

УДК 523.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБРОСА ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРУ ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ ДЕСЯТИКИЛОМЕТРОВЫХ АСТЕРОИДОВ В ОКЕАН

© 2023 г. В. В. Шувалов*

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

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

Поступила в редакцию 19.09.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Приведены результаты трехмерного численного моделирования падения десятикилометровых астероидов под углом 45 градусов на твердую поверхность и в океан глубиной от 1 до 6 км. В расчетах получены максимальные массы выброшенных в атмосферу воды, вещества ударника и грунта, а также массы воды, вещества ударника и грунта, оставшиеся в атмосфере через 10 мин после удара. Определена масса паров в выбросах. Показано, что при косых ударах в атмосферу выбрасывается в 2–5 раз больше вещества ударника и грунта, чем при вертикальных.

Ключевые слова: астероидная опасность, численное моделирование, выбросы из кратера, атмосферные возмущения.

DOI: 10.31857/S0002333723030122, **EDN:** KBCVUQ

ВВЕДЕНИЕ

После выхода работы [Alvarez и др., 1980] стала очень популярной идея о том, что падения астероидов на Землю могли заметно влиять на эволюцию биосферы и, в частности, могли быть причиной массовых вымираний. В этой и последующих статьях этих авторов показано, что падение астероида размером порядка 10–20 км могло вызвать массовое вымирание биоты на границе мела и палеогена 66 млн лет назад, в том числе гибель динозавров. Был обнаружен кратер Чиксулуб [Hildebrand и др., 1991], который был образован этим ударом. Поиски других кратеров, образование которых можно было бы связать с какими-либо массовыми вымираниями, до сих пор не увенчались успехом. Тем не менее, ударная гипотеза по-прежнему видится весьма перспективной. Во-первых, более двух третей Земли покрыто океаном, а подводные кратеры не только плохо изучены, но и большей частью просто еще не обнаружены. Во-вторых, даже в тех случаях, когда удары не были единственной и основной причиной массовых вымираний, они могли быть триггером, запускающим или усиливающим другие механизмы [Feulner, 2011]. В связи с этим интересно более подробно рассмотреть падения крупных астероидов в океан, которые изучены значительно хуже, чем удары по суше.

Основные механизмы, которые могут приводить к гибели живых организмов при ударе (см., например, [Claeys, 2007; Kring, 2007; Rampino, 2020]) в большой степени определяются выбросом вещества в атмосферу в процессе кратерообразования и могут зависеть от структуры мишени (химического состава грунта и наличия воды). При ударе в океан наличие слоя воды толщиной в несколько километров может заметно повлиять на выбросы грунта в атмосферу. Кроме того, в атмосферу выбрасывается много воды, которая сама и содержащиеся в ней соли могут заметно повлиять на химию атмосферы и радиационный баланс. Выбросы воды и вещества ударника и мишени при падении десятикилометровых астероидов в океан различной глубины рассматривались в недавней работе [Шувалов, 2021]. В этой работе показано, что при глубинах вплоть до 5–6 км масса выброшенного в атмосферу вещества ударника и грунта не более чем в 2–3 раза отличается от массы выбросов при падении астероида на твердую поверхность. И только при глубинах порядка 7 км и больше (около 1% от поверхности Земли) выбросы твердого вещества заметно уменьшаются по сравнению с выбросами при падении астероидов на сушу. Исходя из этого, был сделан вывод о том, что при падении астероидов размером порядка десяти километров в океан воздействие на атмосферу Земли будет, по-видимому, не менее сильным, чем при падении асте-

роидов на сушу. Однако в рассматриваемой работе моделировались только вертикальные падения астероидов, хотя наиболее вероятный угол наклона траектории падающего космического тела равен 45° . Более того, в ряде работ (см., например, [Shuvalov, Dyrvik, 2004; Artemieva, Morgan, 2009]) показано, что угол наклона траектории сильно влияет на формирование и распространение выбросов из кратера. Поэтому необходимо проверить, будут ли верны результаты и выводы, полученные в работе [Шувалов, 2021], для более вероятных косых ударов.

