

ФРАГМЕНТАЦИЯ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

О.П. Попова¹, П. Дженнискенс², Д.О. Глазачев¹

¹ – Институт динамики геосфер РАН, ² – SETI Institute

Рассматривается взаимодействие Челябинского метеороида (ЧМ) с атмосферой, оценивается его кривая блеска и соответствующее энерговыделение. Предлагается модель фрагментации метеороида в атмосфере, дающая возможность воспроизвести наблюдательные данные (световую кривую, кривую торможения). Описывается поле рассеяния метеорита, оценивается выпавшая масса, сравниваются модельное и реальное расположение фрагментов.

Световая кривая болида

Видеозаписи пролета болида были сделаны в большом числе населенных пунктов, которые разбросаны на 540 км с севера на юг (от Нижнего Тагила до города Карталы) и на 900–1000 км с запада на восток (от Самары и Оренбурга до Тюмени) [Емельяненко и др., 2013]. Анализ видеозаписей позволил целому ряду авторов определить как траекторию пролета болида, так и его световую кривую [Borovička et al., 2013; Емельяненко и др., 2013; Brown et al., 2013; Popova et al., 2013].

Световая кривая (кривая блеска) является наиболее точной оценкой профиля энерговыделения в атмосфере, хотя при входах больших разрушающихся тел следует помнить, что регистрируемый световой поток суммирует излучение достаточно протяженной области. От профиля энерговыделения зависят и особенности

формирующейся ударной волны, и детали ее воздействия на поверхность [Шува-лов и др., 2014].

Камеры видеорегистраторов и камеры наблюдений, которые записали пролет метеороида, имеют целый ряд ограничений [Емельяненко и др., 2013]: малый динамический диапазон, автоматическое уменьшение диафрагмы при увеличении

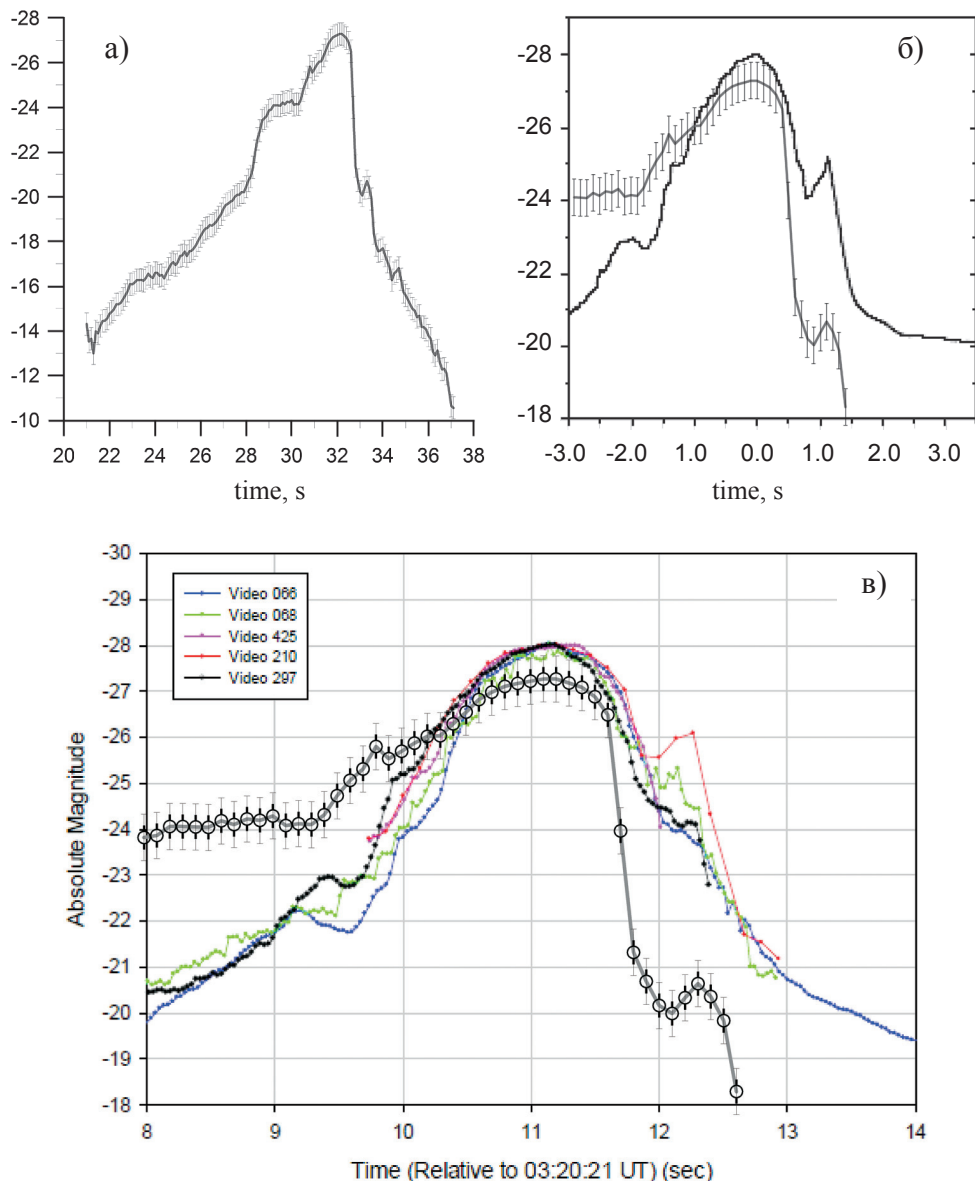


Рис. 1. (а) – Световая кривая Челябинского болида; (б, в) – сравнение световых кривых, полученных в работах [Porova et al., 2013] (кривая с указанной погрешностью) и [Brown et al., 2013]; на рис. (б) приведена средняя световая кривая из работы [Brown et al., 2013]; (в) световые кривые из работы [Brown et al., 2013], полученные по четырем разным видеозаписям

яркости болида, неизвестную спектральную чувствительность, отсутствие калибровки. Тем не менее, анализ видеозаписей позволил определить световую кривую болида целому ряду авторов, которые использовали различные методы коррекции (рис. 1, 2).

