

ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗЕМЛЮ УДАРОВ АПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

© 2021 г. В. В. Светцов^{1,*}, В. В. Шувалов^{1,**}

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

*E-mail: svetsov07@rambler.ru

**E-mail: valeryvshuvalov@gmail.com

Поступила в редакцию 22.03.2021 г.

После доработки 26.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Удары комет по Земле, как и сами кометы, особенно аперидические, по сравнению с астероидами изучены гораздо меньше. Но, несмотря на редкость таких ударов, они происходили в прошлом и нельзя исключить их в ближайшем будущем. Причем возможны удары межзвездных и, в принципе, даже межгалактических объектов с гиперболическими орбитами. Одна такая комета 21/Борисов была открыта совсем недавно. Для оценки воздействия таких объектов на Землю мы провели численное моделирование ударов кометных ядер диаметром 1 и 3 км по твердой Земле со скоростями 70 и 170 км/с под углом 45° к поверхности. Моделирование проводилось с помощью гидродинамической компьютерной программы с учетом термодинамических свойств пылевого ядра и оболочки кометы и земной коры в твердом и расплавленном состоянии. Определялись потоки теплового излучения на поверхности Земли на основе приближенного решения уравнения переноса излучения с учетом оптических свойства паров и воздуха. Оценены размеры зоны поражения воздушной ударной волной, массы выброшенного вещества в атмосферу и ее загрязнение, магнитуды землетрясений, размеры областей потенциального возникновения пожаров. Наиболее опасное прямое воздействие связано с возможностью возникновения пожаров в области, которая намного превышает как размер ударного кратера, так и область низкоскоростных выбросов из кратера, составляя в диаметре от 3000 км при минимальной из рассмотренных энергий удара до 14000 км при ударе с максимальной энергией. Долговременные последствия ударов связаны с загрязнением атмосферы мелкодисперсными выбросами, химическими компонентами, затемнением атмосферы.

Ключевые слова: комета, ударная волна, выбросы из кратера, тепловое излучение, загрязнение атмосферы.

DOI: 10.31857/S0002333721050197

ВВЕДЕНИЕ

Удары астероидов и комет играли значительную роль в геологической истории Земли; наиболее интенсивные в период ее раннего существования они продолжают и в настоящее время. Сейчас открыто более 90% околоземных объектов размером более 1 км, которые могут представлять значительную опасность для жизни на Земле, и целенаправленные поиски таких и более мелких тел продолжают. Тем самым постепенно снижается оценка риска непредсказуемого удара крупного космического тела. Кометы составляют лишь небольшую часть объектов, пересекающих орбиту Земли, но почти параболические кометы не могут быть обнаружены задолго до их появления, с тем, чтобы предотвратить их столкновение с Землей. Тем более это касается межзвездных, а возможно, и межгалактических объектов. Поэтому, несмотря на то, что вероятность ударов апе-

риодических комет по Земле относительно мала, опасность таких ударов будет сохраняться всегда, пока существует Солнечная система, и целесообразно оценить их последствия. Отметим, что среди ударов крупных тел, диаметром ~10 км и больше, представляющих угрозу для человечества, по видимому, чаще происходили удары комет [Toon et al., 1997].

Изучение и моделирование ударов проводилось значительно чаще для ударов астероидов. Воздействие удара зависит в первом приближении от кинетической энергии тела [Toon et al., 1997], при таком подходе удар астероида с плотностью 2500 кг/м³ и скоростью 15 км/с можно приравнять к удару кометы с плотностью 1000 кг/м³, скоростью 50 км/с и диаметром в 1.6 раз меньше. Тем не менее, удар кометы с небольшой плотностью и высокой скоростью приведет к передаче большей энергии атмосфере, более высоким тем-

пературам, другому составу выбросов в атмосферу и другой эффективности излучения плюма (выброшенного из кратера облака пара, газа, конденсированных и пылевых частиц) по сравнению с ударом астероида эквивалентной энергии. Отличие будет тем больше, чем больше разница в скоростях. Поэтому мы рассматриваем удары аperiодических комет с наибольшими скоростями.

Помимо почти параболических комет недавно, 30.08.2019 г., была открыта комета 2I/Борисов с гиперболической орбитой с высоким эксцентриситетом 3.36. На момент открытия комета 2I находилась на расстоянии 3 а. е. от Солнца, приближаясь к нему со скоростью 40.5 км/с, и на расстоянии 3.7 а. е. от Земли. Первоначальные оценки размера ядра 2I были недостаточно определенными (в пределах 1.4–6.6 км) из-за большого количества пыли в коме [Jewitt, Luu, 2019; Fitzsimmons et al., 2019]. Оценки, основанные на более точных наблюдениях кометы с помощью телескопа Хаббл, при некоторых предположениях (альbedo 0.04, плотность кометы 500 кг/м³) уточнили возможный диаметр кометы 2I интервалом от 0.4 до 1 км [Jewitt et al., 2020]. Еще одна оценка, на основании измеренного негравитационного ускорения кометы 2I, ограничила ее диаметр сверху величиной 0.9 км [Hui et al., 2020]. Межзвездные объекты, такие как комета 2I, а также открытый в 2017 г. астероид 1I/Оумуамуа [Meech et al., 2017], могут представлять реальную опасность для человечества, а из-за большой скорости и кинетической энергии последствия столкновения таких космических объектов с Землей могут быть глобальными.

С целью определения воздействия на Землю ударов тел кометного происхождения мы провели их численное моделирование. Диаметры наблюдаемых комет в Солнечной системе находятся в интервале от 0.4 до 80 км [Lamy et al., 2004; Weiler et al., 2011; Paradowski, 2020], причем число объектов вблизи нижнего предела мало. Мы выбрали для моделирования два диаметра объекта 1 и 3 км, что соответствует характерным размерам наблюдаемых комет, и, с другой стороны, такие диаметры соответствуют телам, приводящим к глобальным последствиям.

Комета 2I приблизилась к Солнцу на расстояние в два раза больше астрономической единицы, имея скорость на бесконечности 32 км/с. При такой скорости на бесконечном удалении кометы на расстоянии 1 а. е. от Солнца будет иметь скорость примерно 53 км/с. Орбитальная скорость Земли равна примерно 30 км/с, тогда в зависимости от направления движения кометы могут столкнуться с Землей со скоростью от 23 до 85 км/с, если не учитывать притяжение Земли. С учетом земного притяжения диапазон скоростей получается от 25 до 86 км/с. Отметим, что примерно такую же ско-

рость, 49.6 км/с, на расстоянии 1 а. е. от Солнца имел межзвездный астероид Оумуамуа [Meech et al., 2017]. Для моделирования мы выбрали скорость удара 70 км/с, близкую к максимальной скорости удара почти параболических комет. Отметим, что такие скорости входа в атмосферу Земли наблюдаются в некоторых метеорных потоках, например, в метеорном потоке Леониды.