Цель данной работы — оценить с помощью численных экспериментов, как угол наклона траектории падающего космического тела влияет на выбросы вещества в атмосферу. Еще одна задача — оценить агрегатное состояние выбросов (относительные массы паров и частично испаренных выбросов). В первой части статьи описывается постановка задачи и методы, используемые при ее решении; во второй — результаты расчета падения десятикилометровых астероидов под углом 45° в океан разной глубины; в третьей части приведены основные выводы, обсуждаются использованные приближения и оставшиеся невыясненными вопросы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для оценки выброса воды и грунта в атмосферу при косых ударах было проведено численное моделирование падения сферических каменных астероидов диаметром 10 км под углом 45° в океан глубиной 1–6 км и на твердую поверхность. Астероиды и дно океана считались состоящими из кварца. Скорость ударников принималась равной 20 км/с. Как и в работе [Шувалов, 2021] расчеты проводились с помощью программного комплекса COVA [Shuvalov, 1999], который неоднократно применялся для моделирования ударных явлений, в том числе падений астероидов в море (см., например, [Shuvalov, Dyrvik, 2004]). Однако в данном случае использовался трехмерный вариант программы COVA. В расчетах явно выделялись границы между веществами, описываемыми разными уравнениями состояния (в данном случае вода, воздух и грунт). Размер расчетной сетки $400 \times 200 \times 400$ ячеек: по 400 точек в вертикальном (ось Z) и горизонтальном вдоль траектории (ось X) направлениях и 200 точек в горизонтальном перпендикулярном траектории (ось Y) направлении. Учитывалась симметрия течения относительно вертикальной плоскости $Y = 0$, проходящей через траекторию падающего астероида. Начальный размер ячейки 125 м (80 точек на диаметр ударника), по мере разлета атмосферного плюма, образующегося при ударе, и увеличения возмущенной области ячейки удваивались, на за-

ключительной стадии расчетов расчетная сетка была неравномерной, ячейки увеличивались по мере удаления от эпицентра удара. Максимальный размер расчетной области составлял $20000 \times 6000 \times 4000$ км вдоль осей X , Y , и Z соответственно. При таких больших расстояниях, в принципе, на результаты может влиять сферичность Земли, которая в данной работе не учитывалась. Однако это влияние не должно быть очень сильным, т.к. характерный вертикальный размер задачи (толщина атмосферы) много меньше горизонтальных размеров. Для описания термодинамических свойств воздуха использовалось табличное уравнение состояния [Кузнецов, 1965]. Для описания термодинамики воды и кварца, как и в работе [Шувалов, 2021], использовались табличные уравнения состояния, полученные по программе ANEOS [Thomson, Lauson, 1972]. Распределение плотности и давления воздуха по высоте в равновесной атмосфере Земли задавалось согласно модели CIRA [COSPAR International Reference Atmosphere, <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/atmospheric/cira/cira86/>]. Газодинамическое приближение работает до высот порядка 400 км, выше пробег частиц становится больше характеристической высоты атмосферы. Учитывая это, в качестве граничных условий на верхней границе расчетной сетки, как и в работе [Шувалов, 2021], использовалась процедура, описанная в работе [Шувалов, Хазинс, 2018]. Уравнения газовой динамики решались и на высотах более 400 км, при этом периодически (в данном случае один раз за 50 расчетных слоев) область, где плотность газа меньше, чем равновесная плотность на высоте 400 км, заполнялась фоновыми значениями плотности и давления и нулевыми скоростями. Такие граничные условия не влияют на течение на высотах до 200–300 км, обеспечивают максимально большой временной шаг и позволяют аккуратно описывать атмосферный плюм, который поднимается на высоты в тысячи километров.

При расчете кратерообразования, как и в работе [Шувалов, 2021], учитывалась прочность грунта по модели Кулона–Мора и акустическая флюидизация [Wunnemann, Ivanov, 2003].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 1 показана самая начальная стадия (первые 10 секунд после начального контакта ударника с поверхностью воды) падения десятикилометрового астероида в океан глубиной 4 км под углом 45° и вертикально. Основное различие между косым и вертикальным ударом состоит в том, что при косом ударе разлетающееся в атмосферу облако выбросов из кратера (плюм) начинает формироваться раньше, имеет больший объем и поднимается на большую высоту. Объясняется это тем, что при вертикальном ударе

наиболее горячая (испытывавшая наиболее сильное ударное сжатие) масса мишени и ударника продолжает двигаться вниз и вдавливаются в более глубокие слои мишени, не имея возможности разлетаться вверх. В случае косоугольного удара значительная часть горячего вещества выдавливается вбок и быстро начинает расширяться в атмосферу. Кроме того, при наклонной траектории ударник непосредственно воздействует на большую площадь поверхности мишени (больше энергии выделяется вблизи поверхности).

При вертикальном ударе в момент времени 10 с практически все вещество ударника и твердой мишени еще находится ниже уровня моря, плюм, поднимающийся на высоту около 70 км, состоит исключительно из воды и горячего воздуха (который на рисунках не показан). В то же время при косом ударе значительная часть массы ударника, “отражаясь” от поверхности океана выбрасывается на высоты до 100 км. При этом плюм разлетается преимущественно в направлении движения упавшего астероида (справа налево).