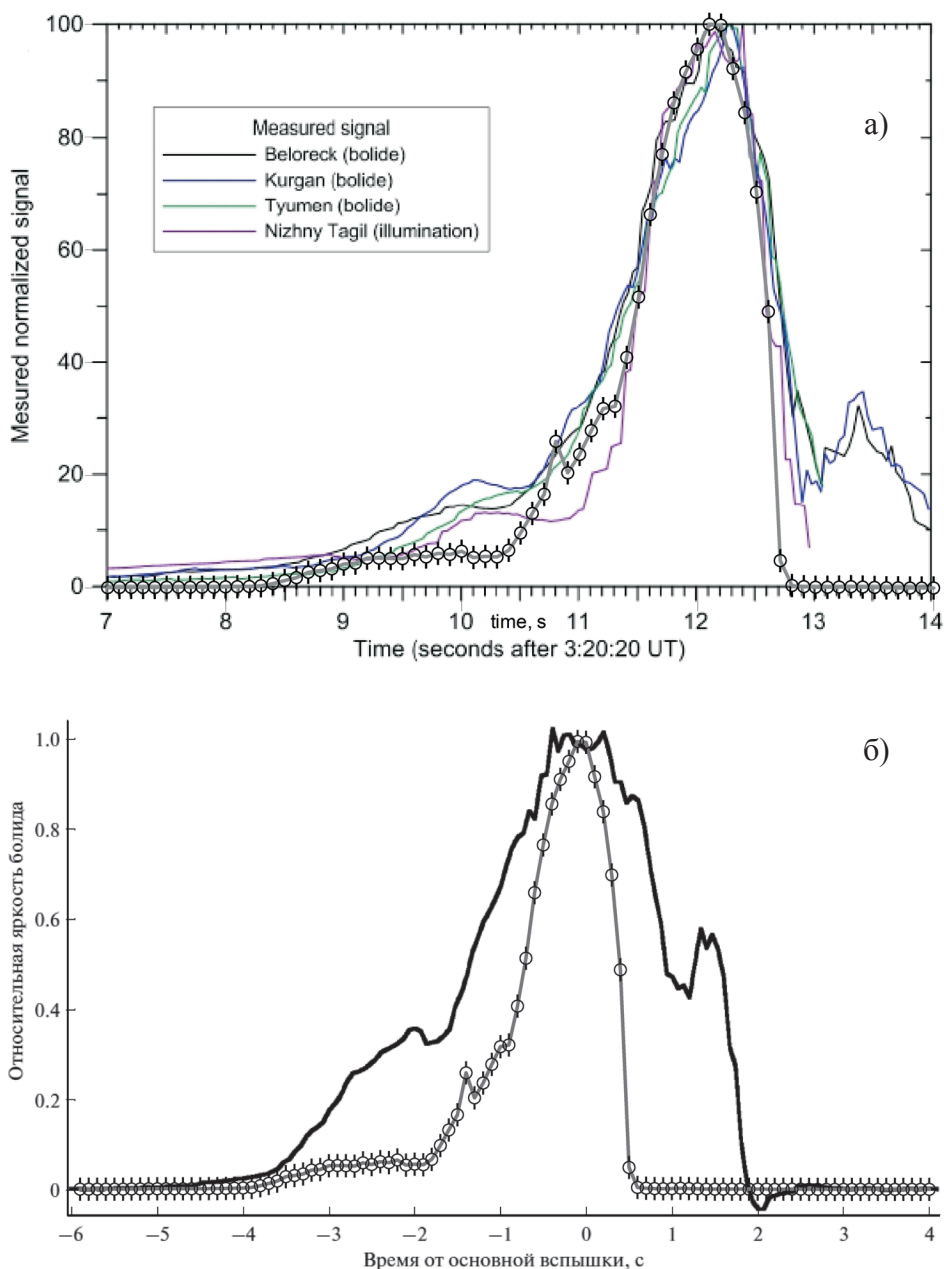


Рис. 2. (а) Световые кривые, полученные в работе Borovicka et al. (2013) по четырем разным видеозаписям; (б) световая кривая, полученная в работе Емельяненко и др.(2013). Для сравнения на рисунках приведена световая кривая, полученная в [Popova et al., 2013] (кривая с точками)

Световая кривая на рис. 1,б [Brown et al., 2013] нормирована на максимальную яркость, определенную по данным спутниковой системы наблюдений; световая кривая на рис. 1,а [Porova et al., 2013] калибровалась по изображению Луны на видеорегистраторе в схожих световых условиях. Максимальные яркости в обеих оценках оказались близкими друг к другу и достигали $-27,5 - -28$ звездных величин (значение соответствует стандартному расстоянию в 100 км (рис. 1,б)). Вблизи траектории и в Челябинске болид был ярче Солнца. Видно, что яркость световых кривых, полученных по разным видеозаписям, может отличаться на 1–2 звездные величины, особенно для второй вспышки (рис. 1,в–2,а). В работах [Borovicka et al., 2013] и [Емельяненко и др., 2013] (рис. 2) получены световые кривые в относительных единицах. Основное различие состоит в оценке яркости после максимума светимости, то есть в те моменты времени, когда наиболее существенным было влияние автоматического изменения чувствительности камеры. Тем не менее, несмотря на все различия (рис. 1, 2), можно сказать, что для световой кривой Челябинского болида характерно наличие нескольких явно выраженных вспышек излучения, обычно связываемых с разрушением метеороида. Явно можно выделить рост интенсивности примерно за 4 сек до максимума, сам максимум, вспышку на одну секунду позже. Это соответствует высотам примерно 45–50, 30 и 24–25 км. Следует отметить, что максимум вспышки обычно сдвинут на более низкие высоты, чем вызывающее эту вспышку разрушение, поскольку образующиеся фрагменты должны затормозиться для того, чтобы передать свою энергию воздуху.

Разрушение Челябинского метеороида

Модели взаимодействия метеороида с атмосферой

Диаметр Челябинского метеороида оценивается в 18–20 м [Brown et al., 2013; Porova et al., 2013], поэтому его взаимодействие с атмосферой происходило в режиме сплошной среды с самого начала регистрации на высоте порядка 97 км (длина свободного пробега на этой высоте составляет 20–50 см). Взаимодействие таких тел с атмосферой можно описывать в рамках газодинамических моделей (см. обзор [Porova, 2005]), основным механизмом абляции является излучение ударной волны и паров вещества [Svetsov et al., 1995; Голубь и др., 1996; 1997]. Существенное влияние на взаимодействие метеороида с атмосферой оказывает фрагментация.

Газодинамические модели, которые учитывают все эффекты (абляцию, излучение и фрагментацию), достаточно редки и применялись, в основном, к крупным телам с массами большими 10^8 кг (то есть размерами большими нескольких десятков метров, например, [Boslough et al., 1994; Shuvalov and Artemieva, 2002; Shuvalov and Trubetskaya, 2007] и др.) В этих моделях обычно предполагается, что разрушившийся метеороид ведет себя как жидкость. Эти модели не могут описать процесс фрагментации, если в нем образуются одновременно отдельные фрагменты и заметное количество пыли.

Взаимодействие более мелких метеорных тел с атмосферой, как правило, описывается стандартной системой простых дифференциальных уравнений, основанных на законах сохранения массы, импульса и кинетической энергии [Baldwin and Sheaffer, 1971; Cepplecha et al., 1993; Borovicka et al., 1998; Bland and Artemieva, 2006] и др. Целью таких расчетов обычно является определение начальных параметров метеороидов через воспроизведение световой кривой и кривой торможения [Cepplecha et al., 1993; Borovicka et al., 1998; Cepplecha and ReVelle, 2005], описание

общей картины взаимодействия метеороида с атмосферой [Baldwin and Sheaffer, 1971; Borovička et al., 1998; Bland and Artemieva, 2006], определение таких параметров как коэффициенты абляции и формы-плотности [Ceplecha et al., 1993; Ceplecha and ReVelle, 2005]. Эта стандартная система уравнений часто дополняется разными моделями фрагментации, поскольку фрагментация – обычное явление во время пролета через атмосферу, большинство метеороидов разрушается под действием аэродинамических сил [Ceplecha et al., 1993; Попова и Немчинов, 2005].

Разрушение может происходить различным образом, например, это может быть образование нескольких достаточно крупных фрагментов, которые до некоторого момента взаимодействуют друг с другом, генерируя одну общую ударную волну, а затем продолжают свое движение независимо друг от друга и могут разрушаться дальше (прогрессивная фрагментация). Такие модели рассматривались во многих работах, начиная с Левина (1956). До работы [Passey and Melosh, 1980] эти модели не учитывали взаимодействие фрагментов друг с другом даже на начальном этапе. Предполагалось, что поперечный размер кратерных полей и метеоритных полей рассеяния обусловлен чисто случайными причинами [Frost 1969; Цветков, 1987]. Passey and Melosh (1980) рассмотрели взаимодействие ударных волн между фрагментами, которое вызывает появление боковой скорости, приводящей к удалению фрагментов друг от друга. Величина коэффициента в выражении для скорости оценивалась как по расположению кратеров в известных кратерных полях [Passey, Melosh, 1980], так и в газодинамических расчетах [Artem'eva, Shuvalov, 1996; Artemieva, Shuvalov, 2001].

Другой механизм разрушения – это разрушение метеороида на облако мелких фрагментов и паров, объединенных общей ударной волной [Svetsov et al., 1995]. Если падающее тело разрушается на очень большое число небольших фрагментов, то после разрушения это облако паров и фрагментов может деформироваться как жидкость. Наименьшие фрагменты могут легко испариться и заполнить промежутки между крупными кусками. Движение полностью разрушившегося метеороида внутри общей для всех фрагментов ударной волны часто применяют к крупным телам (таким, как вызвавшее Тунгусскую катастрофу [Shuvalov and Artemieva, 2002]).

Григорян (1979) ввел понятие бокового растекания метеороида, подвергнутого фрагментации, указывая при этом, что при увеличении площади поперечного сечения края облака фрагментов загибаются назад и отрываются от общей массы. Сходные идеи использованы и в других работах [Hills, Goda, 1993; Chyba et al., 1993]. В этих работах выводятся дифференциальные уравнения, описывающие растекание фрагментированного объекта. Простые соотношения для изменения размера разрушающегося тела позволяют включить их в общую систему уравнений движения метеороида в атмосфере (модель pancake). Но крупные куски могут уйти из этого облака и вести себя как независимые тела. Полная картина движения раздробившегося тела оказывается достаточно сложной. Оба сценария разрушения могут возникать в реальных событиях, гораздо меньших Тунгуски, иногда на разных стадиях разрушения одного и того же метеороида [Borovička et al., 1998; Попова, 2011].

