсутствовала информация о траектории и скорости космических тел. Нередко она отсутствовала и в последующие годы.

Мы проанализировали массив данных, полученных в 1994—2016 гг. За это время зарегистрировано 693 события. Высота области максимального свечения регистрировалась в 287 случаях, а скорость (ее проекции) — в 144 случаях.

Каждый спутник системы снабжен фотометрическим датчиком с высоким временным разрешением и чувствительностью [18]. Датчики позволяют измерять временную зависимость удельной (отнесенной к единице телесного угла) мощности источника излучения величиной не менее 10^9 Вт/стер с временным разрешением не хуже нескольких сотых долей секунды. При этом минимальная регистрируемая энергия излучения составляет около $2 \cdot 10^{10}$ Дж, что соответствует минимальной кинетической энергии космических тел около $3 \cdot 10^{11}$ Дж, или 70 т ТНТ. Датчики позволяют обнаружить метеороиды с размером около 0.3...0.6 м (в зависимости от их плотности) при начальной скорости v 60 км/с или размером 1...2 м при скорости v 11 км/с.

Проводимый ниже статистический анализ заключается в построении распределений числа вторжений метеороидов в атмосферу Земли (далее — числа n событий) по широте в диапазоне от 90° ю. ш. ($\varphi = -90^\circ$) до 90° с. ш. ($\varphi = +90^\circ$), по долготе от 180° з. д. ($\lambda = 180^\circ$) до 180° в. д. ($\lambda = +180^\circ$), по начальной кинетической энергии E от 0.07 до 440 кт ТНТ, по скоростям v от 9.8 до 49 км/с, по массам m от 0.4 т до 11 кт и по высотам z_r области максимального свечения от 15.2 до 74 км. Кроме упомянутых распределений (гистограмм), также построены корреляционные зависимости «начальная масса — начальная кинетическая энергия», «высота области максимального свечения — начальная кинетическая энергия» и «высота области максимального свечения — начальная скорость» (квадрат начальной скорости).

Ряд распределений аппроксимировался аналитическими зависимостями, по которым вычислялись статистические характеристики такие, как среднее значение случайной величины, среднее квадратичное отклонение σ и среднее квадратичное отклонение среднего значения $\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{N}$, где N — число отсчетов в статистическом ряду (число столбцов в гистограммах).

Распределение числа событий по годам. Распределение числа событий с 1994 по 2016 гг. приведено на рис. 1. Видно, что в разные годы число событий изменялось от 13 до 44. Наименьшее число событий было в 1994 и 1998 гг., а наибольшее — в 2005 г. Всего зарегистрировано 693 события. Ежегодно в атмосферу Земли вторгалось в среднем 30.1 ± 1.8 астероидов, при этом для всей выборки $\sigma = 8.5$. Закон распределения, приведенный на рис. 1, в среднем близок к равномерному.

Распределение числа событий по широтам. Широта и долгота области максимального свечения зарегистрированы для 513 событий. По данным [18] самым «северным» было космическое тело, вторгшееся в атмосферу Земли 12 октября 2007 г. в 09:14 UT (88.5° с. ш., 116.6° в. д.) над Северным Ледовитым океаном. Его начальная кинетическая энергия составляла около 0.11 кт ТНТ, высота максимального свечения — 37.0 км. Самым «южным» космическим телом стал метеороид, затормозившийся в атмосфере над Антарктидой 18 апреля 2007 г. в

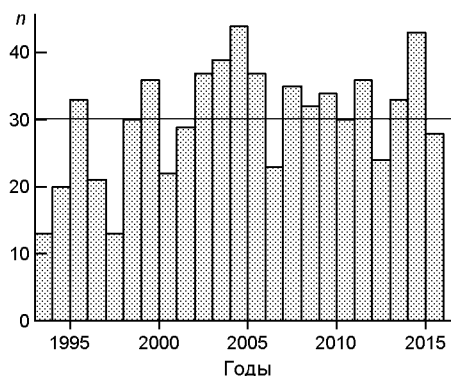


Рис. 1. Распределение числа n событий ($n = N = 693$) по годам (1994—2016 гг.). Сплошной линией показана аппроксимация гистограммы равномерным законом распределения

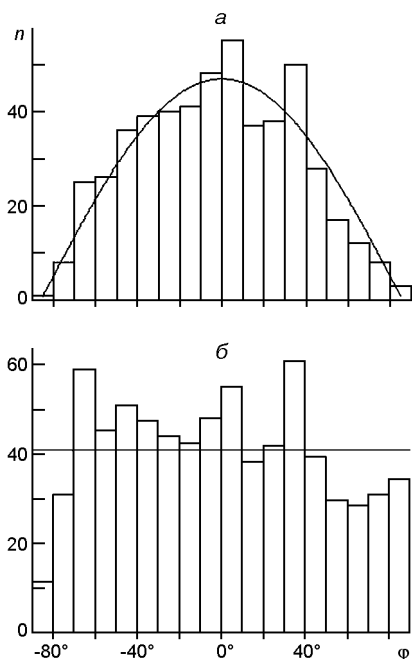


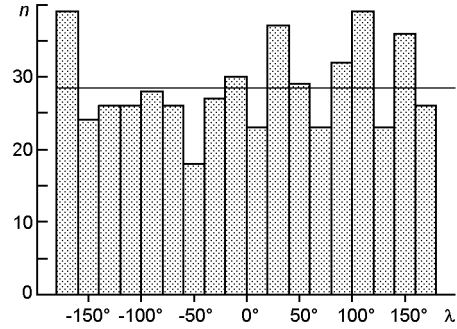
Рис. 2. Распределение числа n событий ($N = 513$) по широтам: a — исходное распределение. Сплошная линия — аппроксимация законом $n = a \cos(180 \varphi / b)$, где $a = 46.88$, $b = 0.006$. Коэффициент достоверности аппроксимации $R = 0.94$, $\chi^2 = 5.72$; b — после исключения широтной зависимости. Сплошная линия — аппроксимация гистограммы равномерным законом распределения: $\bar{n} = 41.08 \pm 2.90$, $\chi^2 = 12.30$

12:44 UT. По данным [18] координаты области максимального свечения, расположенной на высоте 38.0 км, следующие: 83.7° ю. ш., 171.2° з. д. Кинетическая энергия тела — 0.33 кт TNT.

