

УДК 523.6

ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В АТМОСФЕРЕ ПРИ ПАДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ РАЗМЕРОМ 20–250 МЕТРОВ

© 2025 г. В. В. Шувалов^{1,*}, О. П. Попова¹, Д. О. Глазачев¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: shuvalov@idg.ras.ru

Поступила в редакцию 27.09.2024 г.

После доработки 14.11.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

Приведены результаты расчетов разрушения, испарения и торможения каменных метеороидов размером от 20 до 250 метров в атмосфере Земли. Подробно исследуется перераспределение тепловой и кинетической энергии между конденсированным веществом метеороида, его парами и воздухом. Показано, что при размерах ударника в несколько десятков метров испаренное вещество не тормозится сразу, а долго летит вдоль траектории, постепенно передавая энергию воздуху. В результате основное энерговыделение в атмосфере происходит на стадии торможения струи паров, уже после того, как метеороид и его фрагменты полностью испарились.

Ключевые слова: астероидная опасность, численное моделирование, кратеры, метеороид, атмосфера, ударная волна.

DOI: 10.31857/S0002333725020146, EDN: DMYKII

ВВЕДЕНИЕ

При изучении движения метеороидов в планетных атмосферах одним из ключевых вопросов является определение энерговыделения в атмосфере. От этого энерговыделения зависят параметры ударной волны, которая доходит до поверхности планеты и может вызвать разрушения, интенсивность наблюдаемой световой вспышки, а также размеры кратера, если метеороид долетает до поверхности планеты. Для оценки энерговыделения при движении космических тел в атмосфере чаще всего используются приближенные полуаналитические модели (см., например, работы [Григорян, 1979; Zahnle, 1992; Hills, Goda, 1993; Чуба и др., 1993]), основанные на уравнениях физической теории метеоров [Бронштэн, 1981]. В этих моделях предполагается, что выделение энергии на любой высоте равно энергии, теряемой метеороидом, которая при этом определяется уменьшением его скорости (за счет торможения) и массы (за счет испаре-

ния). При этом считается, что пары мгновенно тормозятся в атмосфере, передавая ей свою энергию.

Другим способом изучения взаимодействия космических тел с планетными атмосферами является прямое численное моделирование движения метеороида в воздухе, основанное на решении уравнений гидродинамики. Такие модели впервые были разработаны и использованы для моделирования падения фрагментов кометы Шумейкер–Леви 9 на Юпитер [Crawford et al., 1994; Zahnle, Mac-Low, 1994; Shuvalov et al., 1999], а позднее использовались для моделирования Тунгусской катастрофы [Svetsov, 1996; Boslough, Crawford, 1997; Shuvalov, Artemieva, 2002; Boslough, Crawford, 2008] и торможения астероидов в плотной венерианской атмосфере [Korycansky et al., 2002; Шувалов, 2023; Шувалов, Иванов, 2024]. Гидродинамические модели более сложные и трудоемкие, но позволяют более детально изучить процесс разрушения,

испарения и торможения метеороида в воздухе. В частности, в работе [Shuvalov, Artemieva, 2002] показано, что при падении Тунгусского космического тела происходило сложное перераспределение энергии между твердым веществом, парами и воздухом, которое не описывается приближенными полуаналитическими моделями. Более того, само понятие энерговыделения в атмосфере требует пояснения. После полного испарения метеороида (и, казалось бы, полной передачи энергии метеороида воздуху на соответствующих высотах) образуется высокоскоростная струя (со скоростью, близкой к начальной скорости метеороида), которая продолжает лететь вниз и, соответственно, переносит энергию на более низкие высоты. Окончательная передача энергии воздуху происходит не там, где тормозится и испаряется метеороид, а там, где тормозится эта высокоскоростная струя.

Целью данной работы является детальное изучение перераспределения энергии между твердым веществом, парами и воздухом и между разными ее формами (т.е. между кинетической и тепловой) в процессе фрагментации, абляции и торможения метеороида в атмосфере Земли. В первом параграфе статьи описываются постановка задачи и метод ее решения. Во второй части рассматриваются результаты численного моделирования падения каменных астероидов размером 20–250 м. В заключении обсуждаются полученные результаты и возможности их использования для разработки более адекватных приближенных моделей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для расчета деформации, фрагментации, испарения и торможения метеороида в атмосфере использовалась модель, подробно описанная в работах [Shuvalov, Artemieva, 2002; Шувалов, Трубецкая, 2007]. Для решения уравнений гидродинамики в этой модели используется гидродинамический код SOVA [Shuvalov, 1999], который позволяет явно выделять границы между областями, занятыми веществами с разными уравнениями состояния (в рассматриваемом случае между конденсированным веществом метеороида, его парами и воздухом). При рассмотрении метеороидов размером в несколько десятков метров и бóльших можно пренебречь их прочностью (квазизидкое приближение), поскольку

такие тела начинают заметно деформироваться на высотах, где аэродинамические нагрузки настолько велики, что полностью разрушают тело, превращая его в груды обломков (*sandbag* согласно терминологии в работе [Svetsov et al., 1995]). Перенос излучения в рассматриваемой модели описывается в приближении лучистой теплопроводности.