На рис. 2 показана поздняя стадия тех же ударов. Через минуту после удара в обоих случаях атмосферный плюм поднимается на высоты порядка 500 км и продолжает расширяться вверх и вбок. При этом облако из вещества ударника и грунта, образовавшееся после вертикального удара, находится внутри водяного облака. При косом ударе вода, грунт и вещество ударника в плюме более равномерно перемешаны.

Постепенно большая часть плотного конденсированного вещества из плюма осаждается на поверхность океана под действием силы тяжести, а разреженные, частично конденсированные пары, тормозясь в плотных слоях атмосферы и через 20 мин формируют облако паров и мелких конденсированных частиц воды, грунта и ударника размером в несколько тысяч километров. Горизонтальные размеры этого облака при косом ударе примерно вдвое больше, чем при вертикальном. Торможение плюма в плотных слоях атмосферы приводит к его разогреву и повышению давления, в результате чего плюм опять начинает расширяться вверх, потом опять тормозится силой тяжести и т.д. Результаты, приведенные на рис. 1–рис. 2, показывают, что характер течения и параметры образующегося облака выбросов при косом ударе существенно отличаются от наблюдаемых в случае вертикального удара.

На рис. 3 показаны зависимости от времени масс воды, вещества ударника и суммарной массы вещества ударника и грунта в атмосфере на высотах более 16 км при падении десятикилометрового астероида в океан глубиной 4 км под углом 45 градусов. Значение 16 км выбрано как характерное значение высоты современной тропопаузы, т.е. рассматривалась масса вещества, выбро-

шенного в современную стратосферу и выше. Есть два способа определения в расчетах массы вещества, выброшенной в атмосферу. Первый состоит в том, чтобы подсчитывать эту массу по распределениям плотности (показанным на рис. 1–рис. 2). Второй основан на использовании маркерных частиц, которые первоначально равномерно распределены в мишени и ударнике и в дальнейшем перемещаются со скоростью течения. Каждому маркеру приписывается соответствующая масса, и по распределению маркеров можно посчитать массу выбросов на разных высотах. Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. Первый способ не позволяет проследить изменение во времени параметров выброшенных частиц (давления, температуры и т.д.), определить, из какой области мишени выброшена та или иная частица. В частности, в данном конкретном случае твердая мишень и ударник состоят из одного вещества (т.к. программа СОВА не позволяет рассматривать более трех разных материалов), поэтому первый способ позволяет определить только суммарную массу выброшенных в атмосферу грунта и вещества ударника. Второй способ лишен этих недостатков, однако передвижение маркеров может не вполне совпадать с движением сплошной среды, на которое (в отличие от маркеров) действует схемная вязкость. На рис. 3 показаны результаты, полученные обоими способами. В начальные моменты времени результаты хорошо совпадают, на поздней стадии первый способ дает массы, на 20–30% меньшие, чем второй. Отчасти это различие связано с тем, что в поздние моменты в некоторых ячейках концентрация выбросов становится очень маленькой или одна ячейка, содержащая выбросы, отрывается от других, в этих случаях вещество выбросов заменяется (с сохранением массы и энергии) окружающей средой. Какой из этих способов лучше, сказать трудно, в любом случае различие не очень велико. В данной работе используется второй способ (маркеры), который позволяет получить больше информации о выбросах в атмосфере.

Примерно через минуту после удара масса выбросов на высотах более 16 км достигает максимума, после этого начинает уменьшаться за счет падения плюма в поле тяжести и к моменту 10 мин выходит на более или менее стационарное значение. Поэтому большая часть расчетов заканчивалась в этот момент.

На рис. 4 для всех посчитанных вариантов падения десятикилометровых астероидов под углом 45° приведены максимальные массы воды, грунта и вещества ударника на высотах более 16 км и соответствующие значения через 10 минут после удара. При всех рассмотренных глубинах выбросы вещества ударника и грунта при косом ударе больше (в 2–5 раз), чем при вертикальном. Осо-

