

УДК 523.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

© 2022 г. В. В. Шувалов¹¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

E-mail: valeryvshuvalov@gmail.com

Приведены результаты расчетов деформации, фрагментации и торможения астероидов размером 1.5–5 км в атмосфере Венеры. Определены доля энергии, теряемой астероидами при пролете через атмосферу и эффективные размеры астероида (или облака его фрагментов) в момент удара по твердой поверхности. Показано, что астероиды размером 1–2 км долетают до поверхности Венеры в виде облака фрагментов поперечником 5–20 км, кинетическая энергия которого в 10–1000 раз меньше начальной энергии астероида. Такие удары, по-видимому, не приводят к образованию классических одиночных кратеров или полей рассеяния кратеров, но могут быть причиной образования темных и ярких пятен (*splotches*), наблюдаемых на поверхности Венеры.

Ключевые слова: Венера, астероид, численное моделирование, ударная волна, фрагментация.

Для цитирования: Шувалов В.В. Численное моделирование торможения астероидов в атмосфере Венеры // Динамические процессы в геосферах, т. 14, № 2. С. 92–98.
http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_92

Введение

Последствия падения астероидов на планеты в значительной степени определяются взаимодействием падающих тел с планетными атмосферами. Существуют два предельных сценария такого взаимодействия (см., например, [Шувалов и Трубецкая, 2007]). Первый – это так называемые «метеорные взрывы», когда астероид полностью разрушается и тормозится в атмосфере. При этом вся энергия падающего тела выделяется в атмосфере. Примером «метеорного взрыва» в атмосфере Земли является Тунгусская катастрофа 1908 г. Второй предельный сценарий – это кратерообразующие удары, когда крупный астероид, не испытывая заметного торможения и фрагментации в атмосфере, долетает до поверхности планеты и образует ударный кратер, размеры которого определяются размером, массой, скоростью и углом наклона траектории падающего тела. На Земле «метеорные взрывы» реализуются при размерах ударника от 50 до 300 м (в зависимости от плотности ударника и угла наклона траектории), кратерообразующие удары при падении космических тел размером порядка километра и больших [Шувалов и др., 2016]. В промежутке между двумя предельными случаями реализуется промежуточный сценарий, при котором разрушенный астероид или его фрагменты долетают до поверхности планеты и образуют кратер или тесную группу кратеров, но размеры этого кратера (кратеров) заметно меньше из-за того, что ударник существенно тормозится и теряет энергию при пролете через атмосферу. Для оценки размеров образующегося в этом случае кратера необходимо знать долю энергии ударника, потерянной при пролете в атмосфере. Если астероид испытывает сильную фрагментацию при пролете в атмосфере, то по поверхности ударяет облако фрагментов, при этом увеличивается эффективный размер ударника и уменьшается эффективная плотность. Это может существенно повлиять на структуру образующегося кратера [O’Keefe & Ahrens, 1982].

Атмосфера Венеры почти на два порядка плотнее атмосферы Земли, давление у поверхности 93 бар, плотность 67 кг/м³, характеристическая высота 17 км [Moroz, 1981]. Поэтому значительно большие (чем на Земле) астероиды разрушаются и тормозятся в атмосфере. В работе [Shuvalov et al., 2014] показано, что если бы атмосфера Земли была в 100 раз плотнее, то километровые астероиды не долетали бы до поверхности и не образовывали бы кратеры. Поэтому можно предположить, что и при падении на

Венеру километровых тел реализуется сценарий «метеорного взрыва». Такие «метеорные взрывы», по-видимому, являются причиной образования темных и ярких пятен (*splotches*) размером порядка 100 км на поверхности планеты [Bondarenko & Kreslavsky, 2018; Ivanov, 2022]. «Радио-темные» и «радио-светлые» пятна хорошо видны на изображениях, построенных по отраженному радарному сигналу, полученных космическим аппаратом «Магеллан». Целью данной работы является моделирование разрушения и торможения астероидов в атмосфере Венеры, определение кинетической энергии и эффективного размера деформированного астероида или облака фрагментов непосредственно перед ударом по поверхности планеты. В первой части статьи описывается постановка задачи и методы, используемые при ее решении; во второй – результаты расчета внедрения астероидов разного размера под разными углами в атмосферу Венеры, в третьей части приведены основные выводы, обсуждаются использованные приближения и оставшиеся невыясненными вопросы.

