

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-17-00107).*

## Литература

*Хазинс В.М., Шувалов В.В.* Численное моделирование акустико-гравитационных волн, инициированных падением метеороида // *Динамические процессы в геосферах.* Выпуск 8: Сборник научных трудов ИДГ РАН М. : ГЕОС, 2016. С. 197–207.

*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 // *Астрон. вестн.* 2017. Т. 51. № 1. С. 44–58.

*Шувалов В.В., Хазинс В.М.* Численное моделирование возмущений в ионосфере, генерируемых при падении челябинского и тунгусского космических тел // *Астрон. вестн.* 2018. Т. 52. № 2. С. 142–151.

*Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: application to the thermal layer effect // *Shock Waves.* 1999a. V. 9. P. 381–390.

*Shuvalov V.V.* Atmospheric plumes created by meteoroids impacting the Earth // *J. Geophys. Res.* 1999b. V. 104. № E3. P. 5877–5890.

УДК 523.6:57.045

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ПОЖАРОВ ПРИ УДАРАХ АСТЕРОИДОВ

*В.В. Светцов, В.В. Шувалов*

ИДГ РАН

Численно моделировались удары астероидов диаметром 1–10 км, включая развитие и излучение ударного плюма. Вычислялись потоки излучения на поверхности Земли, что позволило определить площади потенциального возникновения пожаров. Размеры области начального воспламенения составляют от ~ 1000 км при размере тела 1 до ~ 7000 км при диаметре 10 км.

### Введение

Каждый день на Земле возникают пожары, в результате которых ежегодно выгорает около 3% поверхности суши [Randerson et al., 2012]. Частота пожаров в среднем обратно пропорциональна их размерам, наиболее значительные из них захватывают площади в тысячи квадратных километров. В совокупности пожары воздействуют на глобальные процессы развития и структуру большинства экосистем, углеродный цикл и климат. Они являются мощным биологическим фильтром, влияющим на производство биомассы и распространение растительности [Bowman et al., 2009]. При движении космического тела в атмосфере и при ударе о поверхность Земли

создаются области нагретого газа и пара, излучение которых может инициировать пожары. Хорошо известно, что падение Тунгусского космического тела вызвало локальный пожар, радиационные ожоги деревьев на площади около 200 км<sup>2</sup> и гибель животных [Васильев, 2004; Vasilyev, 1998]. А удар астероида диаметром около 20 км, создавший кратер Чиксулуб 66 млн лет назад, привел к возникновению пожаров в разных районах земного шара [Morgan et al., 2013], о чем может свидетельствовать глобальный слой сажи на границе мел-палеоген [Wolbach et al., 1985]. Хотя эти пожары вряд ли могли привести к повсеместной гибели растений [Belcher et al., 2015], они, безусловно, способствовали массовому вымиранию биоты.

Астероиды размером 10–20 км сталкиваются с Землей в среднем раз в 100–300 млн лет [Иванов, 2005], и, возможно, удар на границе мел-палеоген был самым сильным ударом в фанерозое. Тела же размером 3 км сталкиваются с Землей гораздо чаще, примерно раз в 10 млн лет, и таких ударов на протяжении фанерозоя могло быть около пятидесяти. В настоящее время открыто около двадцати ударных кратеров возрастом менее 540 млн лет (фанерозой) и диаметром 35 км и больше, что соответствует ударам тел размером более 3 км. Если учесть, что площадь суши примерно в два раза меньше площади океана, можно предположить, что на суше и в прибрежных областях почти все крупные ударные кратеры фанерозоя найдены. Всего же кратеров размером не менее 35 км обнаружено лишь ненамного больше, 24 кратера, что естественно объясняется эрозией и другими изменениями земной коры.

