

УДК 523.681

ЧАСТОТА ПАДЕНИЙ МЕТЕОРИТОВ И БОЛИДОВ

© 2020 г. А. Е. Дудоров^{a, b}, О. В. Еретнова^{a, *}

^aЧелябинский государственный университет, Челябинск, Россия

^bУральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: eretnova@csu.ru

Поступила в редакцию 18.02.2019 г.

После доработки 28.10.2019 г.

Принята к публикации 01.11.2019 г.

Проведен статистический анализ 926 зарегистрированных падений метеоритов с 1860 по 2017 г. Построенное распределение метеоритов по массам аппроксимируется логнормальным законом. Показано, что средний интервал между регистрациями падений метеоритов, подобных метеориту Chelyabinsk, составляет ~25 лет. Автокорреляционным методом исследована зависимость числа падающих за год метеоритов от времени. Обнаружена (10–11)-летняя периодичность у группы Н-хондритов, железных и железокремнистых метеоритов на интервале с 1860 по 1960 г. Распределения числа зарегистрированных падений метеоритов по годам, месяцам и времени суток сопоставлены с аналогичными распределениями для болидов. Максимальное число болидов приходится на 2005 и 2015 годы, что позволяет предположить наличие (10–11)-летнего цикла в распределении числа болидов по годам. Отмечено, что большая часть падений метеоритов приходится на интервал времени от полудня до полуночи и на весенне-летний период. Число регистрируемых болидов не зависит ни от времени суток, ни от времени года.

Ключевые слова: метеориты, болиды, распределение по массам, распределение по годам, месяцам, времени суток, периодичность падения метеоритов

DOI: 10.31857/S0320930X20030032

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно на Землю выпадает несколько десятков тысяч тонн космического вещества. В основном, это пыль и мелкие метеороиды ($d < 0.5$ м), сгорающие в атмосфере и наблюдаемые как метеоры (Астероидно-кометная опасность, 2010). Метеороиды размером от 0.5 до 10 м полностью или частично разрушаются в атмосфере и наблюдаются как болиды.

Разрушение в нижних слоях атмосферы тел диаметром от 10 до 50 м сопровождается взрывом, по мощности сравнимым со взрывом атомной бомбы. При ударе фрагментов о поверхность Земли могут образовываться кратеры. Метеорит Челябинск является примером падения подобного тела. Энергия его взрыва оценивается примерно в 500 килотонн (Ророва и др., 2013; Челябинский суперболид, 2016; Chelyabinsk Superbolide, 2019). В населенных пунктах Челябинской области воздушной ударной волной были повреждены здания, в основном окна, дымоходы, вентиляция. Зарегистрировано более тысячи пострадавших от осколков разлетевшихся стекол. Энергия взрыва небесного тела размером $50 < d < 100$ м составляет десятки мегатонн, разрушения происходят на

площади в тысячи квадратных километров, что соответствует локальной катастрофе. Примерами подобных падений являются Тунгусское и Аризонское события. Космические тела с размерами более 100 м сталкиваются с Землей не чаще, чем раз в 5–10 тыс. лет (Астероидно-кометная опасность, 2010; Brown и др., 2013). Тела таких размеров достигают поверхности планеты с космическими скоростями, практически не разрушаясь в атмосфере. При их ударе о поверхность Земли возникают кратеры диаметром в 10–20 раз больше размера упавшего тела. При падении в океан образуются цунами. Выделившаяся при этом энергия вызывает пожары и землетрясения, которые могут охватить миллионы квадратных километров. Катастрофа такого рода считается региональной. Если размеры тела превышают километр, последствия столкновения имеют характер глобальной катастрофы. В настоящее время подобные события определяются с помощью регистрации астероидов (passc.net/EarthImpactDatabase/).

В Meteoritical Bulletin Database (www.lpi.usra.edu/meteor/) представлены данные о зарегистрированных падениях метеоритов на Землю с 1801 г. База данных регулярно пополняется и об-

новляется. Статистический анализ данных о падениях за большой промежуток времени позволяет выявить закономерности в распределении метеоритов по типам, массам, времени падения и оценить частоту падения космических тел различных размеров.

Не все вошедшие в атмосферу Земли метеороиды регистрируются как метеориты. Часть из них полностью сгорает в атмосфере, часть падает в озера, моря и океаны. Лишь малая часть упавших на сушу метеоритов может быть найдена. В последние десятилетия появилась возможность регистрации болидов с помощью болидных сетей, инфразвуковых станций и спутников. Среднее число регистрируемых болидов почти в 5 раз превышает число метеоритов. Данные о 714 болидах с 1995 г., энергия которых превышает 0.07 килотонн, приведены на сайте NASA (cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/). Для тела, движущегося со скоростью 20 км/с и плотностью 3 г/см³, энергия 0.07 кт соответствует диаметру ~0.9 м и массе ~1.1 т.

В работе Брауна (Brown и др., 2013) проведена оценка частоты падения космических тел в зависимости от их диаметра на основе данных о болидах. Показано, что тела диаметром ~20 м (подобные метеориту Chelyabinsk) падают ~1 раз в 30 лет. Дудоров и Еретнова (2014) получили аналогичный результат на основе данных о зарегистрированных падениях метеоритов с 1910 по 2013 гг.

Hughes (1981) исследовал выборку зарегистрированных падений метеоритов с 1700 по 1975 г. В распределении числа каменных метеоритов по массам он нашел максимум в интервале $M = (2-4)$ кг. Дудоров и Еретнова (2014) показали, что распределение метеоритов по массам, падения которых зарегистрированы с 1910 по 2013 г., описывается логнормальным законом, и максимум в распределении приходится на интервал масс $M = (2.5-4.0)$ кг.

Алексеев (1988) провел анализ числа зарегистрированных падений каменных метеоритов (Н- и L-хондритов) в интервале с 1800 по 1983 г. У Н-хондритов он обнаружил колебания числа падений с периодом 10.5 ± 0.5 лет, коррелирующие с 11-летними вариациями числа солнечных пятен.

Hughes (1981) и Алексеев (1988) отметили, что с апреля по сентябрь регистрируется больше метеоритов по сравнению с другим полугодием. По их мнению, наиболее вероятная причина неравномерности распределения падений метеоритов по месяцам года — сезонный фактор. Весной и летом условия для наблюдения падений метеоритов наиболее благоприятны в северном полушарии, где регистрируется около 88% падений метеоритов (Алексеев, 1988).

В ряде работ (Wetherill, 1968; Hughes, 1981; Алексеев, 1988) отмечается преобладание числа регистрируемых падений в дневное время, так как днем подавляющее большинство людей бодрствует. Согласно Hughes (1981), с 12 до 18 ч наблюдается почти в два раза больше падений, чем с 6 до 12 ч. Алексеев (1988) пришел к выводу, что около 70% падений всех хондритов приходится на послеполуденное время.

Дудоров и Еретнова (2014) показали, что некоторые максимумы в распределении числа зарегистрированных падений метеоритов по годам близки к минимумам солнечной активности (1933–1934, 1976–1977 гг. и др.). Авторы высказали предположение о том, что в годы максимума солнечной активности усиленный солнечный ветер отклоняет метеороиды от первоначальных орбит и таким образом влияет на частоту их падения на Землю. Для проверки этого предположения необходимо исследование периодичности в распределении числа падений метеоритов по годам.

В работе Hughes (1981) отмечено, что в 19 веке число регистрируемых падений возросло. За промежуток времени 20 лет в начале 19 века было зарегистрировано 48 метеоритов, в середине — 85, а в конце 19 века — уже 100 метеоритов. Это связано с тем, что в 19 веке быстро росла численность наблюдателей, а также уровень их культуры.

В настоящей работе мы расширили исследуемую выборку зарегистрированных падений метеоритов и используем данные о 926 падениях с 1860 по 2017 г. На основе этой выборки построено распределение метеоритов по массам, оценивается среднегодовой поток метеоритного вещества на Землю. Детально исследуется периодичность распределения числа регистрации падений метеоритов по годам автокорреляционным методом. Оценивается частота регистрации падения метеоритов, подобных метеориту Chelyabinsk. Проводится сравнение распределений регистрации метеоритных падений по месяцам года и времени суток с аналогичными распределениями для болидов, регистрируемых болидными сетями, спутниками и инфразвуковыми станциями.