Рассматривались падения сферических каменных метеороидов диаметром от 20 до 250 м со скоростью $U_0 = 20$ км/с вертикально и под наиболее вероятным углом падения 45° . Для описания термодинамики конденсированного вещества метеороида использовалось табличное уравнение состояния, полученное по программе ANEOS [Thompson, Lauson, 1972]. Также в расчетах использовались табличные уравнения состояния и таблицы пробегов излучения в воздухе [Кузнецов, 1965; Авилова и др., 1970] и парах Н-хондрита [Косарев, 1999].

Рассматривалась двумерная осесимметричная задача в координатах (r, z) . Ось z направлена вдоль траектории, r — расстояние в перпендикулярном траектории направлении. Расчеты проводились в системе координат, связанной с метеороидом. Скорость набегающего потока в начальный момент времени была равна начальной скорости метеороида. По мере торможения метеороида скорость набегающего потока уменьшалась так, чтобы метеороид все время находился вблизи начала координат. Плотность и давление воздуха в набегающем потоке соответствовали высоте полета, для чего использовалась модель стандартной атмосферы CIRA-86. Расчетная сетка состояла из 251×411 ячеек в направлениях r и z соответственно. В центральной области (81×191 ячеек) вокруг метеороида пространственный шаг был равен $D/60$, вне ее шаг увеличивался по геометрической прогрессии с тем, чтобы описать расширяющееся облако фрагментов разрушенного метеороида и протяженный метеорный след.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 1 и 2 показаны основные стадии взаимодействия с атмосферой астероида диаметром 50 м, падающего на Землю со скоростью 20 км/с под углом 45° . На высоте 40 км метеороид еще сохраняет свою первоначальную форму и начальную скорость. Центральная часть метеор-