Постановка задачи и метод решения

Для описания движения крупных метеороидов в планетных атмосферах обычно используется квазиджидкое приближение (см., например [Zahnle & MacLow, 1994; Crawford, 1996; Shuvalov et al., 2014]). Такое приближение обосновано тем, что метеороиды размером больше нескольких десятков метров начинают деформироваться на высотах, где аэродинамические нагрузки значительно превышают их прочность [Svetsov et al., 1995], поэтому можно считать, что падающее тело полностью разрушено и ведет себя как квазиджидкость. Для расчета деформации, фрагментации и торможения квазиджидкого астероида применялась методика, описанная в [Shuvalov et al., 2014], основанная на использовании программного комплекса COBA [Shuvalov 1999]. Считалось, что астероид имеет сферическую форму, и рассматривалась двумерная осесимметричная задача в координатах (r, z) , где z – расстояние вдоль траектории, а r – расстояние от оси симметрии. Моделирование проводилось в системе координат, связанной с падающим метеороидом, плотность и давление набегающего потока венерианского воздуха задавались в соответствии с распределением плотности и давления по высоте в венерианской атмосфере [Moroz, 1981]. Атмосфера считалась состоящей из идеального газа с показателем адиабаты 1.3. Плотность астероида принималась равной 3.32 г/см^3 , термодинамические свойства вещества астероида описывались уравнением состояния дунита, полученным по программе ANEOS [Thomson & Lauson, 1972]. Скорость астероидов принималась равной 20 км/с, однако, в работе [Shuvalov et al., 2014] показано, что скорость метеороида слабо влияет на высоту энергосвечения.

Расчетная сетка состояла из 250×400 ячеек вдоль осей r и z соответственно. В центральной области 70×140 ячеек вокруг метеороида размер ячейки был равен $D_0/60$, где D_0 – начальный диаметр метеороида. По мере удаления от центральной области размер ячеек постепенно увеличивался, максимальный размер расчетной области составлял $10D_0$ вдоль оси r и $25D_0$ вдоль оси z .

Результаты расчетов

На рис. 1 показаны последовательные стадии деформации и разрушения астероида диаметром $D_0 = 1.5 \text{ км}$, падающего под углом 45 градусов. Черным цветом показано вещество ударника, разными оттенками серого – относительная (по отношению к нормальной на данной высоте) плотность атмосферного газа. На высоте $H = 40 \text{ км}$ астероид начинает деформироваться под действием возрастающего давления торможения набегающего воздуха. К этому моменту энергия астероида E уменьшилась примерно на 2%, эффективный диаметр немного увеличился. Определяется эффективный диаметр как диаметр цилиндра, внутри которого сосредоточено 95% массы метеороида. Здесь и далее высота H определяется как высота, выше которой расположено 95% массы астероида.

На высоте $H = 30 \text{ км}$ астероид уже заметно расплющивается, его эффективный диаметр увеличивается почти в полтора раза. На высоте $H = 20 \text{ км}$ астероид начинает разваливаться на части (фрагментирует), на высоте $H = 15 \text{ км}$ он теряет половину своей энергии. На высотах ниже 10 км астероид окончательно превращается в облако фрагментов, диаметр которого быстро увеличивается.

