

## ОЦЕНКА ПРОИСХОЖДЕНИЯ И СОСТАВА МАТРИЦЫ ТЕЛА ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА 2013 Г.

<sup>1</sup>А.В. Багров, <sup>1</sup>В.А. Леонов, <sup>2</sup>Н.В. Попеленская

## ESTIMATING THE ORIGIN AND COMPOSITION OF THE BODY MATRIX OF 2013 CHELYABINSK BOLIDE

<sup>1</sup>А.В. Bagrov, <sup>1</sup>V.A. Leonov, <sup>2</sup>N.V. Popelenskaya

На основании предварительных измерений траектории Челябинского болида проведена оценка условий разрушения болидного тела. Показано, что оно представляло собой ледяную матрицу с интрузиями из метеоритного материала. В предположении, что тело Челябинского болида являлось фрагментом кометного ядра второго поколения, дается прогноз, что радиоизотопный возраст найденных после падения метеоритов составит более 4 млрд лет, а экспозиционный (время облучения космическими лучами) будет нулевым. Хотя не обнаружено прямой связи между орбитой Челябинского болида и орбитами известных метеорных потоков, высказана идея, что крупные тела типа фрагментов кометных ядер могут входить в состав метеорных и болидных роев и мониторинг их орбит может обеспечить раннее обнаружение тел класса Челябинского болида и выше.

*Ключевые слова:* болид, метеорит, кометное ядро, композиционный состав космического тела.

Based on preliminary measurements of Chelyabinsk bolide trajectory we estimated conditions of bolide disintegration. The bolide body was shown to be ice matrix with meteorite matter intrusions. With the assumption that the Chelyabinsk bolide body is the fragment of second generation cometary nucleus, the forecast has been made that radioisotopic age of meteorites found after the fall is more than 4 billion years, and the exposition age (the time of exposure by cosmic rays) has to be zero. We assumed that large bodies such as cometary nucleus fragments can be a part of meteor and bolide swarms, although the direct relationship between Chelyabinsk bolide orbit and orbits of well-known meteor streams was not found. The inspection of their orbits can provide an early detection of bodies of Chelyabinsk bolide type or of higher type.

*Key words:* bolide, meteorite, cometary nucleus, cosmic body composition.

### Данные наблюдений

Челябинский болид 15 февраля 2013 г. был зарегистрирован большим числом телевизионных камер высокого разрешения с разных направлений с момента появления до момента полного угасания. Предварительная координатная обработка позволила определить траекторию болида и параметры его движения.

Болид двигался в атмосфере со средней скоростью 18 км/с под углом 20° к горизонту. Его движение сопровождалось несколькими световыми вспышками и образованием серии ударных волн. Моменты вспышек и их высота над поверхностью Земли известны [Свободная пресса, 2013], и это дает возможность оценить давление на тело болида. Поскольку болид двигался под малым углом к горизонту, можно считать, что давление нарастало постепенно и момент вспышки болида совпадает с достижением давления, превышающего прочность тела. Характер изменения яркости болида и вида его следа указывают на то, что в атмосферу Земли вошло монолитное тело, которое сначала распалось на два крупных фрагмента, а они, в свою очередь, разрушились на множество более мелких частей. Окончательное разрушение тела произошло на высоте 22–23 км [NBC News, 2013]. В результате болидное тело было заторможено набегающим воздушным потоком и его кинетическая энергия перешла в тепловую, проявившуюся в световой вспышке и взрывной волне. По величине этой энергии можно произвести оценку массы Челябинского болидного тела. Так, например, специалисты NASA на основании анализа данных инфразвуковых регистраций и наблюдений, сделанных со спутников, оценивают энергию взрыва в 300÷500 кт ТНТ [РИА Новости, 2013], или 12÷20·10<sup>14</sup> Дж. Отсюда следует, что при скорости тела 1.8·10<sup>4</sup> м/с начальная масса болидного тела составляет (7÷12)·10<sup>6</sup> кг.