Распределение числа событий по широте показано на рис. 2. Из рис. 2а видно, что закон распределения имеет два максимума. Главным из них является максимум в окрестности 0° . В целом же распределение хорошо аппроксимируется зависимостью $n = n_{\max} \cos \varphi$, где $n_{\max} = n_{10}$. На первый взгляд кажется, что большинство метеороидов вторгаются в атмосферу Земли в экваториальных широтах, на самом же деле закон распределения по широте близок к равномерному с $\bar{n} = 41.1 \pm 2.9$ и $\chi^2 = 12.3$ при $\nu = 10$, а уменьшение числа событий связано с уменьшением площади участка поверхности Земли, перпендикулярной к вертикальной проекции траектории тела, при увеличении широты. Об этом свидетельствует почти полное отсутствие зависимости параметра $n / \cos \varphi$ от широты (см. рис. 2б). При указанном значении \bar{n} средняя частота вторжения космических тел в интервале широт $\varphi = 10^\circ$ близка к $1.79 \pm 0.13 \text{ год}^{-1}$.

Распределение числа событий по долготам. Долготное распределение частоты падений метеороидов представлено на рис. 3. Видно, что в распределении $n(\lambda)$ есть несколько незначительных максимумов и минимумов. В целом же эмпирическое распределение хорошо аппроксимируется равномерным законом, для которого среднее значение \bar{n} составляет 28.4 ± 1.4 , а $\chi^2 = 6$ при $\nu = 20$. Средняя частота вторжений космических тел в интервале долгот $\lambda = 20^\circ$ составляет около $1.25 \pm 0.06 \text{ год}^{-1}$.

Рис. 3. Распределение числа n событий ($N = 513$) по долготам. Сплошная линия — аппроксимация гистограммы равномерным законом распределения: $\bar{n} = 28.44 \pm 1.37$, $\sigma = 6.00$



Распределение числа событий по кинетическим энергиям. Кинетическая энергия зарегистрированных космических тел изменялась в широких пределах от 0.073 (18 событий, или 2.6 %) до 440 кт ТНТ (одно событие). Наибольшую энергию имел знаменитый Челябинский метеороид, вторгшийся в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. в 03:20 UT [1, 5, 13, 14]. Его размер составлял около 18 м, масса — около 11 кт. Координаты высоты области максимального свечения: 54.8 с. ш., 61.1 в. д.

Распределение числа событий по начальным кинетическим энергиям E приведено на рис. 4. Поскольку энергия изменялась почти на четыре порядка, имеет смысл рассмотреть распределения по кинетической энергии от 0.1 до 1.3 кт ТНТ с дискретностью в 0.1 кт ТНТ (рис. 4а), от 1 до 18 кт ТНТ с дискретностью в 1 кт (рис. 4б) и от 0.1 до 33 кт ТНТ (рис. 4в). Заметим, что энергии $E < 0.1$ кт ТНТ округлялись до 0.1 кт ТНТ.

Законы распределения, представленные на рис. 4, близки к степенным с показателем степени от -0.57 до -1.11 . При этом чем больше ки-

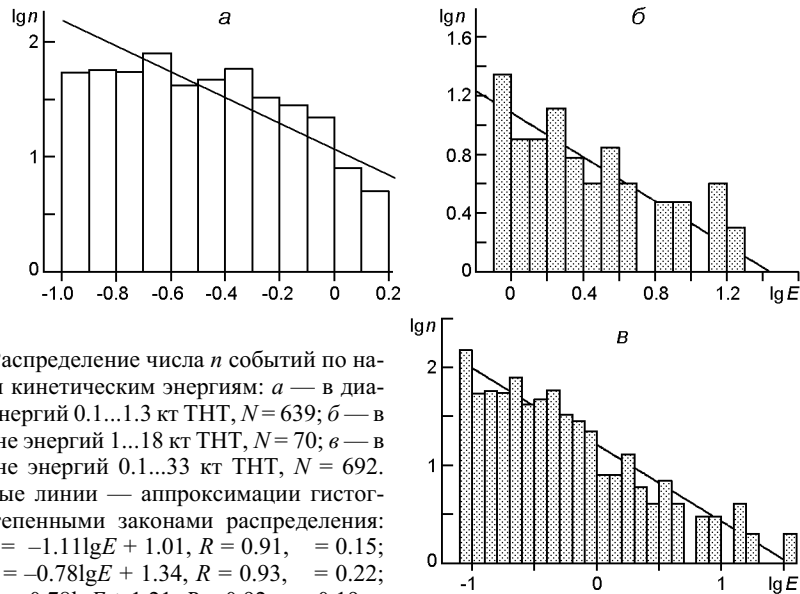


Рис. 4. Распределение числа n событий по начальным кинетическим энергиям: а — в диапазоне энергий 0.1...1.3 кт ТНТ, $N = 639$; б — в диапазоне энергий 1...18 кт ТНТ, $N = 70$; в — в диапазоне энергий 0.1...33 кт ТНТ, $N = 692$. Сплошные линии — аппроксимации гистограмм степенными законами распределения: а — $\lg n = -1.11 \lg E + 1.01$, $R = 0.91$, $\sigma = 0.15$; б — $\lg n = -0.78 \lg E + 1.34$, $R = 0.93$, $\sigma = 0.22$; в — $\lg n = -0.78 \lg E + 1.21$, $R = 0.92$, $\sigma = 0.19$

