

## ФРАГМЕНТЫ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТНОГО ДОЖДЯ: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО МАССАМ, РАЗМЕРАМ И ВОЗМОЖНАЯ МАССА МАКСИМАЛЬНОГО ФРАГМЕНТА

© 2013 г. Д. Д. Бадюков\*, А. Е. Дудоров\*\*

\*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН 119991 Москва, ул. Косыгина, 19  
e-mail: badyukov@geokhi.ru

\*\*Челябинский государственный университет 4  
54000 Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129

Поступила в редакцию 20.03.2013 г.  
Принята к печати 23.03.2013 г.

В работе приводятся данные по массам фрагментов Челябинского метеоритного дождя (падение 15.02.2013). В предположении о логнормальном распределении масс в зависимости от числа фрагментов приведены параметры логарифма среднего значения массы и стандартного отклонения для имеющихся данных, описывающие закон плотности распределения масс и расчетных диаметров фрагментов. На основе зависимости кумулятивного числа обломков с массой равной или большей массы от данной приведены оценки массы максимального фрагмента Челябинского метеоритного дождя. Предполагается, что наиболее вероятную массу этого фрагмента можно оценить в сотни килограмм для 100-тонной общей массы выпавшего вещества и 1–2 тонны для 1000-тонной общей массы, при этом нижнее ограничение по максимальной массе фрагмента составляет первые десятки килограмм.

**Ключевые слова:** Челябинский метеоритный дождь, фрагментация метеоритов, хондриты.

DOI: 10.7868/S0016752513070078

### ВВЕДЕНИЕ

Челябинский метеоритный дождь – уникальное явление, в результате которого на поверхность выпало десятки–сотни тысяч (возможно и более) фрагментов космического тела. Вполне вероятно, что эллипс рассеяния вещества простирается на 60–100 или более километров при ширине 10–20 км. При оценке доатмосферной массы Челябинского тела в 8–10 тысяч тонн, можно ожидать, что масса вещества, достигшего поверхности, составит около 1000–80 тонн при степени абляции 90–99% [1].

Собранные образцы представлены исключительно индивидуальными фрагментами, поскольку, вследствие наличия толстого снежного покрова, их разрушения при столкновении с поверхностью не происходило. Таким образом, распределение фрагментов по массам и размерам может быть использовано при описании процессов дробления тела при его пролете в атмосфере, что, в свою очередь, представляется важным для создания полной физической модели Челябинского болида. Интересной и важной также является оценка массы наибольшего обломка. В настоящей работе мы приводим данные по распределению фрагментов хондрита Челябинск (LL5 S4 W0) и предварительные оценки ожидаемой массы наибольшего фрагмента.

*Распределение по массам и размерам фрагментов хондрита Челябинск.* Для проведения анализа распределения по массам использовались данные по коллекциям Челябинского метеоритного дождя ГЕОХИ РАН и Челябинского государственного университета (всего 887 экземпляров общей массой 6.97 кг). На рис. 1 приведена интегральная кривая, показывающая распределение доли обломков, с массами, равными или меньшими данной массы  $m$ , из которой следует, что экземпляры с массами от 1 до 10 грамм представляют примерно 50% от общего числа образцов, а 30% представлены фрагментами весом менее 1 грамма. На рис. 1 также приведена кривая распределения фрагментов по размеру, для построения которой было принято, что они имеют шарообразную форму и плотность  $3.3 \text{ г/см}^3$ , что позволяет рассчитать их “виртуальный” диаметр  $D$ . Кривые на рис. 1 имеют форму, характерную для логарифмически нормального распределения. Данное распределение типично для процессов дробления [2], в частности, происходивших многократно, так например, различные гранулометрические фракции лунного грунта подчиняются именно этому закону [3, 4, 5]. Переходя к переменным  $N - \lg(K)$ , где  $K$  – масса  $m$  или диаметр  $D$  фрагментов, интегральные кривые можно описать полиномом 6-го порядка в виде  $a_0 + a_1 \lg(K) + a_2 \lg^2(K) + \dots + a_6 \lg^6(K)$ ,  $R^2 = 0.999$ , коэффициенты которого приведены в