Мы провели численное моделирование ударов каменных астероидов размером 1, 3 и 10 км и вычислили потоки излучения на поверхности Земли. Тела меньшего размера также могут вызвать воспламенение горючих материалов, но лишь в относительно небольшой области. Так при ударе астероида диаметром 300 м сухая древесина может воспламениться в радиусе ~ 100 км от места удара [Шувалов и др., 2017], что не выходит за рамки крупнейших лесных пожаров. Расчеты [Shuvalov, 2002] излучения при вертикальном ударе астероида диаметром 10 км показали, что пожары могут возникнуть на расстояниях 2000–3000 км от места удара. В этих расчетах при моделировании удара и развития плюма (представляющего собой расширяющуюся вверх струю испаренного вещества астероида и породы) перенос излучения учитывался в приближении оптически тонкого объема. В данной работе мы использовали приближения как для оптически тонких, так и оптически толстых сред и моделировали удары под разными углами к поверхности Земли.

### **Метод численного моделирования**

Моделирование основывалось на предположении, что движение вещества при ударе о поверхность Земли можно описать уравнениями гидродинамики. Гидродинамическая модель, уравнения и численный метод СОВА, описаны в работах [Shuvalov, 1999; Shuvalov, Artemieva, 2002; Шувалов, Трубецкая 2007; Шувалов и др., 2017; Shuvalov et al., 2017]. След, образующийся в атмосфере во время падения космического объекта, может влиять на формирование плюма после удара о землю, поэтому мы моделировали как сам удар, так и предшествующее падение в атмосфере. На стадии падения численные уравнения решались в двумерной осесимметричной системе координат, связанной с движущимся телом. Когда тело достигает поверхности Земли, происходит переход к трехмерной системе координат, связанной с поверхностью. Мы пренебрегали прочностью космического тела и грунта в процессе удара, но учитывали внутреннее трение разрушенных пород,

хотя, в отличие от образования кратеров, параметры ударного плюма незначительно зависят от прочностной модели.

Для учета переноса излучения необходимо рассчитать поток излучения в каждой точке пространства и вставить дивергенцию этого потока в правую часть уравнения энергии [Зельдович, Райзер, 1966]. Поскольку для точного расчета потоков излучения требуются чрезмерно большие затраты компьютерного времени, мы использовали два приближения: лучистой теплопроводности для оптически толстой среды с росселандовыми пробегами излучения фотонов и приближение для оптически тонкой среды, в которой излучаемая энергия пропорциональна функции Планка, умноженной на средний планковский коэффициент поглощения [Зельдович, Райзер, 1966]. Приближение лучистой теплопроводности справедливо до удара и позже, пока ударный плюм не расширится до низкой плотности в верхних слоях атмосферы. Переход от оптически толстой к оптически тонкой среде в любой ячейке разностной сетки происходит, когда оптическая толщина нагретого газа и пара вдоль диаметра огненного шара, проходящего через эту ячейку, меньше единицы.

В наших расчетах плюм поднимается на высоты порядка 1000 км, где важную роль могут играть плазмодинамические эффекты, связанные с ионизацией выброшенного попутного воздуха, с движением вышележащих слоев ионосферы и плазмосферы. Их учет требует разработки модели другого класса с включением плохо изученных к настоящему времени процессов. Такие эффекты не рассматривались, так как для оценки возможности возникновения пожаров нас интересовали только потоки излучения на поверхности Земли, которые испускаются парами при небольшой температуре (см. ниже) и на которые эти эффекты не влияют.

Метод решения уравнений гидродинамики COVA [Шувалов, 1999] позволяет различать границы между различными веществами (воздух, пар, конденсированный материал ударяющего тела и грунта), а одна ячейка может содержать три вещества с различными уравнениями состояния. Мы моделировали удары каменных сферических тел с плотностью 3.3 г/см<sup>3</sup> (дунит). Для твердых и жидких веществ (дунит для ударника, кварц для грунта) мы применяли уравнения состояния ANEOS [Thompson, Lauson, 1972]. Что касается паров, мы использовали уравнение состояния и оптические свойства паров обыкновенного хондрита, рассчитанные Косаревым (2009). Для воздуха мы взяли табличное уравнение состояния [Кузнецов, 1965] и таблицы коэффициентов поглощения [Авилова и др., 1970].