ВЫБОРКА МЕТЕОРИТОВ

В работе использованы данные о 926 зарегистрированных падениях метеоритов (далее — падения метеоритов) с 1860 по 2017 год из Meteoritical Bulletin Database (www.lpi.usra.edu/meteor/) и работы Buchwald (1975) (см. Дудоров, Еретнова, 2019). Кроме того, дополнительные сведения о метеоритах, упавших на территории бывшего СССР, взяты с сайта Лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН (www.meteorites.ru/) и из работ Кулика (1941а; 1941б). В Приложении метеориты

Таблица 1. Распределение зарегистрированных падений метеоритов по типам и группам

Тип		Число падений	%	Группа	Число падений	%	% из Hughes (1981)
Каменные	Хондриты	785	84.9	L	342	36.9	92.5
				H	308	33.5	
				LL	77	8.3	
				Углистые	41	4.4	
				Др. группы	2	0.2	
				Группа не определена	15	1.6	
	Ахондриты	74	7.8				
	Неклассиф. каменные	11	1.2				
Железные		45	4.9				5.7
Железокаменн.		10	1.1				1.3
Аномальные		1	0.1				0.5

разделены по типам и группам для проведения статистических исследований. Для каждого метеорита указаны название, страна и географические координаты места падения, дата и время падения, найденная масса метеорита, его тип. О наиболее известных метеоритах в Приложении приведены более детальные сведения и литература.

В табл. 1 представлено распределение метеоритов по типам и группам (Weisberg и др., 2006). Все метеориты подразделяются на три типа: каменные, железные и железокаменные. Табл. 1 показывает, что каменные метеориты составляют около 94% от всех метеоритов, падения которых наблюдались. Среди каменных метеоритов ~85% относятся к хондритам, около 8% – к ахондритам. Наиболее многочисленными среди хондритов являются группы L- и H-хондритов (~40 и 33.5%, соответственно). Деление железных, железокаменных метеоритов и ахондритов на группы мы не приводим ввиду их малочисленности. Более подробное описание классификации метеоритов приведено в Приложении. В последнем столбце табл. 1 для сравнения приведено процентное соотношение типов метеоритов из работы Hughes (1981). Он исследовал статистику 858 падений с 1700 по 1975 г.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТЕОРИТОВ ПО МАССАМ

В большинстве случаев метеороид при падении распадается на фрагменты. Под массой метеорита будем понимать сумму масс найденных фрагментов, данные о которых известны. На рис. 1

приведена гистограмма распределения метеоритов по логарифму масс. Ширина столбца гистограммы составляет $\Delta \lg M = 0.2$, что соответствует изменению массы в 1.58 раза при переходе к соседнему столбцу. Согласно рис. 1, наибольшее число метеоритов приходится на интервал $\lg M = 0.2-0.8$, что соответствует массе $M = (1.6-6.3)$ кг. Этот интервал масс согласуется с найденными в работах Hughes (1981), Дудорова и Еретновой (2014). Построенную по наблюдательным данным гистограмму в интервале $\lg M = -1.8-2.6$ (в него попали 902 метеорита из 926) можно аппроксимировать логнормальным распределением (Агекян, 1974):

$$f(\lg M_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(\lg M_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где $f(\lg M_i)$ – функция масс, μ – логарифм наиболее вероятного значения массы, σ – среднеквадратичное отклонение от μ . Для нашей выборки $\mu = 0.43 \pm 0.06$, $\sigma = 0.88 \pm 0.01$, наиболее вероятное значение массы $M_{\text{вер}} = 2.7$ кг.

По функции масс (1) можно определить число метеоритов N_i в интервале масс $\Delta \lg M_i$:

$$N_i = f(\lg M_i) \times 902 \Delta \lg M_i. \quad (2)$$

На рис. 1 аппроксимация распределения числа падений метеоритов по массам изображена сплошной линией.

Согласно теоретическим представлениям, распределение по массам (или размерам) фрагментов, образованных в результате дробления, описывается логнормальным законом (Колмого-

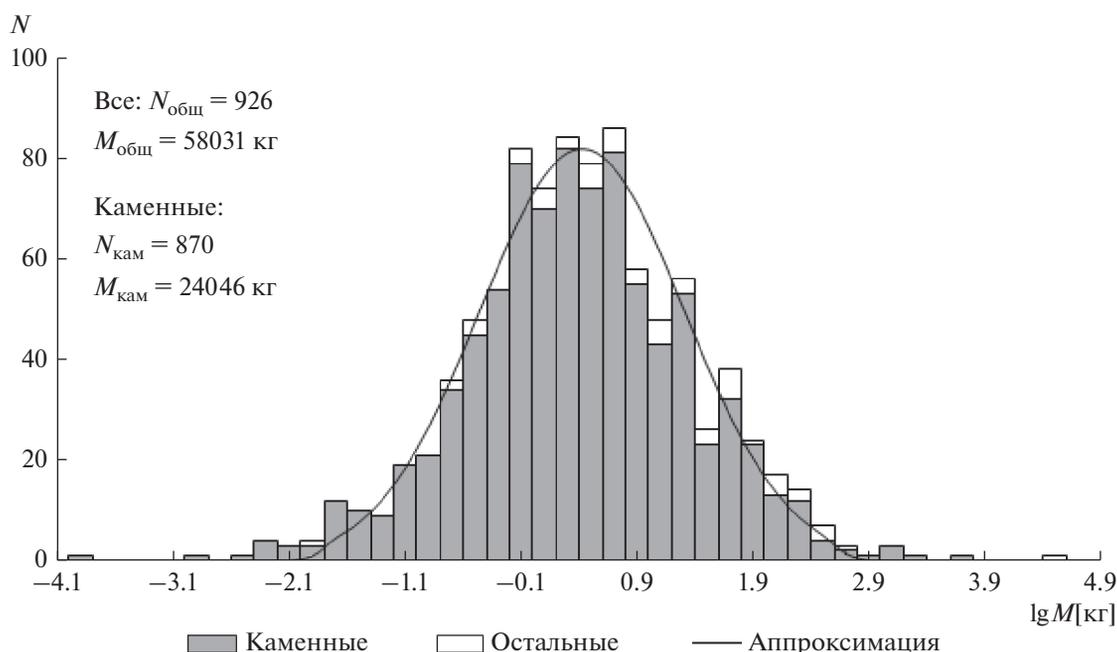


Рис. 1. Распределение по массам метеоритов, падения которых зарегистрированы с 1860 по 2017 год. Сплошная линия – аппроксимация гистограммы логнормальным распределением.

ров, 1941). В работах Бадюкова и Дудорова (2013), Badyukov, Dudorov (2013), Бадюкова и др. (2014) показано, что распределение по массам фрагментов метеорита Chelyabinsk аппроксимируется логнормальным законом. Метеориты образуются в результате дробления метеороидов, которые являются продуктами столкновительной эволюции и фрагментации астероидов. Распределение астероидов по массам является степенным (см. Dohnanyi, 1969; Durda, Dermott, 1997; Rubincam, 2018). Число ударных кратеров на Луне, где нет атмосферы, убывает с ростом их диаметра по степенному закону, показатель степенной функции принимает значения от 1.5 до 4 в зависимости от

размера кратеров (Иванов, 2018; Ivanov, 2018). Правую ветвь гистограммы на рис. 1 можно аппроксимировать степенным законом. Уменьшение числа регистрируемых падений метеоритов в области $\lg M < 0.4$ можно объяснить тем что: 1) небольшие метеороиды могут сгорать в атмосфере; 2) чем меньше масса (и размер) метеорита, тем меньше вероятность найти его фрагменты. В данном случае логнормальный закон является наиболее подходящей аппроксимацией гистограммы распределения числа метеоритов по массам, построенной по наблюдательным данным.