Обычно предполагается, что разрушение метеороида начинается, когда аэродинамическая нагрузка на поверхность тела превышает некоторую характерную прочность тела. Характерную прочность при этом выбирают разными способами, часто предполагают, что прочность уменьшается с увеличением размера [Svetsov et al., 1995]. Средняя прочность на сжатие образцов метеоритов небольшого раз-

мера (весом порядка нескольких граммов) составляет порядка 217 ± 134 МПа, а на растяжение 30 ± 17 МПа [Svetsov et al., 1995; Цветков и Скрипник, 1991]. В то же время, анализ наблюдательных данных для 13 метеоритных падений (массами от 20 кг до 70 тонн), дополненных данными для целого ряда болидов, позволил оценить прочность при первом разрушении в атмосфере в 0,1–1 МПа, а максимальную прочность при входе в атмосферу как 1–10 МПа [Popova et al., 2011], но не дал возможности выделить зависимость прочности от размера.

Моделирование Челябинского события

Предполагалось, что начальная масса метеороида составляет $7 \cdot 10^6$ кг, скорость входа – 19 км/с и начальная прочность – 0,2 МПа. Коэффициент теплопередачи для основного тела и всех фрагментов предполагался равным 0,1, что соответствует параметру абляции $0,016 \text{ с}^2/\text{км}^2$, близкому по значению к $\sim 0,014 \text{ с}^2/\text{км}^2$, определенному для болидов похожего состава [Serpelcha et al., 1998]. Использовались эффективности свечения в различных диапазонах, определенные по результатам газодинамического моделирования [Голубь и др., 1996; 1997]. Коэффициент конверсии в звездные величины предполагался равным $1,1 \cdot 10^3$ Дж/с для 0-звездной величины [Serpelcha et al., 1998]. Выбранная начальная масса меньше, чем наиболее вероятное значение в $1,3 \cdot 10^7$ кг, но следует учитывать неопределенность в оценке параметров. Увеличение массы в два раза приводит к увеличению яркости примерно на +0,5 – +1,5 звездных величин до и в максимуме светимости. Кроме того, как эффективность свечения, так и коэффициент конверсии в звездные величины известны недостаточно хорошо и погрешность, вносимая каждой из этих величин, может достигать 1 звездной величины.

Целью моделирования было воспроизвести световую кривую и торможение в атмосфере. Первые попытки были сделаны в рамках модели прогрессивной фрагментации при различных предположениях о числе образующихся фрагментов (разрушение на два куска, разрушение на целый ряд фрагментов, удовлетворяющих степенному закону распределения и т.д.). Такой подход приводит к слишком большой величине массы метеоритов (~ 300 – 600 тонн), большому количеству фрагментов ($> 10^6$), слишком яркому излучению ниже 25 км высоты и слишком малому значению полной высвеченной энергии.



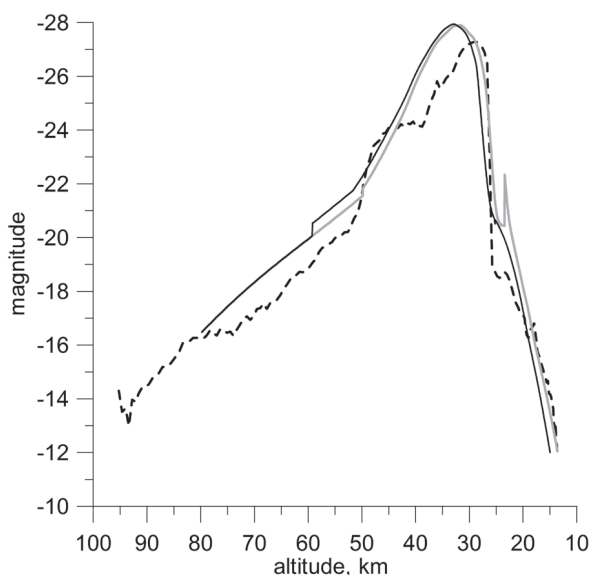
Рис. 3. Изображение облака примерно через 6 секунд после пролета болида (фото Марата Ахметвалеева)

Формирование и торможение облака мелких фрагментов и паров прямо наблюдалось в Челябинском событии – это облако затормозилось примерно на высоте 25–27 км [Porova et al., 2013], тепловое излучение продолжалось и после полного торможения облака (рис. 3). Формирование огромного числа фрагментов на высотах 50–20 км в течение короткого времени свидетельствует о том, что эти фрагменты нельзя рассматривать как независимые.

Наиболее подходящим описанием Челябинского события может быть гибридная модель, объединяющая pancake и прогрессивную фрагментацию, и предполагающая, что одна часть начальной массы образует облако фрагментов и паров, а другая – независимо летящие и разрушающиеся фрагменты. Аналогичная модель описывает разрушение астероида TC₃2008, чей вход в атмосферу привел к падению метеорита Алмахата Ситта [Porova, 2011]. К сожалению, нельзя предсказать, какая доля начальной массы разрушается с образованием облака фрагментов и пыли, но оценить эту долю можно, сопоставляя результаты моделирования с измеренной световой кривой.

Гибридная модель позволила воспроизвести световую кривую болида (рис. 4). Предполагалось, что после первого разрушения на высотах порядка 50–60 км большая часть обломков образует облака фрагментов и паров, а часть (примерно 20 тонн) разрушается на независимо летящие фрагменты. Предполагается, что прочность независимо летящих фрагментов увеличивается с уменьшением их массы по степенному закону (рассматривались разные показатели степени в диапазоне 0,25–0,5 [Цветков и Скрипник, 1991; Svetsov et al., 1995]). Кроме того, допускаются дополнительные случайные отклонения значений прочности [Bland and Artemieva, 2006]. Масса наибольшего фрагмента при каждом разрушении выбирается случайным образом, масса и число остальных фрагментов удовлетворяют степенному закону [Jenniskens et al., 1991; Borovicka et al., 1998]. Финальное распределение фрагментов метеорита по массе меняется от расчета к расчету, но при этом масса наибольшего фрагмента достигает 100–600 кг, а масса большинства фрагментов не превышает 10 кг. Следует отметить, что все эти фрагменты формируют головную часть поля рассеяния.

Рис. 4. Две модельные световые кривые (серая и черная) в сравнении с наблюдаемой (пунктирная кривая). Модельные кривые соответствуют двум разным реализациям



Описанный подход позволяет описать основные особенности световой кривой (рис. 4), хотя используется упрощенное описание разрушения Челябинского метеороида. Полученное решение – не единственное, разное количество первичных фрагментов (то есть образовавшихся в первой фрагментации) может разрушаться с образованием облака фрагментов.

На рис. 4 приведены две модельные кривые, неплохо описывающие наблюдаемую. Например, узкий пик на серой кривой соответствует разрушению достаточно крупного фрагмента, пережившего предшествующие разрушения, похожая вспышка присутствует и на наблюдаемой кривой. Различие в интенсивности вызвано тем, что несколько различаются массы фрагментов, участвовавшие во фрагментации. Так же объясняется и различие в интенсивностях на высотах 50–40 км – большее количество материала было разрушено на мелкие фрагменты и затормозилось на этих высотах. Наблюдаемая световая кривая известна с точностью порядка 0,5–1 звездной величины (раздел 1), коэффициенты высвета и конверсии также известны с точностью не лучше 2, поэтому вводить большее число заданных параметров, чтобы получить лучшее соответствие, не имеет смысла.

Дополнительной проверкой модели на соответствие наблюдательным данным является сравнение модельного и наблюдаемого торможения (рис. 5). До высот порядка 27–25 км метеороид фактически не тормозится, после чего наблюдается быстрое торможение (рис. 5). Модельное торможение для нескольких фрагментов показано на рис. 5. Кроме того, показано торможение облаков мелких фрагментов и пыли (clouds), образовавшихся на высотах 30–40 км и затормозившихся выше 25–35 км. Масса наибольшего фрагмента в данной реализации составляет порядка 300 кг.