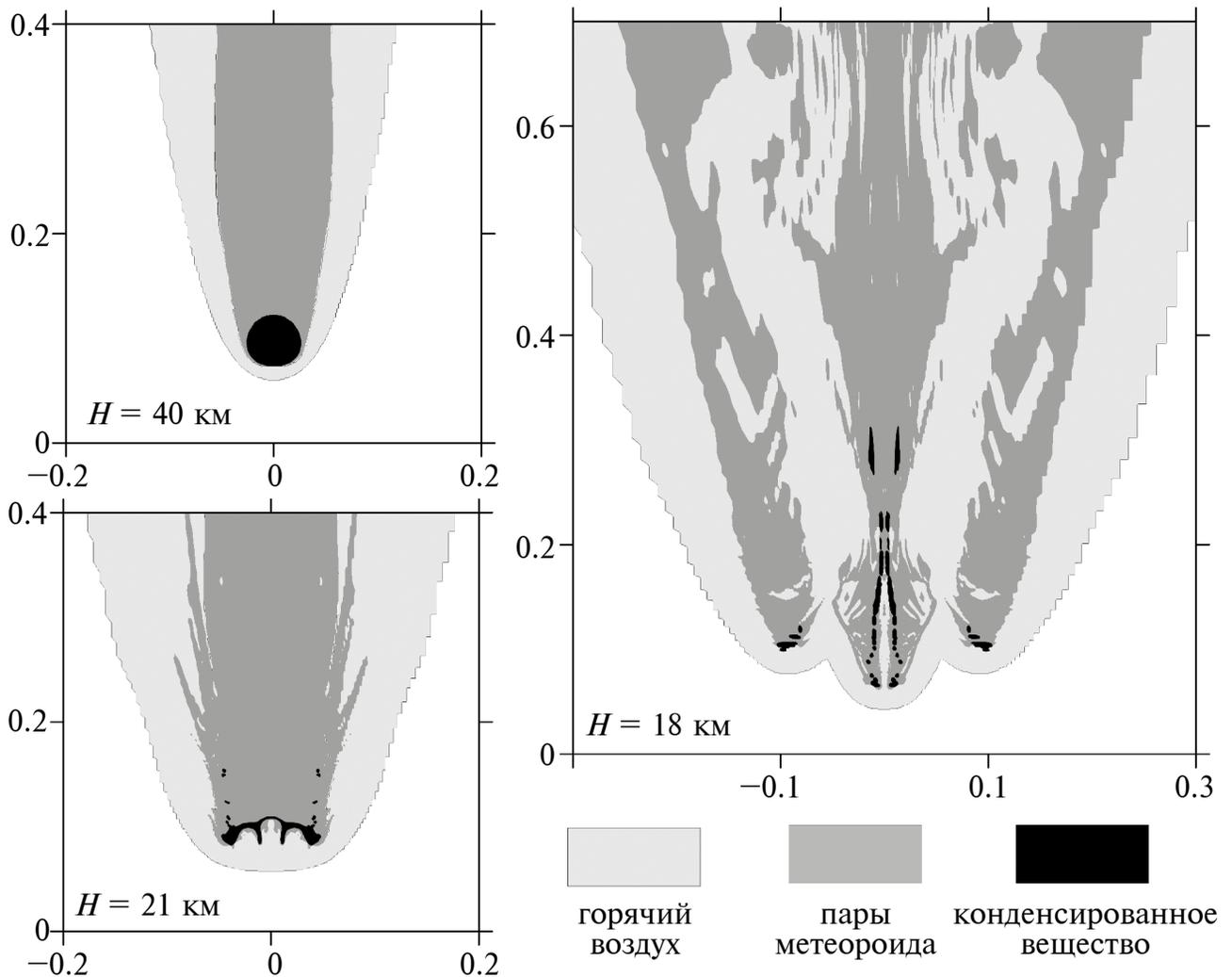


Рис. 1. Распределения конденсированного вещества метеороида (показано черным цветом), паров метеороида (показаны темно-серым цветом) и ударносжатого воздуха (показан светло-серым цветом) при полете метеороида диаметром 50 м на разных высотах H . Все расстояния указаны в км.

ного следа заполнена парами более холодными, чем ударносжатый воздух. По мере уменьшения высоты полета и, соответственно, увеличения аэродинамических нагрузок метеороид начинает деформироваться, превращаясь из шара в диск. При этом из-за развития гидродинамических неустойчивостей на поверхности метеороида образуются неоднородности. Характерная форма такого расплющенного метеороида показана на рис. 1 и 2 в момент, когда он находится на высоте 21 км.

После увеличения эффективного диаметра метеороида в 1.5–2 раза происходит его фрагментация, образуется струя, состоящая из фрагментов разрушенного метеороида, испаренного вещества и нагретого ударной волной воздуха.

Скорость этой струи в начальный момент близка к начальной скорости метеороида. Фрагментация приводит к резкому увеличению испаряемой поверхности и, соответственно, усилению абляции. Диаметр струи также резко увеличивается, что приводит к увеличению эффективного диаметра облака фрагментов метеороида, более сильному его торможению и, соответственно, увеличению энерговыделения в атмосфере.

На рис. 3б для рассматриваемого варианта показаны зависимости от высоты полета энергии и скорости метеороида (или его фрагментов, или паров), кинетической и тепловой энергии паров и горячего воздуха. Высота полета H здесь и далее определяется как $H = Z \sin(\alpha)$, а скорость — как dZ/dt , где Z — нижняя граница

