

УДК-622.011.4:622.023

ВЫБРОС ВОДЫ В АТМОСФЕРУ ПРИ ПАДЕНИИ АСТЕРОИДОВ В ОКЕАН

В.В. Шувалов

ИДГ РАН

С помощью численного моделирования оценивается объем воды, выбрасываемой в атмосферу на разные высоты при падении астероидов в океан. Исследуется зависимость этого объема от размера астероида, его скорости и глубины океана.

DOI

Введение

Более двух третей земной поверхности покрыты морями и океанами, поэтому большая часть космических тел, сталкивающихся с Землей, падает в воду. Однако падения комет и астероидов в воду изучены значительно хуже, чем удары по твердой поверхности. Это связано с тем, что исследования ударных процессов связаны, главным образом, с изучением и моделированием конкретных ударных кратеров, а доля подводных кратеров составляет всего лишь около 10% от всех обнаруженных [Ormö, Lindström, 2000]. В последнее время интерес к падению космических тел в море вырос из-за более детального изучения морского дна, стимулированного поисками подводных месторождений углеводородов, и обнаружения новых подводных ударных структур. При этом основное внимание уделялось изучению влияния глубины водоема на параметры образующегося кратера [Artemieva, Shuvalov, 2002; Lindström et al., 2005] и генерации волн цунами [Ward, Asphaug, 2002; Wünnemann, 2007; Shuvalov, Gersonde, 2014], которые рассматриваются как один из важных факторов астероидной опасности. Атмосферные эффекты ударов в море практически не рассматривались. Целью данной работы является попытка оценить количество воды, выбрасываемой в атмосферу (в том числе, в ионосферу) при падении астероидов в море разной глубины.

Постановка задачи и методика расчета

Для оценки выброса воды в атмосферу были проведены численные расчеты вертикальных ударов астероидов диаметром 1 км по мишени, состоящей из кварца (моделирующего земную кору), покрытого слоем воды глубиной от 500 м до

5 км. Астероиды считались состоящими из кварца. Скорость ударников изменялась в диапазоне от 15 до 50 км/с.

Расчеты проводились по программе COBA [Shuvalov, 1999], которая позволяет явно выделять границы между веществами, описываемыми разными уравнениями состояния (в данном случае вода, воздух и кварц). Размер расчетной сетки 1000×1000 ячеек. Начальный размер ячейки 31.25 м (32 точки на диаметр ударника), по мере увеличения возмущенной области ячейки удваивались, максимальный размер расчетной области составлял 4000×4000 км.

Газодинамическое приближение работает до высот порядка 400 км, выше пробег частиц становится больше характерного размера задачи, в данном случае это характеристическая высота атмосферы. Учитывая это, в качестве граничных условий на верхней границе расчетной сетки 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 100 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 200–300 км и обеспечивают максимально большой временной шаг.

Для описания термодинамики воды и кварца использовались табличные уравнения состояния, полученные по программе ANEOS [Thomson, Lauson, 1972]. Для воздуха использовалось уравнение состояния [Кузнецов, 1965].

Результаты расчетов

Рис. 1 демонстрирует типичную картину течения, возникающего при падении в океан километрового астероида. При глубине 3 км астероид заметно разрушается и тормозится в слое воды, тем не менее на дне образуется кратер, хотя и существенно меньший, чем тот, который образовался бы при падении такого же астероида на суше. Основная часть выбросов из кратера в грунте застревает в слое воды и не попадает в атмосферу. Выбросы же из водяного кратера поднимаются на высоты в несколько сотен километров. Начальная скорость выбрасываемой воды достигает нескольких километров в секунду, формируется мощный плюм (направленная вверх струя), который вначале движется преимущественно внутри метеорного следа, а затем расширяется вбок и генерирует сильную ударную волну в атмосфере. На высотах 500–600 км плюм тормозится из-за действия силы тяжести и сопротивления воздуха, на этой стадии практически нет перемешивания воды с воздухом. После торможения вещество плюма (вода и окружающий ее плотный воздух) опускается в поле тяжести, тормозится на высоте порядка 100 км (где происходит резкое изменение температуры воздуха и высоты характеристической атмосферы) и растекается вбок на расстояние в несколько тысяч километров.