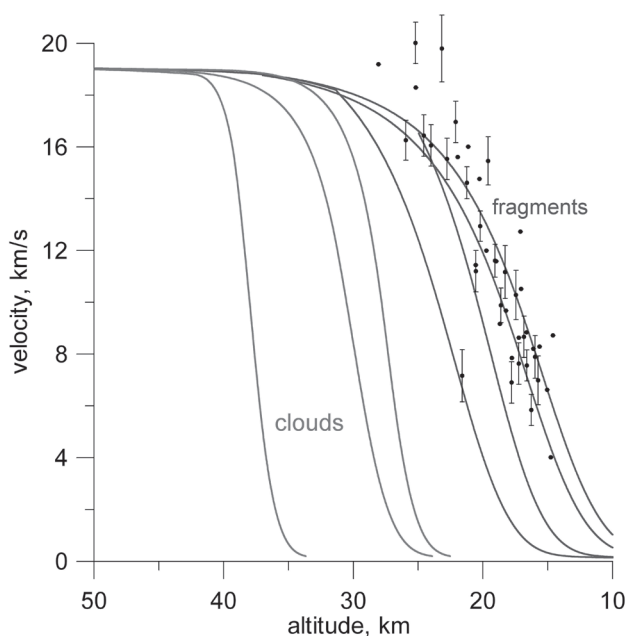


Рис. 5. Наблюдаемое торможение (точки) в сравнении с модельными кривыми для ряда фрагментов. Кривые, обозначенные как clouds, показывают торможение облаков мелких фрагментов и пыли, образовавшихся на высотах 30–40 км и затормозившихся выше 25–35 км

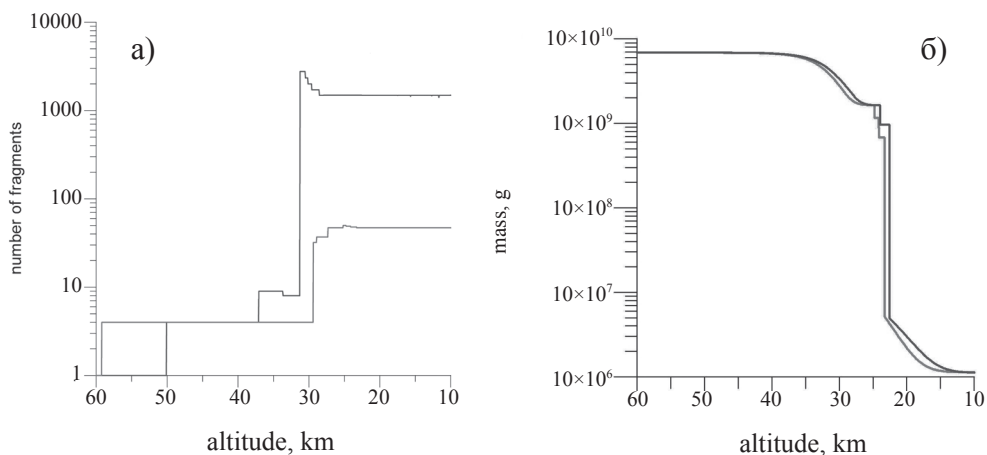


Рис. 6. (а) – Число фрагментов в зависимости от высоты. (б) – Суммарная масса фрагментов в зависимости от высоты для двух модельных реализаций

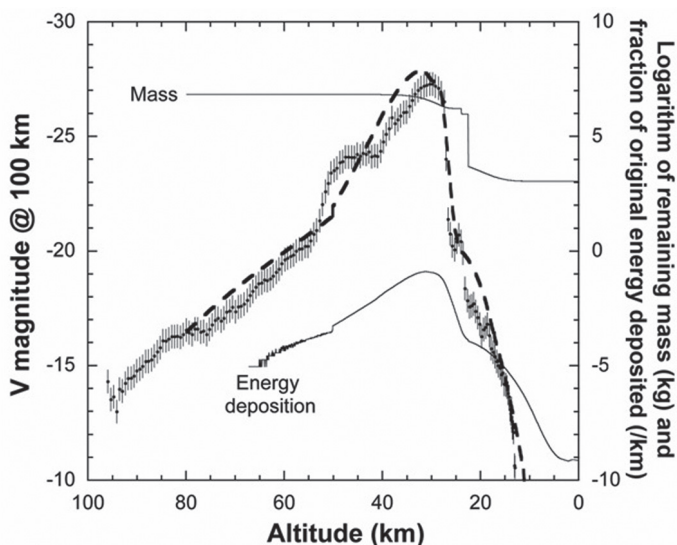


Рис. 7. Световая кривая болида, суммарная масса всех фрагментов на данной высоте и зависимость энерговыделения от высоты (нормированная на начальную энергию, км⁻¹)

Изменение числа образующихся фрагментов и их суммарной массы в модели показано на рис. 6. Интенсивное разрушение на высотах 32–29 км приводит к быстрому увеличению числа фрагментов. Большая часть массы и энергии выделилась на высотах 40–25 км (рис. 7).

Число и размер фрагментов, их местоположение в поле рассеяния меняются в модели от реализации к реализации, но есть целый ряд аспектов, которые хорошо определены: только незначительная доля начальной массы и энергии выделилась ниже 20 км. Оцененное значение интегральной эффективности высвета составляет 18–20%, около 76% начальной массы испарилось, масса, сохранившаяся в виде

мелких фрагментов и пыли, которая потом образовала долгоживущий пылевой след [Gor'kavy et al., 2013], достигает примерно 24%.

Облако фрагментов, образовавшееся на высотах 32–29 км, затормозилось на высотах 27–23 км (наблюдавшееся торможение – на 26,2 км). Множественные мелкие фрагменты, собранные в районе пос. Александровка, Березняки и других, рядом расположенных пунктов, при фрагментации образовывали это облако фрагментов, и их распределение нельзя описать в рамках используемой модели (облако рассматривается как целое). Основываясь на плотности распределения этого вещества можно оценить массу этих метеоритов в 3000–5000 кг [Popova et al., 2013, раздел 3.2].

Фрагменты, светившие ниже высоты 26 км, (их массу можно оценить примерно в 20 тонн), приводят к выпадению еще около 1000 кг (в виде 20–2000 фрагментов в зависимости от реализации модели). Эти фрагменты образуют головную часть поля рассеяния. Длина поля рассеяния меняется с размером наибольшего фрагмента, но наибольший фрагмент (если его масса превышает 150–300 кг) способен достичь озера Чебаркуль. Скорости падения фрагментов лежат в диапазоне 50–250 м/с для фрагментов с массами 0,1–1000 кг. Точное значение зависит от предполагаемой формы фрагмента и принятого коэффициента сопротивления. Все фрагменты, включая наибольший, долетевший до озера Чебаркуль, падают с дозвуковой скоростью. Время полета наибольшего фрагмента хорошо согласуется с видеозаписью Мельникова, на которой зарегистрировано образование пыльной на озере [Popova et al., 2013].

Разрушение Челябинского метеороида рассматривается в целом ряде недавно появившихся работ. Дудоров и Майер (2014) использовали модель прогрессивной фрагментации (разрушение на два фрагмента). Для лучшего воспроизведения световой кривой авторы использовали различные масштабные факторы в законе изменения прочности для разных диапазонов размеров фрагментов и зависимость коэффициента конверсии в звездные величины от температуры. Использовались постоянная эффективность свечения в 2% и оценка температуры по закону Стефана–Больцмана по интенсивности свечения, что является слишком упрощенным подходом, поскольку за формирование излучения болида отвечает протяженная область с некоторым профилем температуры [Голубь и др., 1997]. Эффективная яркостная температура не сильно меняется на высотах 50–30 км, а рост интенсивности излучения на этих высотах вызван скорее увеличением светящейся области благодаря разрушению метеороида, чем ростом температуры излучающей области. Прогрессивная фрагментация приводит к образованию более $1,3 \cdot 10^5$ фрагментов суммарной массой 67 тонн. Распределение фрагментов по массе ассиметрично, имеет резкий максимум в области масс порядка 1 кг, большая часть фрагментов имеет массы 0,1–1 кг, что не соответствует наблюдавшейся картине. Прогрессивная фрагментация с разрушением на два фрагмента обычно приводит к дефициту мелких фрагментов [Artemieva and Shuvalov, 2001; Popova, 2011].