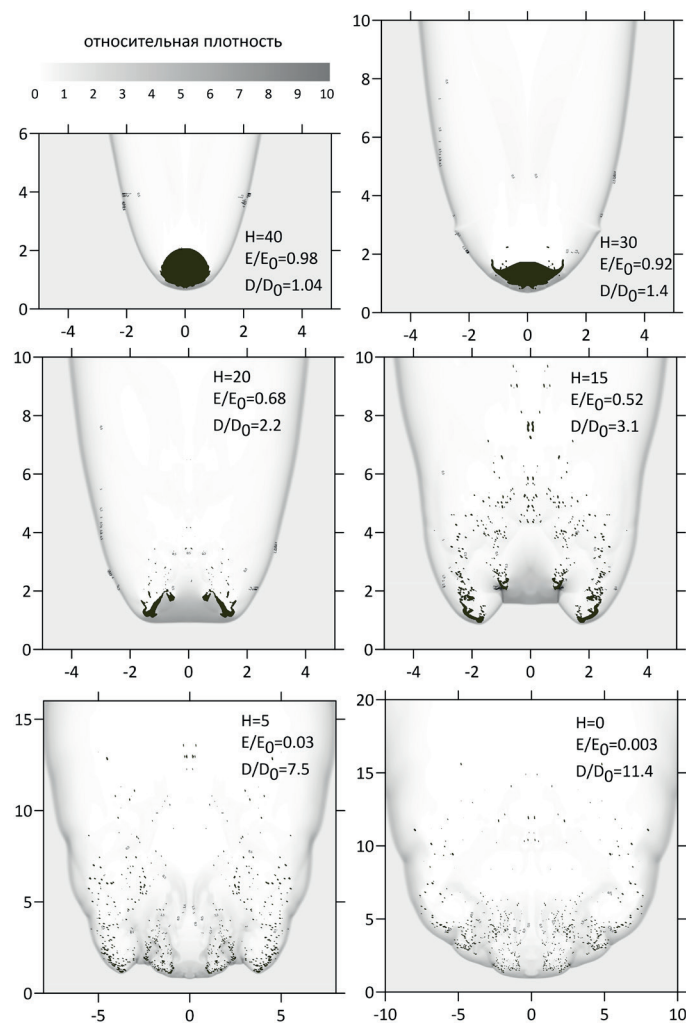


Рис. 1. Последовательные стадии разрушения астероида. На каждом фрагменте рисунка указаны высота полета H в км, отношение кинетической энергии астероида E к начальной E_0 , отношение эффективного диаметра астероида D к начальному диаметру D_0 . Все расстояния измеряются в радиусах астероида. Вертикальные оси графиков параллельны траектории, горизонтальные – перпендикулярны ей

Вблизи поверхности Венеры облако фрагментов имеет диаметр, более чем в 10 раз превосходящий начальный диаметр астероида, а его энергия составляет менее одного процента от начальной энергии астероида. Максимум энерговыделения, т.е. максимум величины dE/dH , наблюдается на высоте около 15 км. В более разреженной атмосфере Земли на высоте 15 км тормозятся астероиды размером около 50 м, при этом в момент фрагментации (примерно на той же высоте около 20 км) астероид еще сохраняет почти 100% начальной кинетической энергии [Шувалов и др., 2016]. Это объясняется тем, что размер пятидесятиметрового астероида много (на два порядка) меньше характеристической высоты атмосферы Земли.

На рис. 2 показано как меняются эффективный радиус и относительная кинетическая энергия астероидов разного начального размера D_0 по мере их внедрения в атмосферу Венеры под углом 45 градусов. Сначала эффективный диаметр астероидов увеличивается примерно в полтора раза за счет расплющивания, превращения шара в диск, затем рост эффективного диаметра приостанавливается из-за сдува вещества с границ диска. После фрагментации эффективный диаметр начинает резко увеличиваться, для астероида с начальным диаметром $D_0 = 1.5$ км в момент удара о твердую поверхность он более чем в 10 раз превышает начальный диаметр.