Расчетная сетка для двумерного моделирования состояла из 400 ячеек вдоль оси симметрии (траектории тела) и 200 ячеек в радиальном направлении. Размер ячейки увеличивался вдоль осей и составлял вблизи тела около 1/40 от его радиуса. При моделировании удара мы использовали трехмерные декартовы координаты с размером сетки 200×400×400 ячеек (200 в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии).

Распределения температуры и плотности, полученные при моделировании удара, позволяют рассчитать потоки излучения на поверхности Земли в некоторые моменты времени. Для этого мы образуем вычислительную сетку на поверхности и проводим геометрические лучи, которые пересекают нагретый объем (ударный плюм) под разными углами. Уравнение переноса излучения решается вдоль лучей, причем его интегрирование начинается от холодного воздуха по направлению к светящейся области и к поверхности Земли. Мы учитываем спектральную зависимость излучения в многогрупповом приближении, которое раньше использовалась при моделировании мощных взрывов в атмосфере [Светцов, 1994].

Полная интенсивность излучения на поверхности при заданном угле пересечения луча с поверхностью получается суммированием интенсивностей излучения по группам энергий фотонов. Плотность потока излучения в точке на поверхности Земли рассчитывается путем интегрирования интенсивности излучения, умноженной на косинус угла между лучом и нормалью к облучаемой поверхности по всем углам. Интегрирование плотности потока во времени позволяет получить поверхностную плотность лучистой энергии. Значения плотности потока излучения и радиационной энергии позволяют оценить эффекты, вызванные излучением.

В работах [Shuvalov et al., 2017; Светцов и др., 2018] этим методом проводилось моделирование падения Челябинского метеорита, и неплохое совпадение вычисленных и наблюдаемых потоков излучения (в пределах погрешностей наблюдений и их интерпретации) показывает, что метод вполне применим для оценки радиационных эффектов при падении космических тел.

Для определения возможности возникновения пожаров необходимы определенные критерии. Плотности лучистой энергии, необходимые для воспламенения различных материалов, были получены во время ядерных испытаний в атмосфере [Glasstone, Dolan, 1977]. Однако импульсы излучения от ударов крупных тел существенно отличаются от излучения взрывов по величине и длительности. Так, при ударе тела диаметром 3 км длительность импульса излучения составляет несколько минут [Svetsov, Shuvalov, 2018], тогда как при взрывах длительность светового импульса составляет секунды. Используя опубликованные экспериментальные данные по воспламенению природных материалов тепловым излучением [Simms, Law, 1967; Гришин и др., 1999; Belcher et al., 2015], мы получили следующее соотношение для оценки спонтанного воспламенения древесины и наиболее легковоспламеняющихся материалов:

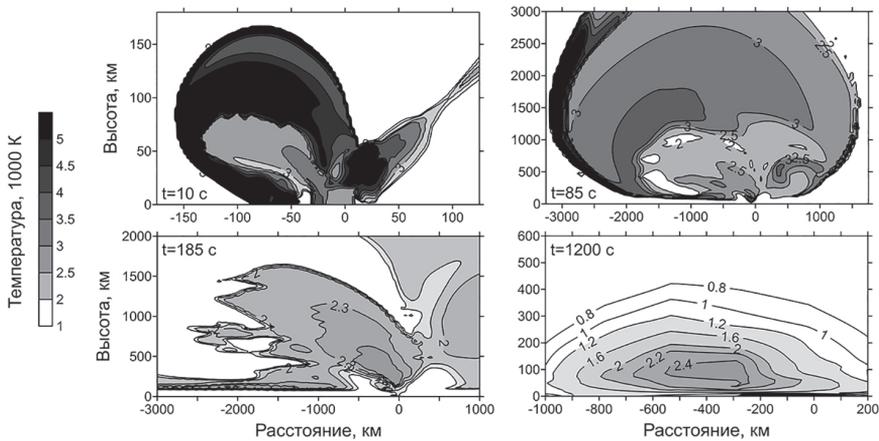
$$E = \int_{t_0}^t q dt > q_{cr} t + at^{0.45} \quad (1)$$