### Ударное разрушение тела болида и его свойства

Математическая модель мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической нагрузки была впервые предложена в 1979 г. С.С. Григоряном [Григорян, 1979]. Согласно этой модели, разрушение происходит при выполнении условия

$$p_{\max} = \rho_a V^2 = \sigma^*, \quad (1)$$

где  $p_{\max}$  – давление набегающего потока,  $\rho_a$  – плотность атмосферы,  $V$  – скорость движения тела,  $\sigma^*$  – прочность материала тела на сжатие. После разрушения тела облако, состоящее из множества обломков, продолжает двигаться вдоль той же траектории, расширяясь вследствие взаимодействия с атмосферным воздухом. Подразумевается, что облако обломков имеет общую ударную волну, и его движение по-прежнему описывается классическими уравнениями движения в атмосфере тела с переменной площадью сечения. Предложенные позже модели [Бронштэн, 1995; Тирский и др., 2008; Попеленская, 2010] более детально описывают процессы аблляции и разрушения метеороида, но в рамках нашего исследования можно ограничиться более простым подходом.

Исходя из того, что скорость Челябинского болида составила около 18 км/с, высота разрушения – 22 км, и считая атмосферу экспоненциальной, запишем:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность атмосферы на высоте  $h$ ,  $\rho_0=1.225 \text{ кг/м}^3$  – плотность атмосферы на уровне моря,  $h$  – высота над уровнем моря,  $h_0=7.16 \text{ км}$  – высота однородной атмосферы. Согласно расчетам, давление набегающего потока на болидное тело в момент его разрушения составляло 15 мПа. По этому значению мы можем оценить возможный материал

Челябинского болида. Прочность некоторых материалов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Прочность материалов  
[Цветков, Скрипник, 1991; Козлов, 1999; Степанюк, 2001]

Материал	Прочность $\sigma^*$ мПа
Следящийся снег	0.15
Лед	1.6÷3.5
Песчаник	30÷260
Каменные метеориты	50
Железные метеориты	406

Получается (см. табл. 1), что вещество болидного тела имело прочность несколько выше, чем чистый лед, но ниже, чем рыхлый песчаник. Известно, что прочность льда повышается, когда он содержит более прочные включения и имеет очень низкую температуру. Поэтому мы приходим к выводу, что Челябинский болид представлял собой ледяную матрицу с прочными тугоплавкими включениями. Косвенным доказательством этого вывода является цвет следа болида – белый. Белый цвет легко ассоциировать с конденсацией паров воды, но не железа, силикатов и их окислов, которые должны были бы присутствовать в следе, если бы все тело Челябинского болида являлось хондритом. В тех случаях, когда наблюдались дневные падения тугоплавких метеоритов (например, Сихотэ-Алиньский 1947 г.), очевидцы отмечали темный дымный след. Еще одним косвенным доказательством значительной доли летучих веществ в теле Челябинского болида является отношение его внеатмосферной массы к массе собранного метеоритного вещества. Собрано в виде выпавших метеоритов менее 0.1 % начальной массы тела, тогда как обычно выпадает до 1–10 % [Грицевич, 2008; Тирский, 2000]

Найденные после пролета болида метеориты относятся к классу хондритов. Поскольку проведенные нами оценки показывают, что основное тело Челябинского болида могло быть только композитным ледяным, можно заключить, что метеоритный материал находился в составе ледяного тела болида. Этот вывод полностью согласуется с общепринятым взглядом на происхождение метеорных потоков в результате распада родительских кометных ядер.