Кроме того, поскольку полностью не исключены и столкновения с межгалактическими объектами, мы рассчитали также последствия ударов с очень высокой скоростью 170 км/с. Если удар происходит перпендикулярно орбите Земли, то для этого на “границе” Солнечной системы скорость межгалактической кометы должна быть около 165 км/с. А минимальная и максимальные скорости на этой “границе” для столкновений с Землей со скоростью 170 км/с (при встречном ударе и когда комета догоняет Землю) составляют около 133 и 195 км/с. Такие и даже значительно большие скорости возможны, поскольку скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики составляет примерно 230 км/с. Действительно, если бы вращение галактических объектов соответствовало законам Кеплера (как в Солнечной системе), то межгалактический объект, приближившийся к Галактике с очень малой скоростью, пересекая орбиту Солнца, имел бы скорость в корень из двух раз большую скорости вращения Солнца вокруг центра Галактики, то есть 325 км/с. А возможные минимальная и максимальная скорости входа в Солнечную систему составляли бы 95 и 555 км/с. Минимальная скорость меньше нижнего предела 133 км/с, и поэтому некоторые межгалактические объекты могут столкнуться с Землей со скоростью менее 170 км/с, но средняя скорость столкновений оказывается значительно больше. Вращение галактических объектов отклоняется от законов Кеплера, их скорость на периферии за орбитой Солнца уменьшается медленнее (чем обратно пропорционально квадратному корню из расстояния), что, вероятно, вызвано наличием темной материи. В таком случае темная материя разгонит межгалактический объект, направляющийся внутрь Галактики, до больших скоростей.

Во всех случаях моделировался удар под углом 45° к поверхности Земли, так как это наиболее вероятный угол ударов космических тел. Мы предполагали, что ударяющее тело состоит из каменного ядра, имеющего радиус, равный 0.6 от радиуса тела, ледяной мантии и тонкой пылевой оболочки толщиной 0.1 радиуса. С введением пористости средняя плотность тела составляла 1000 кг/м³. Такая структура кометы была выбрана по следующим причинам. Оценки дегазации, сделанные на основе спектроскопических наблюдений кометы 2I, показывают, что она похожа на кометы Солнечной системы [Busarev et al.,

2021], что позволяет предположить ее каменно-ледяной состав. Между тем, дефицит H_2O в коме 2I [Cordiner et al., 2020] и отсутствие в коме спектральных признаков водяного льда [Busarev et al., 2021] может объясняться наличием плотной пылевой оболочки, препятствующей подводу тепла и высвобождению воды, в отличие от более летучего CO [Cordiner et al., 2020]. Такая оболочка могла образоваться, например, в результате аккреции межзвездной пыли [Cordiner et al., 2020]. Насколько однородно может быть вещество внутри ядра кометы неизвестно. Исследования кометы 67P/Чурюмова–Герасименко показывают, что оно, по-видимому, однородно в больших масштабах, хотя для проверки этого предположения не хватает данных [Choukroun et al., 2020], как и в других случаях. Мы предположили, что ядро межзвездной кометы дифференцировано вследствие нагрева жестким излучением при прохождении около звезд. Таким нагревом может объясняться и появление плотной оболочки у кометы 2I (и у объекта 1I/Оумуамуа) [Cordiner et al., 2020], а также отсутствие комплексной органики у объектов 1I и 2I [Busarev et al., 2021]. Дифференциация с образованием каменного ядра в принципе возможна также при распаде короткоживущих радиоактивных изотопов (^{26}Al , ^{60}Fe) на ранней стадии возникновения объекта, хотя это происходит при больших размерах тел. С другой стороны, у нас нет уравнения состояния смеси минеральной компоненты с летучими, и наше предположение облегчает решение задачи.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование основывалось на описании движения вещества при ударе о поверхность Земли уравнениями гидродинамики. Гидродинамическая модель, уравнения и применяемый для решения дискретных уравнений численный метод SOVA 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 после удара о Землю влиять на формирование пюма, поэтому мы моделировали как сам удар, так и предшествующее движение кометы в атмосфере. На стадии движения в атмосфере 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 пренебрегли прочностью космического тела и грунта в процессе удара, но учитывали внутреннее трение разрушенных пород, хотя, в отличие от моделирования образования кратеров, параметры ударного пюма, который представляет для нас инте-

рес с точки зрения опасных последствий, значительно зависят от прочностной модели.

В процессе решения гидродинамических уравнений мы также учитывали перенос энергии излучением. Для этого 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 пюм 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 пюма, проходящего через эту ячейку, меньше единицы [Светцов и др., 2018; Svetsov, Shuvalov, 2019].

Метод решения уравнений гидродинамики SOVA [Shuvalov, 1999] позволяет различать границы между различными веществами (воздух, пар, конденсированное вещество ударяющего тела и грунта), а одна ячейка может содержать три вещества с различными уравнениями состояния. Для описания термодинамических свойств пылевого ядра и оболочки кометы, а также мишени (т.е. земной коры) в твердом и расплавленном состоянии мы использовали уравнение состояния для кварца, а для приближенного описания ледяной мантии кометы – уравнение состояния для воды, причем в обоих случаях уравнение состояния было получено в виде таблицы с помощью программы ANEOS [Thomson, Lauson, 1972] с входными параметрами для кварца [Melosh, 2007] и для воды [Turtle, Pierazzo, 2001] (ссылка 24 (Supplemental Data)). Что касается паров, мы использовали уравнение состояния и оптические свойства паров обыкновенного хондрита и кометного вещества [Косарев, 2009]. Для воздуха применялись табличное уравнение состояния [Кузнецов, 1965] и таблицы коэффициентов поглощения [Авилова и др., 1970].

Предполагалось, что комета имеет сферическую форму. 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 1/30 от его радиуса. При моделировании удара о мишень мы

использовали трехмерные декартовы координаты с размером сетки $200 \times 400 \times 400$ ячеек (200 ячеек в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии, проходящей через центр кометы и проекцию ее траектории на земную поверхность).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

При ударе космического тела о поверхность Земли происходит несколько процессов [Мелош, 1994]. Вглубь земной коры распространяется ударная волна, за фронтом которой вещество сжимается до высоких давлений и температур. Последующая разгрузка вещества до низких давлений приводит к плавлению и испарению вещества. Образуется ударный кратер, а ударная волна в грунте инициирует сейсмическую волну, подобно землетрясениям. Те выбросы вещества из кратера, которые имеют относительно невысокую скорость, засыпают поверхность вокруг кратера. В атмосфере образуется ударная волна, которая распространяется вдоль поверхности и может вызывать значительные разрушения. Выбрасываемое из кратера с высокой скоростью вещество (ударный плюм) поднимается на большие высоты и может влиять на химические процессы в атмосфере и поглощение солнечного излучения. Плюм, состоящий из нагретого воздуха, пара и конденсата ударяющего тела и мишени, может иметь достаточно высокую температуру и излучать энергию, инициируя пожары. Частицы плюма, имеющие наибольшую скорость, могут, двигаясь по баллистическим траекториям и входя вновь в плотные слои атмосферы, нагревать ее до высокой температуры.

Начальная стадия удара кометы диаметром 3 км со скоростью 70 км/с проиллюстрирована на рис. 1 от момента контакта кометы с поверхностью до трех секунд, когда ударный плюм достигает высоты более 100 км. В момент времени 0.3 с на рисунке хорошо видна почти полусферическая ударная волна, распространяющаяся по мишени. В момент времени 3 с эта ударная волна уходит на большие расстояния и ослабевает, но вызванное ею кратерообразующее течение в мишени приводит к росту кратера, из которого выбрасывается вещество земной коры, до размера около 10 км за 3 с. В результате этого удара в конечном итоге образуется переходный кратер диаметром около 30 км. На стадии обрушения (модификации) размер кратера увеличивается, но мы эту стадию подробно не рассматривали, потому что нас интересовала, значительно большая по размерам, возмущенная область атмосферы. Механическое воздействие такого удара на мишень вызывает сейсмические волны, по интенсивности соответствующие землетрясению, согласно оценкам [Хазинс и др., 2018], магнитудой 8.8. Его можно отнести к круп-

нейшим землетрясениям в истории наблюдений на планете, которые приводили к гибели сотен тысяч человек, например, во время землетрясения магнитудой 7 на Гаити в 2010 г. погибло более двухсот тысяч человек.