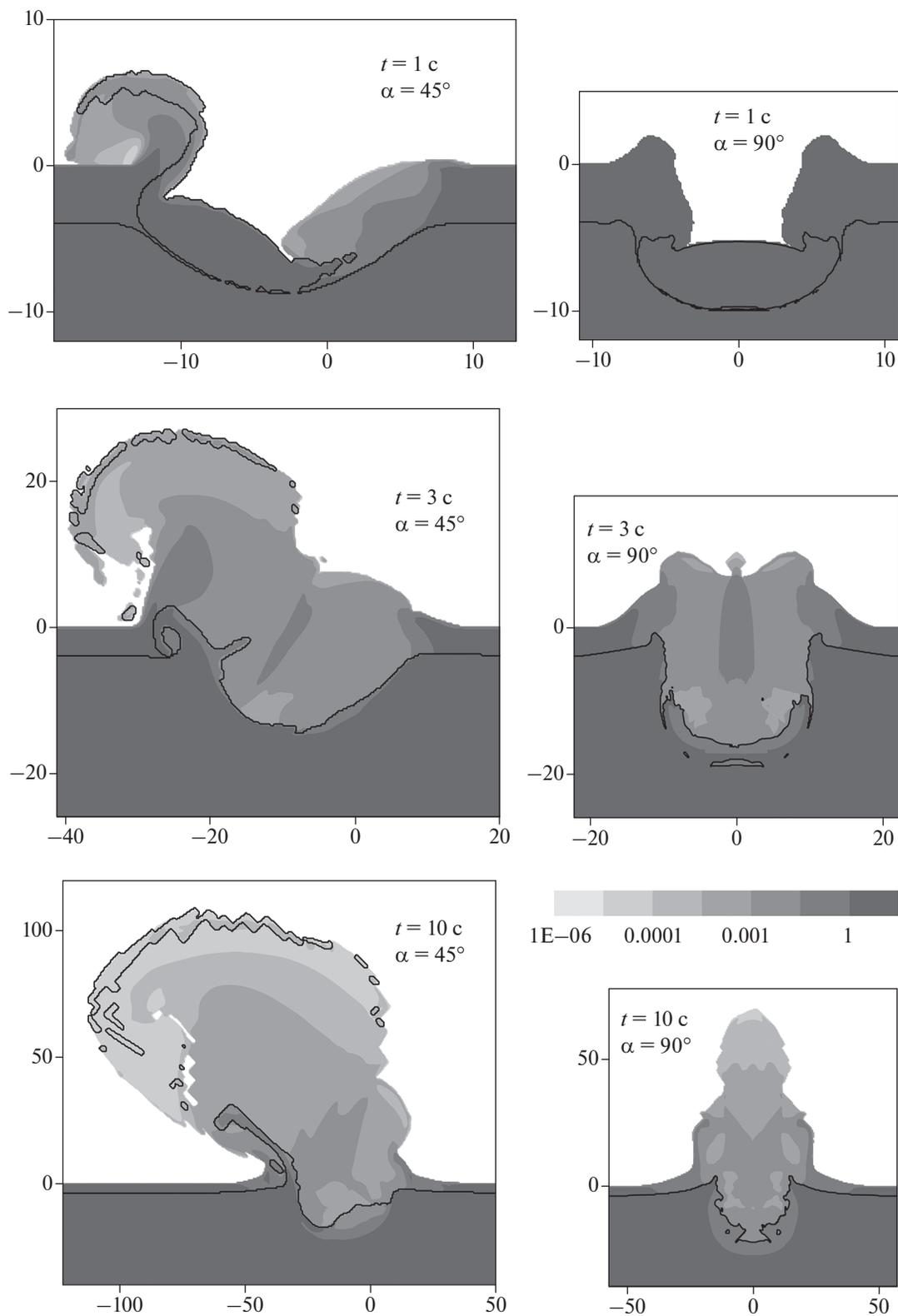


Рис. 1. Распределения плотности воды и вещества ударника и грунта в г/см^3 через 1, 3 и 10 с после падения десятикилометрового астероида со скоростью 20 км/с под углом 45° (слева) и вертикально (справа) в океан глубиной 4 км. Черная линия показывает границу между водой и веществом ударника и мишени. Все расстояния измерены в километрах.

