

УДК 523.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБРОСА ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРУ ПРИ ПАДЕНИИ ДЕСЯТИКИЛОМЕТРОВЫХ КОМЕТ В ОКЕАН

© 2023 г. В. В. Шувалов*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: valeryvshuvalov@gmail.com*

Приведены результаты трехмерного численного моделирования падения десятикилометровых ядер комет со скоростями от 20 до 50 км/с под углом 45 градусов на твердую поверхность и в океан глубиной до 6 км. В расчетах получены максимальные массы, выброшенных в атмосферу океанской воды, вещества кометы и грунта, а также массы океанской воды, вещества кометы и грунта, оставшиеся в атмосфере через 10 минут после удара. Определена масса паров в выбросах.

Ключевые слова: астероидная опасность, численное моделирование, кратеры, атмосфера, комета, выбросы из кратеров.

Для цитирования: Шувалов В.В. Численное моделирование выброса вещества в атмосферу при падении десятикилометровых комет в океан // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 3. С. 95–102. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_95

Введение

Глобальные последствия падения на Землю крупных космических тел связаны с выбросом в атмосферу большой массы различных газов и аэрозольных частиц, образующихся при ударе (см., например, [Claeys, 2007; Kring, 2007; Rampino, 2020]). Вызываемые выбросами изменения химического состава и прозрачности атмосферы могут заметно влиять на климат и биосферу Земли и даже быть причиной массовых вымираний [Alvarez et al., 1980]. Выбросы в атмосферу зависят от структуры и химического состава грунта и наличия воды. В частности, при падении космических тел в океан глубиной в несколько километров количество грунта, выбрасываемого в атмосферу (и размер кратера, если он образуется), уменьшается [Шувалов, 2021]. Но при этом в атмосферу выбрасывается значительная масса воды. Вода является парниковым газом: содержащийся в ней хлор и радикалы ОН, образующиеся при ионизации молекул воды, могут разрушать озоновый слой [Pierazzo, 2012]. Поэтому выброс воды в атмосферу также может заметно влиять на климат и биосферу Земли.

В работах [Шувалов, 2021; 2023] рассматривались выбросы воды, вещества ударника и грунта в атмосферу при вертикальных и косых ударах десятикилометровых астероидов в океан разной глубины. Было показано, что при глубине океана менее 5 км масса выбрасываемого в атмосферу грунта уменьшается не более, чем в 2–3 раза по сравнению с ударом по твердой поверхности. Масса выбрасываемого в атмосферу вещества ударника почти не зависит от глубины океана. Масса выброшенной воды заметно увеличивается при увеличении глубины и при глубинах более 1 км в 2–10 раз превышает массу ударника. Исходя из этого в [Шувалов, 2021; 2023] делается вывод, 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.

Однако выбросы в атмосферу зависят не только от структуры мишени, но и от свойств ударника, в первую очередь от его плотности и скорости. Для оценки влияния свойств ударника на выбросы вещества в атмосферу в данной работе рассматриваются падения комет, плотность которых в несколько раз меньше плотности астероидов, со скоростями от 20 до 50 км/с.

В первой части статьи описывается постановка задачи и методы, используемые при ее решении; во второй – результаты расчета падения сферических комет диаметром 10 км с разными скоростями под наиболее вероятным углом падения 45 градусов в океан разной глубины; в третьей части приведены основные выводы, обсуждаются использованные приближения и оставшиеся невыясненными вопросы.

Постановка задачи и метод решения

Для моделирования падения десятикилометровых ядер комет, которые в дальнейшем для краткости будут называться просто кометами, со скоростями 20–50 км/с использовалась модель, аналогичная использованной в [Шувалов, 2023] для расчета падения астероидов и основанная на программном комплексе COVA [Shuvalov, 1999]. Программа COVA позволяет явно описывать границы между веществами с разными уравнениями состояния (в рассматриваемом случае это грунт, вода и воздух). При этом количество веществ не может быть больше трех. Поэтому для описания термодинамики сферических комет плотностью 1 г/см³ использовалось уравнение состояния воды. Как и в [Шувалов, 2023], расчетная сетка состояла из 400 × 200 × 400 ячеек: по 400 точек в горизонтальном вдоль траектории (ось X) и вертикальном (ось Z) направлениях и 200 точек в горизонтальном направлении, перпендикулярном траектории (ось Y). Течение считалось симметричным относительно вертикальной плоскости $Y = 0$, что позволило вдвое сократить количество точек по оси Y . В начальный момент времени размер ячейки был в 80 раз меньше диаметра ударника, по мере увеличения возмущенной области ячейки удваивались. Максимальный размер расчетной области в горизонтальном направлении составлял около 10000 км. При таких больших расстояниях существенной становится сферичность Земли, которая в данной работе не учитывалась. Однако влияние сферичности не должно быть очень сильным, т.к. характерный вертикальный размер задачи (толщина атмосферы) много меньше горизонтального.

