

УДК 523.682

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ УДАРОВ КРУПНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

© 2024 г. Д. О. Глазачев*, О. П. Попова, В. В. Шувалов

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

**E-mail: GlazachevD@gmail.com*

Возможны два предельных сценария ударов крупных космических тел: кратерообразующий удар, когда почти вся начальная кинетическая энергия тела идет на образование кратера, и так называемый «метеорный взрыв», при котором энергия выделяется в атмосфере. В переходных сценариях потеря энергии в атмосфере является существенной, но поверхности Земли тело достигает с энергией, достаточной для кратерообразования. Опасные последствия таких ударов должны оцениваться с учетом этого разделения энергии. На основе проведенных расчетов и простой квазиэмпирической модели взаимодействия космических тел с атмосферой предложены аппроксимационные формулы для определения доли энергии, потерянной космическим телом при пролете в атмосфере в переходных режимах. Результаты дают возможность описать появление и рост размера кратера с ростом размера ударника, который сейчас некорректно описывается используемыми в онлайн калькуляторах соотношениями, и скорректировать оценки опасных последствий для переходных сценариев.

Ключевые слова: астероидно-кометная опасность, численное моделирование, энергосодержание в атмосфере, кратеры, астероид, комета.

Для цитирования: Глазачев Д.О., Попова О.П., Шувалов В.В. Распределение энергии между атмосферой и поверхностью Земли для промежуточных сценариев ударов крупных космических тел // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 4. С. 33–45. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_4_33

Введение

Последствия падения космических тел (КТ) зависят от характера их взаимодействия с атмосферой. Существует два предельных сценария такого взаимодействия, один из них – это кратерообразующий удар, при котором космическое тело практически не теряет энергию при пролете через атмосферу, и вся энергия идет на образование кратера. Второй предельный случай – так называемый «метеорный взрыв», при котором основная энергия выделяется в атмосфере [Шувалов, Трубецкая, 2007]. Существует довольно широкая область параметров, при которых реализуется переходный вариант. Для таких вариантов потеря энергии в атмосфере является существенной, но поверхности Земли тело достигает с некоторой долей начальной энергии, и опасные последствия удара должны оцениваться с учетом того, что энергия падающего тела делится между поверхностью и атмосферой. Проведение газодинамических расчетов для получения распределения энергии при заданных параметрах КТ является долгим и трудоемким процессом, поэтому, как правило, по результатам расчетов строятся аппроксимационные соотношения [Collins et al., 2005; 2017; Глазачев и др., 2021], дающие возможность быстрых оценок. Необходимо построить такие аппроксимационные соотношения для распределения энергии между атмосферой и твердой поверхностью в случаях промежуточных сценариев.

Приближенные квазиэмпирические модели типа панкейк [Григорян, 1979; Hills, Goda, 1993; Chyba et al., 1993], которые широко применяются для расчетов падения космических тел в атмосфере, позволяют рассчитать распределение энергии в атмосфере при любых параметрах крупных космических тел. Но точность использования таких моделей не ясна. Газодинамические модели, описывающие падения

крупных КТ, как правило, используются в области метеорных взрывов и кратерообразующих ударов, что позволило аппроксимировать оценки опасных последствий в этих сценариях достаточно простыми соотношениями [Глазачев и др., 2021; Collins et al., 2005; 2017]. В переходной области количество расчетов мало. Несмотря на это, в работе сделана попытка на основании небольшого количества газодинамических вариантов получить аппроксимационные соотношения для распределения энергии в атмосфере и в переходной области.

В первом разделе кратко описывается газодинамическая квазижидкостная модель QL , результаты применения которой используются для получения аппроксимационных соотношений. Во втором – делается попытка использовать небольшое количество рассчитанных вариантов переходного сценария для построения аппроксимационных соотношений для энерговыделения в атмосфере. В третьем разделе панкейк модель сравнивается с результатами газодинамических расчетов для метеорных взрывов и переходных вариантов, определяются параметры панкейк модели, позволяющие получить наилучшее согласование с газодинамическими расчетами. Строятся аппроксимационные соотношения, опирающиеся на результаты калиброванной панкейк модели, эти соотношения сравниваются с соотношениями, полученными по малому числу газодинамических вариантов. Четвертый раздел показывает, как учет потери энергии в атмосфере меняет оценки размеров кратера. В заключении собраны основные результаты работы.

QL модель и энерговыделение КТ

Моделирование ударов космических тел (КТ) в рамках квазижидкостной модели (QL модели) дает возможность рассмотреть деформацию, испарение, фрагментацию и торможение КТ в атмосфере Земли [Шувалов, Трубецкая, 2007; Шувалов и др., 2017]. Такие расчеты позволяют определить массу, размер, скорость и кинетическую энергию неиспаренного вещества КТ, кинетическую энергию струи паров и горячего воздуха в момент удара по твердой поверхности. QL модель – это газодинамическая модель с переносом излучения, которая базируется на предположении, что деформация космических тел размером больше нескольких десятков метров начинается на высотах, где аэродинамическая нагрузка существенно превышает их прочность, и, когда тело полностью разрушено, можно считать его подобным жидкости. Результаты моделирования использовались при исследовании распространения ударных волн, оценке теплового излучения на поверхности Земли и других опасных эффектов [Шувалов и др., 2016]. На основе этих результатов были построены аппроксимационные соотношения для определения опасных последствий ударов.

QL модель позволяет описать выделение энергии при пролете КТ через атмосферу и определить долю энергии, доступную для кратерообразования. На рис. 1 показаны зависимости энергии неиспаренной части КТ, энергии паров и энергии воздуха в зависимости от высоты полета каменного астероида диаметром 50 м с начальной скоростью 20 км/с и углом входа 45° . Видно, что сначала энергия астероида превращается в энергию паровой струи (в основном кинетическую), а затем энергия паров передается воздуху. Большая часть энергии выделяется в воздухе уже после того, как астероид полностью испарился и на высотах, меньших высоты полного испарения.