### Тугоплавкие включения в кометных ядрах

Вместе с тем считается, что ядра комет являются первичным материалом – планетезималями, из которых образовались планеты Солнечной системы. Поэтому ядра комет должны состоять исключительно из вещества протозвездного-протопланетного газопылевого облака. В межзвездных облаках все тугоплавкое вещество существует только в виде пылинок субмикронного размера, так как не существует механизма образования каменных или металлических слитков, т. е. типичных метеоритных материалов, в межзвездной среде. Решение этого противоречия было предложено в работе [Багров, 2003], где изложена концепция существования двух форм кометных ядер. Согласно предложенной модели, первичное вещество формирует только кометные

ядра первого поколения, которые не содержат метеоритного материала. Помимо них должны существовать кометные ядра второго поколения, образованные при разлете мелких фрагментов разрушенной планеты Фаэтон [Bagrov, 2006], которые были выброшены на окраины Солнечной системы, где еще сохранились плотные снежные облака из замерзших газов. Роди тугоплавких частиц, двигавшихся через такие облака, собирали на себя встречный снег, слипались между собой и формировали снежные гряды с тугоплавкими интрузиями. Если кометное ядро под действием солнечного тепла испаряется, то от ядер первого поколения не остается следа, а от ядер второго поколения на орбите остаются высвободившиеся интрузии – метеорные частицы.

Наблюдения показывают, что очень часто распад кометных ядер является многоэтапным. Неоднократно наблюдался распад ядра на два или больше фрагмента, каждый из которых проявлял все кометные свойства. Образовавшиеся фрагменты могли или сразу продолжить распад до полной потери летучих веществ, или, при медленном испарении газов с поверхности, сохранять там пылевую составляющую, которая со временем формирует пылевую пористую кору, предохраняющую ядро от полного испарения. Такие «миникометы» с теплоизолирующей корой могут существовать десятки и сотни тысяч лет даже в центральных областях Солнечной системы. Если при этом учесть, что наблюдаемые метеорные явления происходят при пересечении Землей орбиты распавшейся родительской кометы, то находящиеся на той же орбите остатки типа миникомет в некоторый момент времени должны сталкиваться с Землей.

Таким примером, по мнению авторов, является Челябинский болид. При разрушении болид проявил себя как тело, состоявшее из летучих веществ, при этом на Землю выпали метеориты из тугоплавкого вещества, ранее существовавшие в виде интрузий в болидном теле. Доказательства этого предположения могут быть получены при определении возраста найденных метеоритов. Изотопный возраст метеоритов должен указывать на время отвердевания вещества после последней его переплавки; если переплавка имела место в недрах разрушенного Фаэтона, то этот возраст составит 44.5 млрд лет. А вот экспозиционный возраст (указывающий на продолжительность пребывания образца в условиях прямого облучения космическими лучами) должен быть ничтожен. Находясь внутри кометного ядра, интрузии все время были защищены от космических лучей массой кометного вещества. Этим фрагменты Челябинского болида кардинально должны отличаться от других метеоритных образцов, выпавших на Землю после неопределенного времени существования в космосе в результате полного распада родительской кометы [Алексеев и др., 2008]. Проведение подобного анализа фрагментов Челябинского болидного тела может пролить свет на его истинное происхождение.

### Связь Челябинского болида с метеорными потоками

На основе данных, полученных в работах [AMS, 2013; Zuluaga и др., 2013; Lyttinen, 2013, Borovicka et al., 2013], были проведены анализ орбитальных харак-

Таблица 2

Параметры орбит Челябинского болида и метеорного потока  $\delta$ -Monds

Параметр	Афелий ( $Q$ )	Перигелий ( $q$ )	Большая полуось ( $a$ )	Эксцентриситет ( $e$ )	Наклонение ( $i$ )	Аргумент periцентра ( $\omega$ )	Долгота восходящего узла ( $\Omega$ )
	а. е.				град.		
Челябинский болид [AMS, 2013]	2.53	0.80	1.66	0.52	4.05°	326.43°	116.00°
Челябинский болид [Zaluaga, et al., 2013]	2.64	0.82	1.73	0.51	3.45°	326.70°	120.62°
Челябинский болид [Lyytinen, 2013]	2.58	0.80	1.66	0.52	4.05°	326.43°	116.00°
Челябинский болид [Borovicka, et al., 2013]	2.33	0.77	1.55	0.50	3.6°	326.41°	109.7°
Метеорный поток $\delta$ -Monds [Терентьева, 1966]	2.50	0.95	1.74	0.46	4.00°	31.00°	157.00°