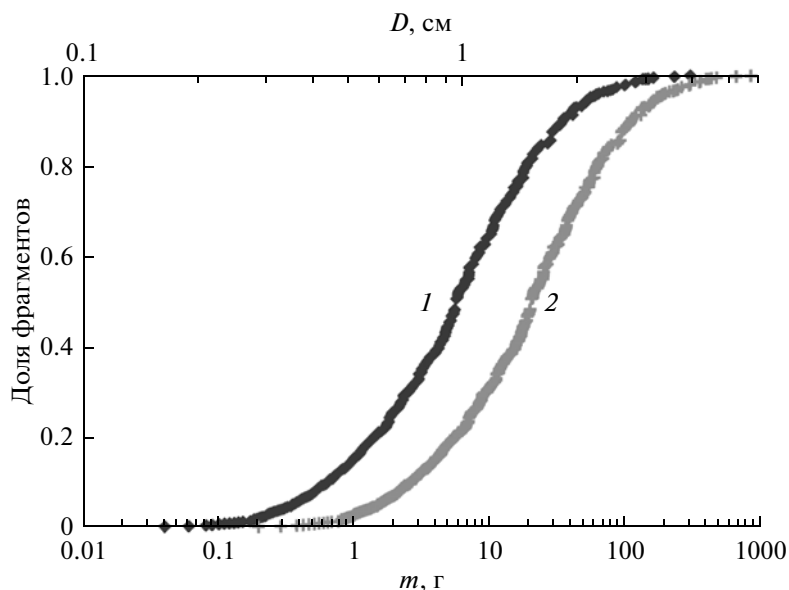


Рис. 1. Интегральное распределение по массам (верхняя кривая 1) и диаметрам (нижняя кривая 2) собранных фрагментов Челябинского метеоритного дождя.

таблице. Дифференцирование полученных зависимостей позволяет получить фактическую (“экспериментальную”) плотность распределения фрагментов (рис. 2).

Для получения параметров плотности распределения  $P$  экземпляров метеоритов по массам и размерам в качестве приближения нами использовался логнормальный закон в виде:

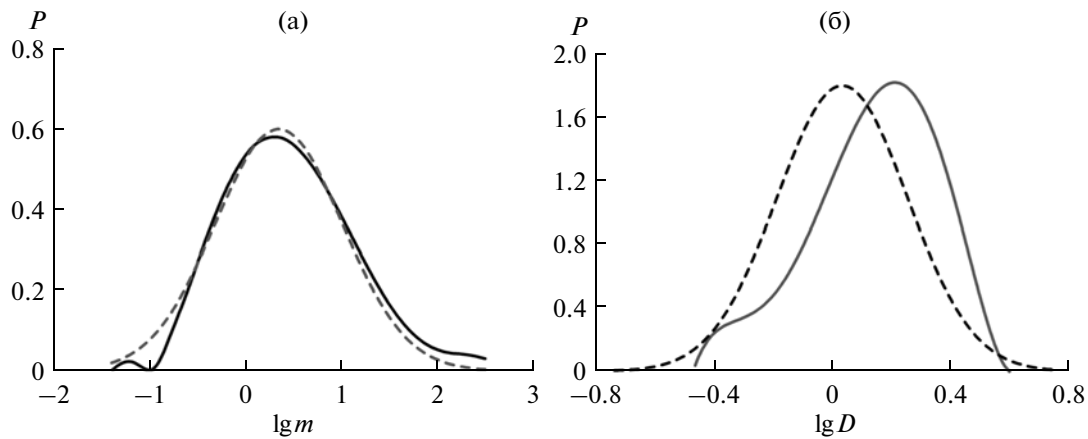
$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\lg(K) - A)^2\right), \quad (1)$$

где  $K$  – масса или размер фрагмента,  $A$  – арифметическое среднее логарифма масс или размеров фрагментов нашей выборки, а  $\sigma$  – стандартное отклонение. Результаты расчетов приведены на рис. 2, а значения среднего и  $\sigma$  – в таблице. Из рис. 2 видно, что кривые плотности распределения обладают слабой асимметрией, которая может быть связана или со спецификой дробления данного космического тела в атмосфере, или недостаточной представительностью использован-

Характеристики интегральных кривых и плотностей распределения логарифмов массы (грамм) и диаметров (см) фрагментов Челябинского метеоритного дождя

Параметры распределения фрагментов Челябинского метеоритного дождя

по массам $m$			по размерам $D$		
коэффициенты полинома интегрального распределения	среднее $\lg(m)$	станд. отклонение $\sigma$	коэффициенты полинома интегрального распределения	среднее $\lg(D)$	станд. отклонение $\sigma$
$a_0$	0.1478747	0.337	0.2246489	0.033	0.221
$a_1$	0.2889101	—	1.1950726	—	—
$a_2$	0.2298104	—	2.2548268	—	—
$a_3$	0.06648548	—	-0.2254483	—	—
$a_4$	-0.06983444	—	-7.5927190	—	—
$a_5$	-0.03079378	—	-2.8925485	—	—
$a_6$	0.01405977	—	10.2495746	—	—



**Рис. 2.** Плотности распределения логарифмов масс (а, сплошная кривая) и диаметров (б, сплошная кривая) фрагментов Челябинского метеоритного дождя. Пунктирными линиями показаны рассчитанные плотности распределения по средним значениям и стандартным отклонениям (таблица).