В [Шувалов и др., 2016] при помощи QL модели показали, что в первом приближении точечный взрыв, энергия которого определяется энергией падающего тела, позволяет получить разумную оценку давления ударной волны на поверхности, если он расположен на правильно выбранной эффективной высоте H_{eff} и предложили формулу для этой эффективной высоты. Величина H_{eff} является приближенной и ее точность составляет 2–5 км. Величину H_{eff} можно использовать для определения сценария удара КТ с выбранными параметрами. Метеорные взрывы характерны для вертикального входа астероидов размером менее 100 м и комет менее 150 м, уменьшение угла наклона траектории сдвигает эти границы к большим размерам. Кратерообразующие удары характерны для тел больших размеров – примерно 250–500 м. На рис. 2 показана зависимость H_{eff} от размера астероида или кометы при разных углах входа. Формально $H_{eff} = 0$ при размере КТ большем

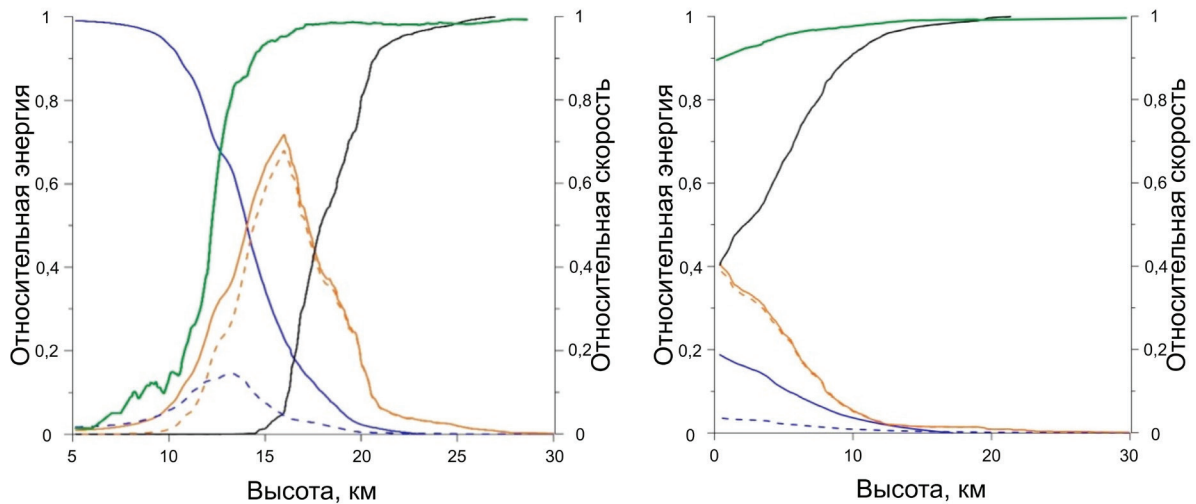


Рис. 1. Левая панель – зависимость энергии неиспаренной части астероида (черная кривая), энергии паров (оранжевая кривая), и энергии воздуха (синяя кривая) от высоты полета каменного астероида диаметром 50 м с начальной скоростью 20 км/с; пунктир – кинетическая энергия, сплошные кривые – полная энергия. Правая панель – зависимость энергии неиспаренной части астероида (черная кривая), энергии паров (оранжевая кривая), и энергии воздуха (синяя кривая) от высоты полета каменного астероида диаметром 120 м с начальной скоростью 20 км/с; пунктир – кинетическая энергия, сплошные кривые – полная энергия. Все энергии отнесены к начальной энергии КТ, а скорость отнесена к начальной скорости КТ; зеленая кривая – скорость КТ

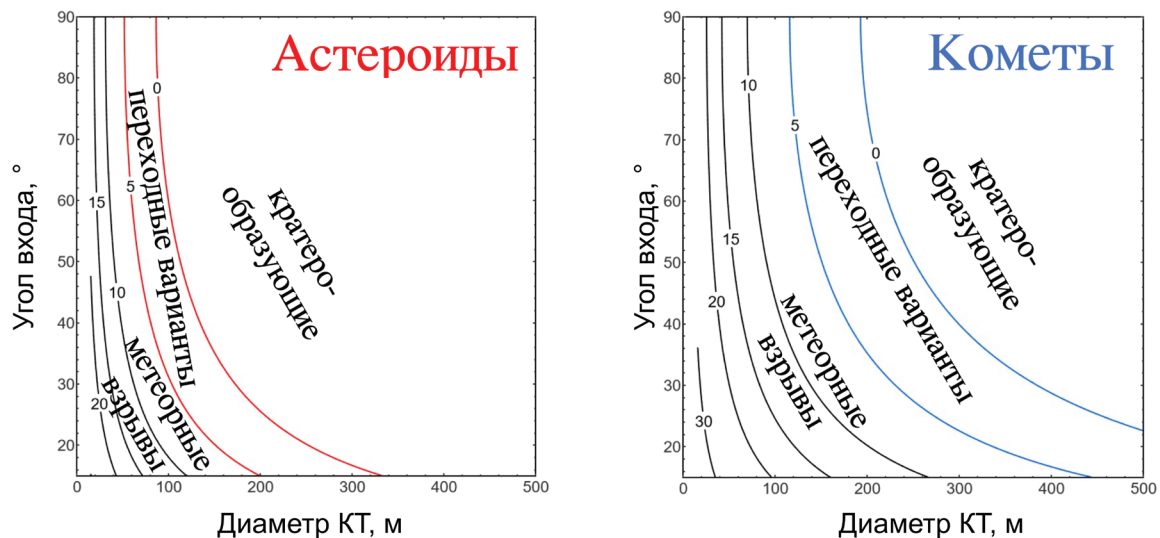


Рис. 2. Зависимость эффективной высоты H_{eff} (изолинии) от размера астероида (левая панель) и кометы (правая панель) для разных углов входа. Цветными линиями отмечены границы различных сценариев ударов

примерно 200 м для астероидов с углами входа больше 30° , и удар будет приводить к образованию кратера, но какая доля энергии пойдет на кратерообразование и каков будет размер кратера, остается неизвестным.

Оценка доли энергии, доступной для кратерообразования, по результатам QL модели

Для КТ кометного происхождения со скоростью в 30 км/с и плотностью 1000 кг/м^3 был рассчитан всего один промежуточный вариант (для которого $0 < E_{k0}/E_k < 1$, где E_{k0} – начальная кинетическая энергия КТ и E_k – энергия КТ при ударе о поверхность). Этого, конечно, недостаточно для общей оценки

распределения энергии между атмосферой и поверхностью и для построения аппроксимационных соотношений для различных ударных эффектов в переходной области. Однако для типичных астероидов (с плотностью 3320 кг/м³ и скоростью 20 км/с) есть 6 промежуточных вариантов, опираясь на которые была предпринята попытка построить аппроксимационное соотношение для доли энергии, остающейся у КТ в момент достижения им поверхности Земли. Эти варианты дополнялись вариантами метеорных взрывов ($E_k/E_{k0} = 0$) для увеличения числа используемых вариантов. Использовалась оценка кинетической энергии твердого вещества, так как энергия, перешедшая в струю паров, не вносит вклад в кратерообразование.