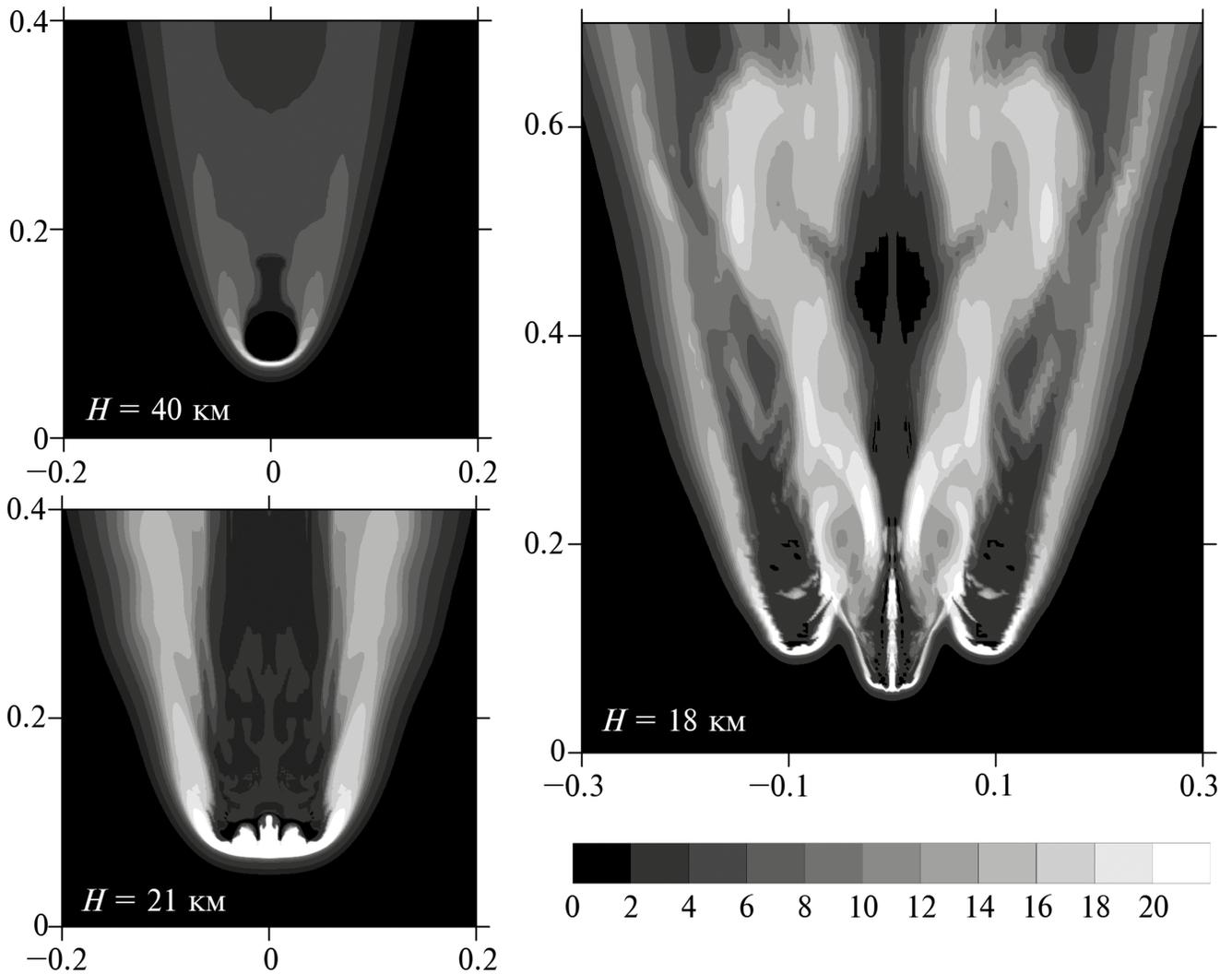


Рис. 2. Распределения температуры в кК при полете метеороида диаметром 50 м на разных высотах H . Все расстояния указаны в км.

области, занятой веществом метеороида (конденсированным или парами); α — угол наклона траектории. На высотах более 30 км энергии паров и горячего воздуха малы, менее одного процента от начальной энергии метеороида. Фрагментация начинается на высоте около 21 км. К этому моменту кинетическая энергия паров составляет несколько процентов от начальной энергии метеороида, при этом она много больше их тепловой энергии и тепловой и кинетической энергии ударносжатого воздуха. Это говорит о том, что пары почти не тормозятся и продолжают лететь за метеороидом. После фрагментации, как уже говорилось выше, испарение становится более интенсивным, эффективная площадь поперечного сечения облака фрагментов увеличивается, и начинает заметно

увеличиваться энергия ударносжатого воздуха. Непосредственно за фронтом ударной волны кинетическая и тепловая энергии воздуха равны друг другу, но из-за торможения кинетическая энергия быстро переходит в тепло. Более плотные и холодные пары тормозятся медленнее, поэтому вплоть до момента торможения воздушно-паровой струи их кинетическая энергия заметно больше тепловой.

На рис. 4б показаны интенсивность потери энергии метеороидом размером $D = 50$ м (за счет испарения и торможения) и интенсивность выделения энергии в воздухе, которая определяется как производная от энергии воздуха по высоте полета H , в зависимости от высоты полета H . Видно, что интенсивность потери энергии метеороидом (которая в приближенных