ных данных о массах фрагментов дождя, или обоими факторами.

*Размер максимального фрагмента Челябинского метеоритного дождя.* Распределение по массам собранных образцов можно также выразить в виде зависимости кумулятивного числа обломков  $N$  с массой равной или большей массы  $m$ . Тогда общая выпавшая масса  $M_{tot}$  может быть выражена как:

$$M_{tot} = \int_1^n mdN, \quad (2)$$

где  $n$  – общее количество фрагментов.

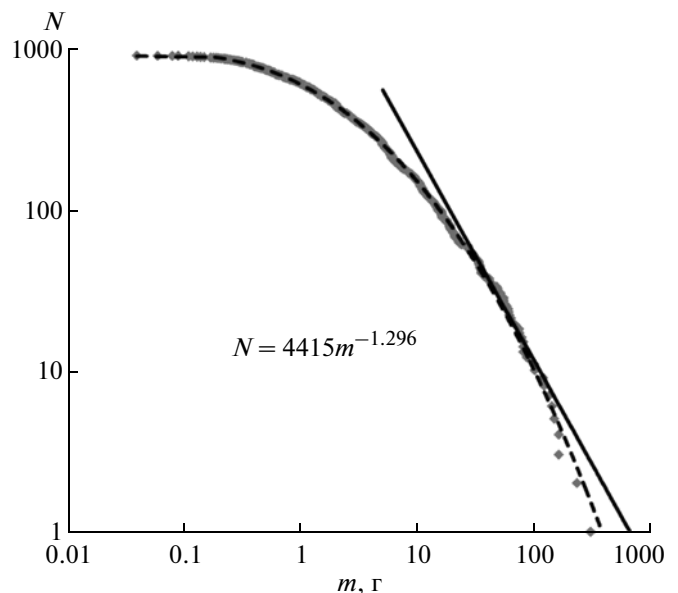
Для хорошо изученных выпадений метеоритов эта зависимость выражается как

$$N(m) = Km^{-b}, \quad (3)$$

где  $b$  характеризует наклон прямой распределения в логарифмических координатах, а  $K$  – коэффициент, являющейся функцией массы наибольшего обломка. Установлено, что для масс экземпляров, меньших 1030 грамм, значение  $b$  составляет 0.49, а для масс, больших этой величины, – 0.82 [6]. Однако для случая Челябинского дождя кривая распределения, как это видно из рис. 3, весьма далека от прямой линии. Поэтому мы рассмотрели два случая – 1) полученная кривая кумулятивного распределения полностью соответствует реальному распределению обломков по массе и 2) полученная кривая соответствует реальному распределению лишь на каком-то своем участке из-за специфики сбора фрагментов.

В первом случае (полное соответствие) кривая распределения аппроксимировалась полиномом 3-й степени в переменных  $\lg(m) - \lg(N)$  в виде  $\lg(N) = a_0 + a_1 \lg(m) + a_2 \lg^2(m) + a_3 \lg^3(m)$  при  $a_0 =$

$= 2.7636, a_1 = 0.3683, a_2 = -0.2074$  и  $a_3 = -0.0247$  ( $R^2 = 0.999$ ) при массе наибольшего обломка 300 грамм. Данный полином дает возможность рассчитать значение коэффициента  $a_0$  при различных массах наибольшего обломка  $m_{max}$ . Нами предполагалось, что коэффициенты  $a_1, a_2$  и  $a_3$  не зависят от  $m_{max}$ . Рассчитывая  $m$  и  $N$  при различных  $m_{max}$  и интегрируя полученные зависимости (см. ур-е 2) можно получить значения общей массы обломков  $M_{tot}$  при различных  $m_{max}$  (нижняя



**Рис. 3.** Кумулятивное распределение числа обломков  $N$  Челябинского метеоритного дождя с массами, равными или большими массы  $m$ . Приведены расчетные данные для полиномиальной зависимости (штриховая кривая, см. текст); и уравнение для зависимости  $N(m) = Km^{-b}$  (прямая линия).