Если число объектов возрастает с уменьшением массы по степенному закону, то их распределение по массам можно представить кумулятивной функцией в виде:

$$N_m = N_0 M^{-s}, \quad (3)$$

где N_0 – число объектов с массой 1 кг, N_m – число объектов массы M и большей (кумулятивное число), s – показатель степени (масс-индекс) (Бронштэн, 1987).

В нашем случае это можно сделать для интервала $\lg M = 0.2-2.8$. На рис. 2 представлена кумулятивная зависимость $\lg N_m - \lg M$ для исследуемых метеоритов. Аппроксимируя ее линейной зависимостью:

$$\lg N_m = (3.05 \pm 0.29) - (0.73 \pm 0.08) \lg M, \quad (4)$$

получим $N_0 = 10^{3.05 \pm 0.29}$, $s = 0.73 \pm 0.08$.

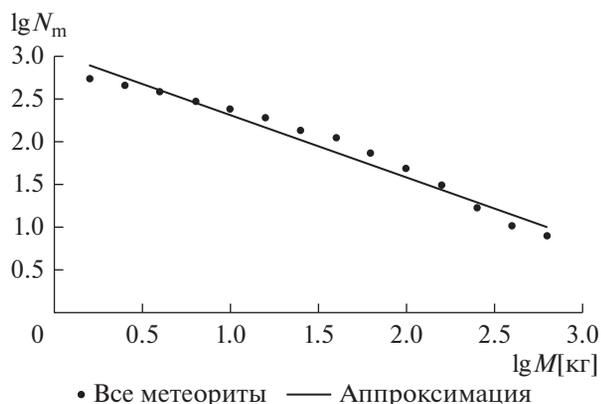


Рис. 2. Логарифмическая зависимость кумулятивного числа метеоритов N_m от их массы M .

Hughes (1981) для каменных метеоритов в интервале $\lg M = 0.3-2.2$ нашел значение масс-индекса $s = 0.80 \pm 0.04$. Halliday и др. (1989) получили значение $s = 0.82$. для метеоритов с массой от 1 до 100 кг. Дудоров и Еретнова (2014) определили величину масс-индекса $s = 0.72 \pm 0.09$ в интервале $\lg M = 0.4-2.8$, используя выборку падений метеоритов с 1910 по 2013 гг. В работе (Hughes, 1981) отмечено, что теоретическое значение масс-индекса для тел, образованных в результате фрагментации, равно 0.8.

Положив в (3) $N_m = 1$ и подставив N_0 и s из (4), получим максимально возможную массу метеорита для исследуемой выборки $M_{\max} \approx 15$ т. Среди метеоритов, падения которых наблюдались с 1860 по 2017 гг., наибольшую массу имеют метеориты Kirin (4 т) и Sikhote-Alin (31 т). Метеорит Sikhote-Alin является железным метеоритом, такие метеориты при движении в атмосфере теряют гораздо меньше вещества чем каменные. В нашей выборке подавляющее число метеоритов являются каменными.

Используя кумулятивное распределение, оценим поток метеоритного вещества на Землю по падениям, зарегистрированным с 1860 по 2017 гг.:

$$M_{\text{общ}} = \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} dN_m M dM = -s N_0 \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} M^{-s} dM = \frac{s N_0}{s-1} (M_{\min}^{1-s} - M_{\max}^{1-s}). \quad (5)$$

Подставив все значения в (5), найдем $M_{\text{общ}} \approx 41$ т. Левая часть гистограммы на рис. 1 не будет вносить существенный вклад в оценку массы метеоритного вещества, так как масса метеоритов исследуемой выборки с $M < 1$ кг равна 115 кг, что составляет $\approx 0.2\%$ от общей массы. Среднегодовой поток метеоритного вещества на Землю, найденный по зарегистрированным падениям, составит $M_{\text{год}} \approx 0.26$ т/г.

Для построения распределения метеоритов по массам (рис. 1) использовались данные об известных массах найденных фрагментов. Для найденных фрагментов метеорита Chelyabinsk в Meteoritical Bulletin Database (www.lpi.usra.edu/meteor/) указана масса ~ 1000 кг. Это фрагменты, находящиеся в метеоритных коллекциях университетов, научных институтов, музеев. Примерно столько же находится в частных коллекциях и у населения, поэтому общая масса фрагментов может быть в 2–3 раза больше указанной (Челябинский суперболид, 2016; Chelyabinsk Superbolide, 2019). Предполагая, что для каждого метеорита известная найденная масса фрагментов в ~ 3 раза мень-

ше массы метеорита, получим $M_{\text{общ}} \approx 120$ т и $M_{\text{год}} \approx 0.78$ т/г.

С 1860 по 2017 гг. зарегистрировано 926 падений метеоритов на сушу. Это соответствует ~ 6 падениям в год или ~ 0.04 падениям в расчете на 10^6 км². В развитых странах с большой плотностью населения число регистраций метеоритов значительно больше. По данным нашей выборки (см. Дудоров и Еретнова, 2019) для стран Европы (Германия, Франция, Великобритания, Испания) оно составляет в среднем 0.3 падения в год на 10^6 км², для Японии – 0.6. Экстраполируем эти значения на всю поверхность Земли, две трети которой занимают моря и океаны. Тогда масса метеоритного вещества оказывается в 11–22 раз больше, $M_{\text{общ}} \approx (1.3-2.6) \times 10^3$ т и $M_{\text{год}} \approx (8.2-16.4)$ т/г.

В настоящей статье показано (см. разделы: “Распределение числа падений метеоритов и болидов по месяцам”, “Распределение числа падений метеоритов и болидов по времени суток”), что с октября по март регистрируется в ~ 1.4 раза меньше метеоритов, чем с апреля по сентябрь. В ночное время число наблюдаемых падений метеоритов в ~ 1.8 раз меньше, чем в дневное. Число зарегистрированных болидов не зависит от времени года и практически одинаково в дневное и ночное время. Учитывая эти поправки, окончательно получаем массу метеоритного вещества, выпавшего с 1860 по 2017 гг., $M_{\text{общ}} \approx (2-4) \times 10^3$ т и среднегодовой поток, $M_{\text{год}} \approx (13-26)$ т/г.

Bland и др. (1996) радиоуглеродным методом определили земной возраст 98 метеоритов, найденных в местах их скопления (Сахара, равнина Налларбор в Австралии, шт. Нью-Мексико США). По этим данным они получили поток ≈ 50 т/г на поверхность Земли для метеоритов с массой от 10 г до 1000 кг. Полученное значение потока имеет значительную погрешность из-за трудностей в оценке возраста найденных фрагментов, отождествлении фрагментов одного и того же метеорита, малой площади исследования.

Только для 15 каменных метеоритов надежно определена доатмосферная (начальная) масса метеороида (Popova и др., 2011; 2013; Jenniskens и др., 2012). Для них доля суммарной массы найденных фрагментов, данные о которых известны, составляет от 10^{-1} до 10^{-4} от массы метеороида. Этот коэффициент учитывает абляцию и массу не найденных фрагментов. В нашей выборке 94% составляют каменные метеориты. Взяв предельное значение коэффициента 10^{-4} (метеориты Chelyabinsk, Sutter’s Mill, Almahata Sitta, Tagish Lake), получим среднегодовой поток метеороидного вещества, попадающего в атмосферу Земли,

Таблица 2. Зарегистрированные падения метеоритов, подобных метеориту Chelyabinsk

Название, страна	Дата падения, тип	Найденная масса (т)	Масса метеороида (т)	Характерный размер (м)	Номер в Приложении
Tsarev, Россия	06.12.1922 хондрит	1.125	11250	18.8	516
Norton County, США	18.02.1948 ахондрит	1.080	10800	18.6	867
Kunya-Urgench, Туркмения	20.06.1998 хондрит	1.100	11000	18.7	263
Chelyabinsk, Россия	15.02.2013 хондрит	~1	12000–13000	18–20	761

$M_{\text{год}}^{\text{атм}} \approx (4.3-8.6) \times 10^4$ т/г. В работе Drolshagen и др. (2017) дана оценка полной массы космического вещества (пыль и тела диаметром до 1 км), попадающего в атмосферу Земли, $\approx 2 \times 10^4$ т/г.