Полученные оценки дают возможность предложить аппроксимационные соотношения для доли начальной кинетической энергии E_{k0} , доступной для кратерообразования E_k/E_{k0} , то есть доли кинетической энергии, остающейся у тела в момент достижения им поверхности Земли. Базовая зависимость (соотношение для конкретного фиксированного угла входа) строилась исходя из предположений, что КТ в случае метеорного взрыва не достигает поверхности Земли, а значит E_k/E_{k0} равно 0, и, с другой стороны, в случае больших кратерообразующих ударов КТ не теряет свою кинетическую энергию, и $E_k/E_{k0} \approx 1$. Эти два предельных случая можно соединить плавной функцией гиперболического тангенса, в котором положение точки перегиба параметризовано диаметром КТ (D):

$$\frac{E_k}{E_{k0}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \operatorname{Tanh} \frac{\ln(D) - c}{\sigma} \right). \quad (1)$$

Все коэффициенты, входящие в соотношение, зависят только от угла входа КТ в атмосферу (A). Коэффициент c отвечает за положение точки перегиба, а σ – за скорость перехода между двумя предельными случаями:

$$\begin{aligned} c &= \ln(409 - 6.42 \cdot A + 0.033 \cdot A^2) \\ \sigma &= 0.35. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 3 представлена аппроксимация доли кинетической энергии по уравнениям (1–2) и исходные значения, полученные при численном моделировании в рамках квазиджидкостной модели (QL) для астероидов различных диаметров, входящих в атмосферу под разными углами со скоростью 20 км/с. Можно заметить, что наибольшая ошибка составляет 20 м по диаметру, или до 20% по доли кинетической энергии для угла входа в 60°, в то время как другие варианты аппроксимируются лучше. Но нужно

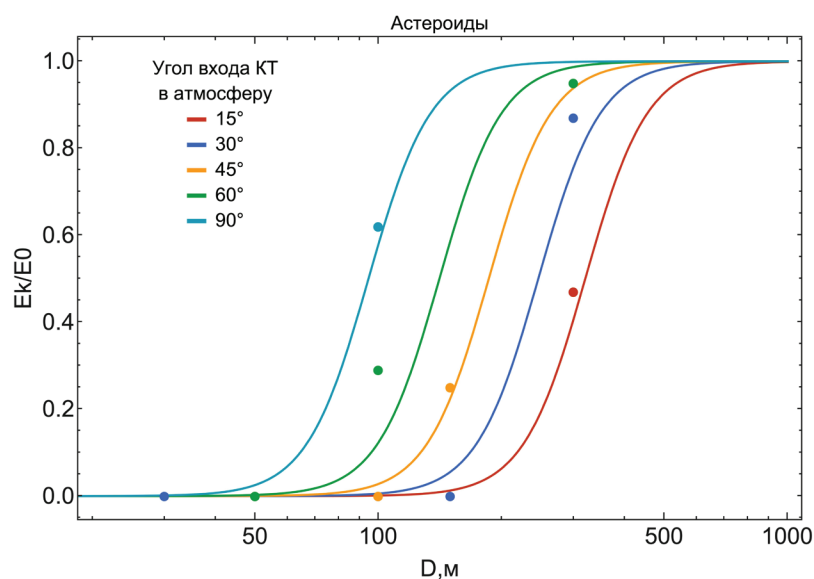


Рис. 3. Доля начальной кинетической энергии E_k/E_{k0} , доступная для кратерообразования в зависимости от размера ударника D и угла входа. Точки соответствуют результатам численного моделирования в рамках квазиджидкостной модели, кривые построены по аппроксимационным соотношениям

учесть, что в QL модели заложена случайная составляющая, и эффективная высота энерговыделения при одинаковых начальных данных может изменяться в диапазоне нескольких километров.

Результаты калибровки квазиэмпирической модели

Всего один промежуточный вариант для кометных КТ недостаточен для построения аппроксимационных соотношений в переходной области и для оценки распределения энергии между атмосферой и поверхностью. Поэтому мы использовали простую квазиэмпирическую модель SM (*simple model*) взаимодействия КТ с атмосферой с учетом фрагментации (по типу панкейк), и подобрали ее параметры так, чтобы она хорошо описывала результаты численного моделирования, увеличив их количество за счет вариантов метеорных взрывов.

Модели типа панкейк предполагают разрушение КТ на облако мелких фрагментов и паров, объединенных общей ударной волной. Если падающее тело разрушается на очень большое число небольших фрагментов, то после разрушения это облако паров и фрагментов может вести себя как жидкость. Наименьшие фрагменты могут легко испариться и заполнить промежутки между крупными кусками. В работе [Hills, Goda, 1993] скорость расширения облака фрагментов определяется из условия, что работа сил давления будет равна кинетической энергии бокового движения. В «*pancake*» модели [Zahnle et al., 1992] разрушившееся КТ рассматривается как рой мелких фрагментов внутри общей ударной волны и оценивается сила, действующая на каждый из фрагментов. Chyba et al. (1993) усредняют давление по объему тела и предполагают, что цилиндрическое тело расширяется в боковом направлении, не меняя своей формы. В этих работах выводятся простые дифференциальные уравнения, описывающие поперечное растекание фрагментированного объекта. Полученные результаты отличаются друг от друга коэффициентами порядка 1.

Давление на лобовой поверхности тела максимально в его критической точке и уменьшается к боковым поверхностям. Наличие градиента давления вызывает движение жидких частиц (или квазижидких частиц разрушенного материала) вдоль лобовой поверхности. Можно оценить скорость этого поперечного движения и получить уравнение для увеличения поперечного размера R разрушенного КТ [Hills, Goda, 1993]:

$$\frac{dR}{dt} = C_r \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_m}} \cdot V, \quad (3)$$

где V – скорость тела, ρ_m – его плотность, ρ_a – плотность атмосферы, C_r – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, достаточно грубые упрощения позволили получить простое соотношение для изменения поперечного размера разрушающегося тела, включив его в общую систему уравнений движения КТ в атмосфере [Бронштэн, 1981]. Параметры, которые определяют энерговыделение в модели типа панкейк – это максимально допустимый размер расширения облака фрагментов и паров (панкейк фактор, P_p) и коэффициент C_r , определяющий скорость роста поперечного размера облака. На энерговыделение влияет также и коэффициент теплопередачи C_h , определяющий долю набегающего потока, идущую на испарение вещества КТ. Квазиэмпирические модели успешно применялись для описания кривых блеска суперболидов [Nemtchinov et al., 1997; Borovička et al., 1998], кроме того, было показано, что эти модели достаточно хорошо описывают энерговыделение при метеорных взрывах КТ размером 20–50 м, таких как в Челябинском и Тунгусском событиях [Collins et al., 2005; 2017; Popova et al., 2013].