где  $E$  – плотность энергии облучения в Дж/см<sup>2</sup>,  $q$  – плотность потока излучения в Вт/см<sup>2</sup>,  $t$  – время облучения в секундах,  $q_{cr}$  – критическая плотность потока излучения, ниже которой воспламенение не происходит,  $t_0$  – время, когда  $q$  становится больше  $q_{cr}$ , и  $a$  – постоянная, зависящая от плотности вещества, тепловых свойств и размера облучаемого образца. Мы использовали  $q_{cr} = 2.5$  Вт/см<sup>2</sup> и  $a = 25.5$  для воспламенения сухой древесины и  $q_{cr} = 0.85$  Вт/см<sup>2</sup> и  $a = 7.6$  для легковоспламеняющихся природных материалов, таких как сухие листья или сухая пористая лесная подстилка. Форма этого соотношения и показатель степени для  $t$  взяты из [Babrauskas, 2002]. Коэффициенты  $q_{cr}$  и  $a$  выбраны так, чтобы было хорошее согласие с экспериментами по зажиганию древесины [Simms, Law, 1967], дубовых листьев, сосновой хвои и аналога полога живого леса [Belcher et al., 2015], а также сухого пористого слоя из сосновых иголок [Гришин и др., 1999].

### Результаты расчетов

После удара астероида о поверхность Земли образуется кратер и ударный плюм, который расширяется вверх и, достигнув значительной высоты, затем движется вниз под действием силы тяжести. Развитие плюма после удара десятикилометрового астероида под углом 45° показано на рис. 1. Через 10 с после контакта

астероида с поверхностью плюма развивается в направлении удара, образуя впереди себя воздушную ударную волну, которая ускоряется вверх, вследствие уменьшения плотности воздуха с высотой. Но излучение этой ударной волны несущественно из-за низкой плотности воздуха на больших высотах, а основной вклад в излучение, приходящее на Землю, дает нагретый пар. Через 85 с ударная волна уходит высоко вверх (прорыв атмосферы [Зельдович, Райзер, 1966]), а плюм достигает высоты  $\sim 1000$  км, его температура составляет 2000–2500 К, порядка температуры конденсации силикатных паров. Через 185 с верхний край плюма достигает предельной высоты 1700 км, а его горизонтальный размер составляет 2000–2500 км. Затем плюм, постепенно остывая за счет излучения, падает вниз и через 20 минут светящаяся область размером  $\sim 800$  км располагается на высотах ниже 200 км. Через 30 минут излучение становится незначительным. Спектр основной части излучения близок к планковскому с температурой  $\sim 2000$  К и ограничивается энергиями фотонов меньше 2.5 эВ. Радиационное воздействие плюма ограничивается той частью поверхности Земли, с которой ударный плюм виден под не очень острыми углами. Мы проводили расчеты для ясной погоды, но учитывали, что атмосфера имеет ограниченную видимость 30 км, что сказывается для острых углов.