Следовательно, поток метеоритного вещества, найденный по зарегистрированным падениям, составляет $\sim 10^{-5}$ от общего потока космического вещества. Предполагая, что имеющаяся выборка падений метеоритов статистически повторяет характеристики общего потока, мы используем ее для исследования частоты падения небольших космических тел.

ЧАСТОТА ПАДЕНИЙ МЕТЕОРИТОВ, ПОДОБНЫХ ЧЕЛЯБИНСКОМУ

В табл. 2 приведены характеристики метеоритов, подобных Челябинскому. Данные о суммарной массе найденных фрагментов метеоритов взяты из Meteoritical Bulletin Database (www.lpi.usra.edu/meteor/). Для метеорита Chelyabinsk данные о начальной массе и размере метеороида получены на основе оценки энергии взрыва по инфразвуковым данным (Ророва и др., 2013). Для остальных метеоритов доатмосферную массу и размер оценим по известной найденной массе. Как было отмечено выше, для каменных метеоритов предельное значение доли суммарной массы найденных фрагментов, данные о которых известны, составляет 10^{-4} от массы метеороида. Под характерным размером каждого метеороида понимается диаметр шара соответствующей массы и плотности. Для каменных метеоритов средняя плотность равна $\bar{\rho} = 3.2$ г/см³ (www.meteorites.ru/). С 1922 по 2017 год зарегистрировано 4 падения метеорита, подобных метеориту Chelyabinsk. Следовательно, средний интервал между падениями подобных метеоритов на Землю, равен ~ 25 годам. Эта оценка близка к значению, полученному Brown и др. (2013).

С 1860 по 2017 год наблюдалось 16 падений метеоритов с массой от 168 до 565 кг (см. Дудоров, Еретнова, 2019), что соответствует начальным диаметрам от 10 до 15 м. Это равносильно частоте падения раз в 10 лет.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПАДЕНИЙ МЕТЕОРИТОВ И БОЛИДОВ ПО ГОДАМ

На рис. 3 изображены распределение числа регистраций падений метеоритов по годам (гистограмма) и среднегодовые числа Вольфа (сплошная линия) (www.solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml). Рис. 3 показывает, что в распределении числа падений метеоритов по годам выделяются чередующиеся максимумы и минимумы. Некоторые максимумы числа падений метеоритов близки к минимумам солнечной активности: 1868, 1933–1934, 1976–1977 гг. и др. Исследуем распределение метеоритов по годам на наличие периодичности.

926 метеоритов, характеристики которых приведены в Приложении, разделены на три группы по содержанию железа в металлической фазе.

1. Группа NIR. Поскольку среди каменных метеоритов у N-хондритов самое большое содержание железа, находящегося в металлической фазе (12–20%) (Дьяконова и др., 1979), мы объединили их с железными (I) и железоканненными (R) метеоритами. В эту группу вошло 363 метеорита.

2. Группа L. Вторую большую группу (419 метеоритов) составили хондриты L и LL с содержанием железа от 5 до 12%.

3. Группа AC. Третья группа (115 метеоритов) — это ахондриты и углистые хондриты, у которых железа в металлической фазе менее 1%. Эту группу мы исключили из статистики, так как для нее среднее число падений в год меньше 1.

На рис. 4 точечными линиями изображены сглаженные кривые числа зарегистрированных падений метеоритов, полученные методом скользящей средней с интервалом усреднения 5 лет,

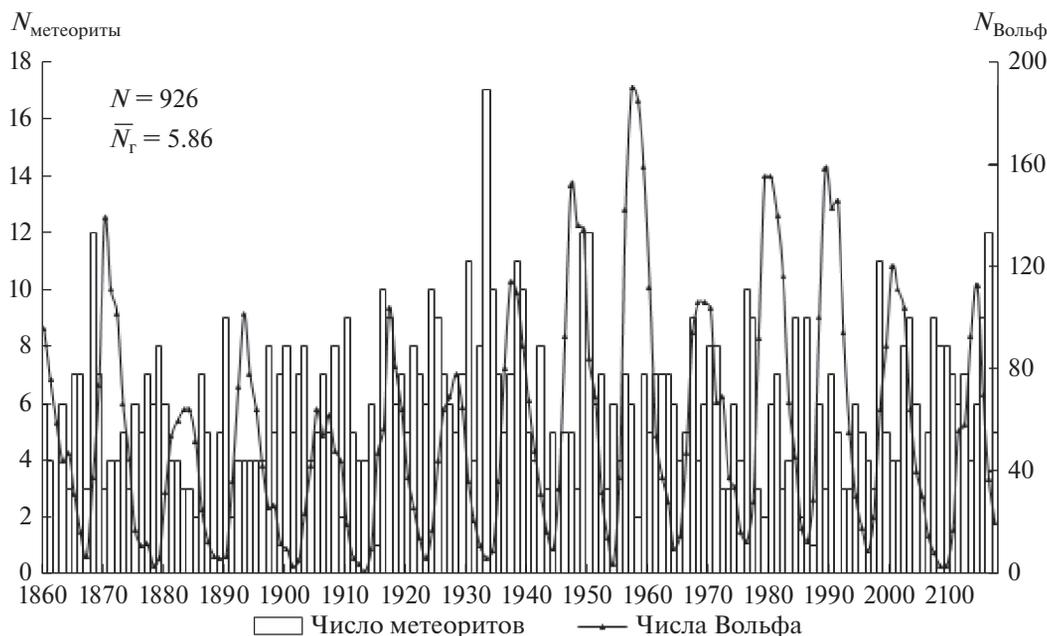


Рис. 3. Распределение числа зарегистрированных падений метеоритов по годам и среднегодовые числа Вольфа с 1860 по 2017 год. N – общее число метеоритных падений, \bar{N}_T – среднее число падений в год.

для группы HIR (рис. 4а) и группы L (рис. 4б). Сглаживание убирает мелкие флуктуации и облегчает выявление периодичности. Мы пробовали проводить сглаживание с интервалами 3, 5 и 7 лет. Интервал усреднения 5 лет оказался оптимальным.

Для изучения периодичности в распределении метеоритов по годам использован автокорреляционный метод (Крамер, 1975). Он позволяет исследовать взаимосвязь между исходным временным рядом и рядом, полученным путем сдвига исходного на определенный шаг по времени. В нашем случае это временной ряд числа падений метеоритов. Коэффициент автокорреляции вычисляется по формуле:

$$r_{t,t-T} = \frac{\overline{x_t x_{t-T}} - \bar{x}_t \cdot \bar{x}_{t-T}}{\sigma(x_t) \sigma(x_{t-T})}, \quad (6)$$

где \bar{x}_t – среднее значение исходного ряда (среднее число падений метеоритов в год); x_{t-T} – среднее значение ряда, полученного из исходного путем сдвига на шаг по времени T ; $\sigma(x_t)$, $\sigma(x_{t-T})$ – среднеквадратичные отклонения от средних значений для соответствующих рядов.

Коэффициент автокорреляции может принимать значения от -1 до 1 . Он будет близок к 1 , когда максимумы обоих рядов совпадают, и близок к -1 , когда максимумы первого ряда совпадают с минимумами второго.

На рис. 5 приведены значения коэффициентов автокорреляции для метеоритов групп HIR и L, упавших с 1860 по 1960 гг., в зависимости от шага по времени. Из рис. 5а следует наличие (10–11)-летней периодичности у метеоритов группы HIR с коэффициентом автокорреляции $r_{t,t-T} = 0.3$. У метеоритов группы L подобная периодичность отсутствует (см. рис. 5б), хотя распределение числа падений по годам является неравномерным (рис. 4б).

11-летняя цикличность присуща солнечной активности, уровень которой характеризуется числами Вольфа. Коэффициент автокорреляции для временного ряда среднегодовых чисел Вольфа равен $r_{t,t-T} = 0.8$. Вычислим коэффициент корреляции $r_{M,B}$ между временным рядом числа падений метеоритов для группы HIR и среднегодовыми числами Вольфа:

$$r_{M,B} = \frac{\overline{x_M x_B} - \bar{x}_M \cdot \bar{x}_B}{\sigma(x_M) \sigma(x_B)}. \quad (7)$$

На интервале с 1860 по 1920 год $r_{M,B} = -0.3$, с 1860 по 1960 год коэффициент корреляции равен $r_{M,B} = -0.15$. Это говорит о том, что существует слабая связь между максимумами числа падений метеоритов и минимумами солнечной активности.