Для описания термодинамических свойств грунта использовалось уравнение состояния кварца, полученное, так же, как и уравнение состояния воды, по программе ANEOS [Thomson, Lauson, 1972], для описания термодинамики воздуха использовались таблицы [Кузнецов, 1965]. Стратификация атмосферы задавалась по модели CIRA [COSPAR International Reference Atmosphere, <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/atmospheric/cira/cira86/>]. Плотность грунта считалась равной 2.65 г/см².

Результаты расчетов

На рис. 1 показаны результаты моделирования падения десятикилометровой кометы со скоростью 50 км/с под углом 45 градусов в океан глубиной 4 км. Через полсекунды после удара образуются водяной и донный кратеры, и начинается выброс воды в направлении движения кометы (справа налево). В момент времени 3 с формируется атмосферный плюм, состоящий из вещества кометы, которая почти полностью испаряется в процессе удара, и океанской воды. Донный кратер продолжает увеличиваться. Через 10 с плюм достигает высоты 100 км и начинается выброс грунта. К моменту 100 с выброс воды и грунта заканчивается. Нижняя часть плюма, состоящая из вещества, выброшенного на поздней стадии роста кратера и, соответственно, с меньшей скоростью, начинает опускаться под действием силы тяжести. Верхняя высокоскоростная часть плюма продолжает подниматься.

Через 10 мин после удара основная масса плюма уже «упала». Большая часть выброшенных воды и грунта осела на поверхности, меньшая, затормозившись в плотных слоях атмосферы, образовала облако, состоящее из паров и мелких конденсированных частиц воды и грунта, горизонтальный размер которого к этому моменту достигает 10000 км и продолжает увеличиваться. Масса воды и грунта в облаке в дальнейшем меняется слабо. Торможение разреженной части плюма вызывает нагрев атмосферы и вещества плюма и соответствующее повышение давления. Последнее приводит к «отражению» плюма от плотных слоев атмосферы, возникают атмосферные колебания. Нагрев атмосферы может приводить к генерации мощных потоков теплового излучения. Эти вопросы рассматривались, например, в работах [Шувалов и др., 2017; Koeberl, Ivanov, 2019]. А в работах [Melosh et al., 1990; Morgan et al., 2013]

рассматривалась возможность возникновения глобальных пожаров в результате падения в атмосферу выбросов из кратера Чиксулуб. Однако все эти процессы слабо влияют на массу облака, состоящего из паров и мелких конденсированных частиц воды и грунта, и в данной работе не рассматриваются.

На рис. 2 для разных начальных скоростей удара показаны зависимости массы грунта на высотах более 16 км, максимальной и остающейся в атмосфере через 10 мин после удара, от глубины океана.