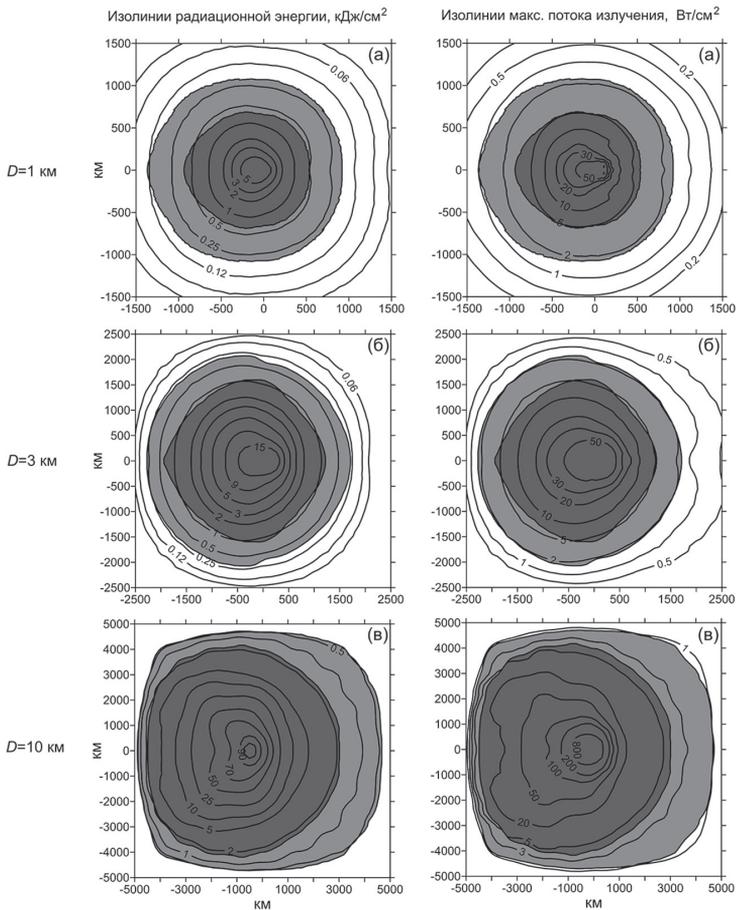


**Рис. 1.** Изображения температуры в плоскости, перпендикулярной поверхности Земли и проходящей через траекторию астероида. Диаметр астероида 10 км, скорость удара 20 км/с, угол  $45^\circ$ . На рисунках показано время, которое отсчитывается с момента контакта тела с поверхностью. Расстояние по оси абсцисс отсчитывается от места удара (от центра кратера) вдоль поверхности Земли. Астероид двигался справа налево. Значения температуры на изолиниях указаны в 1000 К

Заметим, что в данной работе мы учитывали только излучение ударного плюма, хотя высокоскоростные выбросы вещества из кратера, которые летят по баллистическим траекториям и вновь входят в плотные слои атмосферы, также излучают энергию, которой может оказаться достаточно для возникновения пожаров [Morgan et al., 2013]. Кроме того, мы не учитывали влияние магнитного поля Земли на движение вещества. На начальной стадии развития плюма, когда воздух и пары имеют высокую температуру и степень ионизации, газодинамическое давление значительно выше магнитного. В более поздние моменты воздух за счет расширения и излучения становится холодным (с температурой ниже фоновой). Основное свечение определяется парами ударника и мишени с температурой порядка 2000–3000 К, которая соответствует фазовому переходу газ-жидкость. В парах такая темпе-

ратура держится довольно долго из-за выделения энергии при конденсации. Именно эта температура видна на рис. 1. Степень ионизации при этом равна нулю, и поэтому магнитное поле не оказывает влияние на пар. Как можно видеть на рис. 1, плюм при расширении выталкивает воздух на высоты более 1000 км, где этот разреженный воздух будет ионизоваться излучением Солнца и потоками энергичных частиц. Но в данной задаче мы не рассматриваем эволюцию выброшенной массы атмосферы, поскольку для определения потоков излучения важны лишь области с высокой плотностью, пар, куда жесткое электромагнитное излучение и энергичные частицы не проникают.

На рис. 2 проиллюстрировано радиационное воздействие на поверхность Земли при ударах астероидов диаметром  $D$ , равным 1, 3 и 10 км, под углом  $45^\circ$  (это наиболее вероятный угол падения) со скоростью 20 км/с (близкой к средней скорости ударов по Земле).