Исследование периодичности в распределении метеоритных падений по годам затруднено тем, что среднее число регистрируемых метеоритов невелико (~ 6 в год). Более точная зависимость может быть получена по статистике наблю-

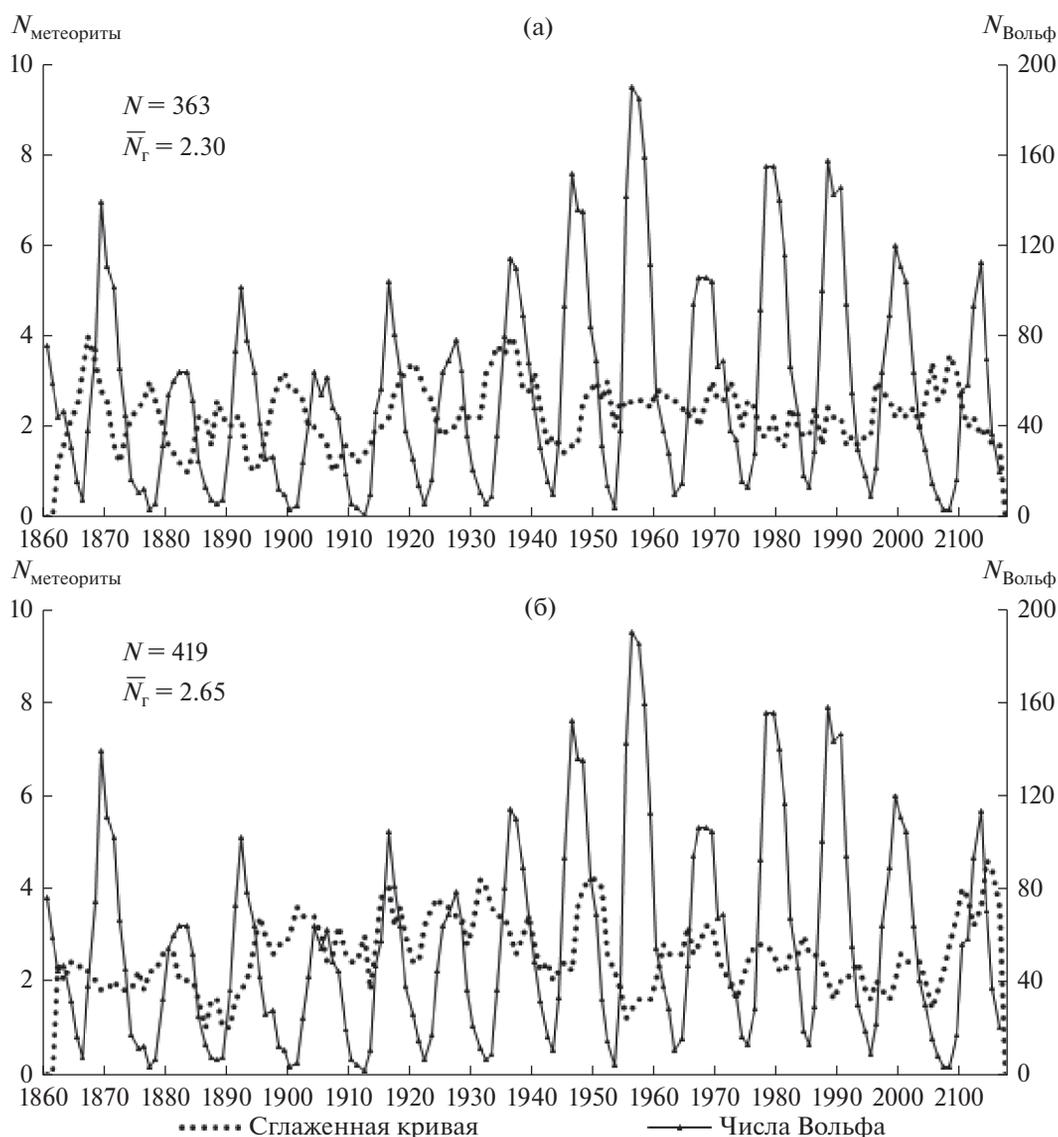


Рис. 4. Сглаженные кривые числа зарегистрированных падений метеоритов и среднегодовые числа Вольфа с 1860 по 2017 год: (а) группа HIR, (б) группа L. N – общее число метеоритных падений, \bar{N}_r – среднее число падений в год.

даемых болидов. Среднее число регистрируемых болидов примерно в 5 раз превышает число метеоритов. На рис. 6 представлены распределения числа болидов по годам и среднегодовые числа Вольфа. Максимальное число болидов приходится на 2005 и 2015 год, что позволяет предположить наличие (10–11)-летней периодичности в распределении числа падений болидов по годам.

Максимумы числа болидов (2005 и 2015 гг.) смещены примерно на 3 года относительно минимумов солнечной активности (2008–2009 и 2018–2019 гг.). Это можно объяснить тем, что продолжительность последнего цикла солнечной активности составила ~ 13 лет (Obridko, Shelting, 2008). Регистрировать входящие в атмосферу

Земли космические тела с помощью болидных сетей, спутников и инфразвуковых станций начали с 1995 г. (www.cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/). Для уточнения параметров периодичности в распределении числа болидов по годам необходимо дальнейшее накопление наблюдательных данных.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПАДЕНИЙ МЕТЕОРИТОВ И БОЛИДОВ ПО МЕСЯЦАМ

Распределение числа падений метеоритов по месяцам приведено на рис. 7а. Каждый столбец гистограммы представляет среднемесячное число метеоритов с 1860 по 2017 г. Рисунок показывает, что с апреля по сентябрь (выделенная часть гистограммы) регистрируется больше падений, чем

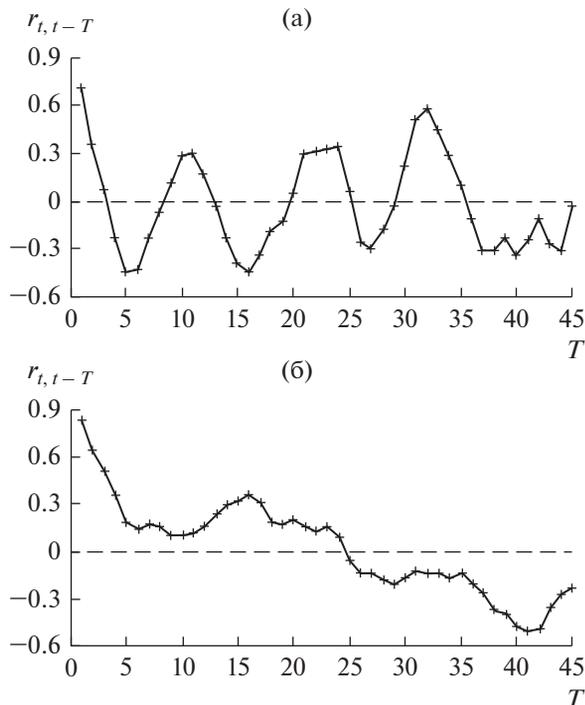


Рис. 5. Коэффициенты автокорреляции $r_{t,t-T} = f(T)$ для сглаженных распределений метеоритов, падения которых зарегистрированы с 1860 по 1960 год. (а) группа NIR, (б) группа L.

с октября по март (58 и 42%, соответственно). Подобная весенне-летняя асимметрия отмечена в работах Hughes (1981) и Алексева (1988). Наибо-

лее вероятная причина неравномерности регистрации метеоритов в течение года – селекция наблюдений. 85.5% падений метеоритов исследуемой выборки зарегистрированы в Северном полушарии, где находится ~74% обитаемой суши и условия для наблюдения более благоприятны в весенне-летний период.