Ударный плюм, пополняясь выбросами из кратера, расширяется вверх и через минуту после удара достигает высот в несколько тысяч километров, как показано на рис. 2. Поскольку скорости удара высоки, и пар в плюме в начале его образования имеет высокую температуру, то верхняя часть плюма приобретает скорости выше второй космической и преодолевает притяжение Земли.

На рис. 3 для трех вариантов удара показано начальное распределение вещества земной коры, которое сжимается в ударной волне до давлений более 50 ГПа и более 300 ГПа. Многие горные породы, сжатые до давлений 50 ГПа, после разгрузки до нормальных давлений начинают плавиться, а сжатые до давлений 300 ГПа и более — испаряются [Мелош, 1994; Pierazzo, Melosh, 2000]. Объем вещества мишени, сжатого до давлений выше 50 ГПа, в случае удара трехкилометровой кометы со скоростью 70 км/с, составляет около 500 км³. Но значительная часть расплавленной породы остается в кратере, в то время как испаренное вещество мишени и кометы (которая превращается в пар почти полностью) выбрасывается в атмосферу. На рис. 3 также показаны объемы вещества мишени, которые выбрасывается в атмосферу со скоростями более 0.5, 1 и 3 км/с. Со скоростями более 3 км/с на высоты в сотни километров и более выбрасывается в основном испаренное и расплавленное вещество. Значительно больший объем вещества в виде мелких и твердых частиц выбрасывается со скоростями более 0.5 км/с в верхнюю часть тропосферы, стратосферы и мезосферы.

Зависимость массы вещества, выбрасываемого в атмосферу, от скорости выброса показана на рис. 4 для четырех вариантов ударов. В варианте удара кометы диаметром 3 км со скоростью 70 км/с масса вещества, равная примерно шести массам кометы, выбрасывается в космическое пространство, а со скоростью более 0.5 км/с в атмосферу выбрасывается масса равная 150 массам кометы, то есть около 2×10^{17} г пыли, конденсата и пара.

В данных расчетах мы не моделировали распространение ударной волны в атмосфере по поверхности Земли на далекие расстояния. Но можно определить размеры зоны поражения воздушной ударной волной, используя аппроксимационные соотношения, представленные в виде калькулятора [Glazachev et al., 2019] и основанные на результатах расчетов давлений за фронтом ударной волны при ударах космических тел [Artemieva, Shuvalov, 2019]. Разрушительные эффекты воздушной ударной волны связаны с максимальным избыточным давлением за ее фронтом. Результаты ядер-

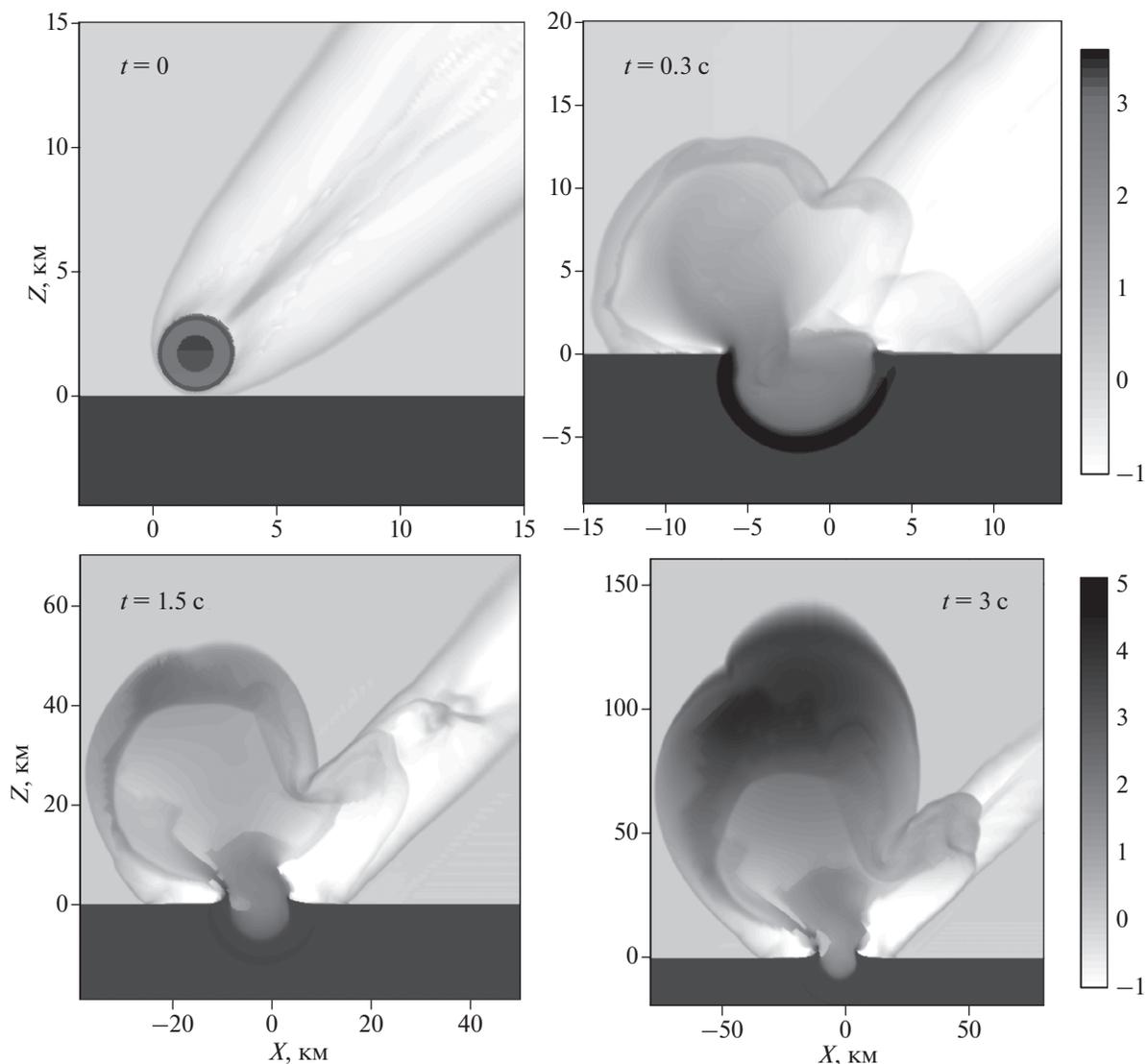


Рис. 1. Начальная стадия удара кометы диаметром 3 км со скоростью 70 км/с под углом 45°. В плоскости симметрии, проходящей через траекторию ударяющего тела, показано распределение десятичного логарифма величины $\rho/\rho_0(z)$ в системе координат, где z – высота, а x – координата вдоль проекции траектории тела на Землю; ρ – плотность вещества, $\rho_0(z)$ – равновесная плотность воздуха на высоте z , если $z > 0$ и $\rho_0(z) = \rho_0(0)$, если $z < 0$. Моменты времени t указаны на каждом фрагменте рисунка. Координата $z = 0$ соответствует поверхности Земли. Шкалы относительной плотности приведены в безразмерных единицах.