Avramenko et al. (2014) предложили модель разрушения с увеличением суммарной площади фрагментов по некоторому закону, который на самом деле близок к известной модели pancake. При этом авторы предлагают оценивать число фрагментов и массу среднего фрагмента из известных полной массы и площади фрагментов. Авторы предполагают, что одна часть метеороида была малопрочной, что и привело к разрушению и интенсивному энерговыделению на высоте 50–30 км, а другая часть обладала более высокой прочностью, и ее разрушение произошло на более низких высотах, что объясняет второй меньший максимум на кривой энерговыделения. Средний размер фрагмента авторы оценивают в 2,5 кг.

Bogovicka et al. (2013) также описывают сложный характер фрагментации, предполагая, что около 1% массы ответственно за увеличение яркости болида на высотах 45–50 км, а 95% массы было разрушено на высотах около 30 км до мелких (меньших 1 кг) фрагментов. На высоте около 26 км масса составляла около 20 тонн по данным о торможении (что согласуется и с нашим моделированием, описанным выше) и около 10 тонн – на высоте 22 км.

Все описанные модели приводят к общему выводу, что разрушение метеороида началось на высотах порядка 45–50 км при нагрузках порядка 0,2–0,7 МПа, наиболее интенсивно протекало на высотах около 30 км и продолжалось вплоть до высоты около 20 км. Множественные мелкие фрагменты, собранные в районе Александровка–Березняки–Депутатское, были образованы на высотах 30–50 км. Крупнейший фрагмент, размером в несколько сот килограммов, мог достичь озера Чебаркуль. Должны существовать и другие фрагменты, с массами порядка нескольких килограмм или десятков килограммов в головной (западной) части эллипса рассеяния. Сложный характер фрагментации приводит к сложному распределению фрагментов по массе.

Низкая доля массы метеоритов по отношению к начальной массе метеороида объясняется, скорее всего, именно его интенсивным разрушением на большое число фрагментов, которые не успевают разделиться и продолжают лететь в общей горячей светящейся области, где их абляция происходит более эффективно, благодаря объемному испарению.

Вещество Челябинского метеороида на поверхности Земли

Данные о собранных метеоритах и их распределение

Сбор метеоритного материала начался сразу после падения, первые находки мелких фрагментов на озере Чебаркуль подтвердили метеоритную природу события. Несколько экспедиций занималось сбором метеоритов. Согласно работе Бадюкова и др. (2014) выборка зарегистрированных метеоритов включает информацию о 1923 образцах, общей массой 730,9 кг, включая наибольший фрагмент в ~550 кг, извлеченный из озера. Минимальная масса фрагмента метеорита в этой выборке составляет 0,04 г.

Точная информация о местах падения известна для 1783 метеоритов выборки [Бадюков и др., 2014]. Поле рассеяния простирается от 60,32°E, 54,959°N (полынь и место нахождения крупнейшего фрагмента) до примерно 54,7°N, 61,3°E вблизи пос. Александровка, то есть имеет длину более 80 км (рис. 8,а). Максимальная ширина эллипса рассеяния составляет 6–7 км. Крупнейшие фрагменты найдены в головной (западной) части эллипса рассеяния. В работе Бадюкова и др. (2014) выборка условно разделена на 3 популяции метеоритов в зависимости от места падения: группу А – метеориты, найденные восточнее с. Еманжелинка, с характерными массами менее 10 г; группу В – метеориты, найденные в районе пос. Депутатский, типичные массы от десятков грамм до 500 г; группу С – метеориты, собранные западнее пос. Депутатского, с массами от сотен грамм до 23,4 кг (рис. 8).

Доступна информация о 1695 фрагментах (из упоминавшихся 1923), собранных различными экспедициями, без указания их места падения. В работе Ророва et al. (2013) приведены координаты для 178 метеоритов, включая несколько фрагментов с массами большими 1 кг. Именно эти данные будут использоваться в настоящей работе.



a)

Рис. 8. (а) – Фрагменты метеорита с указанными местами падения; (б) – Отмечены места находок. Черная линия – траектория метеороида, цифры обозначают высоту траектории над горизонтом

б)



Распределение фрагментов по массам приведено на рис. 9. Опубликованные данные дополнены двумя фрагментами с массами в 3,4 и 23,4 кг. Хотя здесь использованы данные для 1697 фрагментов, оно мало отличается от распределений для 1923 и 1696 фрагментов, приведенных в [Бадюков и др., 2014]. Полная масса составляет 93,6 кг, медианное значение массы равно 1,74 г, среднее значение – 55,2 г. Распределение асимметрично. Распределение метеоритов, приведенных в Таблице S13 [Ророва et al., 2013], содержит данные о фрагментах с полной массой около 80 кг, средней массой 450 г и медианным значением в 134,5 г и представляет собой распределение более крупных фрагментов (рис. 9).

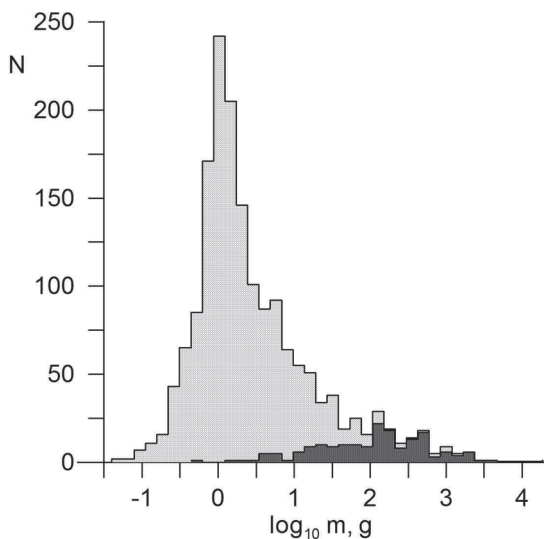


Рис. 9. Гистограмма распределения по массам фрагментов метеорита Челябинск. Черным показана гистограмма распределения фрагментов с опубликованными координатами

Фрагменты на озере Чебаркуль

Вскоре после падения была обнаружена полынья на озере Чебаркуль (примерно 7×8 м, почти круглая), на расстоянии примерно 71 км от места максимальной вспышки. На расстояниях 50–100 м от полыньи были собраны мелкие фрагменты (мм-размера), позднее идентифицированные как метеориты, LL-хондриты. В марте 2013 специалистами Уральского федерального университета была проведена магнитометрическая съемка, показавшая наличие магнитной аномалии на дне озера. Весной 2013 г. местными жителями из полыньи при помощи магнита вытаскивались мелкие фрагменты метеорита, коллекция только одного из жителей включает фрагменты полной массой около 1,7 кг (массы отдельных экземпляров – от 0,002 до 0,1 кг). В октябре 2013 г. со дна озера были подняты фрагменты метеорита (массами от 0,9 до 8 кг), включая главную массу с наибольшими размерами по осям 88×66×62 см и примерной массой 540 кг [Кочеров и Тюменцев, 2014], фрагмент с массой 65 кг откололся от основного фрагмента при подъеме. Возможно, какие-то фрагменты (массами в кг или десятков кг) еще находятся на дне озера, но нет оснований полагать, что там имеется фрагмент, сравнимый с главной массой. Полная масса вытасканных на данный момент фрагментов превышает 625 кг.

Оценки выпавшей массы

Бадюков и др. (2014) предполагают, что асимметричный характер распределения обусловлен сложным процессом фрагментации, и предлагают представить распределение фрагментов суммой трех независимых лог-нормальных распределений со средними значениями масс в 0,8, 1,6 и 54 г, соответственно. Авторы предполагают, что существование как минимум трех независимых групп метеоритов может соответствовать трем последовательным стадиям разрушения метеороида. Используя аппроксимированное распределение, авторы оценивают полную массу выпавших фрагментов примерно в 140 тонн. Хотя авторы рассматривают эту оценку как нижнюю, скорее всего, это завышенное значение. Наблюдаемое распределение фрагментов можно аппроксимировать различными законами распределения [Gritsevich et al., 2013], каждый из которых приведет к своему значению полной массы. Кроме того, нет уверенности в том, что распределение, описывающее набор фрагментов с суммарной массой 69 кг, можно экстраполировать на гораздо большее число фрагментов с полной массой, большей на три порядка. Предположение о трех последовательных стадиях разрушения метеороида также сильно упрощает наблюдающуюся картину разрушения.