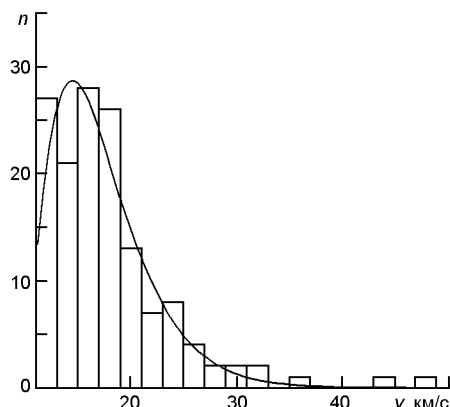


Рис. 5. Распределение числа n событий ($N = 143$) по начальным скоростям. Сплошная линия — аппроксимация законом распределения $n = a(v - v_0)^2 \exp[-b(v - v_0)]$ где $a = 7.51$, $b = 0.38$, $v_0 = 9.19$ км/с. При этом $R = 0.96$, $\sigma = 3.02$

нетическая энергия космического тела, тем реже такие тела вторгаются в атмосферу Земли.

Начальная кинетическая энергия E метеороидов на спутниках непосредственно не измерялась, а вычислялась по интегральной энергии свечения E_r и эмпирической зависимости коэффициента преобразования $\eta = E_r / E$. При этом согласно работе [9]

$$E = 8.2508 E_r^{0.885}.$$

Значения E и E_r в этой формуле даются в кт ТНТ.

Распределение числа событий по скоростям. Проекция скорости космических тел в геоцентрической системе координат регистрировалась в 145 случаях, что составляло около 21 % всех наблюдений. По трем проекциям вычислялся модуль начальной скорости v . Минимальное значение скорости метеороида, равное 9.8 км/с, зарегистрировано 1 июля 2014 г. в 17:00 UT. Падение космического тела имело место над США ($\phi = 37.1^\circ$ с. ш., $\lambda = 115.7^\circ$ з. д.). Кинетическая энергия составила 0.12 кт ТНТ, масса — 10.5 т, высота области максимального свечения — 36.1 км. Интересно, что скорость этого космического тела была меньше минимальной, т. е. параболической, скорости метеороидов, равной 11.2 км. Именно такое значение скорости зарегистрировано 26 июня 2014 г. в 05:55 UT при падении метеороида над Антарктидой ($\phi = 71.5^\circ$ ю. ш., $\lambda = 93.4^\circ$ в. д.). Высота максимального свечения была около 28.5 км, а начальная кинетическая энергия метеороида — 0.2 кт ТНТ. Космическое тело со скоростью 9.8 км/с из статистического анализа исключалось, поскольку оно, скорее всего, представляло собой возвращающийся на Землю космический аппарат.

Максимальная скорость космического тела, равная 49 км/с, зарегистрирована 4 июля 2015 г. в 01:40 UT. Максимальное свечение метеороида наблюдалось над Китаем ($\phi = 38.6^\circ$ с. ш., $\lambda = 103.1^\circ$ в. д.). Из-за сильного торможения высота области максимального свечения была близка к 46 км. Кинетическая энергия тела составляла 0.18 кт ТНТ.

Распределение числа событий (всего 143) по скоростям показано на рис. 5. Видно, что закон распределения по скоростям в интервале 11.2...25 км/с отличается от нормального. При нормальном законе

средняя скорость составляла бы 17.89 ± 1.58 км/с, а 5.91 км/с. При принятом законе распределения $n = a(v - v_0)^2 \exp[-b(v - v_0)]$, где $a = 7.5073$, $b = 0.3766$, $v_0 = 9.193$ км/с, коэффициент достоверности аппроксимации $R = 0.96$, среднее квадратичное отклонение $\sigma = 3.02$, а наиболее вероятная скорость составляет 14.5 ± 0.4 км/с.

Распределение числа событий по массам. Значения начальной массы метеороидов спутниковым методом не определялись. Их можно вычислить, зная начальную кинетическую энергию E и начальную скорость v космического тела. При этом

$$m = \frac{2E}{v^2}.$$

Параметры E и v одновременно измерялись в 145 случаях. Столько же событий содержит и база данных масс метеороидов. Оказалось, что масса тела изменялась от 0.45 до 11 кг. Наибольшее значение относится к Челябинскому метеороиду [1, 5, 14, 15]. Наименьшее значение массы соответствовало метеороиду, вторгнувшемуся в атмосферу Земли 8 января 2014 г. в 17:06 UTC. Для него высота области максимального свечения была близка к 18.7 км. Падение этого космического тела происходило над океаном вблизи о. Новая Гвинея ($\lambda = 1.3^\circ$ ю. ш., $\phi = 147.6^\circ$ в. д.). Начальная кинетическая энергия тела составляла 0.11 кг ТНТ, а $v = 44.8$ км/с.

Распределение числа событий по массам показано на рис. 6. Видно, что эмпирическое распределение имеет максимум, и его удовлетворительно можно аппроксимировать нормальным законом, а