ных испытаний показывают, что разрушение кирпичных стен толщиной 24–36 см начинается при избыточном давлении 20 кПа, а стены из бетонных блоков толщиной 24–36 см полностью разрушаются при избыточном давлении 35 кПа [Glassstone, Dolan, 1977]. Вычисленные размеры зоны разрушений при избыточном давлении 20 кПа приведены в таблице. При ударе кометы диаметром 3 км со скоростью 70 км/с стены кирпичных домов могут быть разрушены в зоне диаметром около 1500 км. Но, помимо сильных разрушений, мелкие повреждения, такие как выбивание оконных стекол или ранения, могут появляться при избыточных давлениях 0.5–1 кПа, как показыва-

ют исследования воздействия ударной волны в Челябинском 2013 (0.5 Мт ТНТ) и Тунгусском 1908 (~10 Мт ТНТ) событиях падений космических тел [Popova et al., 2013; Jenniskens et al., 2019]. Поэтому область опасного действия воздушной волны может быть существенно больше, но расчеты для очень больших расстояний, соответствующих небольшим давлениям за фронтом ударной волны, не проводились.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Распределения температуры и плотности, полученные при моделировании удара, позволяют

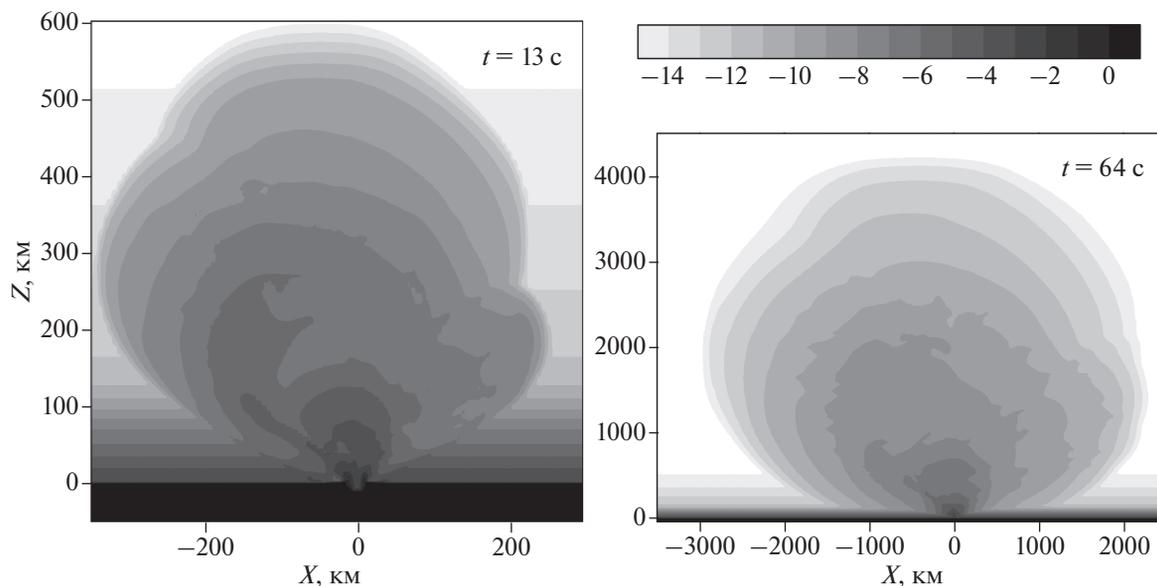


Рис. 2. Развитие ударного плюма после удара кометы диаметром 3 км со скоростью 70 км/с в более поздние моменты времени после удара – 13 и 64 с. Показано распределение десятичного логарифма плотности ρ в плоскости симметрии. Шкала плотности приведена в десятичных логарифмах от плотности в г/см^3 .

рассчитать потоки излучения на поверхности Земли для заданных моментов времени. Для этого создается вычислительная сетка на поверхности мишени, и проводятся геометрические лучи, которые пересекают нагретый объем (ударный плюм) под разными углами. Уравнение переноса излучения решается вдоль лучей, причем интегрирование этого уравнения начинается от холодного воздуха по направлению к светящейся области и к поверхности Земли. Спектральная зависимость излучения учитывается в многогрупповом приближении [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. Этим методом проводилось вычисление потоков излучения при падении Челябинского метеорита в работах [Shuvalov et al., 2017; Светцов и др., 2018], и хорошее совпадение вычисленных и наблюдаемых потоков излучения показало, что применяемый метод вполне приемлем для оценки радиационных эффектов при падении космических

тел. Расчеты теплового воздействия при ударах тел размером от 300 м до 3 км с умеренными скоростями были недавно проведены в работе [Svetsov, Shuvalov, 2019]. В расчетах не учитывалось наличие облаков, и использовалась средняя прозрачность невозмущенной атмосферы.

Для определения возможности возникновения пожаров необходимы определенные критерии. Используя опубликованные экспериментальные данные по воспламенению природных материалов излучением, было получено следующее соотношение для оценки спонтанного воспламенения древесины и наиболее легковоспламеняющихся материалов [Svetsov, Shuvalov, 2019]:

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

где: E – плотность энергии облучения в Дж/см^2 ; q – плотность потока излучения в Вт/см^2 ; 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} ; a – постоянная, зависящая от плотности вещества, тепловых свойств и размера облучаемого образца. Мы использовали $q_{cr} = 2.5 \text{ Вт/см}^2$ и $a = 25.5$ для воспламенения сухой древесины и $q_{cr} = 0.85 \text{ Вт/см}^2$ и $a = 7.6$ для легковоспламеняющихся природных материалов, таких как сухие листья или сухая пористая лесная подстилка. Форма этого соотношения и показатели степени для t взяты из работы [Babrauskas, 2002]. Коэффициенты q_{cr} и a выбраны так, чтобы