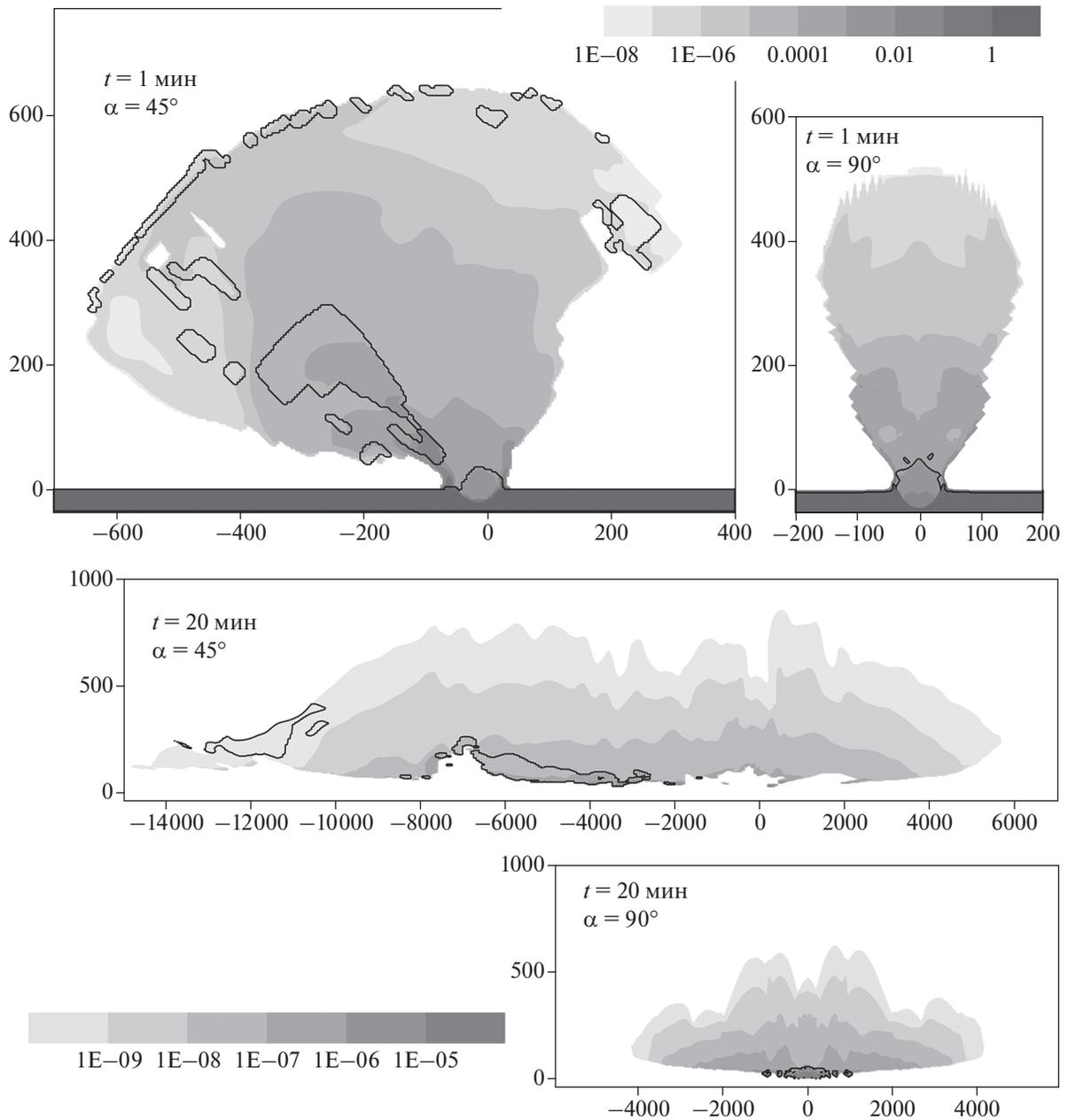


Рис. 2. Распределения плотности воды и вещества ударника и грунта в г/см^3 через 1 и 20 мин после падения десятикилометрового астероида со скоростью 20 км/с под углом $\alpha = 45^\circ$ и вертикально в океан глубиной 4 км. Черная линия показывает границу между водой и веществом ударника и мишени. Все расстояния измерены в километрах.

бенно велика эта разница при малых глубинах и падении астероида на сушу. Как и при вертикальных ударах, максимальная масса выброшенного в атмосферу грунта уменьшается с увеличением глубины, а масса выброшенной воды увеличивается. Однако при вертикальных ударах зависимость от глубины массы грунта и ударника, остающейся в атмосфере после падения плюма в поле тяжести, была немонотонной с максимумом при глубине океана 2 км, в то время как при косых ударах масса грунта на

высотах более 16 км через 10 мин после удара монотонно уменьшается при увеличении глубины. Масса вещества ударника, выброшенная в атмосферу выше 16 км (и максимальная, и через 10 мин после удара), сравнительно слабо зависит от глубины океана. Поэтому при малых глубинах масса выброшенного в атмосферу грунта значительно (в 3–5 раз) превышает массу вещества ударника на высотах более 16 км, а при глубине океана 6 км оказывается даже меньше ее.