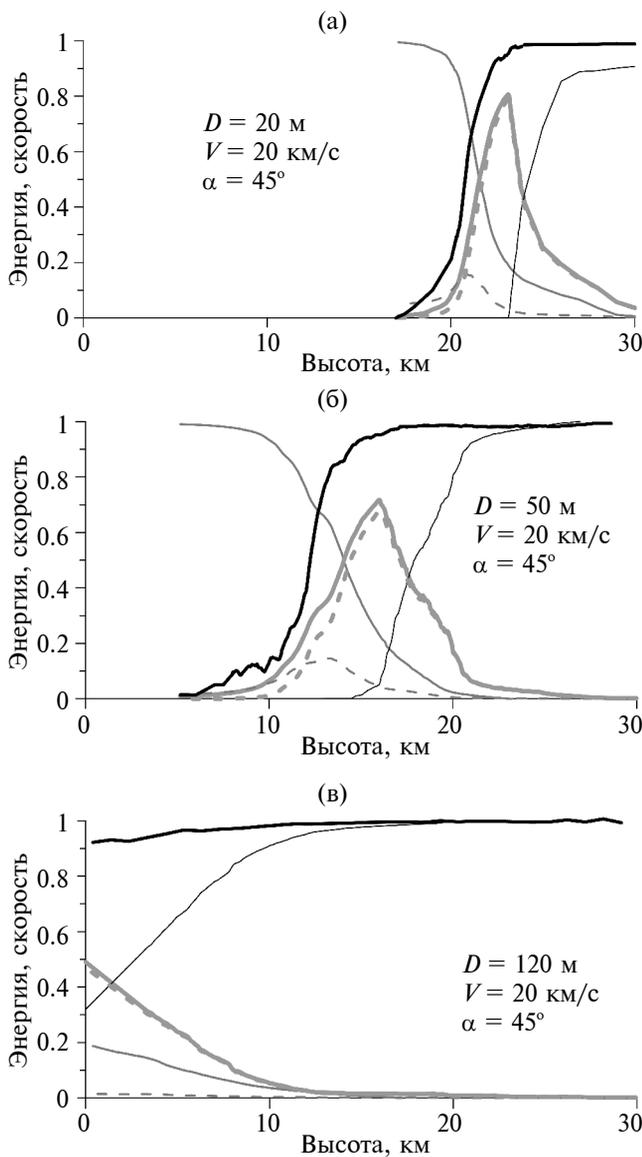


Рис. 3. Зависимости от высоты полета H энергии метеороида или его фрагментов (тонкая черная линия), полной (толстая серая линия) и кинетической вдоль траектории (пунктирная толстая серая линия) энергии паров, полной (тонкая серая линия) и кинетической вдоль траектории (пунктирная тонкая серая линия) энергии ударносжатого воздуха и скорости метеора (толстая черная линия) при падении метеороидов размером $D = 20$ м (а), $D = 50$ м (б) и $D = 120$ м (в). Все энергии отнесены к начальной энергии метеороида E_{m0} , а скорость отнесена к начальной скорости метеороида.

полуаналитических моделях отождествляется с энерговыделением в атмосфере) заметно отличается от интенсивности выделения энергии в воздухе. Пики интенсивностей сдвинуты примерно на пять километров друг от друга. Максимальное увеличение энергии воздуха

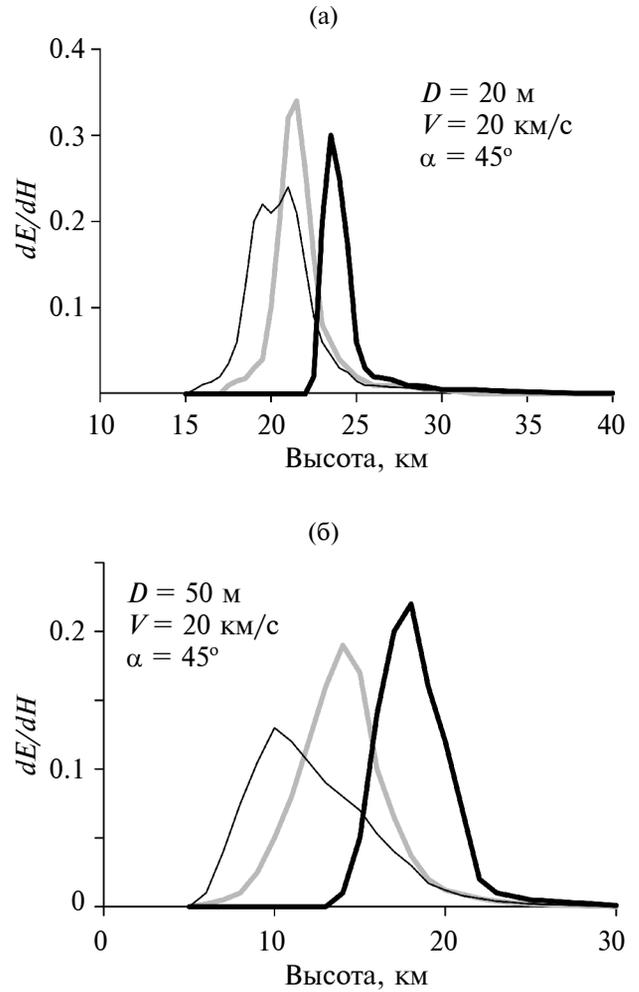


Рис. 4. Зависимости от высоты полета H интенсивности потери энергии метеороидами с начальным размером $D = 20$ м (а) и 50 м (б) dE_m/dH (толстые черные линии) и интенсивности выделения энергии в воздухе dE_α/dH (толстые серые линии). $E_m(H)$ и $E_\alpha(H)$ — зависимости энергии конденсированного вещества метеороида E_m и воздуха E_α от высоты полета H . Тонкие черные кривые показывают распределение энергии воздуха по высоте H в момент времени, когда пары затормозились. Все энергии отнесены к начальной энергии метеороида E_{m0} .