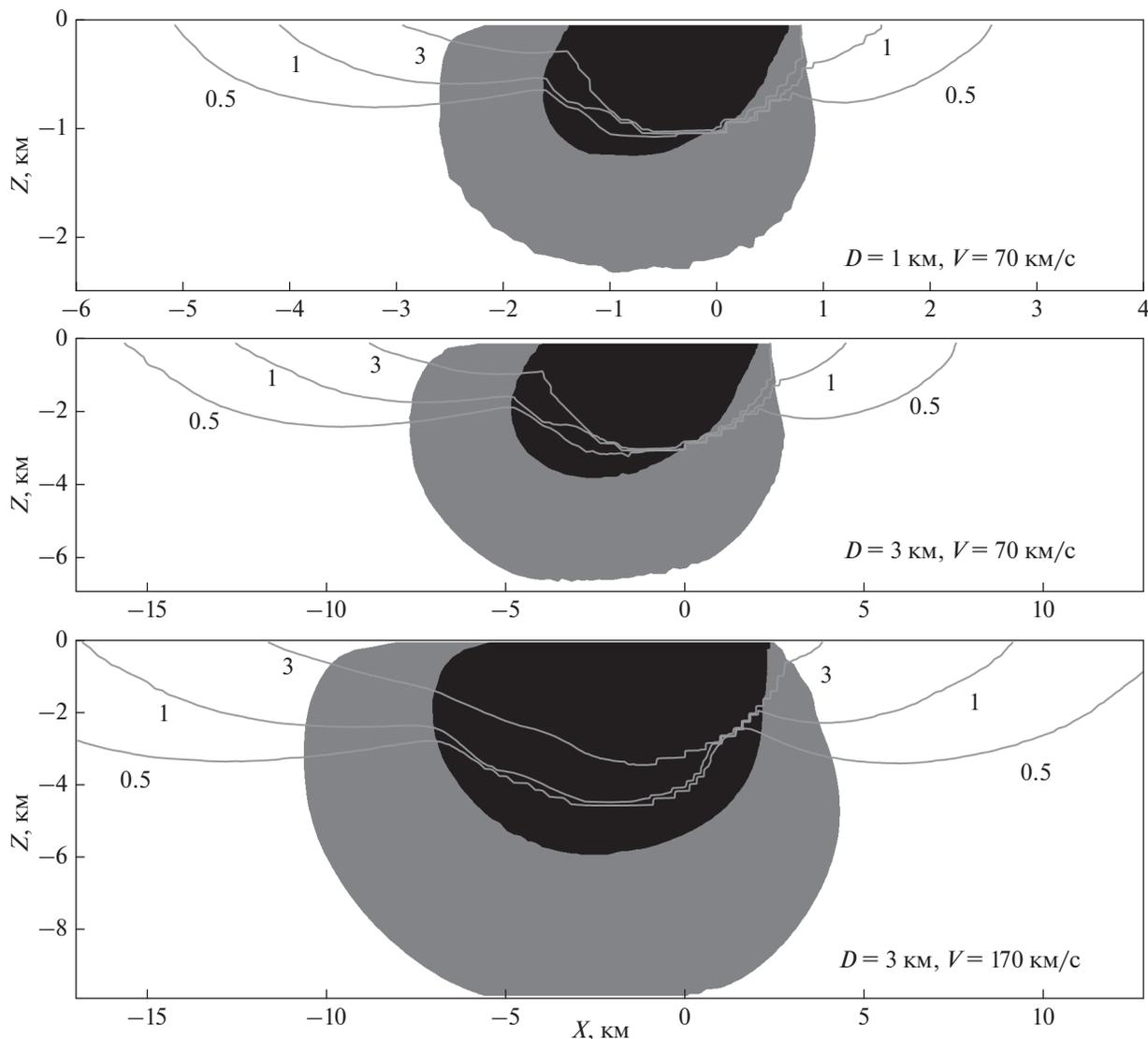


Рис. 3. Начальное распределение вещества мишени, сжатого при ударе до давления выше 300 ГПа (показано черным цветом) и выше 50 ГПа (показано серым цветом). Серые кривые – изолинии скорости в км/с, с которой вещество выбрасывается из кратера. Удар под углом 45° произошел в соответствии с рис. 1, справа налево.

было хорошее согласие с экспериментами по зажиганию древесины [Simms, Law, 1967], дубовых листьев, сосновой хвои и аналога полога живого леса [Belcher et al., 2017], а также сухого пористого слоя из сосновых иголок [Гришин и др., 1999].

Радиационное воздействие излучения ударного плюма ограничивается той частью поверхности Земли, с которой ударный плюм виден под не очень острыми углами. В расчетах предполагалось, что атмосфера имеет видимость, соответствующую ясной погоде. На рис. 5 представлено радиационное воздействие на поверхность Земли для четырех вариантов ударов кометы. Параметры излучения определялись на сферической поверхности Земли, но на рисунке сферическая поверхность преобразована в плоскость с сохране-

нием расстояний от определенной точки на сфере до центра кратера, находящегося в начале координат. Поверхностная плотность энергии равна интегралу по времени от максимальной по ориентации облучаемого объекта плотности потока излучения. Показана площадь потенциального воспламенения по формуле (1). Границы областей, где могут загореться сухие листья, близки к изолиниям удельной энергии облучения 250 Дж/см^2 , а границы областей воспламенения сухой древесины приблизительно соответствуют значениям удельной энергии 1 кДж/см^2 . Как видно из таблицы, длительность радиационного импульса составляет в разных вариантах от 400 до 1000 с, а всего на Землю приходит энергия излучения, которая состав-

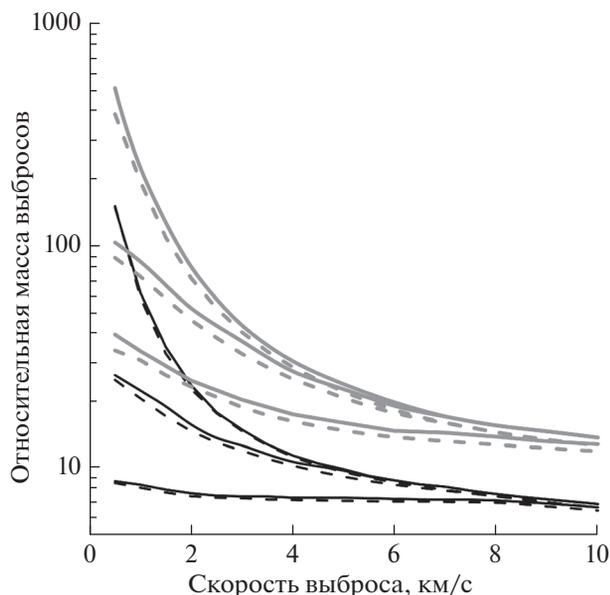


Рис. 4. Зависимости интегральной относительной (по отношению к массе ударника) массы выбросов вещества из кратера от скорости выброса. Черные кривые соответствуют удару комет со скоростью 70 км/с, серые — удару комет со скоростью 170 км/с, сплошные — удару километровой кометы, пунктирные — удару трехкилометровой кометы. Нижние кривые соответствуют массе выбросов вещества, сжатого при ударе до давления выше 300 ГПа, средние — выше 50 ГПа, верхние — массе всех выбросов. Вертикальная ось приведена в логарифмическом масштабе.

ляет от ~2.5 до ~16% от кинетической энергии кометы перед ударом.

Область потенциального возникновения пожара намного превышает как размеры кратеров, так и область низкоскоростных выбросов из кратера, составляя в диаметре от 3000 км при минимальной из рассмотренных энергии удара до 14000 км при ударе с максимальной энергией. Во всех вариантах размеры области возникновения пожара чрезвычайно большие и могут быть сопоставимы с длиной меридиана.

Заметим, что в данных расчетах учитывалось только прямое излучение ударного плюма, но 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 на большей территории [Morgan et al., 2013].

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ УДАРОВ

Как показывают результаты моделирования, суммированные в таблице, область поражения ударной волной и тепловым излучением в вы-

бранных вариантах ударов составляет тысячи километров. Эвакуация населения из столь обширной области — чрезвычайно сложная задача, а экономически ущерб прямого воздействия ударов может быть катастрофическим.