Из результатов QL модели было отобрано 58 вариантов, включающих как метеорные взрывы (для которых $E_k/E_{k0} = 0$), так и переходные кратерообразующие варианты до диаметра ударника 300 м (для которых $0 < E_k/E_{k0} < 1$). На базе этих вариантов были рассчитаны серии пролетов по квазиэмпирической модели (SM) с несколькими свободными параметрами (C_r , C_h , P_p) – порядка 200 000 вариаций.

Для калибровки квазиэмпирической модели (SM) необходимо определить критерий согласованности результатов этой модели и результатов численного моделирования в рамках QL модели. В число рассматриваемых критериев входили такие критерии как близость высот торможения (до половины начальной скорости) и испарения (H_{evap} , где испаряется 75% массы КТ); близость эффективных высот H_{eff} и высот точки максимума кривой энерговыделения (см. рис. 4), а также высот, на которых выделяется половина энергии; абсолютные и относительные невязки, оценивающие совпадение кривых энерговыделения в двух моделях; несколько комбинированных метрик, описанных в [Tarano et al., 2019]. Кривая энерговыделения для QL модели оценивалась исходя из предположения, что излучение болида в каждый момент времени пропорционально потере энергии с коэффициентом интегральной эффективности высвета. Для SM модели рассчитывалась производная кинетической энергии.

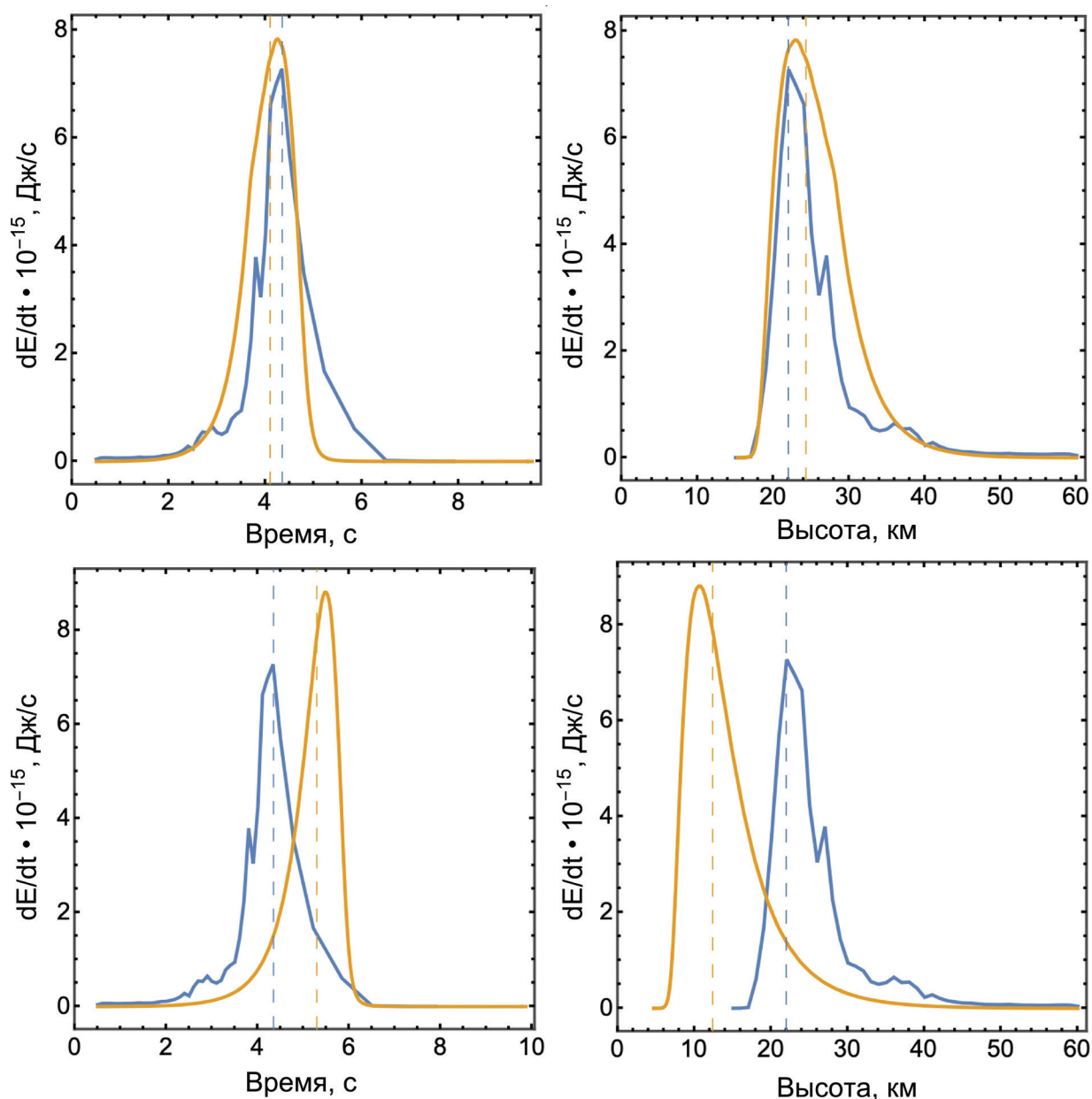


Рис. 4. Сравнение кривых энерговыделения, полученных в рамках QL (синие кривые) и SM (оранжевые кривые) моделей, для астероида диаметром 30 м, с углом входа в атмосферу 30° и скоростью 20 км/с. Верхняя панель – хорошее решение по критерию соответствия высоты максимума энерговыделения и хорошее, но не идеальное, соответствие высот, где происходит потеря половины выделенной энергии (высоты отмечены пунктирными линиями). Нижняя панель – плохое решение: профили потери энергии представлены в зависимости как от высоты, так и от времени пролета

Сравнение высот H_{evap} и H_{eff} , полученных в рамках QL и панкейк моделей, приведено на рис. 5. Наилучшее соответствие между всеми высотами было получено при $H_{start} \sim 60$ км, $P_f \sim 4-6$ ($C_h = 0.1$; $C_r = 0.4$). Высота начала разрушения $H_{start} \sim 60$ км близка к используемой в [Wheeler et al., 2017; McMullan, Collins, 2019]. Полученная величина панкейк фактора близка к полученной в [Collins et al., 2005] и меньше, чем в работах [Collins et al., 2017; Wheeler et al., 2017].