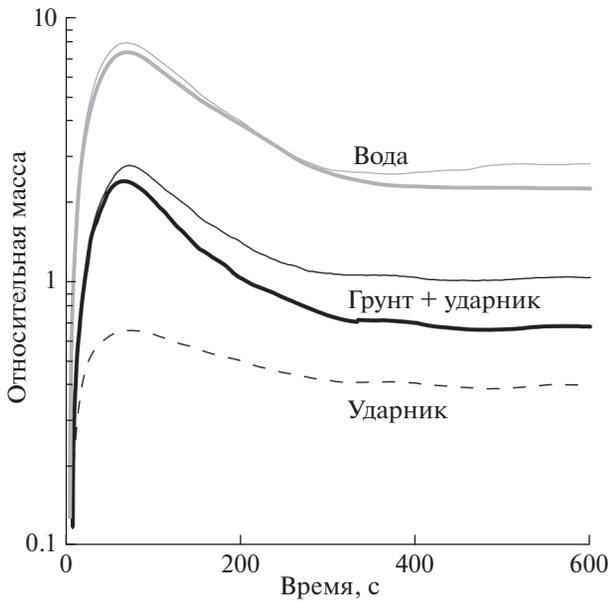


Рис. 3. Зависимости от времени массы воды (серые кривые), ударника (пунктир) и суммарной массы грунта и ударника (черные кривые) в атмосфере на высотах более 16 км. Массы измеряются в массах падающего астероида. Толстые кривые соответствуют прямому интегрированию распределений плотности, тонкие получены с помощью маркеров.

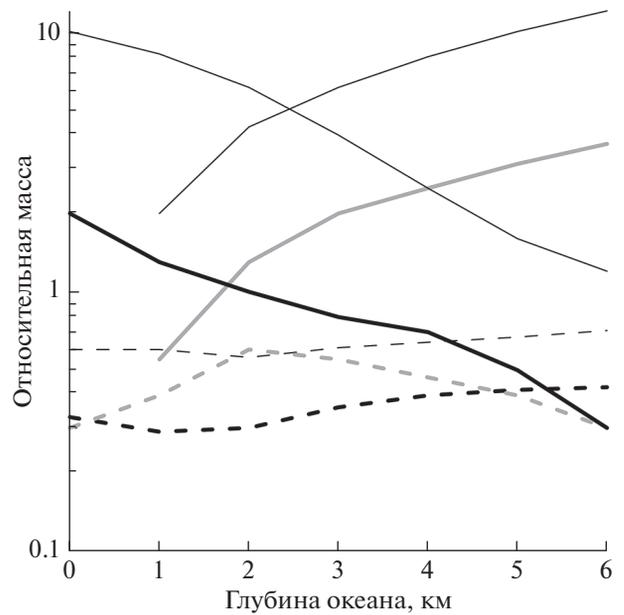


Рис. 4. Зависимости от глубины океана массы воды (серые кривые), ударника (пунктир) и грунта (черные кривые) на высотах более 16 км после падения десятикилометровых астероидов со скоростью 20 км/с под углом 45°. Массы измеряются в массах падающего астероида. Толстые кривые соответствуют моменту времени 10 мин, тонкие — максимальному значению (примерно через одну минуту после удара). Серая пунктирная кривая соответствует суммарной массе ударника и грунта на высотах более 16 км через 10 мин после вертикального удара.

За фронтом ударных волн, образующихся в процессе удара, значительная часть вещества ударника и мишени нагревается до температур, близких к критической, соответствующей критической точке фазового равновесия “жидкость—пар”. При разгрузке до атмосферного давления это вещество может частично или полностью превратиться в пар. Для оценки долговременных последствий ударов космических тел необходимо оценить количество пара в выбросах, так как агрегатное состояние выброшенного в атмосферу вещества сильно влияет на химические процессы, протекающие при взаимодействии выбросов с атмосферой.

На рис. 5 показаны зависимости от глубины океана массы выбросов, испытавших при ударе частичное или полное испарение, и массы паров отдельно для грунта, воды и вещества ударника. При падении астероидов на сушу большая часть выбросов грунта состоит из конденсированного вещества, с увеличением глубины доля конденсированных выбросов уменьшается. При глубине океана 6 км практически весь грунт, выброшенный на высоты более 16 км, испытал частичное испарение. Масса паров при всех глубинах составляет 7–10% от массы грунта, выброшенного на высоты более 16 км.