теристик Челябинского болида и их сравнение с орбитальными характеристиками всех действующих на момент его пролета метеорных потоков, зарегистрированных в каталоге Центра метеорных данных MAC [IAU MDC, 2013]. В этом списке не было найдено ни одного метеорного потока с похожими орбитальными характеристиками. Помимо крупных (основных) метеорных потоков, исследователи выделяют еще несколько сотен малых метеорных потоков [Терентьева, 1966], и существование некоторых из них подтверждено проводимыми в ИНАСАН телевизионными наблюдениями метеоров [Леонов, 2010]. С их орбитами орбита Челябинского болида тоже не имеет абсолютного сходства. Однако некоторые орбитальные параметры Челябинского болида ( $a$ ,  $e$ ,  $i$ ,  $Q$  и  $q$ ) почти точно совпадают с параметрами орбиты малого метеорного потока  $\delta$ -Monds [Терентьева, 1966] (табл. 2). Этот поток регистрируется в период с 11 по 27 февраля, а его орбита получена на основе фотографических наблюдений 4018 метеоров.

Известно лишь несколько метеоритов, для которых были вычислены орбиты, причем для метеоритов Пржибрам, Иннисфри и Тегиши Лейк также выявлены метеорные потоки со схожими орбитами [Терентьева и др., 2002]. Несмотря на огромное количество собранных на планете метеоритов, вопрос об их происхождении до сих пор остается спорным. Хотя нет ни одного прямого доказательства астероидного происхождения метеоров и метеоритов, многие астрономы продолжают связывать их родительские тела с астероидами. Исследование обломков Челябинского болида, являвшегося, как показывает проведенное исследование, фрагментом кометного ядра, имеет огромное значение для понимания космогонии Солнечной системы, в частности происхождения метеорного вещества.

### Заключение

Челябинский болид, с точки зрения авторов, – типичный продукт распада кометного ядра второго поколения, причем наблюдаемого с Земли. При этом нет никаких оснований утверждать, что на орбите родительской кометы нет тел существенно больших размеров. И искать такие тела следует именно на метеорных орбитах, поскольку метеорные потоки, возникавшие в результате полного распада родительской кометы, являются надежным индикатором ее орбиты. Эта идея была высказана сотрудниками ИНАСАН еще в 1994 г. [Багров и др., 1994], а уже в 1995 г. тела декаметрового размера были обнаружены в метеорном потоке Персеиды и в болидном потоке Каприкорниды [Барабанов и др., 1996]. Челябинский болид продемонстрировал, что подобные тела могут представлять реальную угрозу. Мировая наука пока не располагает средствами для круглосуточного обзора всего неба с целью обнаружения подлетающих к Земле опасных космических объектов, поэтому поиск таких тел на орбитах метеорных потоков представляется необходимым элементом системы раннего предупреждения о космических угрозах.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы № 22 фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев В.А., Горин В.Д., Ивлиев А.И. и др. Свежевыпавшие хондриты Бухара (CV3) и KILABO (LL6): параллельное изучение термolumинесценции, треков и космогенных радионуклидов // Геохимия. 2008. № 9. С. 915–933.