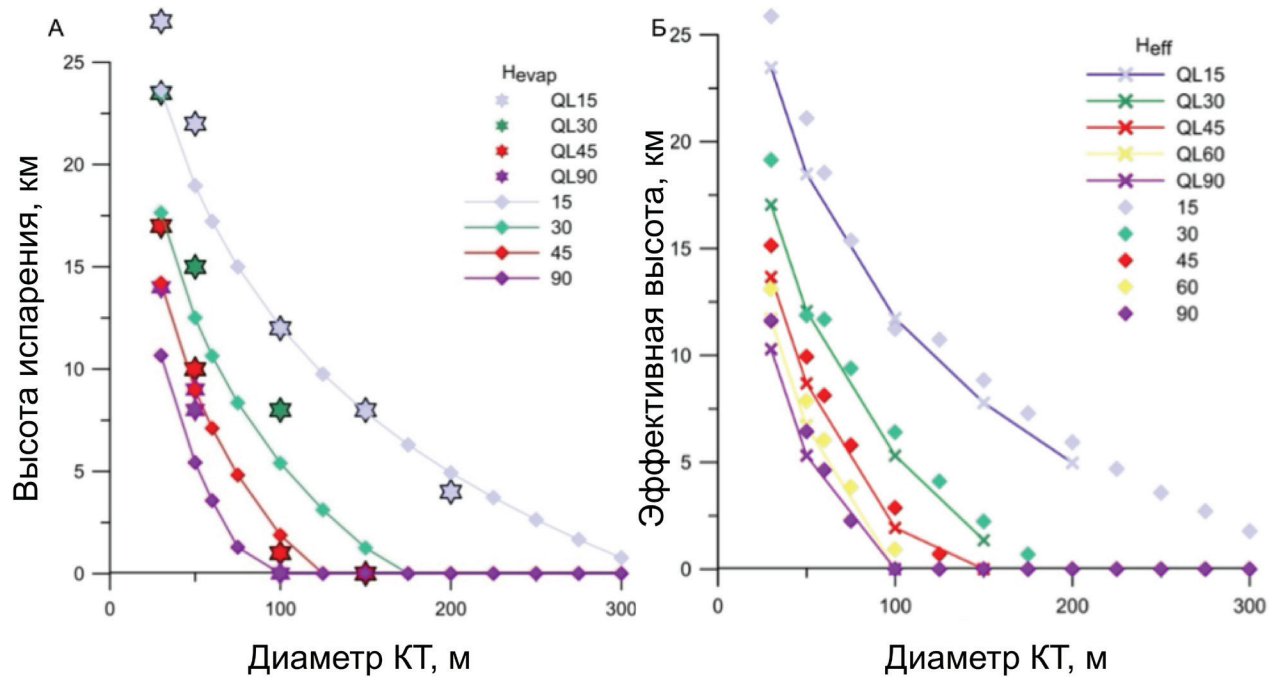


Рис. 5. Сравнение высоты испарения H_{evap} (левая панель) и эффективной высоты H_{eff} (правая панель), полученных в QL модели (маркеры с префиксом QL) и в полуэмпирической (SM) модели (маркеры без префикса), для астероида со скоростью 20 км/с при разных углах входа, указанных на рисунке. Цифры у маркеров указывают на угол входа КТ в атмосферу

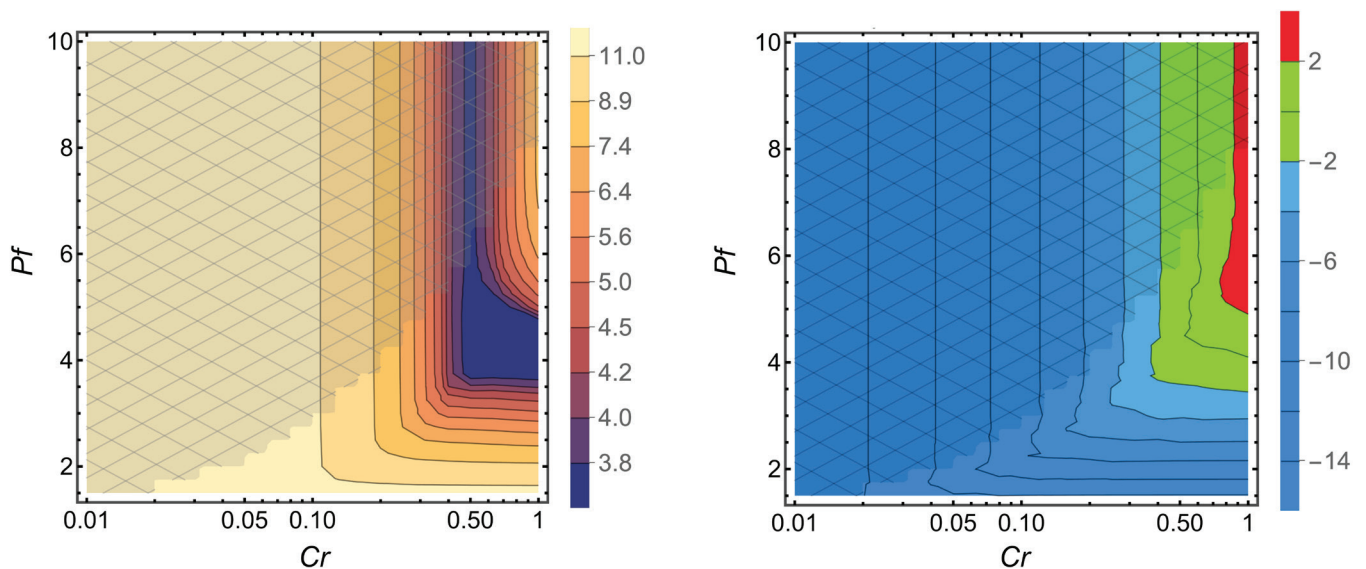


Рис. 6. Поле невязки для варианта астероида диаметром 30 м, входящего в атмосферу под углом 30° со скоростью 20 км/с. Левая панель – интеграл от модуля разности между кривыми энерговыведения по результатам QL и серии SM моделей. Лучшее решение соответствует минимуму невязки – темный цвет. Правая панель – разность высот максимума энерговыведения QL и SM моделей в км. Лучшее решение соответствует нулевой невязке – зеленый цвет. Серой штрихованной областью показаны SM варианты, для которых установленное предельное расширение P_f не было достигнуто

В ходе проведения калибровки панктейк модели для кометных тел оказалось, что необходимо использовать на порядок меньшие значения параметра C_h (≈ 0.01), отвечающего за испарение, чем для описания астероидных тел ($C_h \approx 0.1$), иначе кометные тела слишком быстро сгорают и не достигают полученных в рамках QL модели высот. Кроме того, предварительные оценки C_h для кометных тел, полученные в рамках QL модели, показывают, что коэффициент теплопередачи быстро убывает с высотой до низких значений (0.01–0.001), но детальное изучение еще предстоит провести.

Анализ полей различных невязок показал наличие характерных областей, в которых хорошее решение достигается для большого диапазона P_f (например, от 3.5 до 10) и очень узкого диапазона параметра C_r (рис. 6).