Почти все вещество ударника, оставшееся в атмосфере на высоте более 16 км, через 10 мин по-

сле удара испытало частичное или полное испарение. Масса паров ударника при всех глубинах океана близка к 10% от его полной массы. Примерно 70–80% массы воды в атмосфере на высотах более 16 км через 10 мин после удара испытали частичное или полное испарение, около 50% — чистые пары. Для расчета массы паров для каждой маркерной частицы запоминалось максимальное давление, испытываемое при прохождении ударной волны, и заранее рассчитанные по адиабатам разгрузки до нормального атмосферного давления зависимости массы паров от давления за фронтом ударной волны. Следует отметить, что в процессе эволюции плюма давление и температура в частицах выбросов изменяются, соответственно меняется и концентрация паров. Данные, приведенные на рис. 5 соответствуют расширению до нормального атмосферного давления.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты падения в океан десятикилометровых астероидов со скоростью 20 км/с в океан разной глубины под наиболее вероятным углом наклона траектории 45° показывают, что, как

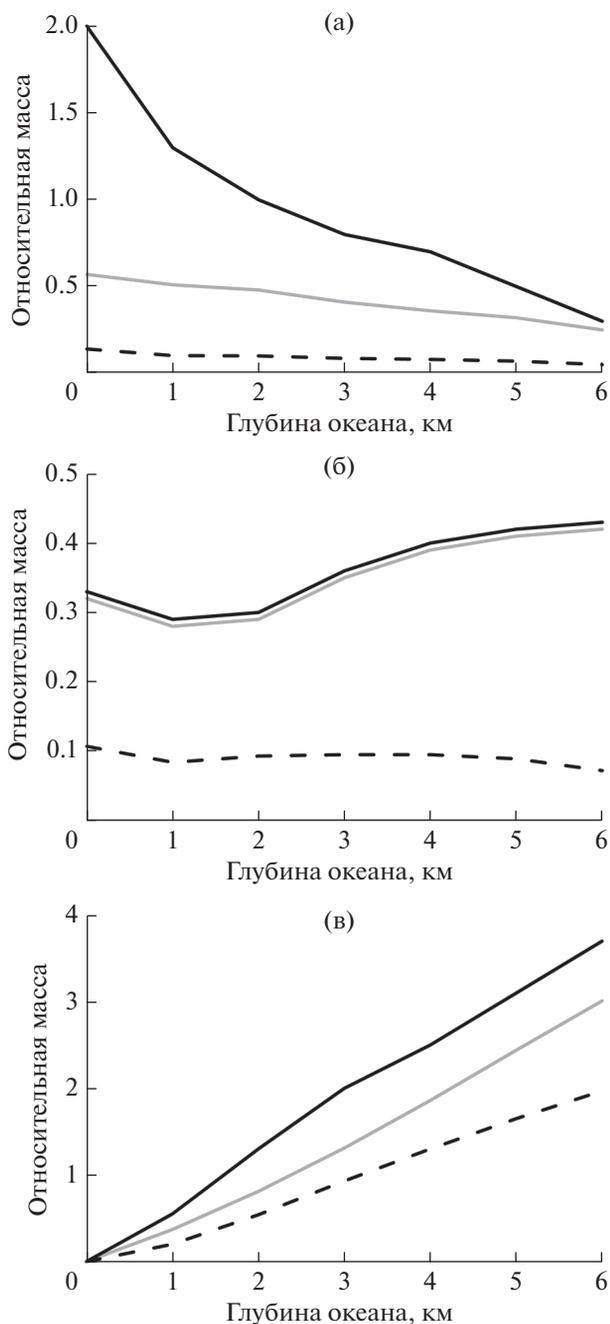


Рис. 5. Зависимости от глубины океана массы грунта (а), ударника (б) и воды (в), на высотах более 16 км через 10 мин после падения десятикилометровых астероидов со скоростью 20 км/с под углом 45°. Массы измеряются в массах падающего астероида. Черные кривые соответствуют полной массе, серые – массе вещества, которое испытало частичное испарение, пунктирные – массе паров.

и при вертикальных ударах, в атмосферу выбрасывается большая масса вещества ударника и грунта. При глубинах океана вплоть до 4–5 км масса выброшенного в атмосферу грунта (и максимальная, и остающаяся на высотах более 16 км

через 10 мин после удара) не более, чем в 2–3 раза отличается от массы выбросов при падении астероида на твердую поверхность. Масса выбрасываемого в атмосферу при ударе вещества ударника вообще слабо зависит от глубины океана. Кроме того, при ударах в воду в атмосферу выбрасывается большое количество воды и содержащихся в ней солей. Вода сильно поглощает инфракрасное излучение, а содержащийся в солях хлор и радикалы ОН, образующиеся при ионизации воды, разрушают озон [Pierazzo et al., 2012]. Таким образом, подтверждается вывод, сделанный в работе [Шувалов, 2021], о том, что при падении астероидов размером порядка десяти километров в океан воздействие на атмосферу Земли будет, по-видимому, не менее сильным, чем при падении астероидов на сушу.