- Багров А.В., Болгова Г.Т., Микиша А.М. и др. Программа наблюдений крупных тел в метеорных и болидных потоках // Тез. докл. Всеросс. конф. «Программа наблюдений высокоорбитальных спутников Земли и небесных тел Солнечной системы». СПб., 1994. С. 17–18.
- Багров А.В. Два поколения кометных ядер и наблюдательные различия в последствиях их распада // Тез. докл. Междунар. конф. «Околоземная астрономия – 2003». СПб.: ВВМ, 2003. С. 125–133.
- Барабанов С.И., Болгова Г.Т., Микиша А.М., Смирнов М.А. Обнаружение крупных тел в метеорных потоках за пределами земной атмосферы // Письма в АЖ. 1996. Т. 22. С. 945–949.
- Бронштэн В.А. Дробление и разрушение крупных метеорных тел в атмосфере // Астрон. вестн. 1995. Т. 29, № 5. С. 450–459.
- Григорян С.С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космич. исслед. 1979. Т. 17, № 6. С. 875–893.
- Грицевич М.И. Интерпретация наземных наблюдений метеоров и болидов: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2008.
- Козлов Е.А. Исследования металлов, минералов и метеоритов в сферических ударно-изэнтропических экспериментах: полиморфные и фазовые превращения, откольные и сдвиговые разрушения, физико-химические превращения (обзор) // Докл. РАН. 1999. Т. 341, № 5. С. 579–588.
- Леонов В.А. Исследование тонкой структуры радиантов некоторых метеорных потоков // Тез. докл. Всеросс. астрон. конф. «От эпохи Галилея до наших дней». Нижний Архыз: САО РАН, 2010. С. 58.
- Попеленская Н.В. Зависимость высоты погасания малых метеорных тел от их параметров // Вестн. МГУ. Математика, механика. 2010. № 4. С. 65–68.
- Степанюк И.А. Технология испытаний и моделирования морского льда. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 78 с.
- Терентьева А.К. Малые метеорные рои // Исследование метеоров. Результаты исследований по международным геофизическим годам. 1966. № 1. С. 62–132.
- Терентьева А.К., Барабанов С.В. Семейство малых тел, связанных с метеоритом Пржибрам // Астрон. вестн. 2002. Т. 36, № 5. С. 464–473.
- Тирский Г.А. Взаимодействие космических тел с атмосферами Земли и планет // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, № 5. С. 76–82.
- Тирский Г.А., Ханукаева Д.Ю. Баллистика дробящегося метеороида с учетом уноса массы в неизотермической атмосфере II // Космич. исслед. 2008. Т. 46, № 2. С. 122–134.
- Цветков В.И., Скрипник А.Я. Атмосферное дробление метеоритов с точки зрения механической прочности // Астрон. вестн. 1991. Т. 25, № 3. С. 364–371.
- РИА Новости. 17.02.2013. URL: <http://news.ru.msn.com/science-and-technology/article.aspx?cpdocumentid=253542504>
- Свободная пресса. 17.02.2013. URL: <http://svpressa.ru/accidents/article/64416/>
- Bagrov A.V. Planetary cosmogony: creation of homeland for life and civilization // The Future of Life and the Future of our Civilization. Dordrecht: Springer, 2006. P. 31–41.
- Borovicka J., Spurny P., Shrbeny L. Trajectory and orbit of the Chelyabinsk Superbolide // IAU. Central Bureau for Astron. Telegrams. Electronic Telegram № 3423: 20130223. 23.02.2013.
- Lytynen E. Russian fireball rough orbit // meteoroobs@meteo-robs.org mailing list 2013–02–15.
- Zuluaga J.I., Ignacio F. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid // Astrophysics. 2013. arXiv:1302.5377.
- American Meteor Society. 2013. URL: <http://www.amsmeteors.org/2013/02/large-daytime-fireball-hits-russia/>
- IAU Meteor Data Center. 2013. [http://www.astro.amu.edu.pl/~jopek/MDC2007/Roje/roje\\_lista.php?corobic\\_roje=0&sort\\_roje=0](http://www.astro.amu.edu.pl/~jopek/MDC2007/Roje/roje_lista.php?corobic_roje=0&sort_roje=0).
- NBC News. 02.03.2013. URL: <http://news.ca.msn.com/top-stories/meteor-lurked-for-thousands-of-years-before-blasting-Russia>.

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИИП механики МГУ, Москва, Россия