Аппроксимационное соотношение подбиралось в форме базовой зависимости гиперболического тангенса по результатам калиброванной панктейк модели (более параметризованной чем по результатам QL модели в предыдущем разделе):

$$\frac{E_k}{E_{k0}} = k \cdot \left(1 + \text{Tahn} \frac{\ln(D) - c}{\sigma + n \cdot D} \right). \quad (4)$$

Все параметры, входящие в аппроксимацию, зависят только от параметров КТ:

$$\begin{aligned} k &= 0.5(1.2 + 0.006 \cdot A) \\ c &= \ln\left(5.37 \cdot A + \frac{26600}{A} - 10.5\right) \\ \sigma &= 0.3 - 0.0031 \cdot A \\ n &= \frac{0.045 \cdot A - 0.34}{1000} \end{aligned} \quad (5)$$

Сравнение оценки доли кинетической энергии комет, доступной для кратерообразования, полученной по оценке остаточной кинетической энергии в твердом веществе, и оценки, полученной по откалиброванной SM модели, показано на рис. 7. Можно заметить, что все оценки по QL модели для метеорных взрывов ($E_k/E_{k0} = 0$) совпадают с аппроксимацией калиброванной SM модели, однако один единственный переходный вариант диаметром 150 м по QL дает оценку $E_k/E_{k0} = 0.9$, когда по SM эта оценка составляет 0.006 – для адекватного сравнения нужно значительно больше вариантов, рассчитанных по QL модели, именно в переходной области.

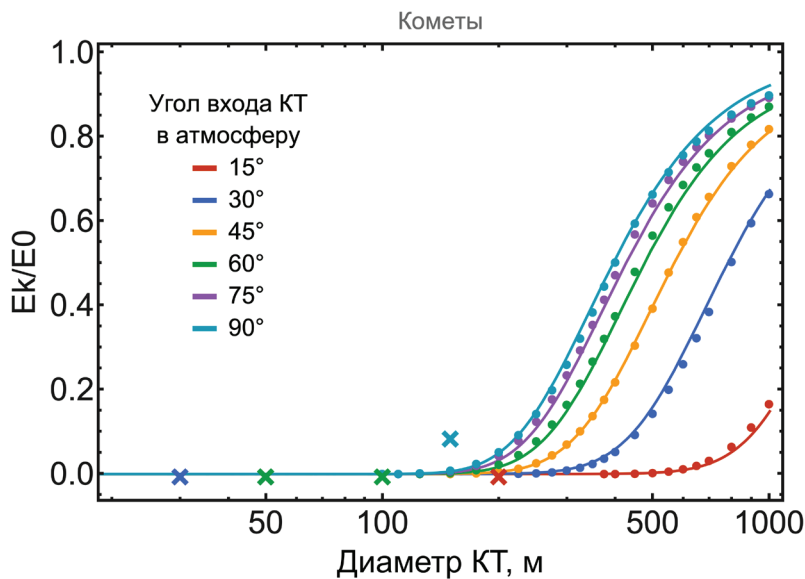


Рис. 7. Доля начальной кинетической энергии E_k/E_{k0} , доступная для кратерообразования, кометных КТ, в зависимости от размера ударника D и угла входа. Точки соответствуют результатам откалиброванной квазиэмпирической модели (SM), кривые соответствуют аппроксимационному соотношению, крестики – результатам QL модели

На рис. 8 приводятся оценки доли кинетической энергии астероидов, доступной для кратерообразования, полученные по откалиброванной *SM* модели.

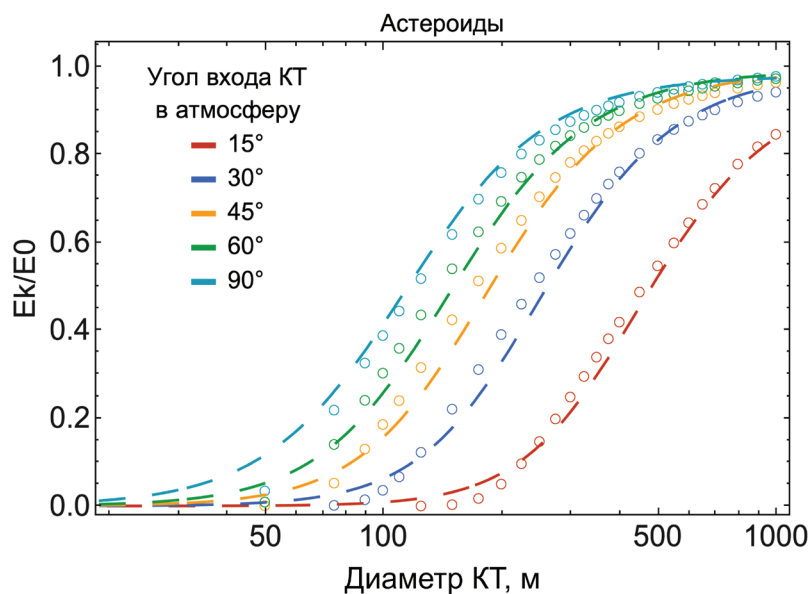


Рис. 8. Доля начальной кинетической энергии E_k/E_0 , доступная для кратерообразования, ударов астероидов в зависимости от размера ударника D и угла входа. Кружочки соответствуют результатам откалиброванной квазиэмпирической модели (*SM*) для астероидов, пунктирные линии соответствуют аппроксимационному соотношению

Аппроксимация для астероидов построена в виде уравнения (4) со следующими параметрами:

$$\begin{aligned} k &= 0.5(1.15 - 0.0019 \cdot A) \\ c &= \ln\left(30 + \frac{7500}{A}\right) \\ \sigma &= 0.6 + 0.0024 \cdot A \\ n &= \frac{0.31 + 0.018 \cdot A - 0.00023 \cdot A^2}{1000} \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 9 сравниваются два предложенных аппроксимационных соотношения для доли начальной кинетической энергии, идущей на кратерообразование для астероидов. Соотношение, построенное