Полная масса, которую определили Бадюков и др. (2014), была получена в предположении, что масса наибольшего фрагмента составляет 3,4 кг. Авторы также попытались оценить массу наибольшего фрагмента, основываясь на кумулятивном распределении для тысячи фрагментов и его представлении в виде степенной функции $N \sim m^{-1.296}$ в интервале масс 30–300 г, (это другое распределение, чем ранее рассматривавшееся лог-нормальное, чье кумулятивное распределение выражается через функцию ошибок). Авторы оценивают массу наибольшего фрагмента в 400–2000 кг для 100 и 1000 тонн полной массы.

Кумулятивное распределение для 1697 фрагментов приведено на рис. 10, аппроксимация в виде степенной функции соответствует $dN \sim m^{-0.5} d(\log m)$ в диапазоне масс 10–300 г, что близко к значению показателя степени (–0,6), характерному для катастрофического разрушения и найденному в [Jenniskens et al., 1994] для

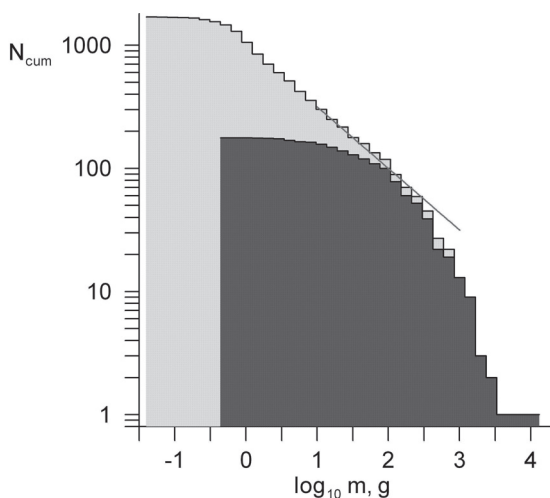


Рис. 10. Кумулятивное распределение собранных фрагментов метеорита (1697 – серое, 178 – черное)

распределения фрагментов метеорита Мбале. В диапазоне масс меньших 10 г велика вероятность неполного сбора фрагментов из-за их малого размера, а в диапазоне масс больших 300 г – из-за редкой встречаемости и большой площади поля рассеяния [Бадюков и др., 2014].

Данные, представленные в Таблицах S13 и S14 статьи [Popova et al., 2013] позволили описать эти фрагменты лог-нормальным законом распределения и оценить полную массу как >790 кг. Эти данные содержат информацию о примерно 92 кг метеоритов, что соответствует линейной плотности 6 кг/м. Это оценка снизу. Другая оценка линейной плотности была получена при анализе коллекции В. Кубрина, который оценил, что его находки составляют только 10% от всего материала, собранного на площади примерно в $0,23 \text{ км}^2$ [Popova et al., 2013]. Тогда массовая плотность составляет 57 кг/км^2 в этом районе. При предположении, что поле рассеяния имеет ширину порядка 2 км (основываясь на сравнении с полем рассеяния Алмахаты Ситты [Jenniskens et al., 2009]), линейная плотность составит 114 кг/м . По аналогии с предыдущими падениями метеоритов можно предположить, что линейная плотность метеоритов постоянна по траектории, тогда полную выпавшую массу между Александровкой и Депутатским можно оценить примерно в 3000 кг. Если та же плотность сохраняется и дальше (до места находки 1,8 кг фрагмента), то полную массу можно оценить в 5100 кг. Конечно, точность этих оценок невысока, зависит от целого ряда предположений (эффективной ширины поля рассеяния, постоянства линейной плотности, точности оценки доли метеоритов, попавших в коллекцию В. Кубрина и т.д.).

Как уже упоминалось, фрагменты в районе Александровка-Депутатский образовались в основном на высотах 30–40 км. Фрагменты, продолжившие свой полет дальше по траектории до 25 км высоты и ниже, образовали западную часть поля рассеяния. Эти фрагменты, как указано выше, могут добавить около 1000 кг в виде 20–2000 метеоритов разной массы и могут оказаться разбросаны в области до 70 км от точки максимальной яркости. Таким образом, консервативная оценка составляет 4000–6000 кг, то есть 0,03–0,05% от начальной массы.

Существуют разные оценки количества выпавшего вещества в долях от начальной массы. Модель прогрессивной фрагментации (с разрушением на два фрагмента [Bland and Artemieva, 2006] для каменных метеороидов оценивает эту долю в 5–15%,

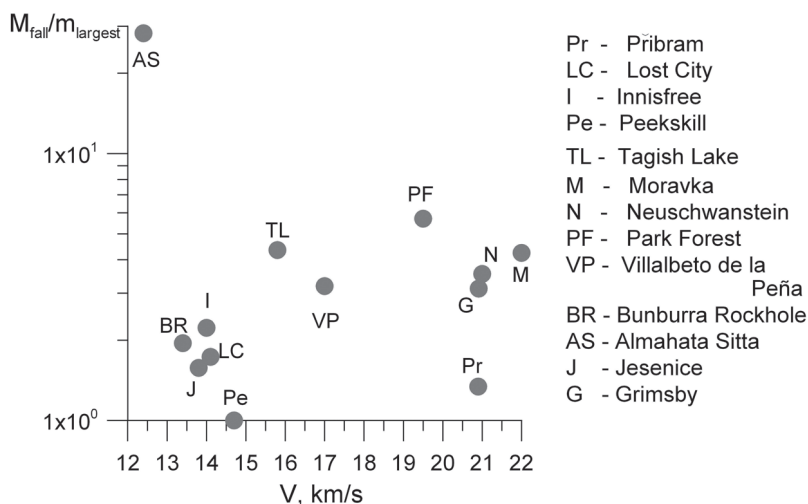


Рис. 11. Соотношение полной собранной массы и массы наибольшего фрагмента для 13 метеоритов

ее применение к Челябинскому событию соответствует примерно 6%. Данные для 13 метеоритов, чей вход был зарегистрирован и начальные массы были оценены разными методами, приведены в [Ророва et al., 2011]. Типичные значения для падений обыкновенных хондритов составляют 0,1–3%, наибольшее значение примерно 10% достигается для двух наиболее медленных и небольших метеоритов (Иннисфри и Лост-Сити, $M \sim 40\text{--}160$ кг, $V \sim 14$ км/с). Наименьшие значения наблюдались у более неоднородных и пористых метеоритов, таких как углистый хондрит Тагиш Лэйк и полимиктовый урелит Алмахата Ситта – 0,01–0,02%, при падении которых также, как и в случае Челябинского метеороида, наблюдалось образование пылевых облаков, то есть их разрушение шло катастрофическим образом и сопровождалось образованием большого количества мелких фрагментов и пыли [Ророва, 2011]. По аналогии с известными событиями, можно оценить массу Челябинских метеоритов в 1300 тонн при доле 10%, 130 тонн при доле в 1%, в 1,3 тонны при доле 0,01%.

Halliday et al. (1989) оценивают отношение полной выпавшей массы к массе наибольшего фрагмента как 1,25–4. Данные по 13 падениям (рис. 11) показывают, что полная найденная масса больше, чем наибольший найденный фрагмент, в среднем в 4,8 раза (от 1 до 28 раз). Если считать, что масса наибольшего фрагмента ЧМ, поднятого из озера Чебаркуль, составляет около 600 кг, то полная масса метеоритов составит 3000 кг. Для 11 из 13 падений, рассмотренных в работе [Ророва et al., 2011], имеются оценки полной выпавшей массы, полученные тем или иным образом. Конечно, эти оценки весьма приблизительны и не очень достоверны. В среднем, собранная масса составляет около 30% от ожидаемой (хотя разброс значений очень велик – от 2 до 92%). В таком случае, можно ожидать, что полная выпавшая масса составит 9000 кг.

Поле рассеяния

Как уже отмечалось, полное поле рассеяния достигает в длину 80 км и нескольких км в ширину. На рис. 12 отмечено положение 178 фрагментов и 21 группа

фрагментов, чьи координаты опубликованы в [Pороva et al., 2013]. В основном это фрагменты, относящиеся к группам А и В по терминологии Бадюкова и др. (2014), образовавшиеся как во время наибольшего энерговыделения, так и на более низких высотах. Сравнение этой части поля рассеяния с результатами моделирования приведено на рис. 12.