Энергия падающих астероидов (и, соответственно, их скорость) начинает заметно уменьшаться примерно тогда же, когда начинается их деформация. Потери энергии резко увеличиваются после

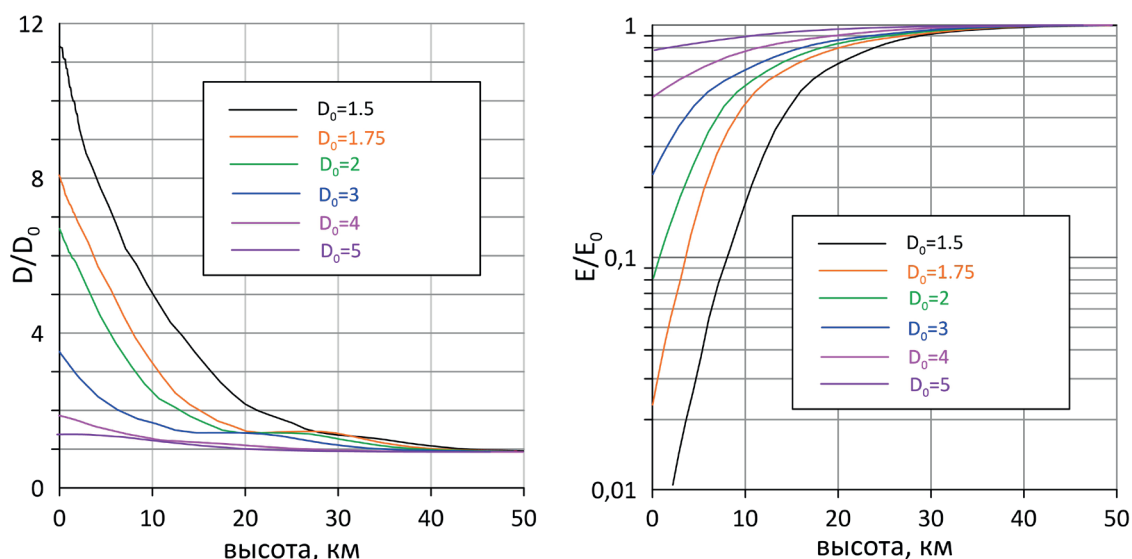


Рис. 2. Зависимости от высоты эффективного диаметра астероида D/D_0 (слева) и энергии астероида E/E_0 (справа) при падении астероидов разного диаметра D_0 (значения на графиках указаны в километрах) под углом 45 градусов

фрагментации астероидов, сопровождающейся быстрым увеличением эффективного диаметра и силы сопротивления. Астероиды с начальным диаметром менее 2 км теряют при пролете через атмосферу Венеры более 90% своей энергии.

На рис. 3 приведены результаты расчетов энергии и эффективного диаметра астероидов (или облаков фрагментов разрушившихся астероидов) в момент достижения твердой поверхности, т.е. при $H = 0$, для разных начальных диаметров астероидов D_0 и углов наклона траектории α . При падении под любым углом астероиды с начальным диаметром менее 1.5 км теряют, при пролете через атмосферу Венеры более 90% своей энергии. С уменьшением угла наклона траектории потери энергии увеличиваются, при $\alpha = 30^\circ$ даже трехкилометровые астероиды теряют 90% энергии при пролете через атмосферу. В момент времени, когда астероид теряет 90% своей энергии из-за торможения в атмосфере, его эффективный диаметр в 5–7 раз больше начального диаметра астероида. Максимум энерговыделения соответствует примерно потере 50% энергии.