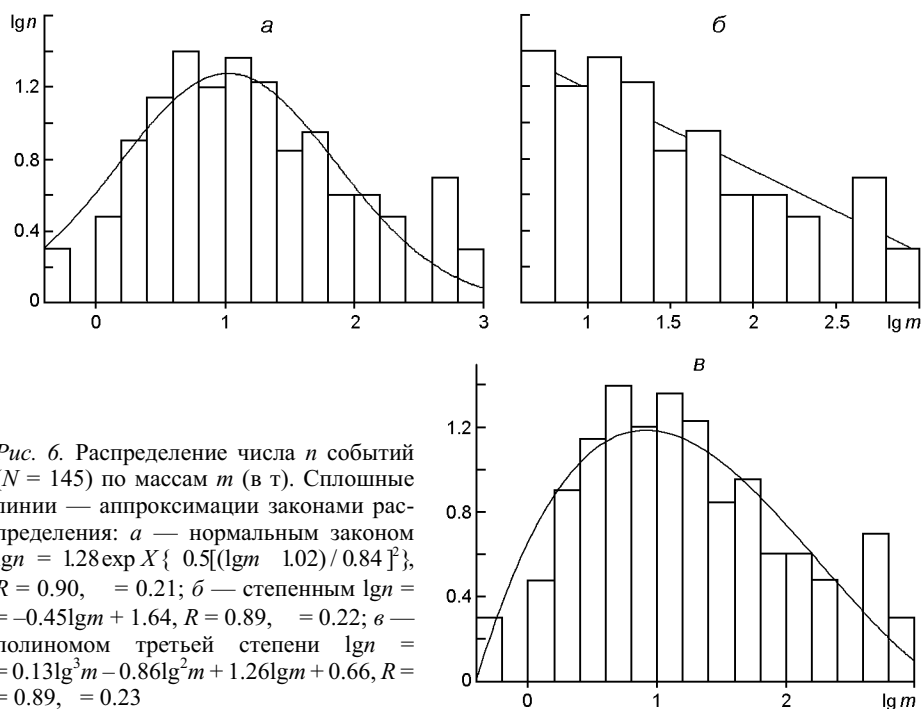


Рис. 6. Распределение числа n событий ($N = 145$) по массам m (в т). Сплошные линии — аппроксимации законами распределения: a — нормальным законом $\lg n = 1.28 \exp\{-X^2 / 0.84^2\}$, $R = 0.90$, $\sigma = 0.21$; $б$ — степенным $\lg n = -0.45 \lg m + 1.64$, $R = 0.89$, $\sigma = 0.22$; $в$ — полиномом третьей степени $\lg n = 0.13 \lg^3 m - 0.86 \lg^2 m + 1.26 \lg m + 0.66$, $R = 0.89$, $\sigma = 0.23$

также полиномом третьей степени. Наиболее вероятное значение массы близко к 10 т.

Распределение числа событий по высотам области максимального свечения. Высота области максимального свечения z_r метеороида регистрировалась в 287 случаях. Минимальная высота свечения $z_r = 15.2$ км отмечалась 7 мая 2015 г. в 09:32 UT при начальной скорости тела $v = 16.6$ км/с, начальной кинетической энергии $E = 92$ т ТНТ и начальной массе $m = 2.8$ т. Метеороид наблюдался над Антарктидой ($\lambda = 75.8^\circ$ ю. ш., $\phi = 163.7^\circ$ в. д.). Малая высота области свечения свидетельствовала о значительной прочности метеороида (не менее 30 МПа). Эта оценка следует из равенства для напряжения разрушения

$$\sigma_d = (\rho_e) v_t^2,$$

где v_t — скорость тела на высоте его разрушения z_e . При $v_t = v$

16 км/с и $(\rho_e) = 0.13$ кг/м³ имеем $\sigma_d = 30$ МПа. Если же $v/v_t = 1.5 \dots 1.7$, то $\sigma_d = 15 \dots 10$ МПа. В любом случае космическое тело было весьма прочным. Большинство достаточно крупных каменных космических тел начинает разрушаться при $\sigma_d = 0.1 \dots 1$ МПа [13].

Максимальная высота области свечения зарегистрирована 2 ноября 2005 г. в 05:17 UT. Она составляла 74 км. Начальная кинетическая энергия была близка к 0.21 кт ТНТ. Если принять наиболее вероятную начальную скорость тела $v = 14.5$ км/с, то масса метеороида равнялась 8.35 т. При плотности атмосферы на высоте $z_e = 74$ км, равной $6 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ и $v = 14.5$ км/с имеем $\sigma_d = 1.3 \cdot 10^4$ Па. Такую низкую прочность имеют кометные тела, состоящие из льда и замерзшей пыли. При плотности кометного вещества 0.9 т/м³ предполагаемый объем космических тел был близок к 7.7 м³, а размер — к 2.5 м.

Распределение числа событий ($N = 287$) по высотам области максимального свечения приведено на рис. 7а. Видно, что оно имеет максимум в диапазоне высот 28...40 км. При этом $\overline{z_r} = 36.62 \pm 0.64$ км, а $\sigma = 10.82$ км. Зависимость $n(z_r)$ для подавляющего количества космических тел ($N = 248$) показана на рис. 7б. Видно, что $\overline{z_r} = 35.66 \pm 0.46$ км ($\sigma = 7.21$ км). Максимум на рис. 7в, по-видимому, имеет место в диапазоне высот 20...22 км. Число событий, которые ему соответствуют, равно 19 (6.6 % от всех наблюдаемых). Малым высотам области максимального свечения соответствуют наиболее прочные космические тела. Для них $\sigma_d = 10$ МПа. Максимум в интервале высот 55...74 км относится к космическим телам кометного типа (рис. 7г). Таких тел было 20, что составляет около 7.0 % от всех наблюдаемых (287).

Для наиболее прочных тел среднее значение высоты области максимального свечения $\overline{z_r} = 20.4 \pm 0.5$ км ($\sigma = 2.1$ км), для каменных тел $\overline{z_r} = 35.6 \pm 0.5$ км ($\sigma = 7.2$ км), а для кометных тел $\overline{z_r} = 63.92 \pm 1.1$ км ($\sigma = 4.8$ км).