**Рис. 2.** Изолинии поверхностной плотности радиационной энергии (на рис. слева) и максимальной плотности потока излучения (на рис. справа) на поверхности Земли при ударах астероидов диаметром 1 (а), 3 (б) и 10 км (в), входящих в атмосферу со скоростью 20 км/с под углом  $45^\circ$ . Площадь потенциального инициирования огня воспламенением сухих листьев показана серым цветом, воспламенение древесины – темно-серым. Ось абсцисс направлена вдоль проекции траектории. Тело двигалось справа налево

Поскольку мы определяли параметры излучения на сферической поверхности Земли, на рисунке сферическая поверхность преобразована в плоскость с сохранением расстояний от определенной точки на сфере до центра кратера, находящегося в начале координат. Мы определяли максимум плотности потока излучения по времени и по ориентации облучаемого объекта, расположенного в определенной точке на поверхности Земли. Поверхностная плотность энергии равна интегралу по времени от максимальной по ориентации объекта плотности потока излучения. Показана площадь потенциального воспламенения по формуле (1). В случаях, показанных на рис. 2, границы областей, где сухие листья могут загореться, близки к изолиниям удельной энергии излучения от 150 до 500 Дж/см<sup>2</sup> и к изолиниям максимальной плотности потока около 1–2 Вт/см<sup>2</sup>. Границы областей воспламенения сухой древесины приблизительно соответствуют значениям удельной энергии 500, 1000 и 3000 Дж/см<sup>2</sup> при  $D$ , равном 1, 3 и 10 км, соответственно, и значению максимальной плотности потока  $\sim 5$  Вт/см<sup>2</sup>. Длительность радиационного импульса составляет около 250, 500 и 1500 с при ударе тел диаметром 1, 3 и 10 км, при этом на Землю приходит энергия излучения, которая составляет около 5,5, 3 и 2,5% от кинетической энергии астероида при  $D = 1, 3$  и 10 км соответственно.

Размеры ударных кратеров для  $D = 1, 3$  и 10 км составляют около 15, 40 и 120 км. Область потенциального возникновения пожара намного превышает как размеры кратеров, так и область низкоскоростных выбросов, составляя в диаметре около 1200, 3000 и 7000 км при  $D = 1, 3$  и 10 км. Варианты расчетов ударов под разными углами показывают, что площадь воспламенения уменьшается по сравнению с рассмотренным случаем удара под углом 45° как при увеличении, так и при уменьшении угла. При вертикальных ударах и при ударах под углом 20° размер зоны воспламенения становится меньше на  $\sim 40\%$ . При увеличении скорости удара выше 20 км/с доля энергии излучения, приходящего на поверхность Земли, (по отношению к кинетической энергии астероида) изменяется незначительно, и поэтому площадь потенциального пожара возрастает. Если же скорость уменьшается до 15 км/с, то доля энергии излучения существенно уменьшается, и зона воспламенения может уменьшиться в размере в два раза.

Во всех случаях, рассмотренных нами, кроме низких скоростей меньше 15 км/с, размеры области потенциального пожара чрезвычайно большие, а при ударах астероидов диаметром 10 км могут быть сопоставимы с длиной меридиана.

### **Обсуждение результатов и выводы**

Для возникновения и распространения пожара, кроме источника тепла, требуется топливо и кислород, существенное влияние оказывают климат, погода, рельеф и характер местности и особенности растительности. Мы получили верхнюю оценку площади возгорания сухих материалов в современной атмосфере при ясной погоде. Находки ископаемого древесного угля свидетельствуют, что пожары начались вскоре после появления наземных растений  $\sim 420$  миллионов лет назад. Геологические исследования показывают, что пожары тесно связаны с содержанием кислорода в атмосфере [Scott, Glasspool, 2006]. Дефицит древесного угля в среднем и позднем девоне совпадает с прогнозируемым низким содержанием кислорода в атмосфере. Увеличение атмосферного кислорода с 13% в позднем девоне до  $\sim 30\%$  в перми сопровождалось интенсивным распространением лесных пожаров [Scott, Glasspool, 2006]. В перми обнаружено два пика содержания кислорода  $\sim 28\%$  около 285 млн лет назад и  $\sim 26\%$  вблизи границы пермь-триас  $\sim 250$  млн лет

назад [Glasspool et al., 2015]. И в это время пожары были более распространены, чем в настоящее время при содержании кислорода около 21%.