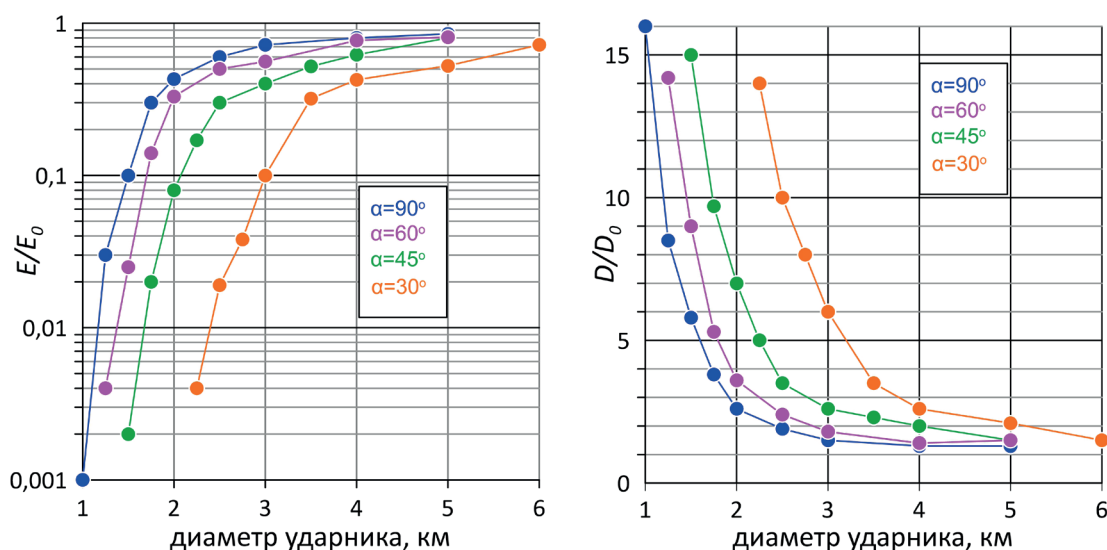


Рис. 3. Зависимости энергии E/E_0 (слева) и эффективного диаметра D/D_0 (справа) астероида в момент удара по твердой поверхности от начального диаметра D_0 при разных углах α наклона траектории

Обсуждение и выводы

Проведенные с использованием квазижидкой модели расчеты деформирования, фрагментации и торможения астероидов в атмосфере Венеры показали, что астероиды размером 1–2 км долетают до поверхности Венеры в виде облака фрагментов поперечником 5–20 км, энергия которого в 10–1000 раз меньше начальной энергии астероида. Такие удары, по-видимому, не приводят к образованию классических кратеров, но могут быть причиной образования темных и ярких пятен (*splotches*), наблюдаемых на поверхности Венеры [Bondarenko & Kreslavsky, 2018; Ivanov, 2022]. Описанные выше результаты могут быть начальными данными для решения задачи о формировании таких структур.

Расчеты показали, что в большинстве случаев можно выделить две стадии увеличения эффективного диаметра и, соответственно, эффективной площади поперечного сечения разрушенного астероида. Первая связана с деформированием и расплющиванием (превращением шара в диск), вторая – с фрагментацией и расширением облака фрагментов. На первой стадии эффективный диаметр увеличивается примерно в полтора раза, на второй – в десятки раз. Процесс фрагментации и торможения может зависеть от соотношения между размером астероида и характеристической высотой атмосферы.

В расчетах не учитывалось испарение астероида и его фрагментов. В случае падения Тунгусского космического тела (ТКТ) такое испарение могло привести к полному испарению фрагментов [Svetsov, 1996]. Однако в рассматриваемом случае масса астероидов на 3–4 порядка больше массы ТКТ, время полета в атмосфере примерно такое же, поэтому, скорее всего, основная масса фрагментов останется неиспаренной. Тем не менее, этот вопрос требует уточнения.

В заключение следует отметить, что двумерная геометрия не вполне хороша для рассмотрения фрагментации астероидов. Она неплохо описывает энерговыделение и облако фрагментов в среднем, но не позволяет описать образование двух или нескольких крупных фрагментов, вместо этого получается тор (или несколько торов). Для объяснения кластеров из нескольких кратеров на Венере, хорошо видимых на некоторых снимках «Магеллана» (см., например, [Herrick & Phillips, 1994]), необходимо рассматривать трехмерную задачу.