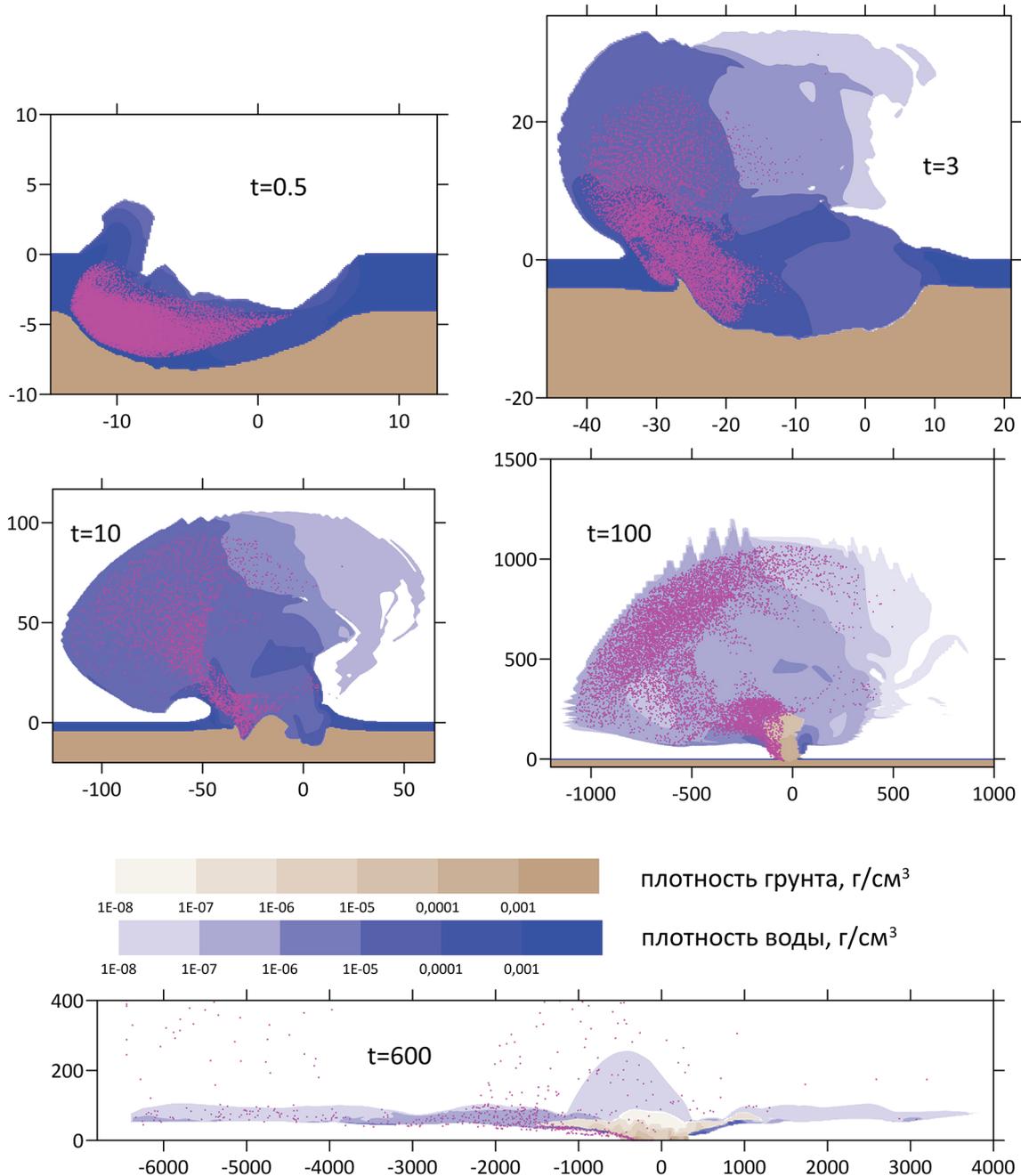


Рис. 1. Распределения плотности воды, грунта и кометного вещества через 0.5, 3, 10, 100 и 600 с после падения десятикилометровой кометы со скоростью 50 км/с под углом 45 градусов в океан глубиной 4 км. Грунт показан коричневым цветом, океанская вода – синим, кометное вещество – фиолетовыми точками. Все расстояния измерены в километрах

Для сравнения на рис. 2 приведены данные для десятикилометрового астероида, падающего со скоростью 20 км/с. Значение 16 км выбрано как характерное значение высоты современной тропической тропопаузы. Как и в [Шувалов, 2023], для определения массы вещества, выброшенной