Отдельные виды растений адаптируются к специфическим режимам пожара, которые, среди прочего, включают частоту возникновения, интенсивность и характер расхода топлива [Keely et al., 2011]. Пожар, вызванный падением крупного космического тела, отличается огромной площадью воспламенения. Растения, которые обычно занимают после локальных пожаров выгоревшую часть, в случае громадной площади, охваченной огнем, также погибнут. Особенно опасно, если удар астероида диаметром 3–10 км произойдет в момент, когда суша образует лишь один материк. Тогда область воспламенения может захватить значительную часть Пангеи – более трети всей суши в случае удара десятикилометрового астероида, а затем пожар может распространиться на еще большую площадь.

Пермь-триасовому массовому вымиранию предшествовало потепление климата, что могло способствовать изменению структуры растительности и уменьшению связности между растениями, что, в свою очередь, затруднило бы распространение естественных пожаров [Glasspool et al., 2015]. Но при ударе астероида и наличии большого количества сухого топлива (вследствие увеличения гибели растений из-за высокой вулканической активности) должен был возникнуть глобальный пожар, приводящий к катастрофе. Тем не менее глобальный пожар на границе пермь-триас пока не нашел подтверждения [Glasspool et al., 2015]. Также не было экспериментально подтверждено наличие соответствующего ударного кратера, хотя геофизические аномалии дают основание полагать, что круглая структура вблизи Фолклендских островов диаметром ~ 250 км и оценочным возрастом позднего палеозоя является таким ударным кратером [Rosca et al., 2017]. (Заметим, что Фолклендские острова в позднем палеозое и раннем мезозое принадлежали континенту Пангея, а исследования крупной геологической структуры, находящейся под толщей более молодых осадочных пород, с помощью бурения требуют значительных затрат).

*Работа выполнена в рамках программы РАН (проект № 0146-2018-0005).*

Авторы благодарны И.Б. Косареву за предоставление коэффициентов поглощения и уравнения состояния паров хондрита.

## Литература

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

*Васильев Н.В.* Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908. М. : Русская панорама, 2004. – 360 с.

*Гришин А.М., Голованов А.Н., Медведев В.В.* О закипании слоя лесных горючих материалов световым излучением // Физика горения и взрыва 1999. Т. 35. № 6. С. 22–25.

*Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М. : Наука, 1966. – 688 с.

*Иванов Б.А.* Распределение ударных кратеров и астероидов по размерам // Катастрофические воздействия космических тел. М. : ИКЦ «Академкнига». 2005. С. 118–150.

*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. 1994. Т. 30. № 5. С. 129–142.

Светцов В.В., Шувалов В.В., Попова О.П. Излучение суперболида // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 3. С. 201–212.

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

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 // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 1. С. 1–16.

Babrauskas V. Ignition of wood: A review of the state of the art // Journal of Fire Protection Engineering. 2002. V. 12. P. 163–189.

Belcher C.M., Hadden R.M., Rein G., Morgan J., Artemieva N., Goldin T. An experimental assessment of the ignition of forest fuels by the thermal pulse generated by the Cretaceous-Palaeogene impact at Chixculub // J. Geol. Soc. 2017. V. 172. P. 175–185.

Bowman D.M.J.S., Balch J.K., Artaxo P., Bond W.J., Carlson J.M., Cochrane, M.A., et al. Fire in the Earth system // Science 2009. V. 324. P. 481–484.

Glasspool I.J., Scott A.C., Waltham D., Pronina N., Shao L. The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system // Frontiers in Plant Science. 2015. V. 6. Article 756.

Glasstone S., Dolan P.J. The Effects of Nuclear Weapons, 3rd edition. Washington, DC: United States Department of Defense and Department of Energy, 1977. – 653 p.

Keely J.E., Pausas J.G., Rundel P.W., Bond W.J., Bradstock R.A. Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits // Trends in Plant Science. V. 16, P. 406–411.

Morgan J., Artemieva N., Goldin T. Revisiting wildfires at the K-Pg boundary // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2013. V. 118. P. 1508–1520.