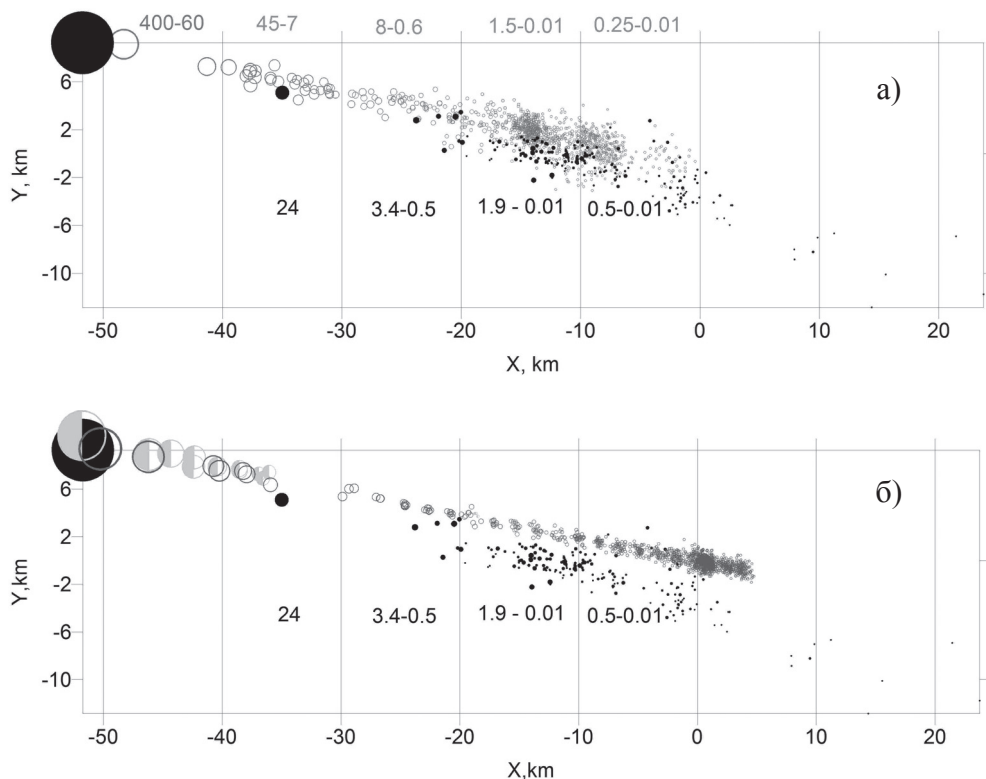


Рис. 12. Часть поля рассеяния, черные кружки – собранные фрагменты метеоритов, на двух панелях показаны три модельных реализации (серые символы)

При моделировании ставилась цель воспроизвести кривые блеска и торможения, а не поле рассеяния, тем не менее, модельное поле рассеяния не противоречит наблюдаемому. На рис. 12,а отмечен диапазон масс фрагментов в пределах нескольких зон поля рассеяния (черные цифры – собранные фрагменты; серые – одна из модельных реализаций), которые согласуются друг с другом. Наибольший фрагмент в этой реализации составлял 190 кг и его место падения оказывается чуть восточнее, чем полынья на озере (большой черный кружок). Позиция фрагментов в 3,4 кг и в 24 кг согласуется с модельным полем рассеяния. Ветер, который приближенно учитывался в этой реализации, приводит к заметному сносу наиболее легких фрагментов. Полное число фрагментов в этом случае составляет около 1200.

Число и размер фрагментов, их местоположение в поле рассеяния меняется в модели от реализации к реализации. Две другие модельные реализации показаны на рис. 12,б (без учета ветра). Наибольшие фрагменты здесь составляют 300 и 400 кг, и располагаются ближе к полынье. Одна из этих реализаций соответствует увели-

ченной прочности фрагментов (наибольший из них не разрушился даже при нагрузке порядка 16,5 МПа) и небольшому числу фрагментов в каждом разрушении, поэтому в этой реализации почти не образуется мелких фрагментов.

Соответствующие распределения фрагментов по массе показаны на рис. 13. К сожалению, информация о поле рассеяния не полна, число найденных крупных фрагментов (>1 кг) пока невелико. Возможно, какие-то фрагменты еще будут найдены, возможно, модель предсказывает слишком много крупных фрагментов.

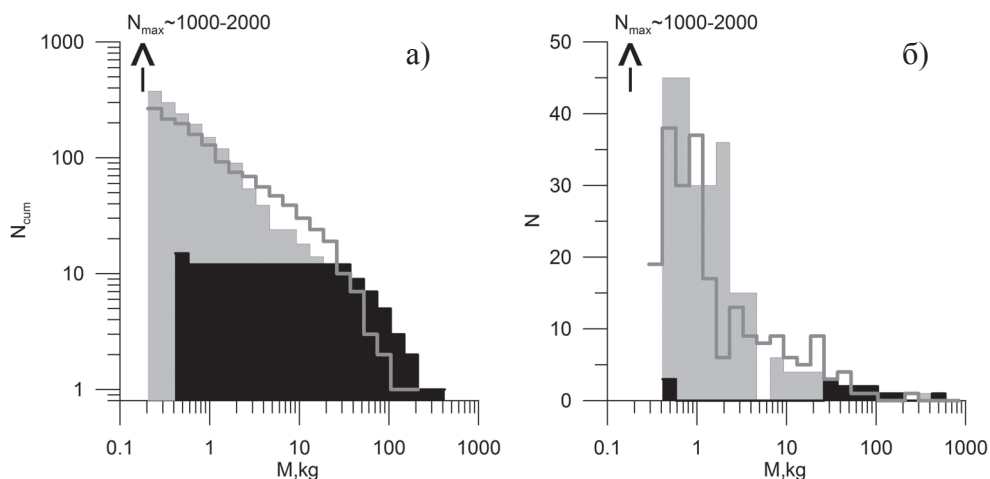


Рис. 13. Распределение фрагментов (а – кумулятивное, б – дифференциальное) в трех модельных реализациях (наименьшее число фрагментов соответствует реализации, показанной на рис. 12,б)

Распределение фрагментов метеорита на поверхности зависит как от распределения образующихся фрагментов, так и от последующего процесса абляции. Особенно существенным оказывается влияние процесса абляции на фрагменты, летящие вместе, когда условия в горячей области приводят к более интенсивному испарению и сгоранию фрагментов, чем при полете отдельных фрагментов. Чем больше тело, тем, возможно, большая часть массы в виде фрагментов, продолжает лететь вместе, что и приводит к большей величине испарившейся массы, и, соответственно, меньшей доли массы, выпавшей в виде метеоритов.

Какая-то часть метеороида имела большую прочность, чем предполагалось в модели, и именно это позволило крупному фрагменту (массой >500 кг) долететь до озера, не разрушившись. Этот фрагмент должен был иметь прочность большую 15 МПа, что больше, чем наблюдалось при входе болидов, где верхняя граница прочности составляла 10 МПа [Ророва et al., 2011]. Только для метеороида, вызвавшего образование кратера Каранкас, прочность оценивалась в 18 МПа [Borovicka and Spurny, 2008].

Заключение

Представлена световая кривая (кривая блеска) болида, проведено сравнение результатов различных авторов. Кривая блеска является наиболее точной оценкой

профиля энерговыделения в атмосфере. Для световой кривой Челябинского болида характерно наличие нескольких явно выраженных вспышек излучения, связанных с разрушением метеороида. Явно можно выделить рост интенсивности за, примерно, 4 сек до максимума, сам максимум, вспышку через секунду позже. Это соответствует высотам примерно в 45, 30 и 24–25 км.

Предложена модель взаимодействия ЧМ с атмосферой, позволяющая описать наблюдательные данные. Наиболее подходящим описанием Челябинского события может быть гибридная модель, в которой предполагается, что одна часть начальной массы образует облако фрагментов и паров, а другая – независимо летящие фрагменты, продолжающие разрушаться дальше.

Разрушение метеороида началось на высотах порядка 45–50 км при нагрузках порядка 0,2–0,7 МПа, наиболее интенсивно протекало на высотах около 30 км и продолжалось вплоть до высоты около 20 км. Прочность различных фрагментов метеороида варьировалась сильнее, чем предсказывает простой закон увеличения прочности с уменьшением размера. Множественные мелкие фрагменты, собранные в районе Депутатского, были образованы на высотах 30–50 км. Крупнейший фрагмент, размером в несколько сот килограммов, мог достичь озера Чебаркуль. Должны существовать и другие фрагменты с массами порядка нескольких кг или десятков килограммов в передней (западной) части эллипса рассеяния. Сложный характер фрагментации приводит к сложному распределению фрагментов по массе. Результаты моделирования не противоречат наблюдениям.

Приведены различные оценки полной выпавшей массы, наиболее вероятной представляется оценка в 4000–10 000 кг, что составляет 0,03–0,06%. Низкая доля массы метеоритов по отношению к начальной массе метеороида объясняется, скорее всего, именно его интенсивным разрушением на большое число фрагментов, которые не успевают разделиться и продолжают лететь в общей горячей светящейся области, где их абляция происходит более эффективно.

Литература

Бадюков Д.Д., Дудоров А.Е., Хаibraхманов С.А. Распределение фрагментов Челябинского метеорита по массам // Вестник Челябинского университета, 2014. 330 (1), с. 40–46.

Григорян С.С. (1979) Движение и разрушение метеоритов в планетных атмосферах // Космические исследования. 17. С. 875–893.

Голубь А.П., Косарев И.Б., Немчинов И.В., Шувалов В.В. Излучение и абляция крупного метеороида при его движении сквозь атмосферу Земли // Астрон. вестн. 1996. Т. 30. № 3. С. 213–228.

Голубь А.П., Косарев И.Б., Немчинов И.В., Попова О.П. Спектры излучения ярких болидов // Астрономический вестник. 1997. Т. 31. № 2. С. 99–112.

Дудоров А.Е., Майер А.Е. Разрушение Челябинского метеороида в атмосфере / В: Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / Ред. Н.А. Антипин и др. Челябинск, 2014. С. 136–150.

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. 2013, 47, с. 1–16.

Кочеров А.В., Тюменцев В.А. Фрагменты метеорита Челябинск из озера Чебаркуль // В: Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / ред. Н.А. Антипин и др. Челябинск, 2014, с. 348–354.

Левин Б.Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе. М.: Изд. АН СССР, 1956. 294 с.

Попова О.П., Немчинов И.В. Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли // Катастрофические воздействия космических тел / Ред. Адушкин В.В., Немчинов И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 92–117.

Цветков В.И. Сихотэ-Алинский метеоритный дождь: дробление, рассеяние, траектория и орбита // Метеоритика. 1987. Вып. 46. С. 3–10.

Цветков, В.И., Скрипник А.Я. Атмосферное дробление метеоритов с точки зрения механической прочности // Астроном. вестн. 1991, 25, № 3, с. 364–371.

Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Гигантские болиды в атмосфере Земли // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 3. С. 241–251.

Шувалов В.В., Артемьева Н.А., Попова О.П. Оценка параметров ударной волны, вызванной падением челябинского космического тела 15 февраля 2013 г. Настоящий сборник.

Artem'eva N.A., Shuvalov V.V. Interaction of shock waves during passage of disrupted meteoroid through atmosphere // Shock Waves. 1996. V. 5. № 6. P. 359–367.

Artemieva N. and Shuvalov V. 2001. Motion of a fragmented meteoroid through the planetary atmosphere // JGR 106: 3297–3310.

Avramenko M., Glazyrin, I., Ionov G., Karpeev A. Simulation of the airwave caused by the Chelyabinsk superbolide // J. Geophys. Res. 2014; DOI: 10.1002/2013JD021028.

Baldwin A., Y. Sheaffer Ablation and breakup of large meteoroids during atmospheric entry // J. Geophys. Res. 76, pp. 4653–4668 (1971).

Bland P., N. A. Artemieva The rate of small impacts on Earth. Meteorit // Planet. Sci. 41, pp. 607–631 (2006).

Borovička, J., Spurný, P., 2008. The Caranacas meteorite impact – encounter with a monolithic meteoroid // Astron. Astrophys. 485, L1–L4.

Borovička J., O.P. Popova, I.V. Nemtchinov, P. Spurný Z. Ceplecha. Bolides produced by impacts of large meteoroids into the Earth's atmosphere: Comparison of theory with observations. I. Benesov bolide dynamics and fragmentation // Astron. Astrophys. 334, pp. 713–728 (1998).

Borovička J. and 6 co-authors. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013, v. 503, p. 235–237.

Boslough M., D. Crawford, A. Robinson, Trucano T. Mass and penetration depth of Shoemaker-Levy 9 fragments from time-resolved photometry // Geophys. Res. Lett. 21, pp. 1555–1558 (1994).

Brown P.G., Spalding R.E., ReVelle D.O., Tagliaferri E., Worden, S.P. (2002) The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature 420: 294–296.

Brown P.G. and 32 co-authors (2013) A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature 503: 238–241.

Ceplecha Z., D.O. Revelle Fragmentation model of meteoroid motion mass loss and radiation in the atmosphere // Meteorit. Planet. Sci. 40, pp. 35–54. (2005).

Ceplecha Z., P. Spurný, J. Borovička, Kečlikova J. Atmospheric fragmentation of meteoroids // Astron. Astrophys. 279, pp. 615–626. (1993).

Ceplecha Z., J. Borovička, W.G. Elford, D.O. ReVelle, R.L. Hawkes, V.Í. Porubčan, Šimek M. Meteor phenomena and bodies // Space Sci. Rev. 84, pp. 327–471. (1998).

Chyba C.F., Thomas P.J. and Zahnle K.J. 1993. The 1908 Tunguska explosion – Atmospheric disruption of a stony asteroid // Nature 6407:40–44.

Frost M.J. Size and spacial distribution in meteoritic showers // Meteoritics. 1969. V. 4. № 3. P. 217–232.

Golub A.P., I.B. Kosarev, I.V. Nemtchinov, Popova O.P. Emission spectra of bright bolides // Sol. Syst. Res. 31, pp. 85–98. (1997).

Gorkavyyi N., Rault D.F., Newman P.A., Silva A.M.; Dudorov A.E. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // Geophysical Research Letters. 2013, v.40, p. 4728–4733.

- Gritceвич, M., Vinnikov, V., Kohout, T., Toth, J., Peltoniemi, J., Turchak, L. & Virtanen, J.* A comprehensive study of distribution laws for the fragments of Kosice meteorite // *Meteoritics and Planetary Science*. 2014. 49, 3, p. 328–345.
- Hills J.G., Goda M.P.* The fragmentation of small asteroids in the atmosphere // *Astron. J.* 1993. V. 105. № 3. P. 1114–1144.
- Halliday, I., A.T. Blackwell, A.A. Griffin.* The flux of meteorites on the earth's surface // *Meteoritics*. 1989. V. 24. P. 173–178.
- Jenniskens P., Betlem H., Betlem J. et al.* 1994. The Mbale meteorite shower // *Meteoritics* 29, p. 246–254.
- Jenniskens P., and 34 colleagues,* 2009. The impact and recovery of asteroid 2008 TC₃ // *Nature*. 458, p. 485–488.
- Passey Q.R. and Melosh H.J.* 1980. Effects of atmospheric breakup on crater field formation // *Icarus* 42: 211–233.
- Popova O.* Meteoroids ablation models // *Earth, Moon, and Planets* (2005) 95: 303–319.
- Popova O.* Passage of Bolides Through the Atmosphere. Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies Proc // *Meteoroids Conference Breckenridge Colorado USA May 24–28 2010*. W.J. Cooke, D.E. Moser, B.F. Hardin, D. Janches, Eds. NASA/CP-2011-216469 p. 232 (2011).
- Popova O., J. Borovička, W.K. Hartmann, P. Spurný, E. Gnos, I. Nemtchinov, Trigo-Rodríguez J.M.* Very low strength of interplanetary meteoroids and small asteroids // *Meteorit. Planet. Sci.* 46, p. 1525–1550 (2011).
- Popova O.P. and 59 co-authors.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013, v. 342, Issue 6162, p. 1069–1073.
- Shuvalov V.V., N.A. Artemieva.* Numerical modeling of Tunguska-like impacts // *Planet. Space Sci.* 50, p. 181–192 (2002).
- Svetsov V.V., I.V. Nemtchinov, Teterev A.V.* Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus*. 116. P. 131–153 (1995).