Долговременные последствия ударов связаны в первую очередь с загрязнением атмосферы мелкодисперсными выбросами и продуктами горения. В таблице приведены массы выбросов со скоростью более 0.5 км/с, то есть достигающих стратосферы. В атмосфере надолго задерживаются частицы субмикронных размеров, которые по некоторым оценкам, основанным на экспериментальных данных по взрывам, составляют по массе 0.1% от массы выбросов всех частиц [Toon et al., 1997]. Вычисленные на основе этого предположения поверхностные плотности субмикронной пыли, приведенные в таблице, в несколько раз меньше, чем дают аналитические оценки [Toon et al., 1997], а поверхностная плотность пара, выбрасываемого в стратосферу, оказалась почти на два порядка больше вычисленной плотности субмикронных частиц. Оптическую толщину атмосферы (при поглощении и рассеянии солнечного света) можно в первом приближении оценить по формуле $\tau = 3 \times 10^4 M$, где M — масса субмикронных частиц на единицу площади Земли в г/см² [Toon et al., 1997]. Средние оптические толщины атмосферы, приведенные в таблице, вычислены в предположении, что половина массы пара конденсируется в частицы размером менее микрометра [Зельдович, Райзер, 1966]. Они достигают больших величин, и при ударе километровой кометы со скоростью 70 км/с оптическая толщина атмосферы превышает предел, при котором прекращается фотосинтез растений. Пожар, вызванный падением крупного космического тела, отличается огромной площадью начального воспламенения. Такие пожары, помимо того, что приводят к гибели живых организмов и наносят прямой ущерб, могут значительно усилить непрозрачность атмосферы за счет дыма и сажи и еще больше увеличить охлаждение земной поверхности путем экранировки солнечного излучения. Дальнейшее развитие событий зависит от условий, необходимых для распространения пожара (климата, топографии, наличия топлива). Очищение атмосферы также зависит от многих факторов и может продолжаться годами. Как показывают модели, описывающие последствия ядерных конфликтов, в которых предполагаются существенно меньшие выбросы в стратосферу [Robock et al., 2007; Mills et al., 2014], значительное охлаждение поверхности и изменение климата может сохраняться годами.

С большой вероятностью удар может произойти по поверхности океана. В этом случае появляется опасность цунами. Удар недалеко от берега,

Таблица 1. Характеристики ударов

	$D = 1 \text{ км}$ $V = 70 \text{ км/с}$	$D = 3 \text{ км}$ $V = 70 \text{ км/с}$	$D = 1 \text{ км}$ $V = 170 \text{ км/с}$	$D = 3 \text{ км}$ $V = 170 \text{ км/с}$
Масса тела, г	5.2×10^{14}	1.4×10^{16}	5.2×10^{14}	1.4×10^{16}
Кинетическая энергия, Дж	1.28×10^{21}	3.46×10^{22}	7.57×10^{21}	2.04×10^{23}
Кинетическая энергия, Мт ТНТ	3.06×10^5	8.27×10^6	1.81×10^6	4.88×10^7
Диаметр кратера, км	18	49	29	76
Магнитуда землетрясения	7.8	8.8	8.3	9.3
Масса испаренного вещества, г	6.6×10^{15}	1.7×10^{17}	3.0×10^{16}	6.5×10^{17}
Масса расплавленного вещества, г	4.2×10^{16}	1.1×10^{18}	1.7×10^{17}	3.7×10^{18}
Масса выбросов в атмосферу со скоростью больше 0.5 км/с, г	9.3×10^{16}	2.1×10^{18}	3.3×10^{17}	5.4×10^{18}
Плотность субмикронной пыли, г/см ²	7.2×10^{-5}	1.6×10^{-3}	2.6×10^{-4}	4.2×10^{-3}
Плотность пара в атмосфере, г/см ²	3.4×10^{-3}	8.9×10^{-2}	1.3×10^{-2}	3.2×10^{-1}
Оптическая толщина атмосферы	50	1300	200	5000
Средний радиус зоны поражения воздушной волной >20 кПа, км	400	800	600	900
Длительность интенсивного излучения, с	400	500	700	1000
Доля энергии теплового импульса, %	6.5	2.5	16	7.3
Средний радиус области потенциального воспламенения, км	1500	2400	4500	7000
Диаметр переходного кратера при ударе в океан, км	18	44	27	64

в область шельфа, безусловно, представляет опасность для прибрежных районов. Но удар на удалении может быть для них менее опасен. Цунами, вызываемые землетрясениями, обычно имеют длину волны ~100 км, которая эффективно распространяется по поверхности океана, нанося значительный ущерб в тысячах километров от источника. При рассматриваемых ударах комет переходный кратер в воде бесконечной глубины (образующийся сразу после окончания эквакации до его коллапса под действием силы тяжести) составлял бы около 20 км и более (таблица). Создаваемые такими ударами волны будут иметь длину такого же порядка величины, то есть больше глубины океанических бассейнов. Такие “мелководные” волны меньше затухают по сравнению с “глубоководными” волнами, генерируемыми ударами тел размером в сотни метров, и значительно большая энергия передается в энергию волны цунами [Robertson, Gisler, 2019]. Поэтому рассматриваемые удары в океан представляют региональную опасность аналогично землетрясениям.

Глобальное воздействие может осуществляться при выбросе воды в верхние слои атмосферы. Расчеты [Шувалов, 2018] показывают, что при ударе космического тела масса выбрасываемой

воды растет с увеличением скорости удара, и при вертикальном ударе километрового астероида со скоростью 50 км/с масса воды, выбрасываемая на высоты более 15 км, то есть в стратосферу и выше, составляет 18 масс астероида (2.8×10^{16} г), а на высоты более 90 км – около четырех масс астероида, причем на 80% – в виде пара. Почти такие же соотношения будут и при ударе километровой кометы со скоростью 70 км/с. Тепловое воздействие водяного плюма невелико, так как такой плюм, расширяясь в атмосфере, быстро охлаждается до низких температур порядка температуры конденсации воды.

Но морская вода и ее компоненты могут оказать сильное влияние на состояние атмосферы. В работе [Koeberl, Ivanov, 2019] рассматривались выбросы воды в атмосферу при ударе пяти- и десятикилометровых астероидов в океан глубиной 1 и 3 км, но выбросы грунта в атмосферу не рассматривались и расчеты заканчивались через 6 мин после удара, до того, как сформировалось более или менее стационарное облако выбросов на высотах от нескольких десятков до нескольких сотен километров. При солёности морской воды 3.5% в плюме из водяного пара содержится по массе: ~2% хлора, ~1% натрия, ~0.13% магния и ~0.1% серы [Koeberl, Ivanov, 2019]. Водяной пар в