происходит на высоте полета, где фрагменты метеороида уже полностью испарились. Участок траектории, на котором метеороид теряет свою энергию, короче, чем участок траектории, на котором происходит передача энергии воздуху.

При изменении размера метеороида характерная картина перераспределения энергии, показанная на рис. 3б, качественно не изменяется, но все кривые сдвигаются вправо, если размер метеороида уменьшается, и влево, если размер

метеороида увеличивается. В качестве примера на рис. 3а и 3в показаны зависимости от высоты полета энергии и скорости метеороида (или его фрагментов), кинетической и тепловой энергии паров и горячего воздуха при падении метеороида диаметром $D = 20$ и 120 м с той же скоростью 20 км/с под тем же углом 45° . В последнем случае фрагменты разрушенного метеороида долетают до поверхности, потеряв около 70% начальной энергии E_{m0} . Однако энергия воздуха в этот момент составляет лишь около 20% от E_{m0} . Остальные 50% — это энергия паров (в основном кинетическая). Вариант с $D = 20$ м соответствует падению Челябинского космического тела под углом 45° . Формально квазижидкое приближение для таких размеров ударника уже не работает, но расчеты [Shuvalov et al., 2018] показали, что результаты, полученные в таком приближении, неплохо соответствуют наблюдательным данным. С увеличением размера метеороида длина отрезков траектории, на которых происходит его торможение, испарение и передача энергии воздуху, увеличивается.

Изменение энергии воздуха происходит во фронте ударной волны, генерируемой метеороидом, его фрагментами или состоящей из паров и ударнонагретого воздуха струей. Нагретый ударной волной воздух какое-то время продолжает двигаться вниз вдоль траектории, увлекаемый метеороидом, его фрагментами или воздушно-паровой струей. За счет этого движения энергия, полученная воздухом на какой-то высоте, переносится на более низкие высоты. Это хорошо видно на рис. 4б, где тонкой черной линией показано распределение энергии в воздухе по высоте в момент времени, когда пары затормозились. Это распределение заметно (на $3\text{--}4$ км) сдвинуто вниз по сравнению с кривой dE_{air}/dH и почти на 10 км по сравнению с кривой dE_m/dH , описывающей интенсивность потерь энергии метеороидом.

На рис. 4а показаны аналогичные распределения для случая падения метеороида с начальным диаметром $D = 20$ м. Качественно кривые выглядят так же, как в случае $D = 50$ м, но сдвиги между кривыми заметно меньше.

Сложный характер перераспределения энергии между конденсированным веществом метеороида, его парами и воздухом влияет не только на параметры баллистической ударной

волны и импульса излучения, но и определяет непосредственное воздействие на поверхность, если метеороид, его осколки или пары долетают до поверхности. На рис. 5а для метеороидов разного размера, падающих под углом 45° и вертикально, показаны энергии конденсированного вещества метеороида и паров в момент столкновения с поверхностью Земли. При наиболее вероятном угле падения 45° при начальных размерах метеороида от 80 до 100 м до поверхности долетает только струя паров, при этом ее энергия может быть достаточно большой, до 60% начальной энергии метеороида. При больших размерах ударника до поверхности долетает смесь паров и конденсированного вещества, доля и энергия которого увеличивается с увеличением размера. Кривые для вертикальных падений ведут себя качественно так же, но сдвинуты в сторону меньших размеров.

На рис. 5б показаны зависимости от размера ударников эффективного диаметра метеороида в момент удара. Эффективный диаметр определяется как диаметр цилиндра, ось которого совпадает с траекторией и внутри которого содержится 95% вещества метеороида (конденсированного или испаренного). Максимальный размер облака паров и фрагментов в $10\text{--}15$ раз превышает начальный размер метеороида. Этот размер, так же как и энергия фрагментов в момент удара по твердой поверхности, определяет параметры образующегося кратера.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Детальное численное моделирование испарения, деформации, фрагментации и торможения метеороидов в атмосфере Земли показало, что используемое в приближенных полуаналитических моделях предположение о том, что энерговыделение в атмосфере определяется потерями энергии метеороида за счет испарения и торможения, является очень грубым. При размерах ударника в несколько десятков метров испаренное вещество не тормозится сразу, а долго летит вдоль траектории, постепенно передавая энергию воздуху. Более того, нагреваемый ударной волной воздух вместе с парами продолжает двигаться вниз и передает свою кинетическую энергию окружающему воздуху на более низких высотах. В результате можно получить три кривые, которые в том или ином смысле могут ассо-