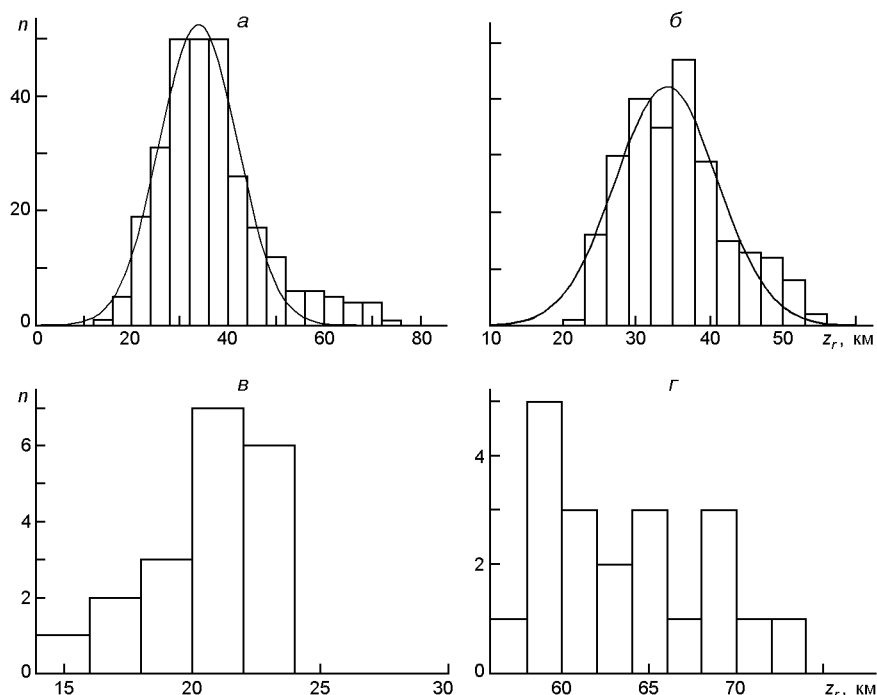
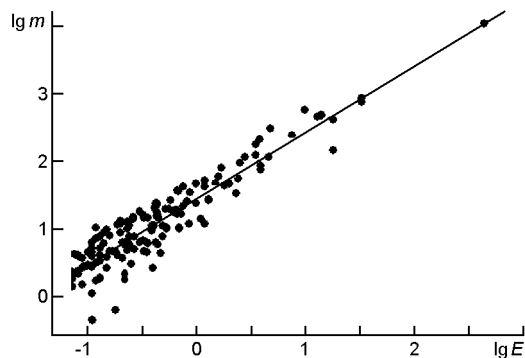


Рис. 7. Распределение числа n событий по высотам области максимального свечения: a — в диапазоне высот 15.2...74 км, $N = 287$; $б$ — в диапазоне высот 23...54.4 км, $N = 248$, $в$ — в диапазоне высот 15.2...22.2 км, $N = 19$; $г$ — в диапазоне высот 55...74 км, $N = 20$. Сплошные линии — аппроксимации гистограмм нормальными законами распределения: a — $n = 52.44 \exp[-0.5((z_r - 33.90)/8.11)^2]$, $R = 0.98$, $\sigma = 3.92$; $б$ — $n = 42.14 \exp[-0.5((z_r - 34.21)/7.01)^2]$, $R = 0.94$, $\sigma = 5.76$

Рис. 8. Корреляционная зависимость начальная «масса — начальная кинетическая энергия» ($N = 144$). Сплошная линия — аппроксимация линейным законом распределения $\lg m = 0.98 \lg E + 1.45$, $R = 0.87$, $\sigma = 1.15$



Корреляционные зависимости. Корреляционная зависимость начальная «масса — начальная кинетическая энергия» показано на рис. 8. Видно, что точки концентрируются в основном вокруг прямой линии $\lg m = k \lg E + B$, где $k = 1.00 \pm 0.04$. Параметр B изменяется в пределах 3.5...66.7 т км²кг⁻¹с⁻². Этот параметр связан со скоростью космического тела следующим соотношением:

$$v = \frac{8370}{B}^{1/2}.$$

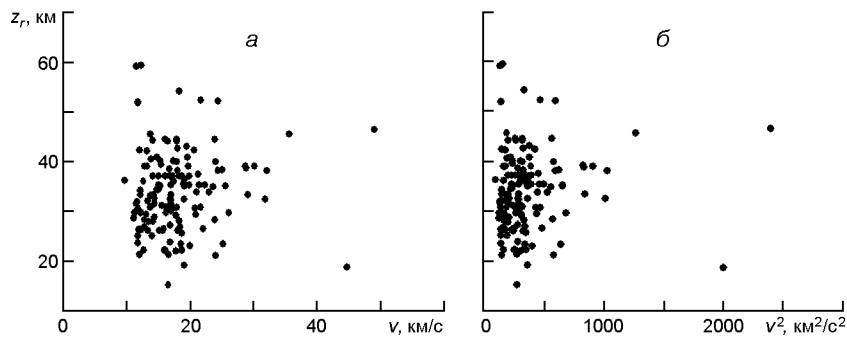
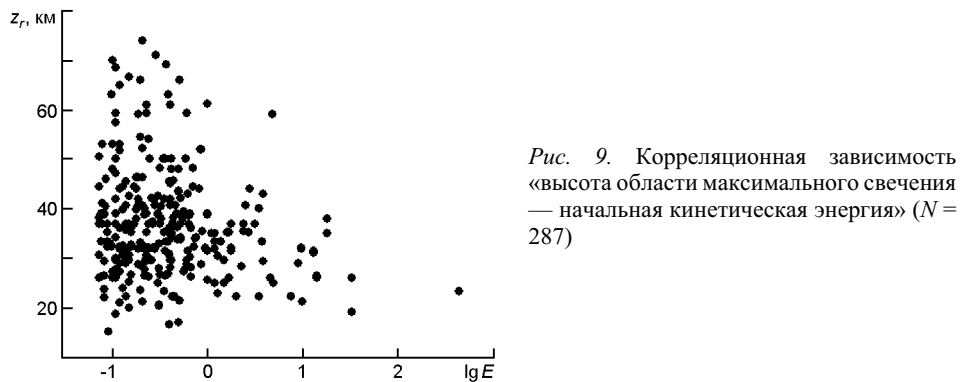


Рис. 10. Корреляционная зависимость: а — «высота области максимального свечения — начальная скорость»; б — «высота области максимального свечения — квадрат начальной скорости» ($N = 144$)

Здесь скорость измеряется в км/с. При $B = 3.5 \dots 66.7 \text{ т км}^2 \text{кт}^{-1} \text{с}^{-2}$ имеем $v = 48.9 \dots 11.2 \text{ км/с}$. Примерно в таких пределах изменялись измеренные глобальной спутниковой системой скорости. Если бы все космические тела имели одинаковую скорость, то параметр B был бы константой, а корреляционная зависимость выродилась бы в прямую линию.