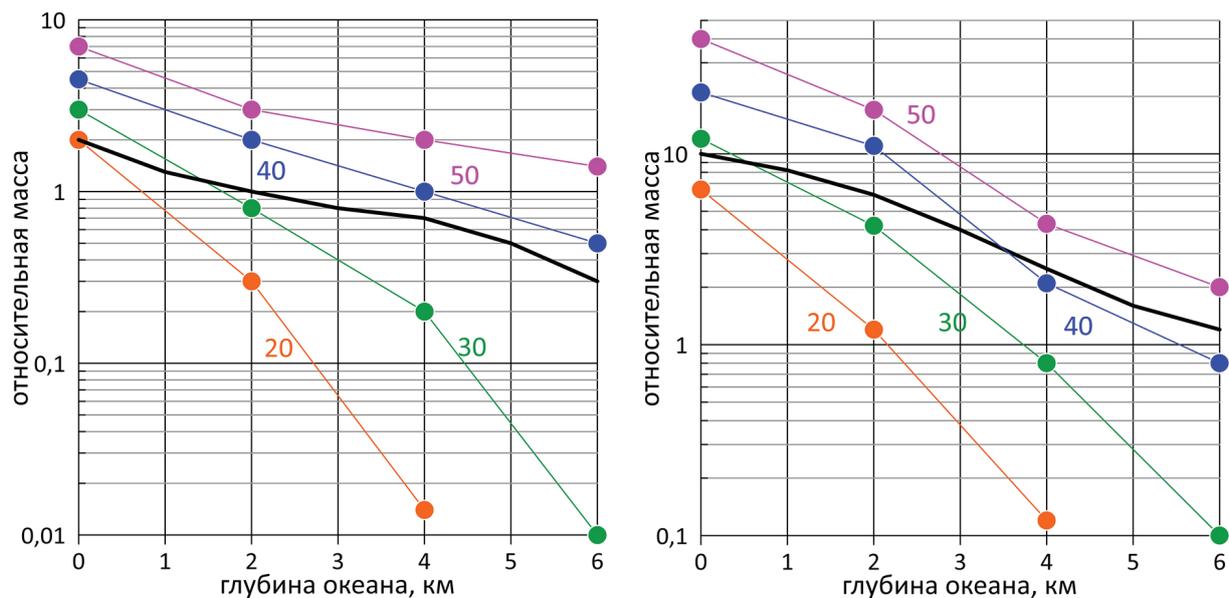


Рис. 2. Зависимости от глубины океана относительной (отнесенной к массе кометы) массы грунта на высотах более 16 км. Левый рисунок соответствует моменту времени 10 мин, правый – максимальным значениям. Значения скорости кометы указаны около каждой кривой. Черная кривая показывает аналогичные зависимости для десятикилометрового астероида, падающего со скоростью 20 км/с [Шувалов, 2023]

в атмосферу, использовались маркерные частицы, первоначально равномерно распределенные в ударнике и мишени и в дальнейшем перемещающиеся со скоростью течения. Число маркеров составляло 532000.

Как и следовало ожидать, масса выброшенного в атмосферу грунта, максимальная и остающаяся в атмосфере через 10 минут после удара, увеличивается с увеличением скорости кометы и уменьшается с увеличением глубины океана. Максимальная масса в 3–5 раз больше остающейся в атмосфере через 10 мин. При скоростях кометы 20 и 30 км/с в атмосферу выбрасывается меньше грунта, чем при ударе астероида со скоростью 20 км/с, при скорости кометы 50 км/с – больше. При этом нужно иметь в виду, что на рис. 2 и последующих, масса выброшенного вещества измеряется в массах ударника, а масса десятикилометровой кометы в 2.65 раз меньше массы десятикилометрового астероида. При скорости кометы 20 км/с и глубинах океана более 4 км грунт в атмосферу практически не выбрасывается.

На рис. 3 для разных начальных скоростей кометы показаны зависимости массы океанской воды на высотах более 16 км, максимальной и остающейся в атмосфере через 10 мин после удара, от глубины океана. Для сравнения, как и на рис. 2, приведены данные для десятикилометрового астероида, падающего со скоростью 20 км/с. В отличие от выбросов грунта масса выброшенной в атмосферу воды, максимальная и остающаяся в атмосфере через 10 мин после удара, увеличивается с увеличением глубины океана. С увеличением скорости кометы масса выброшенной в атмосферу воды, как и масса выброшенного грунта, также увеличивается. Относительная масса выброшенной воды при всех скоростях больше, чем при падении астероида со скоростью 20 км/с. Но, если учесть, что масса астероида в 2.65 раз больше массы кометы (при одинаковых размерах), то размерная масса выброшенной воды при скоростях кометы 40 и 50 км/с примерно равна массе выброшенной воды при ударе астероида, а при скоростях 20 и 30 км/с – меньше.