Около половины всей массы воды, выброшенной в атмосферу при ударе, сосредоточено на высотах от 15 до 60 км, однако объем этой воды очень невелик из-за большой плотности, основная масса сконцентрирована вблизи точки удара. Около 40% выброшенной воды содержится на высотах 60–90 км. Только 10% выброшенной массы воды распределено на высотах более 90 км, но из-за низкой плотности водосодержащее облако через 30 мин после удара имеет диаметр около 6000 км и толщину порядка 100 км.

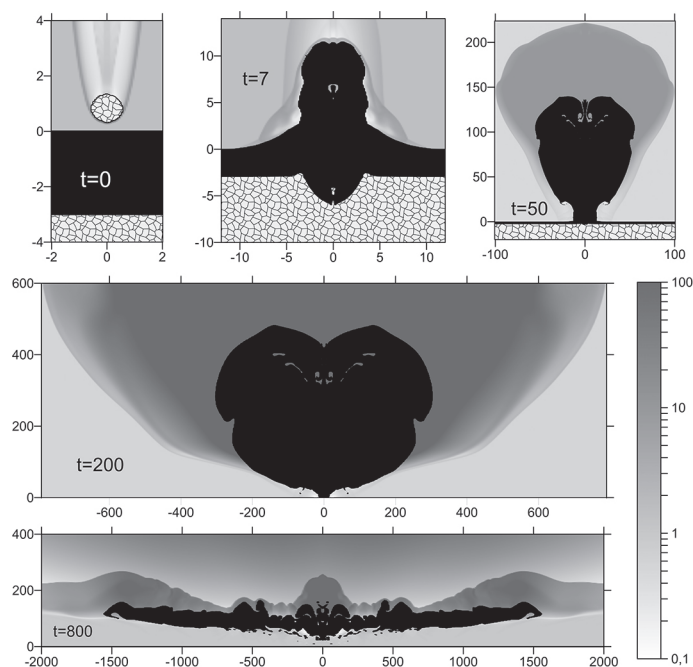
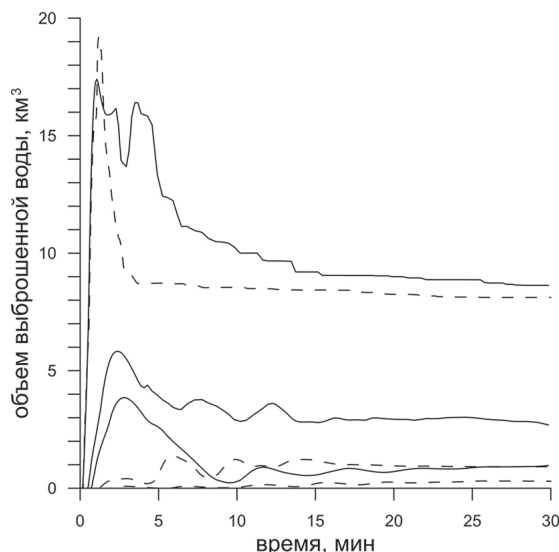


Рис. 1. Газодинамическое течение в разные моменты времени t (сек) после падения километрового астероида в океан глубиной 3 км со скоростью 20 км/с. Черным цветом закрашены области, занятые водой или водяным паром, заштрихованы области, занятые кварцем (грунт и астероид), серым цветом показано распределение относительной плотности воздуха (по отношению к плотности невозмущенного воздуха на соответствующей высоте)

На рис. 2 показана динамика содержания выброшенной ударом воды на разных высотах в течении первых 30 мин. На всех высотах максимальное количество воды наблюдается примерно через 2 мин после удара. Это время соответствует началу падения плюма и конденсированной воды, выбрасываемой с небольшой скоростью в процессе роста водяного кратера. На высотах 15–20 км наблюдается второй пик, связанный со схлопыванием водяного кратера. При падении плюма возникают колебания атмосферы, которые проявляются и в колебаниях содержания воды на заданных высотах.

