

## ЧЕЛЯБИНСКОЕ СОБЫТИЕ КАК АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ

© 2013 г. М. Я. Маров\*, Б. М. Шустов\*\*

\*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

119991, Москва, ул. Косыгина, 19

e-mail: marov@mail@yandex.ru

\*\*Институт астрономии РАН

119017, Москва, ул. Пятницкая, 48

e-mail: bshustov@inasan.ru

Поступила в редакцию 20.03.2013 г.

Принята к печати 23.03.2013 г.

Рассматривается падение метеорита в районе Челябинска с точки зрения астрономии. Проанализированы основные наблюдательные факты, характеристики входа, включая размеры, скорость входа, высоту взрыва и энерговыделение. Приводится краткое описание аэродинамических явлений, сопровождающих вторжение в атмосферу тел с гиперзвуковой скоростью и формирование ударной волны, ответственной за произведенные разрушения на поверхности. Приведены оценки частоты падения небесных тел в зависимости от их размера, а также последствий этих столкновений с Землей. Подчеркнуто, что изучение малых тел Солнечной системы призвано дать ответ на фундаментальные вопросы, связанные с происхождением протопланетного диска и процесса образования планет. Изучение малых тел, к которым относится Челябинское событие, напрямую связано также с проблемой астероидно-кометной опасности (АКО). Приведены размеры потенциально опасных небесных тел, для наблюдения которых необходимо создание наземных специализированных телескопов для предупреждения о событиях АКО, а также развертывание систем космического базирования для обнаружения и мониторинга таких тел в околоземном космическом пространстве.

**Ключевые слова:** астрономия, метеорит, взрыв, ударная волна, астероидно-кометная опасность (АКО).

DOI: 10.7868/S0016752513070121

Упавший в районе Челябинска метеорит стал крупным событием, так как его падение произошло в довольно густо населенном районе и сопровождалось целым рядом зрелищных эффектов и разрушений. Поэтому это, в общем-то рядовое, астрономическое явление привлекло к себе большое внимание. Сам этот факт стал убедительным свидетельством того, что Земля не существует изолированно в космосе, а находится в окружении огромного количества тел различного размера – астероидов и метеороидов – периодически сталкивающихся с Землей, а также с Луной и другими планетами, что хорошо видно на их сильно кратерированных поверхностях. С другой стороны, этот фрагмент более крупного тела принес важную научную информацию о составе вещества, из которого сложены небесные тела в Солнечной системе, и истории их формирования, пополнив обширные коллекции метеоритов различных петрологических классов, найденных в разных районах нашей планеты. Их детальное изучение имеет ключевое значение для ответа на фундаментальные вопросы, связанные с происхождением и ранней эволюцией Солнечной системы на междисциплинарной основе.

В работе [1] представлены и проанализированы основные факты о Челябинском событии, на основе которых ниже приведены предварительные астрономические оценки.

Утром 15 февраля, примерно в 9 часов 20 минут местного времени в районе г. Челябинска (Россия) в атмосферу Земли вошло довольно крупное тело (метеороид), размер которого оценивается величиной 12–17 м. Оно вошло в атмосферу под углом ~14 градусов к горизонту со скоростью ~18 километров в секунду. Из-за столь высокой скорости, почти вдвое превышающей вторую космическую, и низкого положения над горизонтом сближение с Землей метеороидного тела достаточно внушительных размеров прошло незамеченным всеми существующими средствами космического и наземного наблюдения за небесными и искусственными телами. К тому же он приближался к Земле с дневной стороны, направления, очень близкого к направлению на Солнце, чтобы быть замеченным с Земли. И только после его вторжения в атмосферу это событие привлекло к себе столь большое внимание. При взаимодействии с атмосферой появилось сильное свечение (явление, называемое болидом). Примерно через 35 секунд произошла мощная вспышка, длительно-

## Предварительные параметры орбиты Челябинского метеорита

Большая полуось, а.е.	Эксцентриситет	Наклонение, град	Аргумент перигелия, град	Долгота восходящего узла, град	Ссылка на источник
$1.73 \pm 0.23$	$0.51 \pm 0.08$	$3.45 \pm 2.02$	$120.62 \pm 2.77$	$326.7 \pm 0.79$	Zuluaga, Ferrini, 2013
1.55	0.5	3.6	109.7	326.41	Borovicka et al., 2013
$1.26 \pm 0.05$	0.52	2.984	$95.5 \pm 2$	$326.5 \pm 0.3$	Zuluaga, Ferrini, Geens, 2013

стью 1–2 секунды. Анализ наземных фотографий позволил оценить высоту основной вспышки, обусловленной выделением энергии взрыва, в  $22.5 \pm 1.6$  км. Вершина облака, вызванного взрывом, поднялась из-за конвекции на 12 км примерно за 100 секунд, что дает оценку максимальной вертикальной скорости в 110–120 м/с. Расчеты показали, что верхняя часть шлейфа, испытывающая сильный ветровой снос, имеет высоту в 57 км и расположена в мезосфере [2].