Корреляционные зависимости «высота области максимального свечения — начальная кинетическая энергия», «высота области максимального свечения — начальная скорость» и «высота области максимального свечения — квадрат начальной скорости» приведены на рис. 9, 10. Как и следовало ожидать, имеет место значительный разброс точек. Разброс вызван большими различиями значений углов наклона траекторий, скоростей, размеров и плотностей космических тел. Отсутствие точек при $\lg E < -1$ объясняется конечной чувствительностью спутниковых приборов, регистрирующих свечение следа метеороида. Отсутствие точек с $v < 11 \text{ км/с}$ означает, что космические тела естественного происхождения не могут иметь скорость, меньшую, чем вторая космическая скорость для Земли.

ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение по годам. Число вторжений космических тел в атмосферу Земли в разные годы изменялось от 13 до 44, т. е. варьировало более чем в три раза. Это вызвано флуктуациями в распределении космических тел в Солнечной системе, а также положением Земли относительно Солнца и планет, в первую очередь Юпитера. В среднем частота падения метеороидов составляла $30.1 \pm 1.8 \text{ год}^{-1}$. Средний интервал времени между двумя событиями составлял 12.15 ± 0.73 сут.

Распределение по географическим координатам. Распределение числа событий по широтам и долготам можно представить в аналитическом виде, если предположить, что вероятность падения космического тела на участок поверхности Земли площадью dS с широтой от δ до $\delta + d\delta$, долготой от λ до $\lambda + d\lambda$ дается выражением

$$p(\delta, \lambda) d\delta d\lambda = \frac{dS}{S} = \frac{R^2 \cos \delta d\delta d\lambda}{4 R^2} = \frac{\cos \delta}{4} d\delta d\lambda. \quad (1)$$

Здесь $S = 4 R^2$ — площадь земной поверхности, R — средний радиус Земли.

Заметим, что формула (1) — упрощенная. Строго говоря, она справедлива для случая, когда орбита метеороида лежит в плоскости эклиптики, а ось вращения Земли перпендикулярна к этой плоскости. Первое условие может выполняться для ряда метеороидов, а второе — не выполняется никогда. Тем не менее, как показано ниже, соотношение (1) хорошо описывает данные наблюдений.

Из выражения (1) следует, что широтное распределение вероятности падения космического тела имеет вид

$$p(\delta) d\delta = p(\delta, \lambda) d\delta d\lambda = \frac{1}{2} \cos \delta d\delta. \quad (2)$$

Тогда в интервале широт от δ_1 до δ_2 число падений равно

$$n = N p(\delta) = \frac{N}{2} \cos \delta, \quad (3)$$

где N — полное число событий на Земном шаре. Вблизи экватора $\cos \delta \approx 1$, и из (3) получаем, что $n_{\max} = N/2$. При $\delta = 10^\circ = \pi/18$ и $N = 512$ имеем $n_{\max} = 45$. Как видно из рис. 2, $n_{\max} = (48 + 55)/2 = 51.5$, т. е. различие между оценками составляет около 14 %. Оно объясняется отличием n_{\max} от $\bar{n} = 41.1 \pm 2.9$ (см. выше). При аппроксимации широтной зависимости функцией $n = n_{\max} \cos \delta$ значение n_{\max} необходимо заменить на $\bar{n} = 41.1 \pm 2.9$. При таких \bar{n} отличие от расчетного значения не превышает 9 %.

Из соотношения (3) следует, что расчетная плотность вероятности (отнесенная к единице широты) равна

$$n = \frac{n}{N} \frac{\cos \theta}{2}.$$

После исключения влияния широтной зависимости имеем

$$\frac{n}{\cos \theta} = \frac{n}{N \cos \theta} = \frac{1}{2}.$$

При этом по расчетам $n / \cos \theta = 0.50 \text{ рад}^{-1}$. Из данных наблюдений при $\bar{n} = 41.1 \pm 2.9$, $N = 512$, $\theta = 10^\circ$ имеем близкое значение — $0.46 \pm 0.03 \text{ рад}^{-1}$.

Долготное распределение вероятности падения космического тела, как это следует из соотношения (1), имеет вид

$$p(\lambda) d\lambda = \frac{1}{2} p(\lambda, \theta) d\lambda. \quad (4)$$

С учетом (4) число падений в интервале долгот от λ_1 до λ_2 составляет

$$n = \frac{N}{2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} p(\lambda, \theta) d\lambda.$$

При $\theta = 20^\circ = \pi/9$, $N = 512$ имеем расчетные значения $n = N/18 = 28.4$, а плотность вероятности $n/(N \cos \theta) = 1/(2 \cos \theta) = 0.159 \text{ рад}^{-1}$. Наблюдения дали $n = 28.4 \pm 1.4$, $n/(N \cos \theta) = 0.159 \pm 0.008 \text{ рад}^{-1}$, т.е. очень близкое значение.

Распределение по скорости. В работе предпринята попытка аппроксимации зависимости числа событий от модуля скорости космических тел в интервале скоростей 11...49 км/с в виде

$$n(v) = a(v - v_0)^2 \exp[-b(v - v_0)],$$

где $a = 7.5073$, $b = 0.3766$, $v_0 = 9.193 \text{ км/с}$. Из рис. 5 видно, что космические тела, чаще всего, имели скорость 11...19 км/с. Из рис. 5 также следует, что приведенная аппроксимация не описывает тела со скоростью $v > 30 \text{ км/с}$.