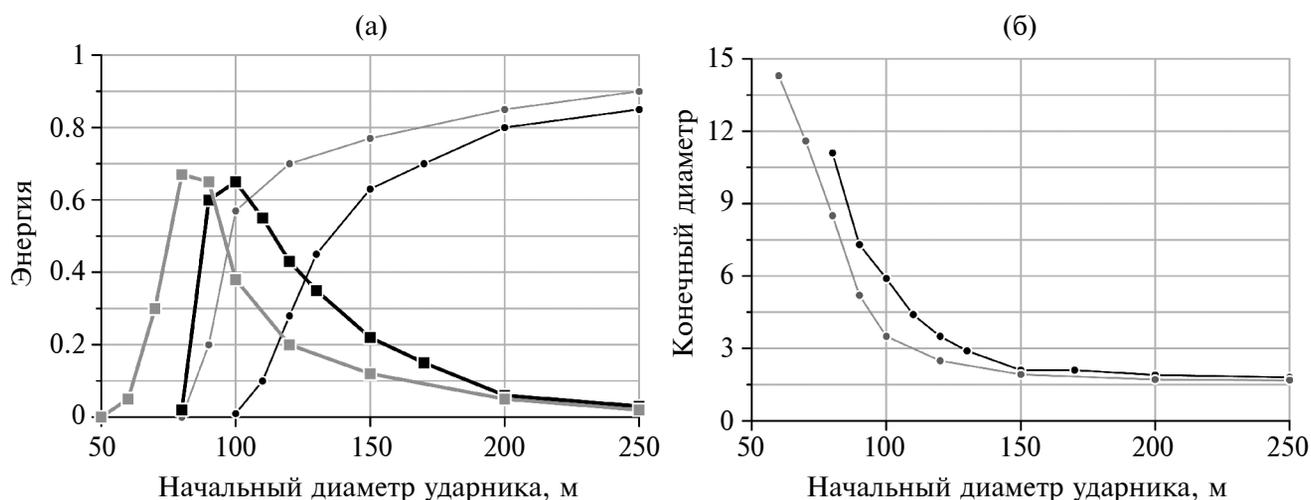


Рис. 5. Зависимости от начального диаметра ударника: (а) — относительной энергии метеороида или его фрагментов E_m/E_{m0} (тонкие кривые) и относительной энергии паров метеороида E_v/E_{m0} (толстые кривые); (б) — относительного эффективного диаметра D/D_0 астероида (или облака его фрагментов и/или паров) в момент удара по твердой поверхности. Черные кривые показывают результаты расчетов для угла падения 45° , серые — 90° .

цироваться с энерговыделением в атмосфере. Эти кривые показаны на рис. 4. Первая кривая соответствует потерям энергии метеороида за счет торможения и испарения. Это то, что называется энерговыделением в приближенных моделях. Вторая кривая — реальное увеличение энергии воздуха (тепловой и кинетической) при пролете метеороида на разных высотах. И третья кривая — распределение энергии воздуха по высоте после того, как все затормозилось.

Какую из трех кривых более разумно использовать, не вполне ясно и, по-видимому, зависит от того, какие эффекты (ударная волна на поверхности, излучение, воздействие на ионосферу) важнее в конкретной рассматриваемой задаче. Вторая кривая связана с текущей амплитудой головной ударной волны, и можно предположить, что она должна неплохо коррелировать со световой кривой, так как свечение болида тоже в большой степени определяется интенсивностью ударной волны. Энергия, полученная воздухом в ударной волне на одной высоте, переносится струей на более низкие высоты. Это приводит к усилению ударной волны, распространяющейся к поверхности Земли. Поэтому третья кривая, как нам кажется, определяет параметры ударной волны на больших расстояниях и, соответственно, возможные повреждения на поверхности Земли. Но эти вопросы требуют более детального изучения. Первая

же кривая описывает исключительно энергию конденсированного вещества метеороида и непосредственно к энерговыделению в атмосфере отношения не имеет.