Была построена световая кривая, которая показывает множественность вспышек болида. По сообщениям очевидцев, в момент основной вспышки свечение было много ярче солнечного, ощущался жар. И до вспышки и после нее в небе был хорошо виден инверсионный след. Через несколько минут (по свидетельствам очевидцев от 77 секунд до трех минут и более, в зависимости от расстояния) на землю пришла ударная волна. Полоса воздействия ударной волны на поверхности составила около 130 километров в длину и 50 километров в ширину. Взрыв произошел над густонаселенной местностью на высоте 23 км. От последствий взрыва, мощность которого оценивается величиной 300–500 килотонн ТНТ, пострадало около полутора тысяч человек, главным образом, из-за порезов стеклами выбитых окон. Моделирование зон поражения ударной волной при ударах каменных метеоритов показало, что тела размером менее 30 м не производят разрушений зданий. Среди каменных тел, падающих вертикально, наиболее эффективными с точки зрения разрушений ударной волной оказываются тела размером около 50 м [3]. Тем не менее, по числу пострадавших падение этого метеорита размером около 20 м не имеет аналогов.

Анализ комплекса физических процессов, связанных со взрывом Челябинского болида, показал, что его прохождение через атмосферу сопровождалось их интенсивным аэродинамическим разрушением и поперечным растеканием под действием градиента давления на лобовой поверхности болида. Эти процессы завершились резким аэродинамическим торможением и “мгновенным” превращением кинетической энергии болида в тепловую энергию частиц болида и атмосферы в сравнительно очень тонком слое, во “взрывной” зоне, с генерацией здесь высоких температур и ударной волны [4].

На территории в несколько десятков квадратных километров было найдено множество мелких и небольших (не более 2 кг) кусочков метеорита, хотя зона рассеяния фрагментов значительно больше, и вероятно предстоят еще многочисленные находки, после того как сойдет снег. Экспедиции, организованные в первые же дни после падения институтами РАН – ГЕОХИ, ИДГ, ИНАСАН и Уральским федеральным университетом (УрФУ) позволили собрать определенное количество образцов метеорита, на основе которых специалистами лабораторий ГЕОХИ РАН были выполнены анализы элементного, минералогического и изотопного состава, позволившие определить класс метеорита и его петрологический тип [5].

На основе обработки многочисленных видеоданных была установлена траектория движения, а на основе сравнения моментов максимальной световой вспышки и начала разрушений были получены оценки высоты  $h$ , на которой происходило наиболее интенсивное разрушение космического тела. Из обработки четырех видеоснимков с наименьшим временем запаздывания ударной волны, сделанных в Первомайском, Еманжелинске и Коркино, в приближении сферической ударной волны, распространяющейся со скоростью 300 м/с, получено значение  $h = 22.9 \pm 0.2$  км. При этом эпицентр взрыва находился вблизи Первомайского. Если добавить видеоданные с более удаленных регистраций в Челябинске, то  $h = 23.9 \pm 1.4$  км. Если же эти оценки проводить в приближении цилиндрической волны, то  $h = 23.0$  км вблизи Первомайского и  $h = 24.9 \pm 0.4$  км для энерговыделения тела, происходящего приблизительно в восьми километрах восточнее. Очевидно, что эти оценки являются предварительными, более точные данные можно будет получить, когда будет уточнена орбита данного тела.

На данный момент наиболее точные предварительные оценки орбиты Челябинского метеороида получены в работах [6–8] и суммированы в таблице, заимствованной нами из [1].

Как видим, результаты разных авторов существенно различаются по нескольким параметрам, прежде всего по вероятным значениям большой полуоси и аргумента перигелия. Предварительное определение орбиты челябинского метеорита до сближения с Землей в ИНАСАН дало значения большой полуоси  $a = 1.77$  а.е., перигелийного рас-

стояния  $q = 0.75$  а.е. и наклона орбиты  $i = 4.3$  градуса. Более точные определения орбиты можно будет сделать путем привязки видеозаписей к траектории полета на основании проведенной сотрудниками ИДГ и ИНАСАН съемки ночного неба. Тем не менее, по результатам уже имеющихся оценок можно сделать однозначный вывод о принадлежности челябинского тела к семейству группы астероидов, сближающихся с Землей, типа Аполлон. К этому следует добавить, что из анализа всех доступных каталогов орбит метеорных тел и базы данных радиометеоров с учетом элементов орбиты согласно [6] был обнаружен метеорный рой, связанный с Челябинским болидом (дневные Пегасо-Аквариды), состоящий из трех ветвей: северной, эклиптикальной и южной [1].