Распределение по массам. Распределение числа падений по массам имеет максимум. Его возникновение отчасти связано с конечной чувствительностью спутниковых датчиков. При $E_{\min} = 0.3 \text{ ТДж}$ минимальная масса m_{\min} метеороида, который может быть обнаружен средствами НАСА, составляет 0.2...5 т при $v = 60...11 \text{ км/с}$ соответственно. Видно, что наиболее вероятное значение массы (около 10 т) превышает $m_{\min} = 0.2...5 \text{ т}$. Это позволяет предположить, что распределение метеороидов по массам действительно не является монотонным. Если это так, то приведенные в работах [3, 9, 11] монотонные аппроксимации нуждаются в уточнениях.

Если же исключить из рассмотрения массы $m > 4 \text{ т}$, то справедлива следующая степенная аппроксимация:

$$\lg n = a \lg m + b,$$

где $a = 0.45$, $b = 1.64$. Значения коэффициентов a и b заметно отличаются от коэффициентов в работах [3, 9, 11].

Частота падений космических тел. Представляет определенный интерес оценка количества вторжений космических тел в атмосферу над Украиной. Исходя из соотношения (1), получим, что за $T = 23$ года число падений

$$n = \frac{N \cos^2 \theta}{4}$$

При средней для территории Украины широте $\theta = 46^\circ$, $\theta = 7^\circ$,

15° имеем $n = 1.24$ и $n/T = 5.38 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$. Средний интервал между двумя падениями составляет около 18.6 года. Каждый житель Украины в течение своей жизни может стать свидетелем трех падений метеороидов метрового размера. Средняя высота вспышек составляет z_r ,

30...40 км. Вспышка в открытой местности может наблюдаться в радиусе $r = (2Rz_r)^{1/2}$, где $R = 6400$ км. При этом $r = 620...715$ км.

Наиболее вероятная начальная кинетическая энергия космического тела, которое может вторгнуться в атмосферу над территорией Украины, составляет 0.1...1 кт ТНТ. Не следует ожидать заметных последствий от падения таких тел. Если же $E = 3$ кт ТНТ, последствия могут быть не только ощутимыми, но и катастрофическими [6].

Число падений космических тел от их начальной кинетической энергии в интервале 0.1...33 кт ТНТ аппроксимировано законом $n = C/E^a$, или

$$\lg n = a \lg E + b, \quad b = \lg C, \quad (5)$$

где $a = 0.78 \pm 0.03$, $b = 1.2083 \pm 0.0266$ — показатель степени, E выражено в кт ТНТ. Полученное соотношение целесообразно сравнить с полученными ранее аппроксимациями [3, 9, 11]. Например, по данным [9] $a = 0.90 \pm 0.03$, $b = 0.5677 \pm 0.015$. В нашем случае эти коэффициенты заметно отличаются.

Представляют ли опасность для жителей Земли падения метеороидов метрового размера? Как показали наблюдения последствий падения Витимского болида над тайгой, космические тела с энергией $E = 3$ кт ТНТ и диаметром около 3 м способны вызвать заметное повреждение леса или построек, а значит, и травмировать людей. Тела, подобные Каранкасскому метеороиду, диаметром около 2 м способны привести к куда более серьезным последствиям [8].

Из данных наблюдений следует, что число космических тел, имевших энергию $E = 3$ кт ТНТ, составляло $n = 27$. При этом кумулятивная относительная частота $p_1 = n/N = 0.039$. За год на всем земном шаре в среднем наблюдалось $\bar{n} = 30.1 \pm 8.5$ событий. Тогда кумулятивное число падений метеороидов с $E = 3$ кт ТНТ за год равно $n_1 = \bar{n} p_1$, т. е. $n_1 = 0.84...1.51 \text{ год}^{-1}$. Средний интервал времени между падениями $T_1 = 0.7...1.2$ года. Число падений на сушу, относительная площадь которой составляет около 30 % от общей площади S поверхности Земли, $n_2 = 0.25...0.45 \text{ год}^{-1}$, а интервал времени $T_2 = 2.2...4$ года. Если при-

нять, что площадь населенных пунктов составляет 3 % от S , то ежегодное число падений $n_3 = 0.025 \dots 0.045 \text{ год}^{-1}$, а интервал времени равен $T_3 = 22 \dots 40$ лет.

Для Украины относительная площадь равна

$$s = \cos^2 \bar{\varphi} = 0.022,$$

где $\bar{\varphi} = 46^\circ$ с. ш., $\varphi = 7^\circ$, 15° . Тогда $n_2 = n_1 s = 0.018 \dots 0.033$, а $T_2 = 30.1 \dots 55.1$ года.

Таким образом, в течение 30...55 лет, т. е. за время жизни одного поколения, на территории Украины можно ожидать 1-2 падений метеороидов метрового размера с кинетической энергией не менее 3 кт ТНТ, способного вызвать разрушения построек или насаждений и травмировать людей.

ВЫВОДЫ

1. В среднем ежегодно на Землю падает 30.1 ± 1.8 космических тел метрового размера. В отдельные годы их число может уменьшаться примерно вдвое или увеличиваться примерно в полтора раза.

2. Средняя частота падений метеороидов над Украиной составляет около 0.054 год^{-1} . Средний интервал времени между двумя событиями близок к 18.6 годам. При высоте вспышки 30...40 км падение тела может наблюдаться на расстояниях до 600...700 км.

Средняя частота падений метеороидов с энергией не менее 3 кт ТНТ над Украиной, способных вызвать разрушения и травмирование людей, составляет около $0.018 \dots 0.033 \text{ год}^{-1}$. При этом средний интервал времени между двумя падениями близок к 30.1...55.1 годам.

3. Распределение числа событий по долготам является практически равномерным. При этом расчетная относительная плотность событий равна $1/(2\pi) \text{ рад}^{-1} = 0.159 \text{ рад}^{-1}$, а полученная из данных наблюдений — $0.159 \pm 0.008 \text{ рад}^{-1}$. В то же время аналогичное распределение по широтам пропорционально косинусу географической широты. После исключения широтной зависимости расчетная плотность событий равна $1/2 \text{ рад}^{-1}$, что в 2 раза больше аналогичной плотности для долготного распределения. Определение плотности событий из наблюдательных данных дало близкий результат $0.46 \pm 0.03 \text{ рад}^{-1}$.