Randerson J.T., Chen Y., van der Werf G.R., Rogers B.M., Morton D.C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2012. V. 117. G04012, doi:10.1029/2012JG002128.

Rocca M.C.L., Rampino M.R., Presser J.L.B. Geophysical evidence for a large impact structure on the Falkland (Malvinas) Plateau // Terra Nova. 2017. V. 29. P. 233–237.

Scott A.C., Glasspool I.J. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration // Proc. Nat. Acad. Sci. 2006. V. 103. P. 10861–10865.

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. Radiation effects of the Chicxulub impact event // Geological and Biological Effects of Impact Events. New York: Springer-Verlag. 2002. P. 237–247.

Shuvalov V.V., Artemieva N.A. Numerical modeling of Tunguska-like impacts // Planet. Space Sci. 2002. V. 50. P. 181–192.

Shuvalov V., Svetsov V., Popova O., Glazachev D. Numerical model of the Chelyabinsk meteoroid as a strengthless object // Planet. Space Sci. 2017. V. 147. P. 38–47.

Simms D.L., Law M. The ignition of wet and dry wood by radiation // Comb. Flame. 1967. V. 11. P. 377–388.

Svetsov V.V., Shuvalov V.V. Thermal radiation from impact plumes // Meteoritics & Planet. Sci. 2018, doi:10.1111/maps.13200. In production.

Thompson S.L., Lauson H.S. Improvements in the Chart D radiation-hydrodynamic CODE III: Revised analytic equations of state. Report SC-RR-71 0714, Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico, 1972. – 119 p.

Vasilyev N.V. The Tunguska Meteorite problem today // Planet. Space Sci. 1998. V. 46. No. 2/3. P. 129–150.

*Wolbach W.S., Lewis R.S., Anders E. Cretaceous extinctions: Evidence for wildfires and search for meteoritic material // Science. 1985. V. 230. P. 167–170.*

УДК 552.6; 52-35

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ ПО НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ ДАННЫМ

***В.В. Ефремов<sup>1,2</sup>, О.П. Попова<sup>1</sup>, Д.О. Глазачев<sup>1</sup>, А.П. Карташова<sup>3</sup>***

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики  
геосфер Российской академии наук

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
астрономии Российской академии наук

В работе рассмотрены модели взаимодействия мелких метеорных тел с атмосферой Земли. Эти модели были использованы для анализа наблюдений метеоров (кривых блеска), что позволило оценить массы и плотности метеорных тел, для чего был разработан автоматизированный метод оценки.

### Введение

Метеорные тела, наряду с астероидами и кометами, несут важную информацию о нашей Солнечной системе, поскольку материал, из которого они состоят, свидетельствует о составе вещества в ранние этапы эволюции Солнечной системы. Большая часть этих тел не достигает поверхности Земли и не становится метеоритами. Метеорное тело, вошедшее в атмосферу, приводит к появлению свечения, ионизации и звуковых волн. Анализ динамики (торможение, разрушение) и излучения (светимость, спектр) дает возможность получить информацию о составе метеорного вещества и свойствах метеорного тела. Фактически, атмосфера является детектором, позволяющим изучать свойства метеорных тел. Поскольку родительскими телами метеорных тел являются астероиды и кометы, изучение метеоров позволяет изучать астероиды и кометы, что дешевле космических миссий, но не заменяет их полностью.

Метеоры делятся на поточные, которые принадлежат к метеорным потокам, и спорадические, для которых не была определена принадлежность к какому-либо из известных потоков. Метеорный поток – совокупность метеоров, порождённых вторжением в атмосферу Земли роя метеорных тел с близкими орбитами и схожими параметрами. Наиболее известные из потоков: Персеиды, Геминиды, Леониды [Бронштэн, 1981].

Яркость метеора определяется звездной величиной. Звездная величина – мера освещённости, создаваемой небесным светилом на плоскости, перпендикулярной падающим лучам [Аллен, 1977]. Абсолютная звёздная величина метеора – это звёздная величина метеора, которую он имел бы, будучи видим в зените на