Как уже отмечалось, падение метеороидов, подобных Челябинскому, не такое уж редкое событие. Среди имеющихся данных о подобных событиях можно упомянуть болиды 3 августа 1963 года (в районе островов Принца Эдуарда, Южная Африка) с оценкой энергии в 260 килотонн ТНТ, болид Маршалловых островов (01.02.1994) с оценкой энергии в 40 килотонн ТНТ и недавний индонезийский болид (08.10.2009) с оценкой энергии в 50 килотонн ТНТ. Последний раз похожее явление на территории России наблюдалось в 2002 году (Витимский болид 24.09.2002, энергия около 10 килотонн ТНТ).

И все же Челябинское событие следует признать уникальным. Впервые в истории человечества столкновение с крупным небесным телом, хотя и неожиданное, было столь детально задокументировано. Проведен беспрецедентно быстрый и достаточно полный научный анализ события, включая сопровождавшие его эффекты. К ним относятся, в частности, возмущения, вызванные Челябинским болидом, помимо спорадического слоя Es, во всей толще ионосферы, такие как изменение электронной концентрации и высоты слоя F2 (до 2.7 раз в максимуме) на расстояниях до 2000 км, где они сохранялись в течение более 10 часов [9].

В заключение еще раз подчеркнем, что изучение малых тел Солнечной системы — астероидов, комет, метеороидов — это ключ к пониманию процессов химической, тепловой и динамической эволюции протосолнечной туманности и протопланетного диска, процесса образования планет [10]. С ними связаны процессы миграции вещества в Солнечной системе, в том числе переноса летучих, включая появление воды на Земле, и, возможно, процессов зарождения и распространения жизни [11]. Изучение малых тел, к которым относится Челябинское событие, напря-

мую связано также с проблемой астероидно-кометной опасности [12].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н., Шеляков М.А., Пахомов Ю.В., Шустов Б.М., Шувалов В.В., Бирюков Е.Е., Рыбнов Ю.С., Маров М.Я., Рыжова Л.В., Нароенков С.А., Карташова А.П., Харламов В.А., Трубецкая И.А. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2013. Т. 47. № 4. С.
2. Горькавый Н.Н., Тайдакова Т.А., Проворникова Е.А., Горькавый И.Н., Ахметвалеев М.М. Аэрозольный шлейф Челябинского болида // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2013. Т. 47. № 4. С.
3. Шувалов В.В., Светцов В.В., Трубецкая И.А. Оценка размера зоны разрушений, производимых на поверхности Земли ударами астероидов размером 10–300 метров // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2013. Т. 47. № 4. С.
4. Григорян С.С., Ибодов Ф.С., Ибодов С.И. Челябинский суперболид: к физике взрыва // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2013. Т. 47. № 4. С.
5. Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Кононкова Н.Н., Рощина И.А., Алексеев В.А., Каишаров Л.Л., Бадюкль Д.Д., Севастьянов В.С. Результаты вещественного анализа метеорита “Челябинск // Геохимия. 2013. № 7.
6. Zuluaga J.I., Ferrin I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid (англ.) // arXiv.org. — 2013. — arXiv:1302.5377Z — arXiv:1302.5377.
7. Zuluaga J.I., Ferrin I., Geens S. The orbit of the Chelyabinsk event impactor as reconstructed from amateur and public footage // arXiv.org. — 2013. — arXiv:1303.1796.
8. Borovicka J., Spurny P., Shrubny L. Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide // Electronic Telegram / Cambridge, MA: Central Bureau Electronic Telegrams, International Astronomical Union, 2013. № 3423.
9. Гвишвили Г.В., Леценко Л.Н., Алтаев В.В., Григорьева С.А., Журавлев С.В., Кузнецов В.Д., Кусонский О.А., Лапшин В.Б., Рыбаков М. Ионосферные эффекты, стимулированные челябинским метеоритом // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2013. Т. 47. № 4. С.
10. Маров М.Я. Малые тела Солнечной системы и некоторые проблемы космогонии // УФН. 2005. Т. 175. № 6. С. 668–678.
11. Marov M.Ya., Ipatov S.I. Volatiles inventory and formation of planetary atmospheres. In: Collisions in the Solar System” (M.Ya Maroy and H. Rickman eds.) Kluwer Academic Publishers, 2001.
12. Шустов Б.М. Астероидно-кометная опасность: о роли физических наук в решении проблемы // УФН. 2011. Т. 181. С. 1104–1108.