Во всех вариантах почти вся масса кометы (от 90 до 99%) выбрасывается на высоты более 16 км. На рис. 4 приведены массы грунта и океанской воды на высоте более 16 км через 10 мин, испаренных при ударе. Масса паров океанской воды во всех вариантах примерно вдвое меньше полной выброшенной массы, как и при ударе астероида со скоростью 20 км/с. Поэтому все сказанное выше про полную

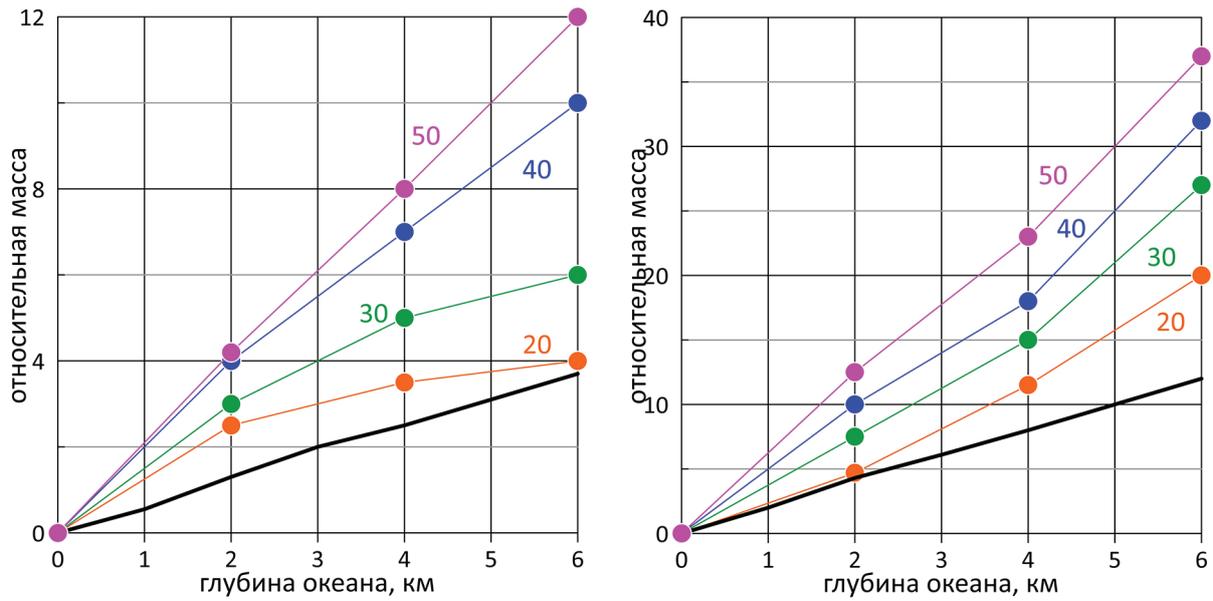


Рис. 3. Зависимости от глубины океана относительной (отнесенной к массе кометы) массы океанской воды на высотах более 16 км. Левый рисунок соответствует моменту времени 10 мин, правый – максимальным значениям. Значения скорости кометы указаны около каждой кривой. Черная кривая показывает аналогичные зависимости для десятикилометрового астероида, падающего со скоростью 20 км/с [Шувалов, 2022]

