

УДК 523.6

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЖЕНИЯ АСТЕРОИДА В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

© 2023 г. В. В. Шувалов^{1,*}, Б. А. Иванов¹¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: valeryvshuvalov@gmail.com

Приведены результаты трехмерных расчетов деформации, фрагментации и торможения астероида размером 1.5 км в атмосфере Венеры. Сравнение с результатами проведенных ранее двумерных расчетов показало, что используемая в двумерных расчетах осевая симметрия приводит к более сильному торможению фрагментов разрушенного астероида, чем в трехмерной геометрии, более соответствующей реальности. Полученная в трехмерных расчетах структура разрушенного астероида, состоящего из нескольких крупных и множества мелких фрагментов, по-видимому, может объяснить причину образования кратерных кластеров и темных и ярких пятен (splotches), наблюдаемых на поверхности Венеры.

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

Для цитирования: Шувалов В.В., Иванов Б.А. Трехмерное моделирование торможения астероида в атмосфере Венеры // Динамические процессы в геосферах, 2023, т. 15, № 1. С. 54–62. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_54

Введение

Для численного моделирования разрушения и торможения кометы астероидов в планетных атмосферах часто используется так называемое квазижидкое приближение [Zahnle, MacLow, 1994; Crawford, 1996; Shuvalov et al., 2014]. Такое приближение обосновано тем, что космические тела 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 квазижидкость. Обычно рассматривается осесимметричная двумерная задача, а ударник считается имеющим сферическую или цилиндрическую форму. Однако двумерный подход имеет ряд существенных недостатков.

Первый недостаток связан с тем, что ось симметрии является особой линией в цилиндрической системе координат. Если на каком-то расстоянии от оси симметрии возникает какое-либо возмущение, то оно (из-за осевой симметрии) имеет тороидальную форму, образуется сходящаяся волна сжатия, которая усиливается при стремлении радиуса к нулю. В результате на оси возникает сильное возмущение (эффект кумуляции), которое может быть даже значительно сильнее начального и может вызывать образование нефизичных, направленных вдоль оси, струй. В реальной трехмерной геометрии возникшее возмущение затухает по мере удаления от точки его возникновения. Кумуляция возмущений на оси является следствием цилиндрической симметрии.

Второй недостаток двумерной осесимметричной методики связан со схемной вязкостью. Схемная вязкость проявляется в том, что в эйлеровой схеме движущиеся разрывы размазываются, резкие градиенты сглаживаются. Это размазывание/сглаживание тем сильнее, чем больше скорость. На оси симметрии радиальная скорость равна нулю, поэтому размазывание/сглаживание (т.е. схемная вязкость) вблизи оси меньше, чем вдали от нее. Это тоже может приводить к нефизичным эффектам на оси.

Третий недостаток, наверное, особенно существенный для данной задачи, связан с описанием движения космического тела после фрагментации. Если в трехмерной задаче, как и в природе, астероид разваливается на отдельные куски, то в двумерной осесимметричной задаче все фрагменты имеют вид

торов, оси вращения которых совпадают с траекторией падающего тела. Для иллюстрации на рис. 1 показаны две картинki одного и того же разрушенного астероида: двумерная (именно такие приводятся во всех работах, описывающих фрагментацию и торможение космических тел в двумерной геометрии) и соответствующая ей трехмерная. Допустим, что в результате фрагментации образовался фрагмент, имеющий отличную от нуля радиальную составляющую скорости (т.е. летящий под некоторым углом к начальной траектории астероида). Если этот фрагмент в течение какого-то времени не разрушается и не сильно тормозится, то сила сопротивления остается примерно постоянной. В двумерной осесимметричной задаче такой фрагмент представляет собой тор, радиус R которого увеличивается (из-за наличия отличной от нуля радиальной скорости), а радиус r образующей окружности, соответственно, уменьшается (из условия сохранения массы $r^2 R = \text{Const}$). Площадь поперечного сечения фрагмента, которая пропорциональна произведению rR , при этом увеличивается. Это должно приводить к тому, что фрагменты разрушенного космического тела в двумерной осесимметричной задаче тормозятся сильнее, чем в трехмерной задаче и в природе. Это, в свою очередь, должно приводить к более быстрому торможению разрушенного космического тела и может существенно изменить высоту и характер выделения энергии в атмосфере, а также воздействие на поверхность планеты.