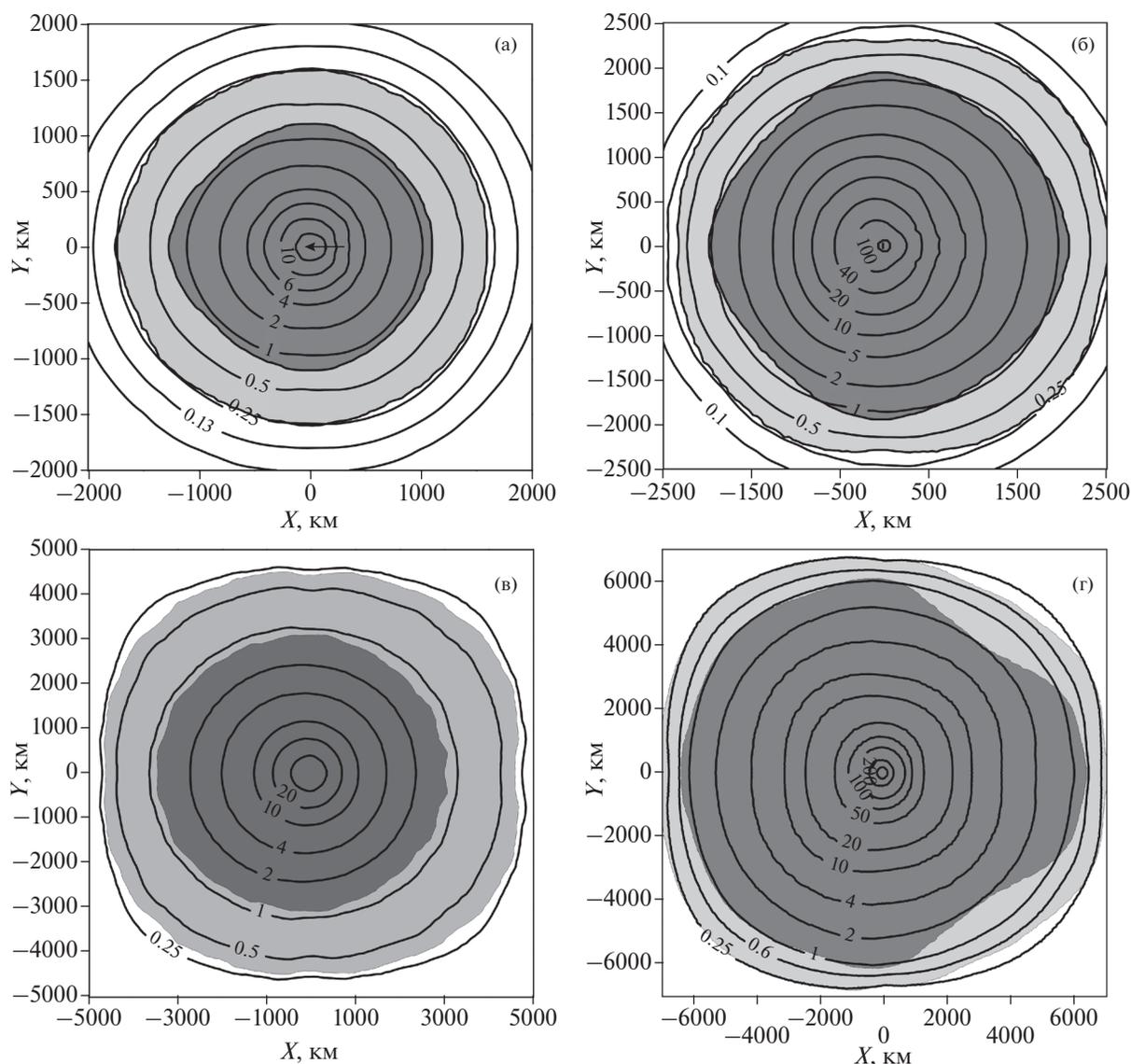


Рис. 5. Изолинии поверхностной плотности радиационной энергии в kJ/cm^2 на поверхности Земли при ударе комет диаметром 1 км (а) и 3 км (б) со скоростью 70 км/с и диаметром 1 км (в) и 3 км (г) со скоростью 170 км/с. Площадь потенциального инициирования пожара путем воспламенения сухих листьев показана серым цветом, воспламенение древесины – темно-серым. Ось X направлена вдоль проекции траектории, ось Y – в перпендикулярном направлении. Тело двигалось справа налево.

верхних слоях атмосферы может диссоциировать под действием солнечного излучения, образуя большое количество водорода. Удар кометы размером 3 км со скоростью 170 км/с по энергии близок к удару астероида диаметром 10 км со скоростью 20 км/с. Весьма вероятно, что такой удар в воду вызовет разрушение озонового слоя и изменение климата на долгий период, но для определения этих эффектов нужны дальнейшие исследования [Koeberl, Ivanov, 2019].

Мы рассмотрели последствия ударов комет размером 1 и 3 км с высокой скоростью. Если взять нижние оценки размера кометы 21 – в 400 м

и минимальную скорость столкновения подобной кометы с Землей – 20 км/с, то такие параметры удара по энергии близки к удару астероида диаметром 300 м, который подробно рассматривался в работе [Шувалов и др., 2017]. Такой удар не приводит к глобальным последствиям, но может нанести значительный ущерб и вызвать гибель людей. Диаметр зоны разрушений наиболее слабых конструкций может достигать 700–1000 км. Возмущения ионосферы длятся часами. При ясной погоде размер области, где под действием теплового нагрева может воспламениться древесина, достигает 200 км, а зона отдельных очагов

пожара, когда загораются легко воспламеняющиеся материалы, может быть в два раза больше. Опасная для человека область увеличивается с уменьшением угла наклона траектории, и тепловое действие может ощущаться людьми на расстояниях до 250–400 км от кратера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом измеренных и предполагаемых физических параметров вещества кометы 21/Борисов проведено численное моделирование столкновений с Землей похожих кометных объектов, движущихся с повышенными скоростями, – почти параболических и межзвездных комет (~70 км/с), а также межгалактических комет (~170 км/с). Рассмотрены варианты падений таких комет с диаметрами 1 и 3 км на континентальную поверхность Земли и сделаны оценки последствий воздействия разных видов энергии (механической и лучистой), освобождающейся при ударе, на разные земные среды (поверхность, недра, атмосферу и океан). Оценены масштабы возникновения на земной поверхности пожаров при лучевом воздействии нагретого ударного плюма и светящегося следа ударника в земной атмосфере (с длительностью от нескольких минут до десятков минут в зависимости от выделяемой энергии). Воспламенение горючих материалов происходит на расстояниях от сотен до тысяч километров от эпицентра удара. Долговременные последствия, хотя и могут быть оценены в первом приближении, требуют дальнейших исследований с помощью глобальных климатических моделей, включающих физические и химические процессы в атмосфере и океане.

Хотя вероятность столкновения межзвездных объектов с Землей очень мала, такие столкновения очень опасны и могут иметь глобальные и длительные катастрофические последствия для земной цивилизации, биосферы и климата.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензентам Б.А. Иванову и В.В. Бусареву за внимательное прочтение статьи, ценные замечания и советы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема АААА-А17-117112350016-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С., Замалин В.М., Кобзев Г.А., Лагарьков А.Н., Мнацаканян А.Х., Норман Г.Э.

Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука. 1970. 320 с.

Гришин А.М., Голованов А.Н., Медведев В.В. О зажигании 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.

Косарев И.Б. Оптические свойства паров 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.

Мелош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир. 1994. 336 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 // Астрономический вестник. 2018. Т. 52. № 3. С. 201–212.

Хазинс В.М., Шувалов В.В., Светцов В.В. Сейсмическая эффективность ударов космических тел // Астрономический вестник. 2018. Т. 52. № 6. С. 566–576.

Шувалов В.В. Выброс воды в атмосферу при падении астероидов в океан. Динамические процессы в геосферах. Вып. 10. Сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ИДГ РАН. 2018. С. 126–131.

Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Численное моделирование образования подводной ударной структуры Элтанин // Астрономический вестник. 2007. Т. 41. № 1. С. 61–69.

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.

Artemieva N., Shuvalov V. Atmospheric shock waves after impacts of cosmic bodies up to 1000 m in diameter // Meteorit. Planet. Sci. 2019. V 54. № 3. P. 592–606.

Babrauskas V. Ignition of wood: A review of the state of the art // J. Fire Protection Engineering. 2002. V. 12. № 3. P. 163–189.

Belcher C.M., Hadden R.M., Rein G., Morgan J.V., Artemieva N., Goldin T. 2015. An experimental assessment of the ignition of forest fuels by the thermal pulse generated by the Cretaceous-Palaeogene impact at Chicxulub // J. Geological Society. 2015. V. 172. № 2. P. 175–185.

Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Ikonnikova N.P., Burlak M.F., Belinski A.A. Interstellar comet 21/Borisov: dust composition from multiband photometry and modeling // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2021. V. 502. № 2. P. 1882–1894.