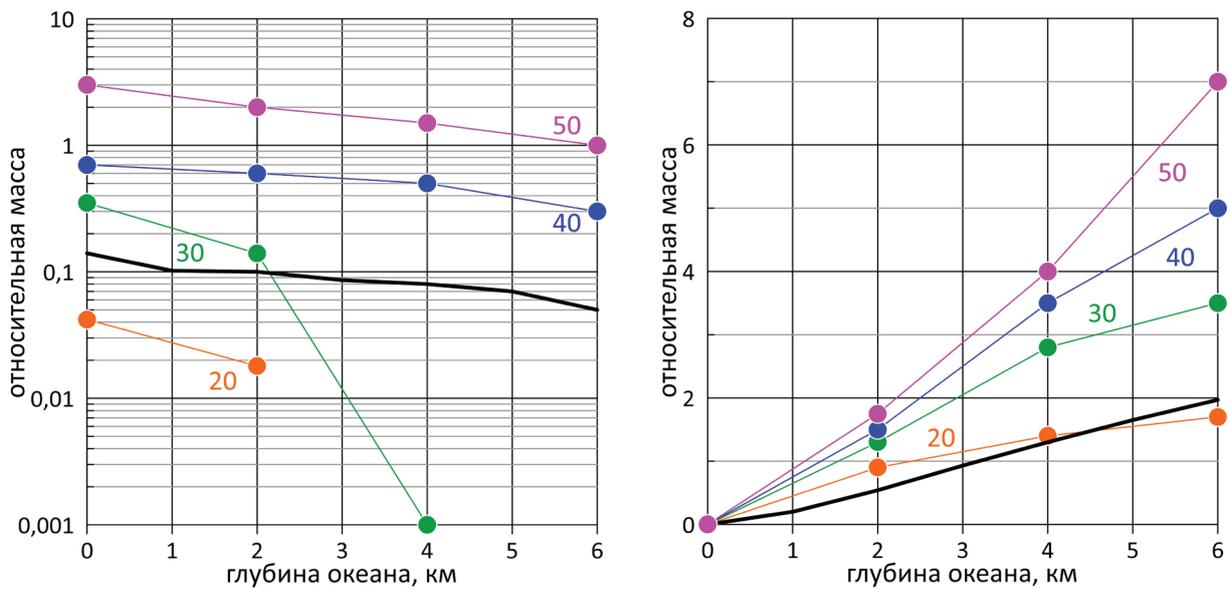


Рис. 4. Зависимости от глубины океана относительной (отнесенной к массе кометы) массы грунта (слева) и океанской воды (справа), которая испарилась при ударе, на высотах более 16 км через 10 мин после удара. Черная кривая показывает аналогичные зависимости для десятикилометрового астероида, падающего со скоростью 20 км/с [Шувалов, 2022]

выброшенную массу океанской воды относится и к водяным парам. Доля паров в выбросах грунта увеличивается с увеличением скорости удара и увеличением глубины и изменяется от нескольких процентов до 70%. Увеличение доли паров с увеличением глубины объясняется тем, что при больших глубинах конденсированное вещество, вылетающее главным образом с краев растущего кратера, сильно тормозится слоем воды, а облако испаренного вещества поднимается со дна кратера. Водяная комета почти полностью испаряется при ударе.

Обсуждение и выводы

Проведенные расчеты падения десятикилометровых водяных комет под углом 45 градусов в океан разной глубины показали, что, как и при падении астероидов в океан, выбрасывается большая масса воды и грунта. Относительная (отнесенная к массе ударника) масса выброшенного вещества увеличивается с увеличением скорости кометы. При скоростях кометы 40 и 50 км/с относительная масса выброшенного грунта на высоте более 16 км через 10 мин после удара в несколько раз больше, чем при падении астероидов со скоростью 20 км/с, при скоростях 20 и 30 км/с – меньше, причем разница увеличивается с увеличением глубины океана. Относительная масса выброшенной в атмосферу воды при всех рассмотренных скоростях кометы больше, чем при падении астероида со скоростью 20 км/с, и почти линейно увеличивается с увеличением глубины океана. При скоростях кометы 40 и 50 км/с масса грунта на высотах более 16 км через 10 мин после удара не очень сильно (не более, чем в 2–3 раза при глубинах до 4–5 км) отличается от массы грунта, выброшенного при ударе о твердую поверхность, при скоростях 20 и 30 км/с это отличие намного сильнее. Таким образом, можно сделать вывод, что при падении десятикилометровых комет в океан и на твердую поверхность воздействие на атмосферу Земли, по-видимому, будет примерно таким же, как при падении астероидов.

Примерно половина выброшенной океанской воды и почти все вещество кометы (которая в данной работе тоже описывается уравнением состояния воды) испаряется в процессе удара. По мере подъема (расширения) и падения (сжатия) плюма концентрации паров и конденсата изменяются. Доля паров в выбросах грунта увеличивается с увеличением скорости удара и увеличением глубины и изменяется от нескольких процентов до 70%.

В данной работе рассматривались кометы плотностью 1 г/см³. Реальная плотность комет в настоящее время плохо известна, немногочисленные измерения и оценки по скорости вращения находятся в пределах 0.5–0.6 г/см³ [Weissman et al., 2020]. В дальнейшем предполагается провести аналогичные расчеты для нескольких плотностей кометных ядер.

В описанных выше расчетах считалось, что в момент удара по поверхности комета имеет форму шара. На самом деле под действием больших аэродинамических нагрузок комета слегка сплющивается и ее площадь поперечного сечения увеличивается. Однако, как показано в [Artemieva, Shuvalov, 2018], эта деформация мала даже для километровых комет и ею можно пренебречь.