В распределении числа болидов по месяцам (рис. 7б) не наблюдается сезонной асимметрии, с апреля по сентябрь регистрируется ~49% от среднегодового числа болидов.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПАДЕНИЙ МЕТЕОРИТОВ И БОЛИДОВ ПО ВРЕМЕНИ СУТОК

Точное время падения известно для 333 метеоритов из исследуемых 926. На рис. 8а показано распределение числа падений метеоритов в течение суток (время местное). Каждый столбец гистограммы представляет среднесуточное число метеоритов с 1860 по 2017 г. Выделенная часть гистограммы соответствует интервалу времени от полудня до полуночи (в дальнейшем – послеполуденное время).

Согласно рис. 8а, 66% падений метеоритов приходится на послеполуденное время. Этот факт был отмечен в работах Hughes (1981), Алексева (1988).

65% падений метеоритов регистрируется в дневное время, с 8 до 20 ч, когда большая часть людей бодрствует. Преобладание числа регистра-

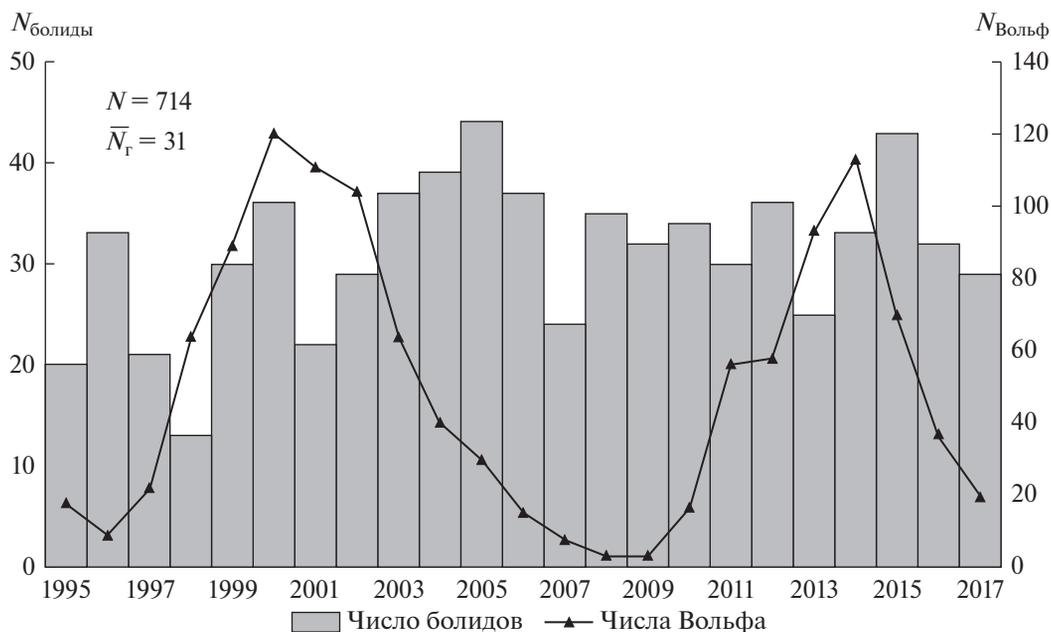


Рис. 6. Распределение числа болидов по годам и среднегодовые числа Вольфа с 1995 по 2017 год. N – общее число болидов, \bar{N}_T – среднее число болидов в год.

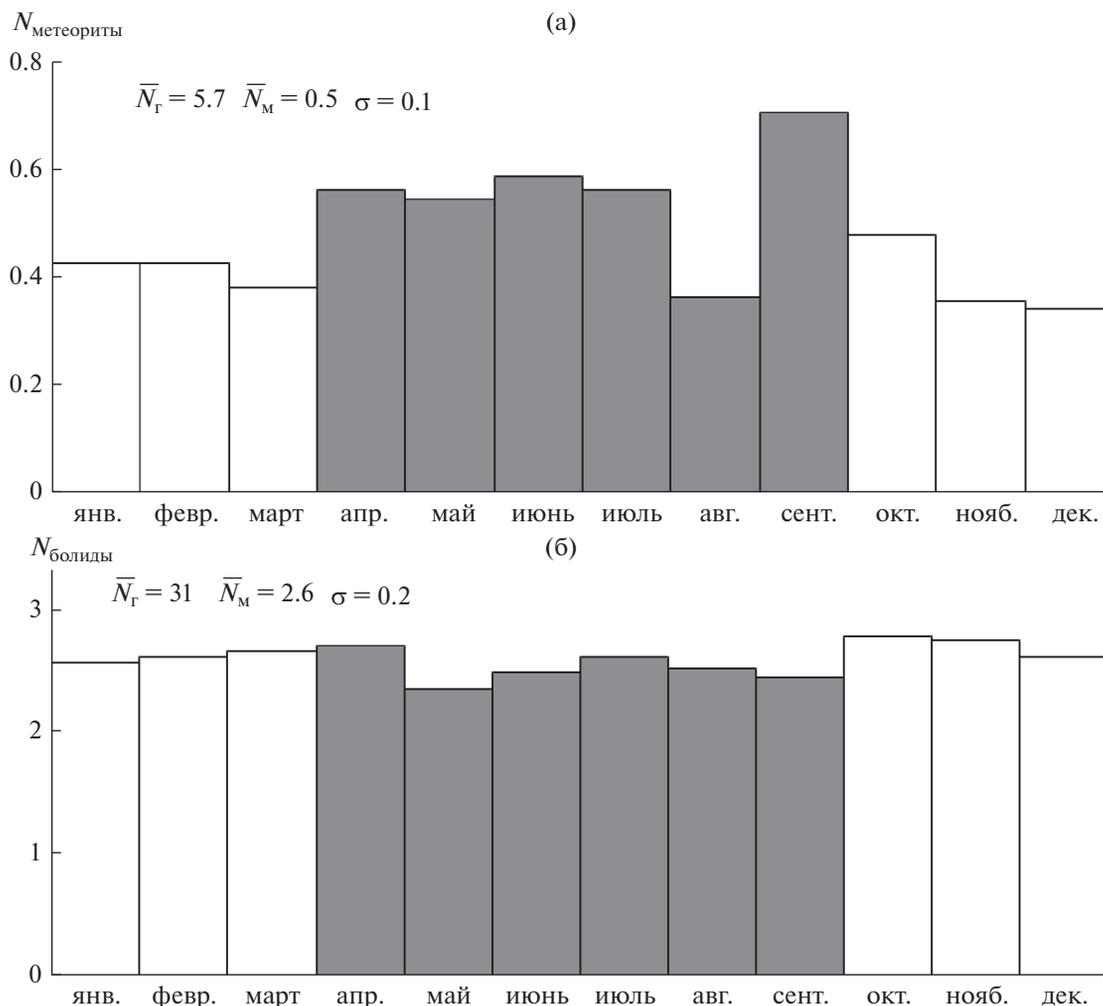


Рис. 7. Распределение числа зарегистрированных падений метеоритов (а) и болидов (б) по месяцам. $\bar{N}_Г$ – среднее число метеоритов (болидов) в год, $\bar{N}_М$ – среднее число падений в месяц, σ – среднеквадратичное отклонение от $\bar{N}_М$.

ции падений в дневное время показано в работах Wetherill (1968), Hughes (1981) и Алексеева (1988).

Halliday и Griffin (1982), используя данные болидных сетей Канады и Европы, провели моделирование орбит метеороидов. Предполагая прямое (как и у Земли) движение метеороидов по орбите, они получили послеполуденный избыток числа регистрации падений метеоритов и минимум числа регистрации падений вблизи 6 ч утра. Galant и др. (2009), моделируя динамику орбит околоземных астероидов, получили превышение в ~ 2 раза дополуденного потока околоземных объектов над послеполуденным, что противоречит наблюдаемому распределению числа зарегистрированных падений метеоритов в течение суток.