Choukroun M., Altwegg K., Kürt E., Biver N., Bockelée-Morvan D., Drażkowska J., Hérique A., Hilchenbach M., Marschall R., Pätzold M., Taylor M. G.G.T., Thomas N. Dust-to gas and refractory-to-ice mass ratios of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta observations // Space Sci. Rev. 2020. V. 216. № 3. Article 44.

Cordiner M.A., Milan S.N., Biver N., Bockelée-Morvan D., Roth N.X., Bergin E.A., Jehin E., Remijan A.J., Charnley S.B., Mumma M.J., Boissier J., Crovisier J., Paganini L., Kuan Y.-J.,

- Lis D.C.* Unusually high CO abundance of the first active interstellar comet // *Nature Astronomy*. 2020. V. 4. № 9. P. 861–866.
- Fitzsimmons A., Hainaut O., Meech K.J. et al.* Detection of CN gas in interstellar object 2I/Borisov // *Astrophys. J. Lett.* 2019. V. 885. № 1. Id. L9. 6 p.
- 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.
- Glazachev D., Podobnaya E., Popova O., Svetsov V., Shuvalov V., Artemieva N.* Scaling relations for shock wave effects from the impacts of cosmic objects with diameters from a few meters to 3 km. In *Trigger Effects in Geosystems* / Eds. G. Kocharyan, A. Lyakhov. Springer Nature Switzerland AG. 2019. P. 475–486.
- Hui M.-T., Ye Q.-Z., Föhring D., Hung D., Tholen D.J.* Physical characterization of interstellar comet 2I/2019 Q4 (Borisov) // *Astron. J.* 2020. V. 160. № 2. Id. 92. 16 p.
- Jenniskens P., Popova O.P., Glazachev D.O., Podobnaya E.D., Kartashova A.P.* Tunguska eyewitness accounts, injuries, and casualties // *Icarus*. 2019. V. 327. P. 4–8.
- Jewitt D., Luu J.* Initial characterization of interstellar comet 2I/2019 Q4 (Borisov) // *Astrophys. J. Lett.* 2019. V. 886. № 2. Id. L29. 6 p.
- Jewitt D., Hui M.-T., Kim Y., Mutchler M., Weaver H., Agarwal J.* The nucleus of interstellar comet 2I/Borisov // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 888. № 2. Id. L23. 8 p.
- Koeberl K., Ivanov B.* Asteroid impact effects on Snowball Earth // *Meteorit. Planet. Sci.* 2019. V. 54. № 10. P. 2273–2285.
- Lamy P.L., Toth I., Fernández Y.R., Weaver H.A.* The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei // *Comets II* / Ed. M. Festou, H.U. Keller, H.A. Weaver. Tucson, Arizona: Univ. Arizona Press. 2004. P. 223–264.
- Meech K.J., Weryk R., Micheli M., Kleyna J.T., Hainaut O.R., Jedicke R., Wainscoat R.J., Chambers K.C., Keane J.V., Petric A.P., Denneau L., Magnier E., Berger T., Huber M.E., Flewelling Y., Waters C., Schunova-Lilly E., Chastel S.* A brief visit from a red and extremely elongated interstellar asteroid // *Nature*. 2017. V. 552. P. 378–381.
- Melosh H.J.* A hydrocode equation of state for SiO₂ // *Meteorit. Planet. Sci.* 2007. V. 42. № 12. P. 2079–2098.
- Mills M.J., Toon O.B., Lee-Taylor J., Robock A.* Multidecadal global cooling and unprecedented ozone loss following a regional nuclear conflict // *Earth's Future*. 2014. V. 2. Iss. 4. P. 161–176.
- Morgan J. V., Artemieva N., Goldin T.* 2013. Revisiting wildfires at the K–Pg boundary // *J. Geophys. Res.: Biogeosciences*. 2013. V. 118. № 4. P. 1508–1520.
- Paradowski M.L.* A new method of determining brightness and size of cometary nuclei // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 2020. V. 492. № 3. P. 4175–4188.
- Pierazzo E., Melosh H.J.* Melt production in oblique impacts // *Icarus*. 2000. V. 145. P. 252–261.
- Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudurov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.-Z., Gural P.S., Alberts J., Gravnik M., 45 co-authors.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013. V. 342. № 6162. P. 1069–1073.
- Robertson D.K., Gisler G.R.* Near and far-field hazards of asteroid impacts in oceans // *Acta Astronaut.* 2019. V. 156. P. 262–277.
- Robock A., Oman L., Stenchikov G.L.* Nuclear winter revisited with a modern climate model and current nuclear arsenals: Still catastrophic consequences // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D13107.
- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. V. 9. № 6. P. 381–390.
- Shuvalov V.V., Artemieva N.A.* Numerical modeling of Tunguska-like impacts // *Planet. Space Sci.* 2002. V. 50. № 2. 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.* 1967. The ignition of wet and dry wood by radiation // *Combust. Flame*. 1967. V. 11. № 5. P. 377–388.
- Svetsov V., Shuvalov V.* Thermal radiation from impact plumes // *Meteorit. Planet. Sci.* 2019. V. 54. № 1. P. 126–141.
- 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. Albuquerque: Sandia National Laboratory. 1972. 119 p.
- Toon O.B., Turco R.P., Covey C., Zahnle K.* Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets // *Rev. Geophys.* 1997. V. 35. № 1. P. 41–78.
- Turtle E., Pierazzo E.* Thickness of an European ice shell from impact crater simulations // *Science*. 2001. V. 294. № 5545. P. 1326–1328.
- Weiler M., Rauer H., Sterken C.* Cometary nuclear magnitudes from sky survey observations // *Icarus*. 2011. V. 212. P. 351–366.

Assessments of Aperiodic Comet Impact Effects on Earth

V. V. Svetsov^{a,*} and V. V. Shuvalov^{a,**}

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**e-mail: svetsov07@rambler.ru*

***e-mail: valeryshuvalov@gmail.com*

Cometary impacts on Earth, as comets themselves, especially aperiodic ones, have been much less studied compared to asteroids. Nevertheless, despite the rarity of such impacts, they occurred in the past and cannot be ruled out in the near future. Moreover, the impacts of interstellar and, in principle, even intergalactic objects with hyperbolic orbits are possible. One such comet 2I/Borisov has been discovered quite recently. To assess the influence of such objects on Earth, we carried out numerical simulations of the impacts of come-

tary nuclei with diameters of 1 and 3 km on solid Earth at speeds of 70 and 170 km/s at an angle of 45° to the surface. Modeling was carried out using a hydrodynamic computer code with allowance for thermodynamic properties of a dusty core and shell of a comet and Earth's crust in solid and molten state. Fluxes of thermal radiation on Earth's surface were determined based on an approximate solution of the radiation transfer equation, taking into account optical properties of vapors and air. We estimated areas affected by air shock waves, masses of material ejected into the atmosphere and atmospheric pollution, magnitudes of earthquakes, areas of potential fires. The most dangerous direct effect is associated with the possibility of fires in areas that are much larger than both the size of an impact crater and the area of low-velocity ejecta from a crater, ranging in diameter from 3000 km with the minimum of considered impact energies up to 14000 km with the maximum impact energy. Long-term effects of the impacts are associated with air pollution by fine dispersed ejecta, chemical components, darkening of the atmosphere.

Keywords: comet, shock wave, crater ejecta, thermal radiation, atmospheric pollution