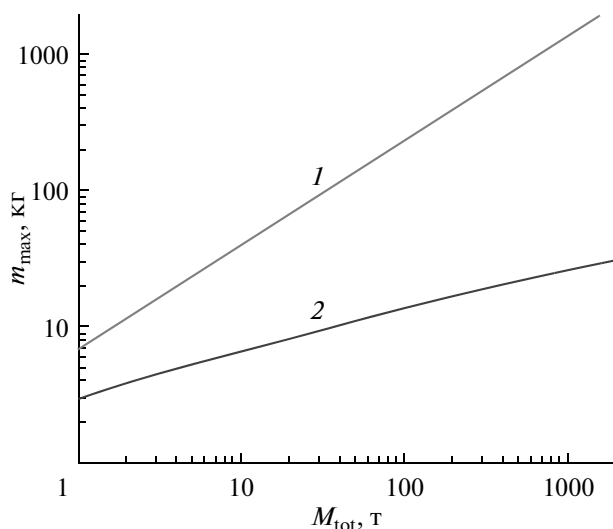


Рис. 4. Зависимость максимальной массы фрагмента от общей выпавшей массы Челябинского метеоритного дождя для разных зависимостей  $N$  от  $m$  (случаи 1 и 2, см. в тексте).

кривая на рис. 5). Мы считаем, что эта оценка  $m_{\max}$  в зависимости от  $M_{\text{tot}}$  является минимально возможной, учитывая предположения о независимости  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  от  $m_{\max}$ .

Для второго случая (соответствие полученной кумулятивной кривой реальному распределению на каком-то своем участке) был выбран диапазон  $m$  от 30 грамм до 100 грамм. При выборе диапазона мы исходили из следующих соображений: а) существует возможность неполного сбора мелких фрагментов вследствие несистематичности поисков и просмотра мелких лунок в снегу и б) заниженное количество крупных — начиная со 100 г — обломков в коллекции из-за их редкой встречаемости и физической невозможности просмотра больших площадей. Выбранный диапазон  $m$  аппроксимировался выражением 3 (рис. 4), которое дальше затем интегрировалось (уравнение 2) для получения зависимости массы наибольшего обломка от общей массы (рис. 4, верхняя прямая).

Из рис. 4 следует, что при общей массе выпавшего материала в 1000 тонн массы наибольшего обломка составляют 26 и 1350 кг для случаев полного и частичного соответствия полученной кривой распределения истинной кривой (случаи 1 и

2, см. выше) соответственно, а для массы выпавшего материала в 100 тонн — 12 и 240 кг. Нам представляется, что верхняя оценка больше соответствует реальности, поскольку для метеоритных выпадений общая масса фрагментов превосходит массу наибольшего обломка в 2–2.5 раза [6]. В качестве примера можно привести метеоритный дождь Jilin (Китай), в котором при  $M_{\text{tot}} = \sim 4$  тонны,  $m_{\max}$  составила  $\sim 1770$  кг. В связи с этим мы предполагаем, что вероятную массу наибольшего фрагмента Челябинского метеорита можно оценить в сотни килограмм для 100 — тонной общей массы выпавшего вещества и 1–2 тонны для 1000 — тонной общей массы. Нижнее ограничение по максимальной массе фрагмента (см. выше) составляет порядка первых десятков килограмм. Привлечение в будущем большего количества данных, в том числе и от других коллекций Челябинского метеорита, позволит уточнить характер распределения масс и, соответственно, ожидаемую массу наибольшего экземпляра.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 22 Президиума РАН.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexeev V.A. Meteorite ablation evaluated from data on the distribution of cosmogenic neon isotopes // Solar System Research. 2003. V. 37. P. 207–217.
2. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР. 1948. Т. 31. № 2. С. 99–101.
3. Стахеев Ю.И. Закономерности распределений размеров частиц лунного грунта / В сб. Грунт из материкового района Луны. Ред. Барсуков В.Л. М.: Наука, 1979. С. 77–82.
4. Стахеев Ю.И., Вульфсон Е.К., Иванов А.В., Флоренский К.П. Гранулометрические характеристики лунного грунта из Моря Изобилия / В сб. Лунный грунт из Моря Изобилия. Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1974. С. 44–49.
5. Стахеев Ю.И., Лаврухина А.К. Гранулометрические характеристики лунного грунта и мощность слоя реголита на местах посадок АС “Луна-16 и 20” / В сб. Грунт из материкового района Луны. Ред. Барсуков В.Л. М.: Наука, 1979. С. 74–77.
6. Halliday I., Blackwell A.T., Griffin A.A. The flux of meteorites on the earth’s surface // Meteoritics. 1989. V. 24. P. 173–178.