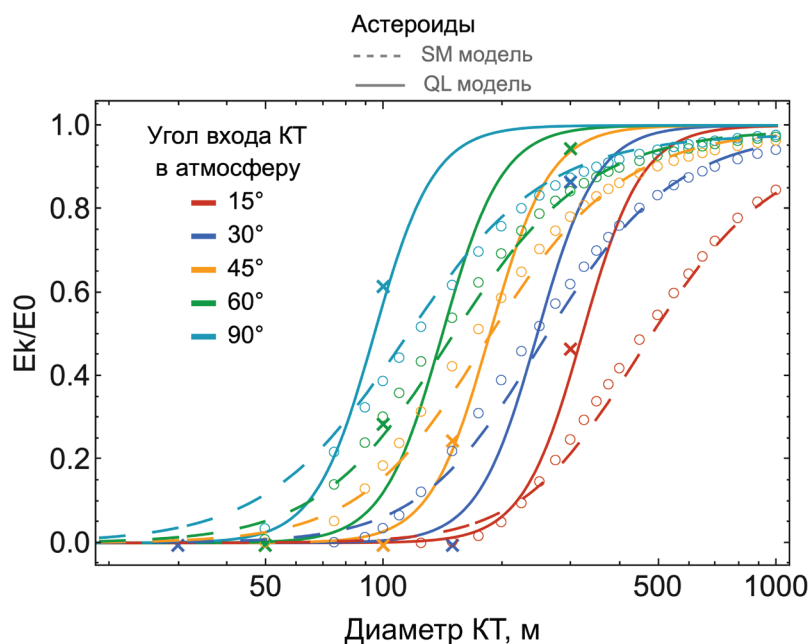


Рис. 9. Сравнение двух предложенных аппроксимационных соотношений для астероидов (сплошные кривые – по 6 вариантам *QL* модели, пунктирные – по *SM* модели). Крестики соответствуют результатам численного моделирования в рамках *QL* модели, кружочки – квазиэмпирической модели (*SM*)

на откалиброванной SM модели, дает более низкую оценку E_k/E_{k0} , чем соотношение, построенное по оценке энергии твердого вещества ударника в QL модели для большинства вариантов. Наибольшее различие наблюдается для косых ударов (угол входа 15°). Для угла входа 60° аппроксимационное соотношение по SM модели лучше описывает результаты QL модели, для вертикального и косого ударов – хуже. На рисунке видно как мало число использованных вариантов, и как может быть велика погрешность такой оценки. Оценка, построенная по SM модели, уменьшает эту неопределенность. Оценку по SM модели для больших ударников необходимо уточнить.

Можно заметить различную скорость перехода у зависимостей между двумя предельными случаями метеорного взрыва и кратерообразующего удара на рис. 9 (аппроксимация по QL модели растет от 0 до 1 при меньшем диапазоне диаметров КТ при любых углах входа); разный наклон зависимостей при переходе от метеорных взрывов к кратерообразующим ударам. С одной стороны, зависимости строились различными подходами на разных исходных данных. С другой, – можно отметить, что не все рассмотренные невязки указывали на одну и ту же группу наиболее оптимальных параметров при калибровке SM модели, наиболее хорошее решение удавалось найти для малых тел (50 м и менее), а для больших тел решения по SM подходили хуже. Поэтому, возможно, стоит несколько модифицировать SM модель, расширить область варьирования параметров (C_r , P_f , C_h) и рассмотреть возможную зависимость этих параметров от параметров КТ (диаметра, угла входа и скорости).

Оценка размера кратера для переходных вариантов

Результаты QL модели ранее дали возможность построить аппроксимационные соотношения для быстрой оценки поражающих факторов ударов КТ и создать интернет-калькулятор на их основе (см., например, [Глазачев и др., 2021]). В текущей версии интернет-калькулятора встроено грубое разделение на метеорные взрывы и кратерообразующие удары, основанное на значении H_{eff} , которое предполагает, что при $H_{eff} \leq 0$ вся энергия КТ доступна для кратерообразования. Это приводит к существенно завышенным оценкам размера кратера (рис. 10, левая панель) для переходных вариантов. Учет потерь энергии в атмосфере для них дает возможность получить более обоснованную оценку размера кратера, с постепенным увеличением его размера вместе с размером ударника (рис. 10, правая панель). Размер кратера оценивался по [Holsapple, Housen, 2007].

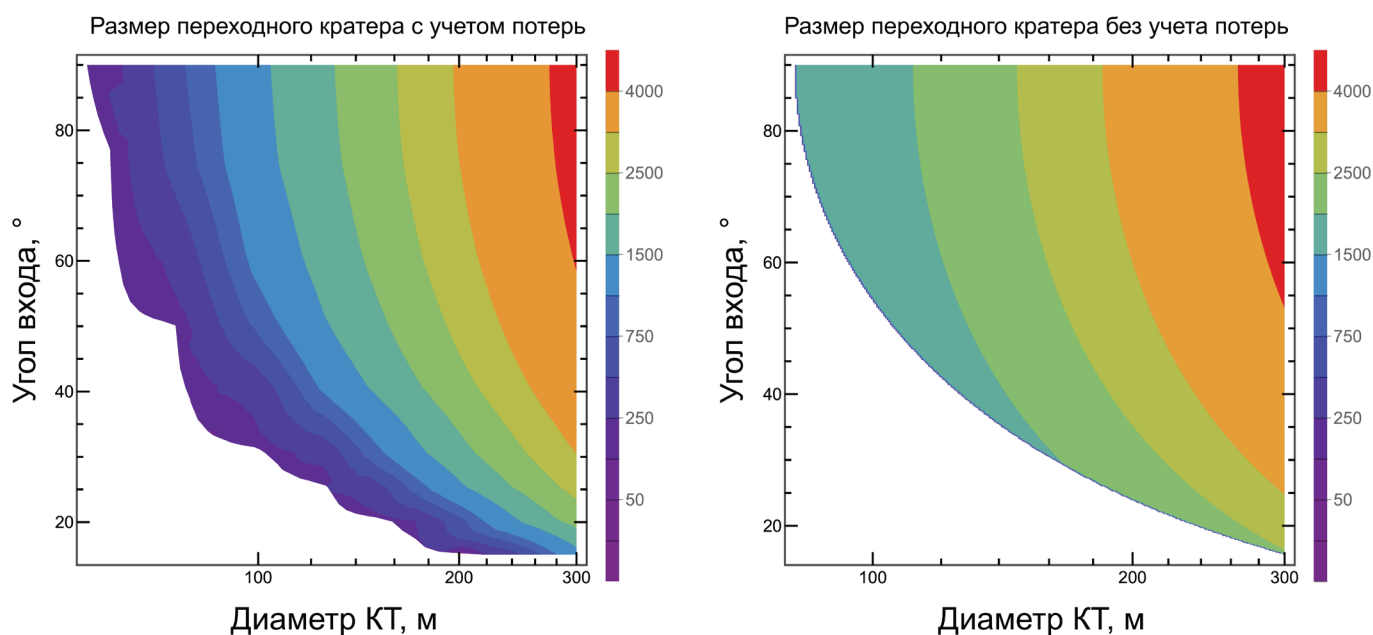


Рис. 10. Размер кратера для ударников разного размера и с разными углами входа – без учета потерь энергии в атмосфере (левая панель) и с учетом (правая панель)

Можно отметить, что в широко распространенном калькуляторе ImpactEarth, доступном по адресу <https://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEarth/ImpactEffects/>, также присутствует скачкообразное увеличение размера кратера. Например, для астероида с плотностью 3320 кг/м³ и скоростью 20 км/с, входящего в атмосферу под углом 45°, при размере $D = 77$ м кратер не образуется, при увеличении диаметра на 1 м появляется кратер с диаметром переходного кратера 779, а конечного 974 м. Такое изменение оценок размера кратера мы называем некорректным. В этом случае оно связано с применением аппроксимационных соотношений для размеров кратеров, изначально полученных для компактных ударников, к фрагментированным панкейк объектам.