Расчеты показывают, что с уменьшением размера тела кривые приближаются друг к другу, и уже для метровых тел, по-видимому, используемое в простых полуаналитических моделях предположение о том, что энерговыделение в атмосфере определяется потерями энергии метеороидом за счет испарения и торможения, оказывается вполне приемлемым.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 125012200624-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.
 Григорян С.С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космические исследования. 1979. Т. 17. № 6. С. 875–893.
 Косарев И.Б. Расчет термодинамических и оптических свойств паров вещества космических тел, вторгающихся в атмосферу Земли // Инженерно-физический журн. 1999. Т. 72. № 6. С. 1067–1075.

- Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение. 1965. 463 с.
- Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Гигантские болиды в атмосфере Земли // *Астрономический вестник*. 2007. Т. 41. № 3. С. 241–251.
- Шувалов В.В., Иванов Б.А. Трёхмерное моделирование торможения астероида в атмосфере Венеры // *Динамические процессы в геосферах*. 2023. Т. 15. № 1. С. 54–62.
- Шувалов В.В., Иванов Б.А. Ударные структуры на Венере как результат разрушения астероидов в атмосфере // *Астрономический вестник*. 2024. Т. 56. № 2. С. 241–251.
- Boslough M.B., Crawford D.A. Shoemaker-Levy 9 and plume-forming collisions on Earth. *Near-Earth Objects / Remo J.L. (ed.)*. New York: N.Y. Academy of Sciences. 1997. P. 236–282.
- Boslough M.B.E., Crawford D.A. Low-altitude airbursts and the impact threat // *International Journal of Impact Engineering*. 2008. V. 35. № 12. P. 1441–1448.
- Chyba C.F., Thomas P.J., Zahnle K.J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature*. 1993. V. 361. № 6407. P. 40–44.
- Crawford D.A., Boslough M.B., Trucano T.G., Robinson A.C. The impact of Comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter // *Shock Waves*. 1994. V. 4. № 1. P. 47–50.
- Hills J.H., Goda M.H. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere // *Astronomical J.* 1993. V. 105. № 3. P. 1114–1144.
- Korycansky D.G., Zahnle K.J., Mac Low M.-M. High-resolution simulations of the impacts of asteroids into the Venusian atmosphere II: 3D models // *Icarus*. 2002. V. 157. P. 1–23.
- Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. V. 9. № 6. P. 381–390.
- Shuvalov V.V., Artem'eva N.A., Kosarev I.B. 3D hydrodynamic code SOVA for multimaterial flows, application to Shoemaker-Levy 9 comet impact problem // *Int. J. Impact Engineering*. 1999. V. 23. P. 847–858.
- Shuvalov V.V., Artemieva N.A. Numerical modeling of Tunguska-like impacts // *Planetary and Space Science*. 2002. V. 50. P. 181–192.
- Shuvalov V.V., Ivanov B.A. Impact Structures on Venus as a Result of Asteroid. Destruction in the Atmosphere // *Solar System Research*. 2024. V. 58. № 2. P. 220–230.
- Svetsov V.V., Nemtchinov I.V., Teterev A.V. Disintegration of Large Meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus*. 1995. V. 116. № 1. P. 131–153.
- Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A. Aerial bursts in the terrestrial atmosphere // *Solar System Research*. 2007. V. 41. № 3. P. 220–230.
- Thompson S.L., Lauson H.S. Improvements in the Chart-D radiation hydrodynamic code III: Revised analytical equation of state. Rep. SC-RR-71 0714. Albuquerque, NM: Sandia Laboratories. 1972. 119 p.
- Zahnle K.J., Mac-Low M.M. The Collision of Jupiter and Comet Shoemaker-Levy 9 // *Icarus*. 1994. V. 108. № 1. P. 1–17.
- Zahnle K.J. Airburst origin of dark shadows on Venus // *J. Geophysical Research*. 1992. V. 97. № E6. P. 10243–10255.

Energy Release in the Atmosphere Induced by the Impact of Meteoroids 20–200 Meters in Size

V. V. Shuvalov^{a,*}, O. P. Popova^a, and D. O. Glazachev^a

^a*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: shuvalov@idg.ras.ru*

Received September 27, 2024; revised November 14, 2024; accepted December 25, 2024

Abstract — The results of calculations of destruction, evaporation and deceleration of stony meteoroids with sizes from 20 to 200 meters in the Earth's atmosphere are presented. The redistribution of thermal and kinetic energy between the condensed matter of the meteoroid, its vapors, and air is studied in detail. It is shown that when the size of the impactor is several tens of meters, the vaporized matter is not decelerated immediately, but flies along the trajectory for a long time, gradually transferring energy to the air. As a result, the main energy release in the atmosphere occurs at the stage of vapor jet deceleration, after the meteoroid and its fragments have completely vaporized.

Keywords: asteroid hazard, numerical modeling, craters, meteoroid, atmosphere, shock wave