4. Распределение числа падений космических тел на Землю по начальным кинетическим энергиям в диапазоне 0.1...440 кт ТНТ в среднем описывается степенным законом, что качественно подтвердило полученные ранее закономерности, установленные по меньшему массиву данных. Количественно зависимости заметно различаются.

5. Распределение числа падений космических тел на нашу планету по скоростям в интервале 11...30 км/с может быть аппроксимировано зависимостью $n = a(v - v_0)^2 \exp[-b(v - v_0)]$. При этом наиболее вероятное значение скорости составляло около 14.5 км/с, а $v_0 = 0.4$ км/с.

6. Распределение числа вторжений метеороидов в атмосферу Земли по массам может быть аппроксимировано нормальным и степенным законами или полиномом третьей степени.

7. Распределение высот максимального свечения в интервале высот 22...55 км описывается нормальным законом со средней высотой 36.7 ± 0.5 км и 7.2 км. Этот закон относится к каменным метеороидам малой и средней прочности. Космические тела малой прочности (кометного типа), которых было около 7.0 %, высвечивались в диапазоне высот 55...74 км. Высота максимального свечения для тел повышенной прочности составляла 15...24 км. Их доля составляла около 6.6 % от всех наблюдаемых тел.

8. Корреляционная зависимость «начальная масса — начальная кинетическая энергия» концентрировалась около прямой линии, описывающей линейную зависимость. Незначительные отклонения от этой зависимости связаны с вариациями скорости космических тел.

9. Корреляционные диаграммы «высота области максимального свечения — начальная кинетическая энергия», «высота области максимального свечения — начальная скорость» и «высота области максимального свечения — квадрат начальной скорости» оказались сильно размытыми. Это обусловлено разными размерами тел, разной плотностью вещества, разными углами входа в атмосферу и т. д.

1. Динамические процессы в геосферах. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. Москва.: ГЕОС. 2014. 160 с.
2. Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова — М.: ИКЦ «Академкнига». 2005. 310 с.
3. Кручиненко В. Г. Математично-фізичний аналіз метеороного явища. Київ: Наукова думка. 2012. 294 с.
4. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. Харьков.: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2012. 556 с.
5. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*. 2013. **8**. С. 23—40.
6. Язев С. А., Антипин В. Г. По следам Витимского болида. *Земля и Вселенная*. 2004. № 5. С. 59—72.
7. Beech M., Steel D. On the definition of the term «meteoroid». *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* 1995. **36**. P. 281—284.
8. Brown P., ReVelle D. O., Silber E. A., et al. Analysis of a crater-forming meteorite impact in Peru. *J. Geophys. Res.* 2008. 113, E09007, doi: 10.1029/2008JE003105.
9. Brown P. G., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Worden S. P. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*. 2002. **420**, 6913. P. 294—296.
10. Cepelch Z. Influx of interplanetary bodies onto Earth. *Astron. and Astrophys.* 1992. **263**. P. 361—366.
11. Nemchinov I. V., Svetsov V. V., Kosarev I. B., et al. Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors. *Icarus*. 1997. **130**. P. 259—274.
12. Oberst J., Molau S., Heinlein D., et al. The «European Fireball Network»: Current status and futures prospects. *Meteorit. Planet. Sci.* 1998. **33**. P. 49—56.
13. Popova O., Borovička J., Hartman W. K., et al. Very low strength of interplanetary meteoroids and small asteroids. *Meteorit. Planet. Sci.* 2011. **46**. P. 1525—1550.

14. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 2013. **342**. P. 1069—1073.
15. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. 145 p.
16. ReVelle D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic gravity waves Near-Earth Objects / Ed. J. Remo. *Ann. Acad. Sci.* 1997. **822**. P. 284—302.
17. Rubin A. E., Grossman J. N. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteorit. Planet. Sci.* 2010. 45, N 1. P. 114—122.
18. Tagliaferri E., Spalding R., Jacobs C., et al. Detection of meteoroid impacts by optical sensors in Earth orbit hazards due to comets and asteroids / Ed. T. Gehrels. Tucson; London: Univer. Arizona Press. 1994. P. 199—220.

Статья поступила в редакцию 12.09.2017

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАМЕТРІВ МЕТЕОРОЇДІВ В АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ

За даними супутникових спостережень НАСА, виконаних в 1994—2016 рр., оцінено статистичні характеристики метеороїдів з кінетичною енергією від 0.1 до 440 кт ТНТ. Побудовано та проаналізовано розподіли кількості падаючих метеороїдів від значень їхньої початкової кінетичної енергії, початкової швидкості, початкової маси, висоти та географічних координат області максимального свічення, а також року падіння. Побудовано кореляційні залежності «маса — початкова кінетична енергія», «висота максимального свічення — початкова кінетична енергія» та «висота максимального свічення — початкова швидкість» (квадрат початкової швидкості).

Ключові слова: метеороїди, статистичні характеристики, основні параметри, апроксимаційні залежності.

L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF DATA ON METEORIODS IN THE TERRESTRIAL ATMOSPHERE

NASA satellite-based observations collected during 1994—2016 have been used to estimate the statistical characteristics of meteoroids in the 0.1 — 440 kilotons TNT kinetic energy range. The data on the celestial bodies entering the Earth's atmosphere were binned with regard to their initial kinetic energy, initial velocity, initial mass, altitude and geographic coordinates of maximum luminosity, and the year of entering the atmosphere, and the corresponding histograms have been computed and analyzed. The plots showing correlations between the mass — initial kinetic energy, altitude of maximum luminosity — initial kinetic energy pairs have been made and altitude of maximum luminosity — initial velocity (initial velocity square).

Keywords: meteoroids, statistical characteristics, main parameters, fitted dependences.