Заключение

Взаимодействие крупных космических объектов с атмосферой часто рассматривается в рамках одного из двух сценариев: метеорного взрыва или кратерообразующего удара. В переходных случаях между этими сценариями (в основном для 100–300 м объектов) для правильных оценок опасных последствий важно знать, какая часть начальной кинетической энергии выделяется в атмосфере, а какая доступна для образования кратеров. Использование результатов ранее проведенного газодинамического численного моделирования дало возможность откалибровать простую квазиэмпирическую модель фрагментации в первом приближении, и, опираясь на ее результаты, предложить аппроксимационное соотношение для энерговыделения, зависящее только от параметров ударника. Для астероидов была предпринята попытка построить аппроксимационные соотношения, опираясь на долю энергии твердого вещества ударника, долетевшего до поверхности. Обе оценки (аппроксимации по QL и SM моделям) согласуются при средних углах входа и заметно расходятся для косых ударов. Результаты позволяют корректно описать появление и рост кратера с ростом размера ударника, который сейчас описывается в онлайн калькуляторах неверно, и скорректировать оценки опасных последствий ударов для промежуточных сценариев.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ ИДГ (тема № 122032900176-3).

Список литературы

- Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. – 1981 с.
- Глазачев Д.О., Попова О.П., Подобная Е.Д., Артемьева Н.А., Шувалов В.В., Светцов В.В. Эффекты ударной волны, генерируемой на поверхности Земли при падении космических тел размером от 20 м до 3 км // Физика Земли. 2021. Т. 5. С. 133–145. <http://dx.doi.org/10.31857/S0002333721050057>
- Григорян С.С. Движение и разрушение метеоритов в атмосферах планет // Космические исследования. 1979. Т. 17. С. 724–740.
- Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Гигантские болиды в атмосфере Земли // Астрономический Вестник. 2007. Т. 41. №. 3. С. 241–251. <https://elibrary.ru/iaaozh>
- 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. <http://dx.doi.org/10.7868/s0320930x16010059>
- Шувалов В.В., Светцов В.В., Артемьева Н.А., Трубецкая И.А., Попова О.П., Глазачев Д.О. Астероид Апофис – оценка опасных последствий ударов подобных тел // Астрономический Вестник. 2017. Т. 51. № 1. С. 51–66. <http://dx.doi.org/10.7868/S0320930X17010042>
- Borovička J., Popova O.P., Golub' A.P., Kosarev I.B., Nemtchinov I.V. Bolides produced by impacts of large meteoroids into the Earth's atmosphere: comparison of theory with observations. II. Benešov bolide spectra // Astronomy and Astrophysics. 1998. V. 337. P. 591–602.
- Chyba C.F., Thomas P.J., Zahnle K.J. The 1908 Tunguska explosion – Atmospheric disruption of a stony asteroid // Nature. 1993. Vol. 361 (6407). P. 40–44. <https://doi.org/10.1038/361040a0>
- Collins G.S., Melosh H.J., Marcus R.A. Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating

the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // *Meteoritics and Planetary Science*. 2005. Vol. 40 (6). P. 817–840. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2005.tb00157.x>

Collins G.S., Lynch E., Mcadam R., Davison T.M. A numerical assessment of simple airblast models of impact airbursts // *Meteoritics & Planetary Science*. 2017. Vol. 52 (8). P. 1542–1560. <https://doi.org/10.1111/maps.12873>

Hills J.G., Goda M. P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere // *Astronomical Journal*. 1993. Vol. 105 (3). P. 1114–1144. <https://doi.org/10.1086/116499>

Holsapple K.A., Housen K.R. A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact // *Icarus*. 2007. Vol. 187. P. 345–356. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.08.035>

McMullan S., Collins G.S. Uncertainty quantification in continuous fragmentation airburst models // *Icarus*. 2019. Vol. 327. P. 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.02.013>

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. Vol. 130 (2). P. 259–274. <https://doi.org/10.1006/icar.1997.5821>

Popova O.P. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*. 2013. Vol. 342 (6162). P. 1069–1073. <https://doi.org/10.1126/science.1242642>

Tarano A.M., Wheeler L.F., Close S., Mathias D.L. Inference of meteoroid characteristics using a genetic algorithm // *Icarus*. 2019. Vol. 329. P. 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.04.002>

Wheeler L.F., Register P.J., Mathias D.L. A fragment-cloud model for asteroid breakup and atmospheric energy deposition // *Icarus*. 2017. Vol. 295. P. 149–169. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.02.011>

Zahnle K., Pollack J.B., Grinspoon D., Dones L. Impact-generated atmospheres over Titan, Ganymede, and Callisto // *Icarus*. 1992. Vol. 95. P. 1–23. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(92\)90187-C](https://doi.org/10.1016/0019-1035(92)90187-C)

ENERGY DISTRIBUTION BETWEEN THE ATMOSPHERE AND THE EARTH'S SURFACE FOR TRANSIENT IMPACT VARIANTS OF LARGE COSMIC BODIES

© 2024 D. Glazachev*, O. Popova, V. Shuvalov

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: GlazachevD@gmail.com*

There are two ultimate impact scenarios for large space bodies: a crater-forming impact, when almost all of the initial kinetic energy of the body goes to the formation of a crater, and the “meteor explosion”, in which the energy is released in the atmosphere. In transient scenarios, the loss of energy in the atmosphere is significant, but the body reaches the Earth's surface with enough energy to form a crater. The hazardous consequences of such impacts must be assessed with this energy separation in mind. On the basis of the performed calculations and a simple quasi-empirical model of the interaction of space bodies with the atmosphere, scaling relations for determining the fraction of energy lost by a space body during a passage in the atmosphere in transient modes are proposed. The results provide an opportunity to properly describe the appearance and growth of a crater as the impactor size increases, which is currently described incorrectly in online calculators of asteroid-comet hazard, and to adjust the estimates of other dangerous consequences for transient variants.

Keywords: asteroid-comet hazard, numerical modeling, energy deposition in the atmosphere, craters, asteroid, comet.