Рис. 2 демонстрирует также влияние размера ударника на объем выброшенной воды. В первом приближении можно считать, что кратерообразующее течение самоподобно, то есть размеры кратера и распределение массы выбросов по скоростям одинаковы для ударников разного размера, если измерять расстояния и массы в размерах и массах ударника. Если распределения по скоростям и масса выбросов самоподобны (то есть все размеры пропорциональны размеру ударника), то можно было бы ожидать, что содержание воды на разных высотах будет пропорционально массе ударника. Однако эта пропорциональность может нарушиться из-за сопротивления воздуха. Оно тем важнее, чем меньше размер астероида. Для оценки этого влияния был проведен расчет удара астероида диаметром 333 м с той же скоростью 20 км/с в океан глубиной 1 км (все размеры уменьшены в три раза). На рис. 2 результаты этого расчета показаны пунктиром, причем объем выбросов увеличен в 27 раз. Содержание воды на низких (15–60 км) высотах примерно

Рис. 2. Зависимость от времени объема выброшенной воды на высотах более 15 км (верхние кривые), более 60 и более 90 км (нижние кривые). Сплошные кривые соответствуют падению километрового астероида в океан глубиной 3 км. Пунктирные кривые соответствуют падению астероида диаметром 333 м в океан глубиной 1 км, при этом значения объема выброшенной воды увеличены в 27 раз



пропорционально массе ударника. При этом отсутствует второй пик, связанный со схлопыванием водяного кратера, поскольку интенсивность этого схлопывания и высота водяного султана зависят от глубины кратера. В верхнюю атмосферу, на высоты более 60 и более 90 км, при падении астероида диаметром 333 м выбрасывается заметно меньше (примерно в три раза) воды. Это объясняется тем, на большие высоты попадает только небольшая масса воды, выбрасываемая с большими скоростями и менее плотная (состоящая в основном из паров), которая более подвержена сопротивлению воздуха. При этом подъем воды на большие высоты при падении маленького ударника напоминает скорее всплытие облака, чем баллистический плюм.

На рис. 3 показана зависимость объема воды, выброшенной на разные высоты, от глубины водоема. При глубине, меньшей размера астероида, слой воды слабо влияет на формирование кратера в грунте, и в атмосферу выбрасывается вся вода, находящаяся выше экскавационного кратера в грунте. При глубине порядка размера ударника образуются отдельные водяной кратер и меньшего размера кратер в грунте. Если размер ударника много меньше глубины, то образуется только водяной кратер. При этом очевидно, что масса выброшенной воды должна увеличиваться до тех пор, пока глубина водоема не сравняется с глубиной экскавационного водяного кратера. Эти рассуждения касаются просто выброшенной воды (то есть выброшенной на любую высоту). Если же говорить о количестве воды, выброшенной на определенную высоту, то все сложнее. Это количество зависит от сложного взаимодействия между выбросами из водяного и грунтового кратеров, и их взаимодействием с воздухом. Тем не менее из рис. 3 видно, что на всех высотах объем выброшенной воды увеличивается с глубиной до глубин порядка 4 км, что примерно соответствует глубине экскавационного водяного кратера, образующегося при падении километрового астероида в бесконечно глубокий водоем.

Объем выброшенной воды сильно увеличивается при увеличении скорости астероида (см. рис. 4). Происходит это по двум причинам. Во-первых, увеличивается энергия удара, что приводит к увеличению размера водяного кратера и, соответственно, объема выбросов. Во-вторых, выброс происходит с большей скоростью,

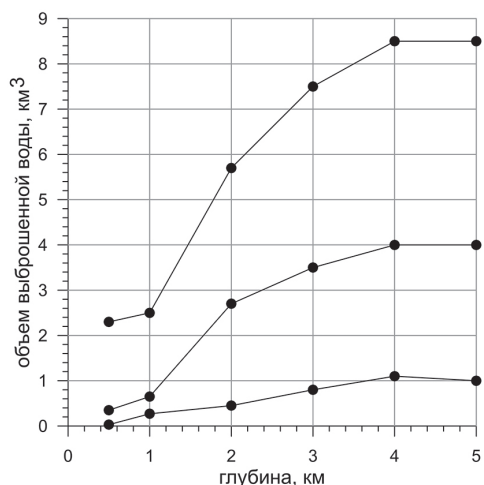


Рис. 3. Зависимость от глубины океана объема воды, выброшенной при падении километрового астероида на высоты более 15 км (верхняя кривая), более 60 и более 90 км (нижняя кривая)