Сравним распределение числа падений метеоритов по времени суток с аналогичным распределением для болидов (рис. 8б). Рисунок показывает, что у болидов не наблюдается послеполуденной

асимметрии. В интервале времени от полудня до полуночи зарегистрировано 358 болидов из 714, что составляет $\sim 50\%$. Практически одинаково и число болидов, регистрируемых в дневное и ночное время (51% и 49%, соответственно). В распределении болидов по времени суток на рис. 8б выделяются ряд минимумов: с 3 до 7, с 13 до 14 и с 17 до 18. Первый из них близок к минимуму, полученному в работе Halliday и Griffin (1982).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведен статистический анализ характеристик метеоритов, падения которых зарегистрированы с 1860 по 2017 г. Данные о 926 метеоритах систематизированы и приведены в Приложении. Для каждого метеорита указаны название, страна и географические координаты места падения, дата и время падения, найденная

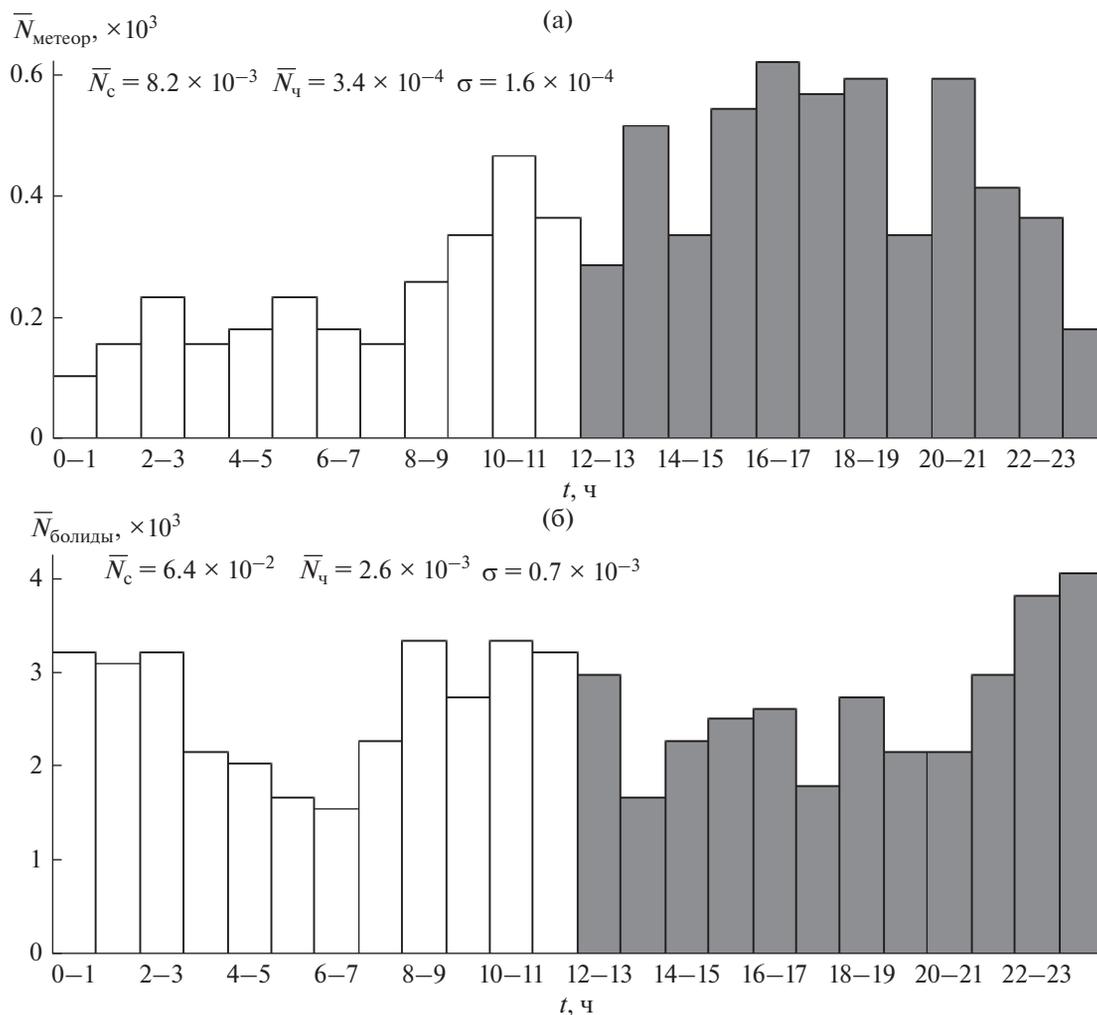


Рис. 8. Распределение числа зарегистрированных падений метеоритов (а) и болидов (б) по времени суток. Время местное. \bar{N}_c – среднее число метеоритов (болидов) в сутки, \bar{N}_q – среднее число падений в час, σ – среднеквадратичное отклонение от \bar{N}_q .

масса метеорита, его тип. О наиболее известных метеоритах в Приложении представлены более детальные сведения и литература. Построено распределение метеоритов по массам, сделана оценка среднегодового потока метеоритного вещества на Землю. Оценена частота регистрации падений на Землю метеоритов, подобных метеориту Chelyabinsk. Исследованы распределения числа регистрации падений метеоритов по годам, месяцам и времени суток. Проведено их сравнение с аналогичными распределениями для болидов. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Распределение метеоритов по массам можно аппроксимировать логнормальным законом, максимум приходится на интервал масс, $M = (1.6–6.3)$ кг.

Оценен среднегодовой поток метеоритного вещества, $M_{\text{год}} \approx (13–26)$ т/г, на основе кумулятивного распределения метеоритов по массам и среднегодовой поток метеороидного вещества, попадающего в атмосферу Земли, $M_{\text{год}}^{\text{атм}} \approx (4.3–8.6) \times 10^4$ т/г. Оценки потока носят приближенный характер.

2. Показано, что средний интервал времени между регистрациями падений метеоритов, подобными метеориту Chelyabinsk, составляет ~ 25 лет. Brown и др. (2013) оценивают частоту падения метеороидов диаметром 20 м как ~ 1 раз в 30 лет на основе данных о болидах. Таким образом, космические тела размером ~ 20 м достаточно частые “гости” на нашей планете. У человечества пока нет средств заблаговременного обнаружения тел подобных размеров, которые в зависимости от угла входа в атмосферу, близости к крупным горо-

дам и промышленным объектам могут нанести и значительно больший ущерб, чем метеорит Chelyabinsk.

3. У группы NIR на интервале с 1860 по 1960 гг. обнаружена (10–11)-летняя периодичность в распределении числа падений метеоритов по годам, а также слабая корреляция между максимумами числа падений метеоритов и минимумами солнечной активности. Среднее число регистрируемых падений метеоритов невелико (~6 в год), что затрудняет исследование периодичности. Среднее число регистрируемых болидов в год примерно в пять раз превышает число метеоритов. Несмотря на короткий срок работы болидных сетей и инфразвуковых станций, можно предположить, что максимумы числа болидов чередуются с интервалом около 11 лет. Подобная периодичность выявлялась ранее В.А. Алексеевым для Н-хондритов.

Изменение числа падений метеоритов с периодом 10–11 лет обнаруживается только у группы NIR, включающей Н-хондриты, железные и железокремниевые метеориты с большим содержанием железа и никеля и проявляющие признаки ферромагнетизма. На такие материалы оказывает воздействие внешнее магнитное поле. Это позволяет предположить, что в годы максимумов солнечной активности секторное магнитное поле Солнца может оказывать более сильное влияние на движение метеороидов в межпланетном пространстве, чем в годы минимумов, и изменять их первоначальные орбиты. Однако это предположение требует дальнейшего исследования.

4. Показано, что в распределении числа зарегистрированных падений метеоритов по месяцам и времени суток существенную роль играют эффекты наблюдательной селекции. 58% от среднегодового числа падений метеоритов приходится на весенне-летний период. Распределение болидов по месяцам не зависит от времени года.

Существенно больше зарегистрированных падений метеоритов (~66%) приходится на интервал времени от полудня до полуночи, чем в первую половину суток. Это согласуется с результатами, полученными ранее другими авторами. Число болидов практически одинаково как в дневное и ночное время, так и в первую и вторую половину суток.