Финансирование

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

Благодарности

Автор благодарен Б. А. Иванову, который был инициатором этой работы и участвовал в постановке задачи и обсуждении результатов.

Список литературы

- Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Гигантские болиды в атмосфере Земли // *Астрономический Вестник*. 2007, 41(3), с. 241–251. <https://doi:10.1134/S0038094607030057>.
- Шувалов В.В., Попова О.П., Светцов В.В., Трубецкая И.А., Глазачев Д.О. Определение высоты «метеорного взрыва» // *Астрономический Вестник*. 2016, 50(1), с. 3–14. <http://DOI:10.7868/S0320930X16010059>.
- Bondarenko N.V., Kreslavsky M.A. Surface properties and surficial deposits on Venus: New results from Magellan radar altimeter data analysis // *Icarus*. 2018, 309, p. 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.03.013>.
- Crawford D.A. (1996). Models of fragment and fireball evolution. In: K. Noll (Ed) *The collision of comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter*. Cambridge Univ. Press, p. 133–156. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525056>.
- Herrick R.R. and Phillips R.J. Effects of the Venusian Atmosphere on Incoming Meteoroids and the Impact Crater Population // *Icarus*. 1994, 112(1), p. 253–281. <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1180>.

- Ivanov B.* (2022). Splotches on Venus: models revisite. 53rd Lunar and Planetary Conference. #1841.
- Moroz V.I.* The atmosphere of Venus // *Space Science Reviews*. 1981, 29 (1), p. 3–127. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1981SSRv...29....3M/doi:10.1007/BF00177144.
- O'Keefe J.D., Ahrens T.J.* Cometary and Meteorite Swarm Impact on Planetary Surfaces // *Journal of Geophysical Research*. 1982, 87 (B8), p. 6668–6680. <http://dx.doi.org/10.1029/JB087iB08p06668>.
- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999, 9 (6), p. 381–390. <https://doi.org/10.1007/s001930050168>.
- Shuvalov V., Kührt E., De Niem D., Wünnemann K.* Impact Induced Erosion of Hot and Dense Atmospheres // *Planetary and Space Science*. 2014, 98, p. 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.08.018>.
- Svetsov V.V., Nemtchinov I.V., Teterev A.V.* Disintegration of Large Meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical Models // *Icarus*. 1995, 116 (1), p. 131–153. <https://doi.org/10.1006/icar.1995.1116>.
- Svetsov V.V.* Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska Explosion // *Nature*. 1996, 383, p. 697–699. <https://doi.org/10.1038/383697a0>.
- Thompson S.L., Lauson H.S.* (1972). 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.
- Zahnle K., MacLow M.-V.* The collision of Jupiter and comet Shoemaker-Levy 9. // *Icarus*. 1994, 108(1), p. 1–17. <http://dx.doi.org/10.1006/icar.1994.1038>.

NUMERICAL SIMULATION OF ASTEROID DECELERATION IN THE VENUS ATMOSPHERE

V. V. Shuvalov¹

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

The results of calculations of deformation, fragmentation and deceleration of asteroids 1.5–5 km in size in the atmosphere of Venus are presented. The fraction of energy lost by asteroids during their passage through the atmosphere and the effective dimensions of an asteroid (or a cloud of its fragments) at the moment of impact on a solid surface are determined. It is shown that asteroids 1–2 km in size reach the surface of Venus in the form of a cloud of fragments with a diameter of 5–20 km, the kinetic energy of which is 10–1000 times less than the initial energy of the asteroid. Such impacts do not appear to result in the formation of classical single craters or crater fields, but may be responsible for the formation of dark and bright spots (splotches) observed on the surface of Venus.

Keywords: Venus, asteroid, numerical simulation, shock wave, fragmentation.