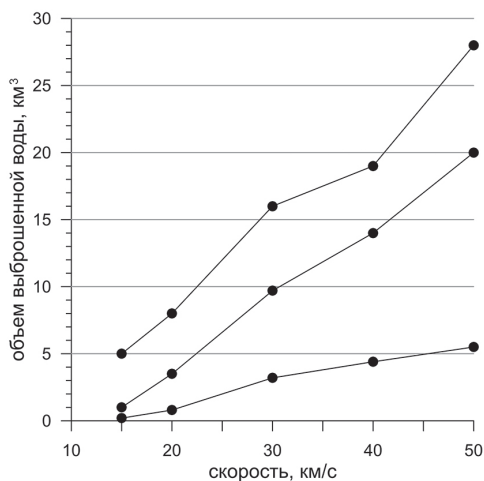


Рис. 4. Зависимость от скорости астероида объема воды, выброшенной на высоты более 15 км (верхняя кривая), более 60 и более 90 км (нижняя кривая)

и выброшенная масса поднимается на большие высоты. Более того, как видно из рис. 2, значительная часть выброшенной воды быстро (в течение нескольких минут) падает обратно в море. Для того, чтобы вода задерживалась в атмосфере надолго (в рассматриваемом случае в течение 30 мин), необходимо, чтобы она расширилась до плотности, близкой к плотности окружающего воздуха. Расширение сильно зависит от начальной температуры выбросов, которая быстро растет с увеличением скорости. При скорости 15 км/с вода конденсируется, не успев заметно расшириться, поэтому на больших высотах через 30 мин ее очень мало.

В расчетах оценивалось также фазовое состояние выброшенной воды через 30 мин после удара. При скорости астероида 50 км/с и глубине океана 3 км на высотах более 90 км 80% воды находится в газообразном состоянии, на высотах D-области ионосферы доля паров только 10%, ниже 60 км практически вся вода находится в конденсированном состоянии. При скорости астероида 30 км/с и глубине океана 3 км на высотах более 90 км около 20% воды находится в газообразном состоянии, на высотах D-области ионосферы доля паров только 1–2%, ниже 60 км практически вся вода находится в конденсированном состоянии. При скорости астероида 15 км/с и глубине океана 3 км на высотах более 90 км около 5% воды находится в газообразном состоянии, на высотах D-области ионосферы доля паров только 0.5–1%, ниже 60 км практически вся вода находится в конденсированном состоянии.

Выводы

При падении километровых астероидов в море/океан в атмосферу выбрасывается огромный объем воды. Значительная часть этой воды быстро падает обратно в течение нескольких минут, и через 30 мин в атмосфере остается от 1 до 30 кубических километров воды. Дальнейшая эволюция водяного облака, которое через

30 мин после удара имеет диаметр несколько тысяч километров и толщину около 100 км, определяется циркуляционными процессами в верхней атмосфере. Объем выброшенной воды зависит от глубины океана и скорости ударника. Эти же факторы определяют распределение выброшенной воды по высоте и ее фазовое состояние (вода-пар). При уменьшении диаметра астероида в три раза объем воды, выброшенной на высоты >15 км уменьшается примерно пропорционально массе ударника, объем воды, выброшенной на большие высоты (> 60–90 км) уменьшается значительно сильнее.

Исследования выполнены в рамках гос. задания ИДГ РАН (рег. № 0146-2017-0003).

Литература

Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М. : Машиностроение. 1965. – 463 с.

Шувалов В., Хазинс В. Численное моделирование возмущений в ионосфере, генерируемых при падении Челябинского и Тунгусского космических тел // *Астрономический Вестник*. 2018. Т. 52. № 2. С. 142–151.

Artemieva N., Shuvalov V. Shock metamorphism on the ocean floor (numerical simulations) // *Deep-Sea Res.* 2002. V. 49. P. 959–968.

Lindström M., Shuvalov V., Ivanov B. Lockne crater as a result of marine-target oblique impact // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. P. 803–815.

Ormö J., Lindström M. When a cosmic impact strikes the sea bed // *Geol. Mag.* 2000. V. 137(1). P. 67–80. Cambridge University Press.

Shuvalov V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. V. 9. No. 6. P. 381–390.

Shuvalov V., Gersonde R. Constraints on interpretation of the Eltanin impact from numerical simulations // *Meteorit. Planet. Sci.*, 2014. V. 49. No. 7. P. 1171–1185.

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.

Ward S., Asphaug E. Impact tsunami – Eltanin // *Deep-Sea Res.* 2002. V. 49. P. 1073–1079.

Wünnemann K., Weiss R., Hofmann K. Characteristics of oceanic impact-induced large water waves–re-evaluation of the tsunami hazard // *Meteorit. Planet. Sci.* 2007. V. 42. No. 11. P. 1893–1903.