Дальнейшее накопление наблюдательных данных о метеоритах, околоземных метеороидах, а также развитие методов регистрации болидов позволят уточнить распределение числа зарегистрированных метеоритных падений по времени суток и ответить на вопрос о наличии и причинах периодичности в распределении числа зарегистрированных падений метеоритов по годам.

Авторы выражают благодарность рецензентам, в частности ведущему научному сотруднику ИДГ РАН Б.А. Иванову, за обсуждение результатов и улучшение подачи материала статьи, а также доценту кафедры теоретической физики ЧелГУ С.А. Хайбрахманову за прочтение рукописи статьи и сделанные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агеян Т.А.* Теория вероятностей для астрономов и физиков. М.: Наука, 1974. 264 с.
- Алексеев В.А.* Статистика метеоритных падений // Метеоритика. 1988. Вып. 47. С. 24–31.
- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Ред. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. М.: Физматлит, 2010. 384 с.
- Бадюков Д.Д., Дудоров А.Е.* Фрагменты Челябинского метеоритного дождя: распределение по массам, размерам и возможная масса максимального фрагмента // Геохимия. 2013. Т. 51. № 7. С. 642–646.
- Бадюков Д.Д., Дудоров А.Е., Хайбрахманов С.А.* Распределение фрагментов челябинского метеорита по массам // Вестн. Челябинского гос. ун-та. 2014. № 1(330). Физика. Вып. 19. С. 40–46.
- Бронштэн В.А.* Метеоры, метеориты, метеороиды. М.: Наука, 1987. 173 с.
- Дудоров А.Е., Еретнова О.В.* Частота падения метеоритов // Вестн. Челябинского гос. ун-та. 2014. № 1(330). Физика. Вып. 19. С. 58–67.
- Дудоров А.Е., Еретнова О.В.* Выборка зарегистрированных падений метеоритов с 1860 по 2017 гг. 2019. /www.csu.ru/Shared%20Documents/theor_phys/Dudorov_Eretnova_meteorite_falls_1860-2017.pdf
- Дьяконова М.И., Харитонова В.Я., Явнель А.А.* Химический состав метеороидов. М.: Наука, 1979. 67 с.
- Иванов Б.А.* Распределение по размерам малых лунных кратеров: роль увеличения диаметра при старении кратеров и время их жизни // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 1. С. 3–31. (*Ivanov B.A.* Size-Frequency Distribution of Small Lunar Craters: Widening with Degradation and Crater Lifetime // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 1. P. 3–31.)
- Колмогоров А.Н.* О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // Докл. АН СССР. 1941. Т. 31. № 2. С. 99–101.
- Крамер Г.* Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
- Кулик Л.А.* Прирост коллекции метеоритов Академии Наук СССР в Москве с 1934 по 1939 г. // Метеоритика. 1941а. Вып. 1. С. 73–121.
- Кулик Л.А.* Комитет по метеоритам АН СССР в 1939 г. // Метеоритика. 1941б. Вып. 2. С. 123–129.
- Челябинский суперболид / Ред. Горькавый Н.Н., Дудоров А.Е. Челябинск: Изд-во Челябинского гос. ун-та, 2016. 223 с.
- Badyukov D.D., Dudorov A.E.* Fragments of the Chelyabinsk meteorite shower: Distribution of masses and sizes and constraints on the mass of the largest fragment // Geochim. Int. 2013. V. 51. № 7. P. 583–586.

- Bland P.A., Smith T.B., Jul A.J.T., Berry F.J., Bevan A.W.R., Cloude S., Pillinger C.T.* The flux of meteorites to the Earth over the last 50000 years // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1996. V. 283. P. 551–565.
- Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M.B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., de Groot-Hedlin C., Drob D.P., Edwards W., Evers L.G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G., Le Pichon A., Mialle P., Moser D.E., Saffer A., Silber E., Smets P., Spalding R.E., Spurný P., Tagliaferrri E., Uren D., Weryk R.J., Whitaker R., Krzeminski Z.* A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature.* 2013. V. 503. P. 238–241.
- Chelyabinsk Superbolide / Eds Gorkavyy N., Dudorov A., Taskaev S. Switzerland AG: Springer Nature, 2019. 304 p.
- Buchwald V.F.* Handbook of Iron Meteorites. Univ. of California Press, 1975. 1418 p.
- Dohnanyi J.S.* Collisional model of asteroids and their debris // *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74. P. 2531–2554.
- Drolshagen G., Koschny D., Drolshagen S., Kretschmer J., Poppe B.* Mass accumulation of earth from interplanetary dust, meteoroids, asteroids and comets // *Planet. and Space Sci.* 2017. V. 143. P. 21–27.
- Durda D.D., Dermott S.F.* The collisional evolution of the asteroid belt and its contribution to the zodiacal cloud // *Icarus.* 1997. V. 130. P. 140–164.
- Gallant J., Gladman B., Čuk M.* Current bombardment of the Earth-Moon system: Emphasis on cratering asymmetries // *Icarus.* 2009. V. 202. P. 371–382.
- Halliday I., Griffin A.A.* A study of the relative rates of meteorite falls on the Earth's surface // *Meteoritics.* 1982. V. 17. P. 31–46.
- Halliday I., Blackwell A.T., Griffin A.A.* The flux of meteorites on the Earth's surface // *Meteorites.* 1989. V. 24. P. 173–178.
- Hughes D.W.* Meteorite falls and finds: some statistics // *Meteoritics.* 1981. V. 16. P. 269–281.
- Ivanov B.A.* Size-frequency distribution of small lunar craters: Widening with degradation and crater lifetime // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. № 1. P. 3–31.
- Jenniskens P., Fries M.D., Yin Q.-Z., Zolensky M., Krot A.N., Sandford S.A., Sears D., Beauford R., Ebel D.S., Friedrich J.M., Nagashima K., Wimpenny J., Yamakawa A., Nishiizumi K., Hamajima Y., Caffee M.W., Welten K.C., Laubenstein M., Davis A.M., Simon S.B., Heck P.R., Young E.D., Kohl I.E., Thiemens M.H., Nunn M.H., Mikouchi T., Hagiya K., Ohsumi K., Cahill T.A., Lawton J.A., Barnes D., Steele A., Rochette P., Verosub K.L., Gattac-
ceca J., Cooper G., Glavin D.P., Burton A.S., Dworkin J.P., Elsila J.E., Pizzarello S., Ogliore R., Schmitt-Kopplin P., Harir M., Hertkorn N., Verchovsky A., Grady M., Nagao K., Okazaki R., Takechi H., Hiroi T., Smith K., Silber E.A., Brown P.G., Albers J., Klotz D., Hankey M., Matson R., Fries J.A., Walker R.J., Puchtel I., Lee C.-T.A., Erdman M.E., Eppich G.R., Roeske S., Gabelica Z., Lerche M., Nuevo M., Girten B., Worden S.P. Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia // *Science.* 2012. V. 338. P. 1583–1587.*
- Obridko V.N., Shelting B.D.* On prediction of the strength of the 11-year solar cycle № 24 // *Sol. Phys.* 2008. V. 248. P. 191–202.
- Popova O., Borovička J., Hartmann W., Spuný P., Gnos E., Nemtchinov I., Trigo-Rodrigues J.M.* Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2011. V. 46. P. 1525–1550.
- Popova O., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Yu., Glazachev D., Mayer 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., Mikouchi T.* (the Chelyabinsk Airburst Consortium). Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science.* 2013. V. 342. P. 1069–1073.
- Rubincam D.P.* Possible lack of low-mass meteoroids in the Earth's meteoroid flux due to space erosion? // *Icarus.* 2018. V. 299. P. 161–165.
- Weisberg M.K., McCoy T.J., Krot A.N.* Systematics and evaluation of meteorite classification / *Meteorites and the Early Solar System II* // Eds Lauretta D.S., McSween H.Y. Tucson: Univ. Arizona Press, 2006. P. 19–52.
- Wetherill G.W.* Stone meteorites: Time of fall and origin // *Science.* 1968. V. 159. № 3810. P. 79–82.
- www.cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/
- www.lpi.usra.edu/meteor/
- www.meteorites.ru/
- www.passc.net/EarthImpactDatabase/
- www.solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml