

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО СОБЫТИЯ В РАМКАХ ЖИДКОСТНОЙ МОДЕЛИ

В.В. Шувалов, В.В. Светцов, О.П. Попова, Д.О. Глазачев

Падение Челябинского метеороида рассматривается в рамках жидкостной модели, изначально предложенной для моделирования входов космических объектов размерами больше нескольких десятков метров. Полученные распределения избыточного давления на поверхности Земли и потоки излучения на поверхность удовлетворительно согласуются с наблюдательными данными. Жидкостная модель может использоваться для оценки последствий падения большей части опасных космических объектов. Рассматриваются гипотетические падения Челябинского метеороида при разных углах наклона траектории, оцениваются последствия таких падений. Показано, что вертикальное падение привело бы лишь к незначительному увеличению амплитуды ударной волны на поверхности по сравнению с реальным падением под углом $18,5^\circ$.

Введение

Событие 15.02.2013, Челябинский болид, выделяется в ряду других болидных явлений прежде всего наличием большой области механических повреждений в населенной местности и огромным количеством разнообразных данных. Эти данные представляют собой уникальную возможность протестировать и откалибровать теоретические модели, предназначенные для оценки последствий падения крупных космических объектов.

Крупные космические тела проникают в плотные слои атмосферы и существенно разрушаются аэродинамической нагрузкой прежде, чем начинают заметно деформироваться и тормозиться. В таком случае разрушенное тело можно рассматривать как объект без прочности, который ведет себя как жидкость. Оценки [Svetsov et al., 1995] показывают, что это описание применимо для каменных тел размером больше 40–50 метров. Расхождение фрагментов метеороидов и образование кратерных полей и полей рассеяния, в основном, наблюдается для каменных тел меньшего (<10 м) размера. Размер Челябинского метеороида (20 м) хотя и меньше, но сравним с этой границей, кроме того, основное энерговыделение в случае Челябинского события произошло на высотах 50–25 км, где астероид уже был существенно разрушен [Borovička et al., 2013; Porova et al., 2013]. Поэтому попытка применить жидкостную модель (quasi-liquid, QL) к Челябинскому событию представляет несомненный интерес. Если такие факторы как распределение избыточного давления и потоков излучения на поверхности Земли (именно эти факторы являются наиболее опасными, когда происходит “метеорный взрыв” над поверхностью) удовлетворительно согласуются с наблюдениями, то жидкостную модель можно использовать для оценки последствий падения практически всех опасных (то есть, производящих разрушения) космических объектов.

Полуаналитические модели используют стандартные уравнения метеорной физики [Бронштэн, 1981], дополненные сценарием фрагментации, в котором учитывается разрушение на отдельные фрагменты, рассматриваемые как квазижидкие и/или твердые частицы. Для Челябинского метеороида [Brown et al., 2013; Porova et al., 2013] такие модели дали возможность воспроизвести световую кривую и торможение. Простая гибридная модель (simple hybrid, SH-модель) [Porova et al., 2013] предполагает, что разрушение происходит в различных формах, некоторая часть исходной массы распадается на отдельные твердые фрагменты, которые могут достичь поверхности, в то время как другая часть образует облако или несколько облаков мелких фрагментов и паров, которые можно описывать в соответствии с ‘pancake’ моделью [Hills and Goda, 1993]. Хотя в модели SH имеется много свободных параметров (прочность при разрушении, распределение по размерам фрагментов, доля массы, которая превращается в облако фрагментов и паров), тем не менее, эта модель позволяет выбрать наилучший сценарий фрагментации и описать как наблюдаемую световую кривую, так и торможение, и поле рассеяния метеоритов.

Траектория Челябинского метеороида (ЧМ) была очень пологой – ее угол к горизонтالي составил только 18,5°. Широко обсуждалось, что при другой траектории падения ЧМ последствия были бы более разрушительными [Harris et al., 2015]. Часто предполагают, что при больших углах наклона траектории (при ударах, близких к вертикальному) основное выделение энергии происходит на более

низких высотах, и благодаря наличию переноса момента количества движения вниз к поверхности (эффект, который отсутствует в случае точечного взрыва), последствия на поверхности оказываются гораздо более серьезными [Kring and Boslough, 2014]. Чтобы проверить или опровергнуть эти предположения, мы рассмотрели гипотетическое падение метеороида, аналогичного ЧМ с разными углами наклона траектории.

Целью данной работы является моделирование Челябинского события с помощью гидродинамической модели и сравнения результатов с имеющимися наблюдательными данными, результатами, полученными по полуаналитической SH-модели [Porova et al., 2013] и другим теоретическим моделям, оценки влияния угла наклона траектории на последствия падения метеороида, аналогичного ЧМ.

Методика расчетов

Моделирование Челябинского события проводилось в два этапа. На первом этапе по двумерной методике моделировалось движение метеороида в атмосфере с учетом его деформации, торможения, разрушения и испарения [Shuvalov, Artemieva, 2002; Шувалов, Трубецкая, 2007]. Этот подход использовался для оценки последствий падения на Землю астероидов разных размеров в работах [Шувалов и др., 2013; 2016], где можно найти его подробное описание. Расчеты первого этапа заканчивались, когда скорость метеороида существенно уменьшалась (до 5 км/с).

Росселандов свободный пробег в воздухе при обычных температурах за головной ударной волной (10000–50000 K) не превышает 1 м на высотах ниже 30–40 км [Авилова и др., 1970] и, следовательно, можно использовать приближение лучистой теплопроводности для расчета тепловых потоков на поверхности таких объектов как Челябинский метеороид размером около 20 м. Излучение, падающее на поверхность тела, приводит к его испарению, которое рассматривается в качестве основного механизма абляции.

Для описания испарения и потерь на излучение используются два приближения уравнения переноса излучения в зависимости от оптической толщины среды: приближение лучистой теплопроводности с Росселандовым свободным пробегом фотонов для оптически толстой среды и приближение для объемного высвета для оптически тонкой среды [Зельдович, Райзер, 1966].

Полученные распределения газодинамических и термодинамических параметров использовались в качестве начальных данных для второго этапа расчетов, на котором в системе координат, связанной с поверхностью Земли, моделировалось распространение ударной волны на большие расстояния. Оба этапа расчетов были реализованы с помощью трехмерного численного комплекса SOVA [Shuvalov, 1999].

Кроме того, полученные на первом и втором этапах расчеты распределения температуры и плотности, использовались при расчете потоков излучения на поверхности Земли. Их вычисление проводилось путем интегрирования уравнения переноса излучения вдоль лучей, проходящих через светящуюся область с температурой выше 500 K, поскольку при меньших температурах излучением газа можно пренебречь. Для этих расчетов строилась расчетная сетка на поверхности Земли и проводились лучи, которые выходят из узлов сетки под разными углами

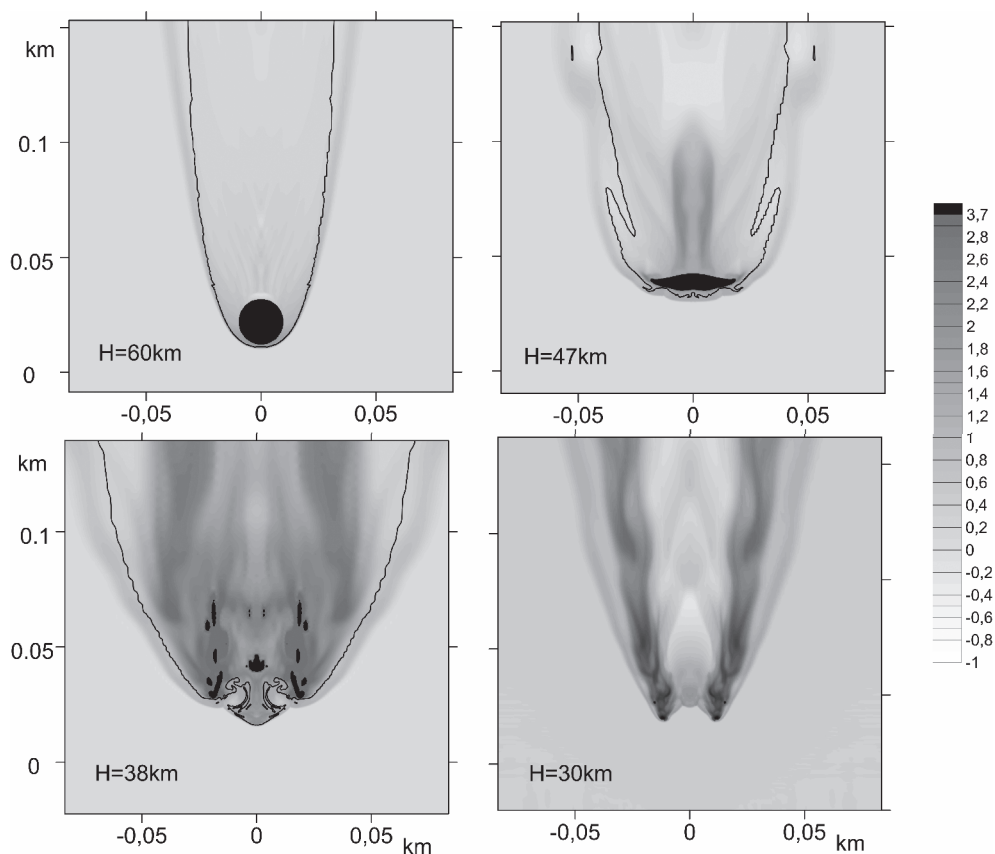


Рис. 1. Разрушение 19 м астероида, входящего в атмосферу со скоростью 19 км/с под углом $18,5^\circ$. Показаны распределения относительной плотности $\delta = \rho / \rho_a(h)$, где ρ – плотность вещества (воздух, пары, тело), а $\rho_a(h)$ – плотность невозмущенного воздуха на высоте h , на разных высотах (указанных на соответствующих панелях). Неиспарившееся вещество астероида показано черным цветом. На вертикальной оси указано расстояние вдоль траектории, по горизонтальной оси – расстояние в направлении, перпендикулярном траектории падения

к поверхности и пересекают излучающий объем. Количество лучей равно 6400 (80 лучей в каждом из двух угловых направлений). Уравнение переноса излучения решалось вдоль каждого из лучей; интегрирование начиналось с холодного воздуха выше светящейся области. В расчетах использовались таблицы уравнения состояния и пробега излучения воздуха [Кузнецов, 1965; Авилова и др., 1970], Н-хондрита [Косарев, 1999, 2009]. Зависимость интенсивности излучения от энергии квантов учитывалась в многогрупповом приближении, которое раньше проверялось при моделировании мощных взрывов в атмосфере [Светцов, 1994а,б].

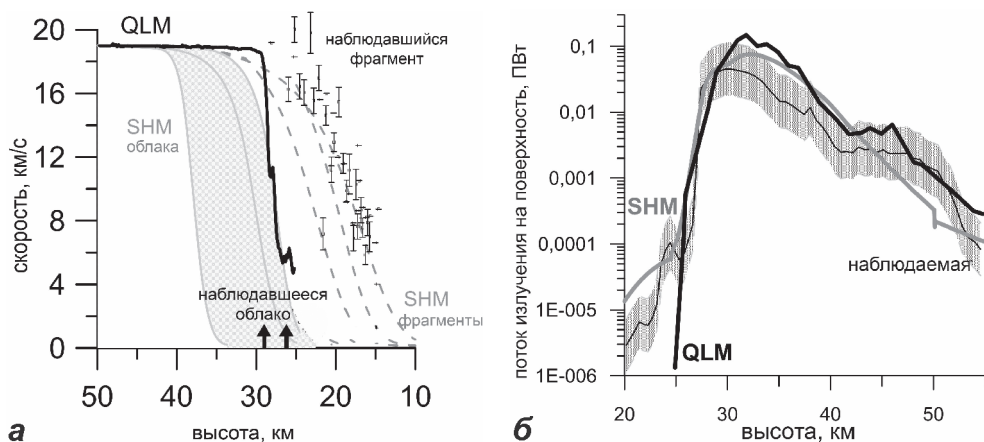


Рис. 2. (а) Торможение в атмосфере: наблюдаемое торможение главного фрагмента ниже 25 км – точки с погрешностью; примерная высота остановки облака фрагментов – вертикальные стрелки; торможение по модели SH – серые кривые; торможение по QL модели – черная кривая.

(б) Поток излучения на поверхность Земли во всем спектре, оцененный по наблюдаемой световой кривой [Ророва et al., 2013] – тонкая черная кривая с указанием неопределенности; по световой кривой, полученной в рамках SH модели, – серая; по QL модели – черная

Разрушение и торможение Челябинского метеороида

Мы провели серию численных экспериментов, в которых моделировалось падение сферического каменного астероида с диаметром 19 м, плотностью $3,32 \text{ г/см}^3$, скоростью 19 км/с, вошедшего в атмосферу под углом $18,5^\circ$ (к горизонту). Последовательные этапы взаимодействия этого тела с атмосферой показаны на рис. 1. Квазизидкий метеороид начинает деформироваться (сплющиваться) на высоте около 55 км; из-за неустойчивостей Рэлея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца на его поверхности возникают волнообразные возмущения. Развитие неустойчивостей ничем не ограничивается и, в конце концов, приводит к фрагментации. При разрешении более 20–30 точек на радиус метеороида высоты фрагментации и торможения слабо зависят от разрешения используемой расчетной сетки. Влияние возможного вращения метеороида не учитывалось. Испаренное вещество сдувается с поверхности тела и постепенно заполняет след. На высоте 47 км с увеличением аэродинамической нагрузки, поперечное сечение метеороида заметно увеличивается в согласии с аналитическими ‘pancake’ моделями [Hills and Goda, 1993]. Дальнейший рост неустойчивостей приводит к фрагментации метеороида, и он превращается в струю пара, ударно нагретого воздуха и фрагментов на высотах ниже 40 км. Фрагментация приводит к увеличению испаряющейся поверхности и, следовательно, к увеличению скорости абляции.

В работах [Ivanov et al., 1997a; 1997b; Шувалов, Трубецкая, 2010] было показано, что наличие внутреннего трения, то есть касательных напряжений, пропорциональных давлению, может повлиять на характер деформации разрушенного

метеороида, в частности, замедлить развитие неустойчивостей на его поверхности, что приводит к некоторому уменьшению высоты торможения.

На высоте около 33 км фрагменты метеороида полностью испаряются, но скорость образовавшейся струи пара на этой высоте все еще высока и отличается от начальной скорости метеорита менее чем на 1% (рис. 2, *а*). При определении скорости рассматривалось движение передней границы светящейся области (метеора) с температурой выше 0,5 эВ (температура прозрачности воздуха). На рис. 2, *а* полученная кривая торможения сравнивается с наблюдательными данными и с одним из вариантов моделирования по полуаналитической SH модели, главной целью которой было воспроизвести наблюдаемую световую кривую.

Струя пара и горячего воздуха в QL модели резко тормозится на высотах 27–29 км, где она заметно расширяется. Эти высоты близки к высоте торможения облака пыли и паров, наблюдавшегося в случае Челябинского события (рис. 2, *а*). Но самые крупные фрагменты ЧМ пережили интенсивное излучение, проникли глубже в атмосферу и, будучи достаточно яркими, были зафиксированы видеокамерами (рис. 2, *б*). Один из них (~ 600 кг) вызвал образование полыньи на озере Чебаркуль, и был впоследствии поднят со дна озера.

Согласно SH модели фрагментация, начавшись на высоте около 50–60 км, вызвала катастрофическое разрушение на 30–40 км, приведя к образованию облака фрагментов и паров, которое тормозится на 25–30 км. Только от 4000 до 6000 кг метеоритов упало на землю, что составляет лишь 0,03–0,05% от начальной массы метеорного тела. Согласно SH модели 76–90% начальной массы испаряется, а оставшаяся масса остается в виде пыли. Некоторые крупные фрагменты, не разрушившись, достигли более низких высот, часть из них там разрушилась, а небольшая часть достигла поверхности как метеориты.

Реальное разрушение ЧМ происходило, по-видимому, более сложным (чем в жидкостной модели) образом, но простая жидкостная модель дает неплохую оценку. Жидкостная модель (QL) не может предсказать формирование отдельных небольших фрагментов и падений метеоритов на Землю, но позволяет оценить высоту максимума энерговыделения с точностью до 2–3 км.

Ударная волна Челябинского метеороида в рамках QL модели и избыточное давление на поверхности Земли

Ударная волна (УВ) является основным поражающим фактором при падениях сравнительно небольших космических объектов и единственным в случае ЧМ. Ударная волна ЧМ не вызвала структурных повреждений кроме разбитых окон, оконных рам и дверей. Область разрушений, нанесенная на карту, показывает, что ударная волна имела цилиндрическую составляющую [Popova et al., 2013]. Сравнение результатов моделирования УВ с наблюдательными данными (областью разрушений, временами прихода УВ в различные точки, максимальным избыточным давлением) показывает, что предположение о выделении энергии в соответствии с световой кривой дает наилучшее согласие [Popova et al., 2013; Brown et al., 2013; Aftosmis et al., 2016].

На рис. 3 приведено сравнение распределений избыточного давления, полученных в рамках QL-модели и при предположении, что энерговыделение пропорционально световой кривой [Brown et al., 2013; Popova et al., 2013; Aftosmis et

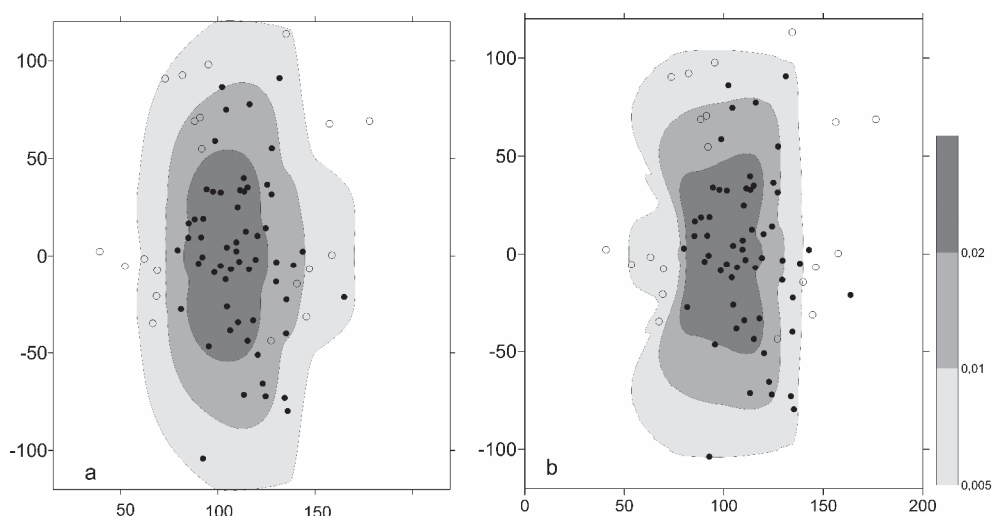


Рис. 3. Распределение максимального избыточного давления, полученное при моделировании на основе световой кривой (слева) и по QL модели (справа).

Светло-серый – избыточное давление $\Delta p > 0,5$ кПа (относительное избыточное давление $> 0,005$), серый – $\Delta p > 1$ кПа (относительное избыточное давление $> 0,01$), черный – $\Delta p > 2$ кПа (относительное избыточное давление $> 0,02$). Черные кружки – повреждения по данным полевых исследований и МЧС, пустые черные кружки – отсутствие повреждений [Popova et al., 2013]

al., 2016]. Обе модели удовлетворительно согласуются с наблюдательными данными. Максимальное избыточное давление превышает 4 кПа при моделировании на основе световой кривой и немного меньше (3,3 кПа) в модели QL. Различие областей с избыточным давлением > 1 кПа и > 2 кПа, не превышает 20%. Различия в формах контуров связано с различием в деталях выделения энергии вдоль траектории.

Оба моделирования (рис. 3) были проведены с использованием одного и того же гидродинамического пакета SOVA и тем же самым разрешением расчетной сетки. Моделирование, выполненное с помощью другого пакета [Aftosmis et al., 2016], основанное на световой кривой, приводит к контурам избыточного давления похожим на наши, но расчетные пиковые избыточные давления при одинаковых расстояниях от эпицентра, примерно, в два раза выше, область с избыточным давлением > 1 кПа – в два раза больше. Максимальное избыточное давление также выше, то есть 7 кПа вместо 3–4 кПа в наших моделях. Причины расхождения не выяснены. При моделировании с использованием метода СТН [Brown et al., 2013] избыточное давление в центре Челябинска оценивается в 3 кПа, что близко к значению, оцененному по разбитым стеклам ($3,2 \pm 0,6$ кПа) [Brown et al., 2013]. В работе [Avramenko et al., 2014] оценивают избыточное давление в центре города в ~ 2 кПа, наши две модели – в 2–3 кПа. Такое совпадение также можно считать удовлетворительным.

Таким образом, QL модель позволяет получить оценки областей избыточного давления, удовлетворительно согласующиеся с наблюдениями. В работе [Шувалов, Трубецкая, 2007] было показано, что случайный характер развития неустойчивостей при деформации метеороида позволяет определить высоту энерговыде-

ления лишь с точностью 2–3 км, такая неопределенность в высоте "взрыва" приводит к различиям в избыточных давлениях на поверхности Земли, значительно большим, чем наблюдаются на рис. 3.

Излучение ЧМ в рамках жидкостной модели

Световая кривая является наиболее точной оценкой профиля энергосвечения в атмосфере, хотя при входах больших разрушающихся тел следует помнить, что регистрируемый световой поток суммирует излучение достаточно протяженной области.

Камеры видеорегистраторов и камеры наблюдений, которые записали пролет метеороида, имеют целый ряд ограничений: малый динамический диапазон, автоматическое уменьшение диафрагмы, неизвестную спектральную чувствительность, отсутствие калибровки. Применение различных методов коррекции позволило определить световую кривую болида целому ряду авторов [Pорова et al., 2013; Borovicka et al., 2013; Brown et al., 2013; Емельяненко и др., 2013]. Яркость световых кривых, полученных по разным видеозаписям, может отличаться на 1–2 звездных величин [Brown et al., 2013]. Одна звездная величина примерно соответствует разнице в 2,5 раза в физических единицах. Для абсолютной калибровки Brown et al. (2013) использовали максимальную яркость, определенную спутниковой системой наблюдений (следует отметить, что сама спутниковая световая кривая не опубликована), а Pорова et al. (2013) сравнивали изображение болида с изображением Луны 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).

Следует отметить, что оценка интенсивности излучения спутниковой системой наблюдения зависит от предположений о соотношении между спектром источника и кривой чувствительности детектора [Brown et al., 2013]. Кроме того, разные авторы используют разные коэффициенты конверсии между физическими и звездными величинами. Эти факторы могут вносить неопределенность в интенсивность излучения, которая может достигать 2–3 раз.

Поток излучения на поверхность Земли, определенный в рамках QL модели, сравнивается с наблюдаемой световой кривой [Pорова et al., 2013] и световой кривой, полученной по SH модели, на рис. 2, б. Все три кривые достаточно близки друг к другу в диапазоне высот основного энергосвечения (примерно в 25–50 км). Рост потока излучения ниже 55 км связан с деформацией и увеличением поперечного сечения метеороида (рис. 1). Температура в светящейся области достигает 20000 К в фронтальной части, а в большей части светящейся области она составляет около 2500–6000 К. Фрагментация приводит к увеличению площади испаряющейся поверхности и полному (в QL модели) испарению на высоте 33 км, при этом в центральной части светящейся области температура выше 10000 К. Эта стадия соответствует дальнейшему увеличению свечения на высотах вплоть до 32 км. Наблюдавшееся излучение достигло максимума, когда болид был на высоте 30,3 км. Струя (облако) пара и газа движется вниз, расширяется и быстро тормозится ниже 30 км, что приводит к уменьшению интенсивности излучения болида. Ниже 25 км световая кривая формируется излучением глубоко проникающих фрагментов и не может быть описана в рамках QL

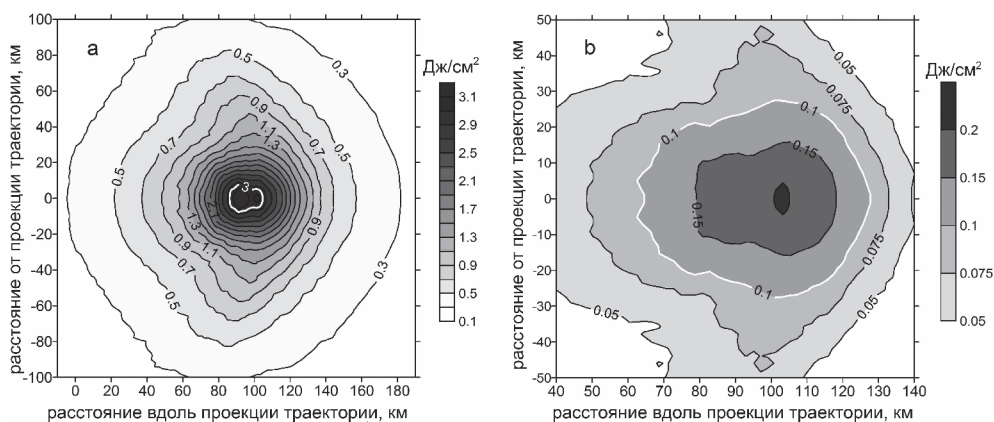


Рис. 4. Распределение плотности полной (за все время) энергии излучения во всем спектре (а) и в диапазоне 280–315 нм (б), достигающего поверхности. Расстояние вдоль проекции траектории отсчитывается от точки, где начальная траектория (без торможения) достигает Земли. Максимум светимости на высоте 29,7 км соответствует примерно ~90 км

модели. Интегральная эффективность высвета ЧМ во всем спектре оценивалась ранее в 14–17% [Pорова et al., 2013; Brown et al., 2013]. Оценка по QL модели близка к этим значениям ~18,4%.

Распределение плотности энергии излучения на поверхности приведено на рис. 4 для идеальной видимости. Максимальная плотность энергии превышает 30 кДж/м², что на порядок меньше значения, необходимого для воспламенения. Область максимального теплового воздействия (>30 кДж/м², ~15х20 км) находится под точкой максимума световой кривой. Результаты, полученные в рамках QL модели, находятся в согласии с высказываниями многочисленных очевидцев, которые ощущали тепло или жар.

Очевидцы, находившиеся в непосредственной близости от траектории, сообщали о легких ожогах, вызванных ультрафиолетовым излучением. Респонденты из г. Еманжелинска (под траекторией) сообщали о запахе озона, который может образовываться в присутствии излучения с длиной волны 200–300 нм. Очевидец из г. Коркино сообщил об ожоге, сопровождавшимся шелушением кожи. Такие эффекты возникают при минимальной дозе облучения ~1000 Дж/м² [Huang et al., 2010] в диапазоне 290–320 нм. Порова et al. (2013) оценили дозу такого УФ облучения в ~200 Дж/м² при предположении о эффективной температуре источника 6000 К. В рамках QL модели рассчитывается спектр излучения, в диапазоне UV-В максимум излученной плотности энергии достигает 2000 Дж/м², а в г. Коркино – около ~1000 Дж/м² (рис. 4, б), что находится в согласии с данными полевых исследований. В соответствии с моделью QL полная доля излучения в УФ-В диапазоне составляет около 1%.

Влияние угла наклона траектории на разрушение и торможение метеороида

Кривые торможения метеороида, аналогичного Челябинскому, при разных углах входа, от 18° до 90° , показаны на рис. 5, а. Как и следовало ожидать, с увеличением угла наклона траектории высота торможения понижается от 30 до 15 км. При вертикальном падении метеороид полностью испаряется на высоте около 20 км и, образовавшаяся струя паров останавливается на высоте около 15 км. Таким образом, при вертикальном входе энергия метеороида выделяется на гораздо более низких высотах.

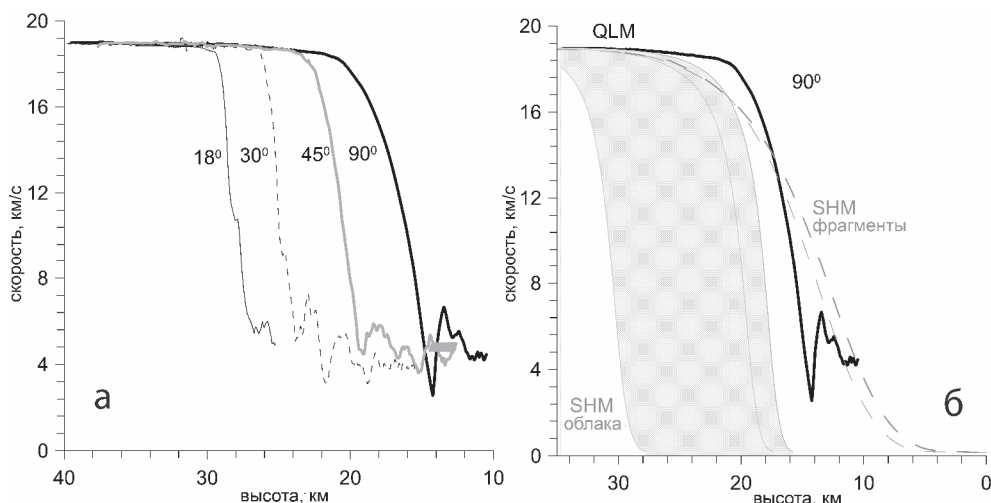


Рис. 5. (а) торможение по QL модели для разных углов входа: (б) торможение по QL модели для вертикального падения – черная кривая; торможение по модели SH – серые кривые

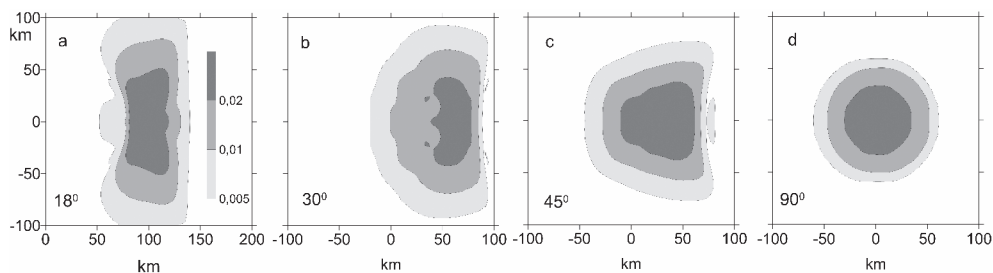


Рис. 6. Распределение максимального избыточного давления для четырех разных углов входа (указанных на панелях).

Светло-серый – избыточное давление $\Delta p > 0,5$ кПа (относительное избыточное давление $> 0,005$), серый – $\Delta p > 1$ кПа (относительное избыточное давление $> 0,01$), черный $\Delta p > 2$ кПа (относительное избыточное давление $> 0,02$). По горизонтали – расстояние вдоль проекции траектории, которое отсчитывается от точки, где начальная траектория (без торможения) достигает Земли. По вертикали – расстояние перпендикулярно проекции траектории

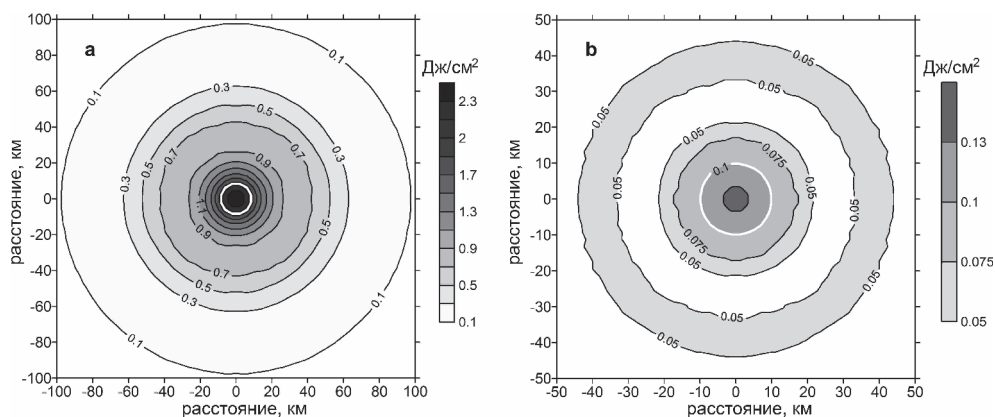


Рис. 7. Распределение плотности полной (за все время) энергии излучения, достигающего поверхности; для вертикального удара во всем спектре (а) и в диапазоне 280–315 нм (б).

Белые контуры соответствуют значению экспозиции 2 Дж/см² на левой панели и 0,1 Дж/см² – справа. На правой панели (б) три контура с одинаковым значением 0,05 Дж/см², поскольку энергия излучения в UVB (280–315 нм) ведет себя немонотонным образом с увеличением расстояния от эпицентра

Мы применили простую гибридную модель (SH, simple hybrid), с теми же параметрами [Porova et al., 2013], которые позволили описать свечение и торможение ЧМ, для вертикального входа. Полученная кривая торможения приведена на рис. 5, 6, в сравнении с результатом QL модели. В рамках SH модели большая часть начальной массы останавливается в виде облака фрагментов и паров на высотах от 28 до 16 км, на несколько километров выше, чем в рамках жидкостной (QL) модели, некоторые фрагменты все-таки могут достичь поверхности Земли.

Распределение максимального избыточного давления на земле, полученное в рамках QL модели для нескольких углов входа, показано на рис. 6. Площади областей с избыточным давлением >1 кПа близки друг другу для всех рассматриваемых углов входа, но формы этих областей различны. Размер области в направлении, перпендикулярном траектории, (цилиндрическая составляющая) уменьшается с увеличением угла входа. Максимальное значение избыточного давления Δp возрастает с увеличением угла траектории от 3,3 кПа при 18° до 5,2 кПа при 90°. Относительно небольшой рост максимального избыточного давления с увеличением угла, несмотря на то, что высота энерговыделения заметно уменьшается, вероятно, вызвано появлением восходящего потока вдоль следа, что приводит к ослаблению ударной волны.

Влияние угла наклона траектории на свечение болида

Распределение энергии излучения на поверхности Земли для вертикального удара приведено на рис. 7 для идеальной видимости. Максимальная плотность энергии излучения превышает 20 кДж/м², что на порядок меньше плотности энергии, необходимой для воспламенения. Максимальное значение энергии излучения на поверхности на 30% меньше, чем при наклонном входе (то есть ~21

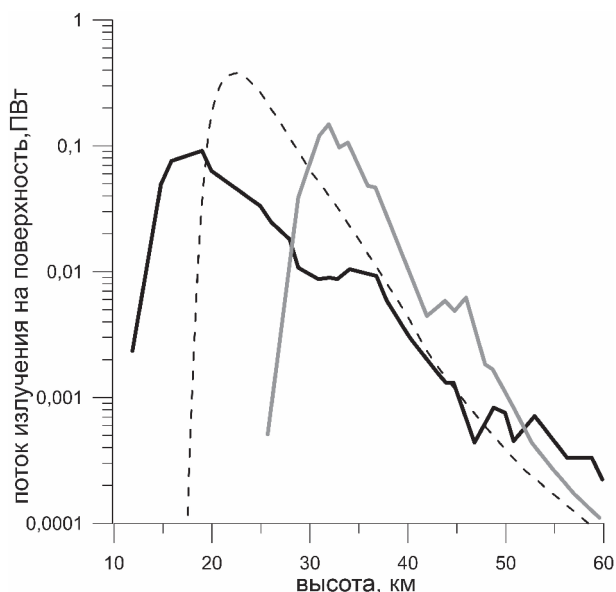


Рис. 8. Световые кривые для наклонного (18,5°, серая кривая) и вертикального (90°, черная кривая), полученные в рамках модели QL. Пунктиром показана световая кривая по модели SH

кДж/м² вместо 31кДж /м²). Полная энергия излучения, попавшая на Землю, составляет около 3% от начальной энергии метеороида, то есть, в три раза ниже, чем в случае пологой траектории с углом входа 18,5°.

Световые кривые, полученные в рамках QL модели для наклонного и вертикального удара, приведены на рис. 8. Максимум на световой кривой смещается примерно на 15 км для вертикального входа по сравнению с пологим. Максимальная интенсивность излучения уменьшается с увеличением угла. В SH модели торможение происходит на большей высоте, чем в QL для вертикального входа, поэтому высота максимума светимости выше, чем в QL модели. Гибридная модель предсказывает большую яркость, что может быть связано с зависимостью используемых коэффициентов высвета от высоты [Nemtchinov et al.,1997].

Выводы

Жидкостная модель базируется на предположении, что деформация космических тел размером больше нескольких десятков метров начинается на высотах, где аэродинамическая нагрузка существенно превышает их прочность, и, следовательно, тело уже полностью разрушено. Мы применили жидкостную модель (QL) к Челябинскому событию, и показали, что результаты, полученные по модели QL, удовлетворительно согласуются с наблюдательными данными, такими как световая кривая и торможение, параметры ударной волны, излучение на поверхности.

Поскольку опасные космические объекты в основном превосходят ЧМ по размерам, то катастрофические последствия падений почти всех опасных косми-

ческих объектов можно рассматривать в рамках QL модели, которая, однако, не позволяет определить небольшое количество сохранившихся фрагментов, которые падают на землю в виде метеоритов. Особый подход также необходим для оценки воздействия относительно небольших прочных тел (например, железных метеороидов, таких как Сихотэ-Алинь).

Вопреки ожиданиям, вертикальный вход метеороида с параметрами ЧМ приводит лишь к небольшому повышению избыточного давления и области разрушений; радиационное воздействие уменьшается. Относительно небольшой рост максимального избыточного давления с увеличением угла наклона траектории, несмотря на более низкую эффективную высоту энерговыделения, вероятно, вызван появлением восходящего потока вдоль следа, что приводит к ослаблению ударной волны.

Авторы благодарны рецензентам Т.А. Лосевой и Б.А. Иванову за полезные замечания.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 16-17-00107).

Литература

Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С. и др. Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука, 1970. 320 с.

Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.

Емельяненко В.В., Попова, О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический Вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 262–277.

Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.

Косарев И.Б. Расчет термодинамических и оптических свойств паров вещества космических тел, вторгающихся в атмосферу Земли // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72. № 6. С. 1067–1075.

Косарев И.Б. Оптические свойства вещества космических тел, вторгающихся в атмосферу Земли // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 6. С. 811–821.

Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965. 463 с.

Светцов В.В. Взрывы в нижней и средней атмосфере – сферически симметричная стадия // Физика горения и взрыва. 1994б. Т. 30. № 5. С. 129–142.

Светцов В.В. Экономичный численный метод для одномерных задач радиационной газодинамики // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1994а. Т. 34. № 3. С. 432–445.

Шувалов В.В., Попова О.П., Светцов В.В., Трубецкая И.А., Глазачев Д.О. Определение высоты метеорного взрыва // Астрономический вестник. 2016. Т. 50. № 1. С. 3–14.

Шувалов В.В., Светцов В.В., Трубецкая И.А. Оценка размера зоны разрушений, производимых на поверхности земли ударами астероидов размером 10–300 м // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 284–291.

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

Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Влияние внутреннего трения на деформацию разрушенного метеороида // Астрономический Вестник. 2010. Т. 44, № 2. С. 117–122.

Aftosmis M.J., Nemec M. et al. Numerical simulation of bolide entry with ground footprint prediction // 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2016. AIAA-0998.

Avramenko M.I., Glazyrin I.V. et al. Simulation of the airwave caused by the Chelyabinsk superbolide // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. V. 119. P. 7035–7050.

Borovička J., Spurný P., Brown P. et al. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013. V. 503. P. 235–237.

- Brown P.G., Assink J.D., Astiz L. et al.* A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*. 2013. V. 503. P. 238–241.
- Harris A.W., Boslough M., Chapman C.R., Drube L., Michel P.* Asteroid impacts and modern civilization: Can we prevent a catastrophe? // *Asteroids IV*, Edit. P. Michel, F.E. DeMeo, W.F. Bottke Jr / The University of Arizona Press, 2015. P. 835–854.
- Hills J.G., Goda M.P.* The fragmentation of small asteroids in the atmosphere // *Astron. J.* 1993. V. 105. P. 1114–1144.
- Huang M.-W., Lo P.-Y., Cheng K.-S.* Objective assessment of sunburn and minimal erythema doses: Comparison of noninvasive in vitro measuring techniques after UVB irradiation. *EURASIP // J. Adv. Signal Process.* 2010. 483562.
- Ivanov B.A., Basilevsky A.T., Neukum G.* Atmospheric entry of large meteoroids: implication to Titan // *Planet. And Space Sci.* 1997a. V. 45. № 8. P. 993–1007.
- Ivanov B.A., Deniem D., Neukum G.* Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric break up and impact cratering // *Int. J. Impact Engng.* 1997b. V. 20. P. 411–430.
- Kring D.A., Boslough M.* Chelyabinsk: Portrait of an asteroid airburst // *Phys. Today*. 2014. V. 67. P. 32–37.
- Nemtchinov I.V., Svetsov V.V., Kosarev I.B., Golub' A.P., Popova O.P., Shuvalov V.V., Spalding R.E., Jacobs C., Tagliaferri E.* Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // *Icarus*. 1997. V. 130. P. 259–274.
- Popova O.P., Jenniskens P. et al.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013. V. 342. P. 1069–1073.
- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. V. 9. P. 381–390.
- Shuvalov V.V., Artemieva N.A.* Numerical modeling of Tunguska-like impacts // *Planetary and Space Science*. 2002. V. 50. P. 181–192.
- Svetsov V.V., Nemtchinov I.V., Teterev A.V.* Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus*. 1995. V. 116. P. 131–153.