При малых глубинах (примерно до 2 км) основная масса выбросов грунта состоит из конденсированного вещества, при больших глубинах большая часть выбросов грунта, остающихся через 10 мин после удара в атмосфере, испытала частичное или полное испарение. Почти все вещество ударника, выбрасываемое в атмосферу, испытывает частичное или полное испарение в процессе удара при всех глубинах океана, так же, как и большая часть выбрасываемой воды.

В описанных расчетах твердая мишень и ударник считались состоящими из кварца, рассматривалась только одна скорость удара 20 км/с. При других скоростях удара и веществах ударника и мишени массы выбросов и, особенно, их агрегатное состояние могут измениться. Поэтому для оценки долговременных последствий ударов крупных космических тел необходимо продолжить аналогичные расчеты в широком диапазоне параметров удара. Кроме того, необходимо разработать более реалистичную модель выбросов, учитывающую то, что они состоят из газообразных паров (и/или двухфазной смеси) и конденсированных частиц разного размера, которые в общем случае не двигаются с одинаковой скоростью. Однако вывод о том, что падения крупных (порядка 10 км) астероидов в океан не менее опасны, чем удары по твердой поверхности, по-видимому, не изменится.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН (рег. № 122032900176-3).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен рецензентам Б.А. Иванову и М.В. Герасимову за внимательное прочтение статьи, ценные замечания и советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение. 1965. 463 с.
- Шувалов В.В., Хазинс В.М. Численное моделирование возмущений в ионосфере, генерируемых при падении Челябинского и Тунгусского космических тел // *Астрономический Вестник*. 2018. Т. 52. № 2. С. 142–151.
- Шувалов В.В. Выброс вещества в атмосферу при падении десятикилометровых астероидов в океан // *Астрономический Вестник*. 2021. Т. 55. № 2. С. 114–123.
- Artemieva N., Morgan J. Modeling the formation of the k-pg boundary layer // *Icarus*. 2009. V. 201. № 2. P. 768–780.
- Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction // *Science*. 1980. V. 208. P. 1095–1108.
- Claeys P. Impact events and the evolution of the Earth. // *Advances in Astrobiology and Biogeophysics, Lectures in Astrobiology* / M. Gargaud, H. Martin, P. Claeys (eds.). Berlin: Springer Verlag. 2007. P. 239–280.
- Feulner G. Limits to biodiversity cycles from a unified model of mass-extinction events // *International Journal of Astrobiology*. 2011. V. 10. P. 123–129.
- Hildebran A.R., Penfield G.T., Kring D.A., Pilkington M., Camargo-Zanoguera A., Jacobsen S.B., Boynton W.V. Chicxulub crater. A possible Cretaceous-Tertiary Boundary impact crater on the Yucatan peninsula, Mexico // *Geology*. 1991. V. 19. P. 867–871.
- Kring D.A. The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous–Tertiary boundary // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2007. V. P. 255: 4–21.
- Pierazzo E., Garsia R.R., Kinnison D.E., Marsh D.R., Lee-Taylor J., Crutzen P.J. Ozone perturbation from medium-size asteroid impacts in the ocean // *Earth and Planetary Science Letters*. 2012. V. 229. P. 263–272.
- Rampino M.R. Relationship between impact-crater size and severity of related extinction episodes // *Earth-Science Rev.* 2020. V. 201. P. 102990.
- Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. V. 9. № 6. P. 381–390.
- Shuvalov V., Dypvik H. Ejecta formation and crater development of the Mjolnir impact // *Meteoritics & Planetary Science*. 2004. V. 39. № 3. P. 467–479.
- 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.
- Wunnemann K., Ivanov B.A. Numerical modeling of the impact crater depth-diameter dependence in an acoustically fluidized target // *Planetary Space Science*. 2003. V. 51. P. 831–845.

Numerical Simulation of Material Ejection into the Atmosphere Induced by Oblique Impacts of Ten-Kilometer-Diameter Asteroids into the Ocean

V. V. Shuvalov*

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

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

The results of a three-dimensional numerical simulation of the oblique impacts of ten-kilometer asteroids at an angle of 45° onto a solid surface and into an ocean with a depth of 1 to 6 km are presented. The maximum masses of water, impactor, and soil ejected into the atmosphere and the masses of water, impactor material, and soil remaining in the atmosphere 10 minutes after the impact are calculated. The mass of vaporized ejecta is determined. It is shown that there are 2–5 times more impactor material and soil ejected into the atmosphere during oblique impacts than during vertical impacts.

Keywords: asteroid hazards, numerical simulation, crater ejecta, thermal radiation, atmospheric disturbances