Как и в [Шувалов, 2023], выбросы рассматривались как сплошная среда. На самом деле они состоят из паров (и/или двухфазной смеси) и конденсированных частиц разного размера, которые в общем случае двигаются с разной скоростью. Для уточнения полученных оценок необходимо разработать более адекватную модель разлета выбросов и их взаимодействия с атмосферой. Однако вывод о том, что падения крупных комет (порядка 10 км) не менее опасны, чем падения астероидов, по-видимому, не изменится.

Финансирование

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

Благодарности

Автор благодарен Б. А. Иванову и анонимному рецензенту за полезные замечания.

Список литературы

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

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. № 51 (1). С. 51–66. <https://doi.org/10.7868/Sht0320930X17010042>

- Шувалов В.В. Выброс вещества в атмосферу при падении десятикилометровых астероидов в океан // *Астрономический Вестник*. 2021. № 55 (2). С. 114–123. <https://doi.org/10.31857/S0320930X21010059>
- Шувалов В.В. Численное моделирование выброса вещества в атмосферу при наклонном падении десятикилометровых астероидов в океан // *Физика Земли*. 2023. № 3. С. 131–138. <https://doi.org/10.31857/S0002333723030122>
- Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F. and Michel H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction // *Science*. 1980. Vol. 208 (4448). P. 1095–1108. <https://doi.org/10.1126/science.208.4448.1095>
- Artemieva H., Shuvalov V. Atmospheric shock waves after impacts of cosmic bodies up to 1000 m in diameter // *Meteoritics & Planetary Science*. 2018. Vol. 54 (3). P. 592–608. <http://dx.doi.org/10.1111/maps.13229>
- Claeys P. Impact events and the evolution of the Earth. In: *Advances in Astrobiology and Biogeophysics, Lectures in Astrobiology II* (eds. M. Gargaud, H. Martin and P. Claeys). Springer Verlag, Berlin. 2007. P. 239–280. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-33693-8_9
- Koeberl C., Ivanov B.A. Asteroid impact effects on Snowball Earth // *Meteoritics & Planetary Science*. 2019. Vol. 54 (10). P. 2273–2285. <http://dx.doi.org/10.1111/maps.13294>
- Kring D.A. The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous-Tertiary boundary // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol. 255. P. 4–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.037>
- Melosh H.J., Schneider N.M., Zahnle K.J., Latham D. Ignition of global wildfires at the Cretaceous/Tertiary boundary // *Nature*. 1990. Vol. 343. P. 251–254. <http://dx.doi.org/10.1038/343251a0>
- Morgan J., Artemieva N., Belcher C., Goldin T., Pierazzo E. Revisiting Fires at the K-Pg Boundary // *JGR: Biogeosciences*. 2013. Vol. 118 (4). P. 1508–1520. <http://dx.doi.org/10.1002/2013JG002428>
- 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*. 2010. Vol. 229. P. 263–272. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.08.036>
- Rampino M.R. Relationship between impact-crater size and severity of related extinction episodes // *Earth-Science Review*. 2020. Vol. 201. P. 102990. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102990>
- Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. Vol. 9 (6). P. 381–390. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1999ShWav...9..381S/doi:10.1007/s001930050168
- Thompson S.L., Lauson H.S. Improvements in the Chart D radiation hydrodynamic code III: Revised analytic equation of state. Report SC-RR-71 0714. 1972. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Weissman P., Morbidelli A., Davidsson B., Blum J. Origin and Evolution of Cometary Nuclei. *Science Reviews*. 2020. Vol. 216. Article No 6. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0625-7>

NUMERICAL SIMULATION OF MATERIAL EJECTION INTO THE ATMOSPHERE INDUCED BY OBLIQUE IMPACTS OF TEN-KILOMETER-DIAMETER COMETS INTO THE OCEAN

© 2023 V. V. SHUVALOV*

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

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

The results of three-dimensional numerical modeling of the oblique impacts of ten-kilometer water comets with velocities of 20 to 50 km/s at an angle of 45° onto a solid surface and into an ocean up to 6 km deep are presented. The maximum masses of ocean water, comet and soil matter ejected into the atmosphere, as well as the masses of water, impactor and soil matter remaining in the atmosphere 10 minutes after the impact are calculated. The mass of vaporized ejecta is determined.

Keywords: asteroid hazard, numerical modeling, craters, atmosphere, comet, crater emissions.