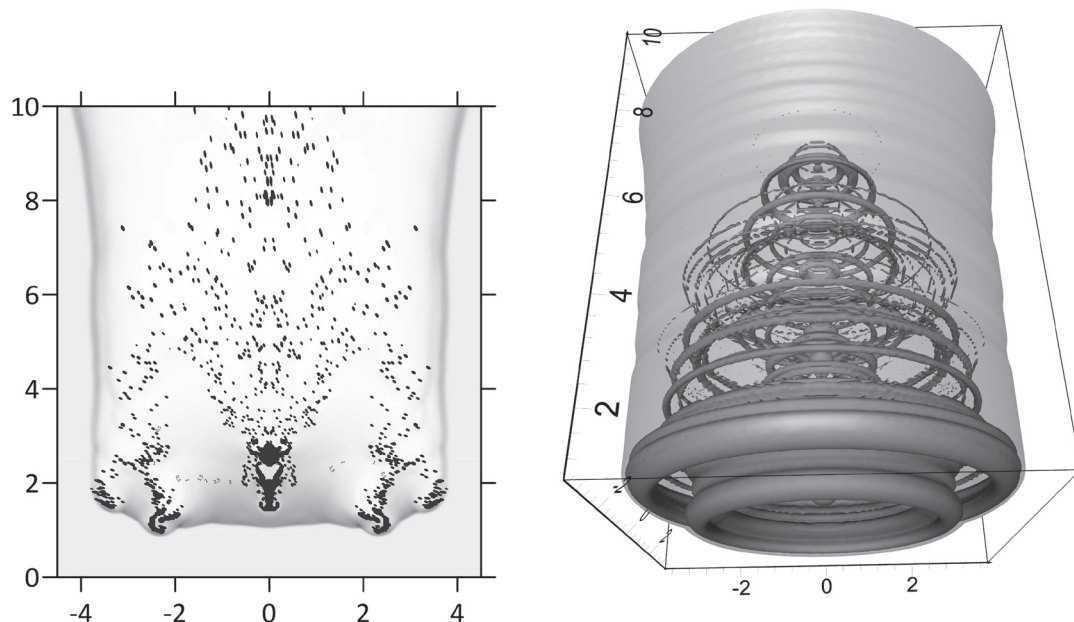


Рис. 1. Полученные в двумерном расчете двумерная и трехмерная картинki фрагментации астероида диаметром 1.5 км, падающего под углом 45 градусов в атмосфере Венеры. Рисунки соответствуют высоте 15 км. Слева – в плоскости, проходящей через траекторию; серым цветом показано распределение относительной плотности атмосферного газа (чем темнее, тем выше плотность), черным – фрагменты разрушенного астероида. Справа – то же самое показано в трехмерной геометрии; светло-серая поверхность соответствует фронту ударной волны, темно-серым цветом обозначены фрагменты разрушенного астероида. По осям координат указаны расстояния в километрах

Еще один недостаток связан с тем, что двумерный подход не позволяет моделировать образование сложных структур из близкорасположенных и частично перекрывающихся кратеров, которые наблюдаются на поверхности Венеры (см., например, [Herrick, Phillips, 1994]) и объясняются падением разрушенных астероидов.

В работах [Korycansky et al., 2002; 2003] рассматривалась задача о деформации, фрагментации и торможении астероидов в атмосфере Венеры в трехмерной постановке. Однако в этих работах использовалась чисто эйлерова методика ZEUS [Stone, Norman, 1992], которая приводит к сильному размазыванию границ между астероидом (или его фрагментами) и атмосферным газом. В результате размазывания плотность вещества астероида уменьшается, что может существенно повлиять на

фрагментацию и торможение астероида. Расчеты [Korycansky et al., 2002; 2003] позволили оценить потери энергии в атмосфере и скорректировать параметры образующегося единого кратера, но не позволили оценить возможность образования кластеров из близко лежащих кратеров, образованных отдельными крупными фрагментами.

Целью данной работы является разработка трехмерной модели деформации, фрагментации и торможения астероидов при движении в атмосфере Венеры, позволяющей более аккуратно описывать границы между веществом ударника и атмосферным газом. В первой части статьи описывается постановка задачи и методы, используемые при ее решении; во второй – результаты расчетов деформации, фрагментации и торможения астероида диаметром 1.5 км в атмосфере Венеры и их сравнение с результатами двумерных расчетов; в третьей части приведены основные выводы, обсуждаются использованные приближения и оставшиеся невыясненными вопросы.

Постановка задачи и метод решения

Для расчета деформации, фрагментации и торможения квазжидкого астероида в атмосфере Венеры использовалась трехмерная версия программного комплекса COBA [Shuvalov, 1999]. Считалось, что астероид имеет сферическую форму и состоит из дунита плотностью 3.32 г/см^3 . Диаметр астероида принимался равным 1.5 км, согласно двумерным расчетам [Шувалов, 2022] такой астероид теряет при пролете через атмосферу Венеры около 99% начальной кинетической энергии и превращается в облако фрагментов диаметром $11D_0$, где D_0 – начальный диаметр астероида. Моделирование проводилось в системе координат, связанной с падающим метеороидом, плотность и давление набегающего потока атмосферного газа задавались в соответствии с распределением плотности и давления по высоте в венерианской атмосфере [Morož, 1981]. Атмосфера считалась состоящей из идеального газа с показателем адиабаты 1.3. Термодинамические свойства вещества астероида описывались уравнением состояния дунита, полученным по программе ANEOS [Thomson, Lauson, 1972]. Скорость астероида принималась равной 20 км/с, однако, в работе [Шувалов и др., 2016] показано, что скорость метеороида слабо влияет на характер и высоту энерговыделения.

Расчетная область имела форму куба, расчетная сетка состояла из $300 \times 300 \times 300$ ячеек вдоль осей x , y и z соответственно. Скорость набегающего потока, в начальный момент равная скорости астероида с противоположным знаком, направлена вдоль основной диагонали куба (чтобы направления x , y и z были равноправны), соединяющей левую нижнюю и правую верхнюю вершины куба (см. рис. 2). В процессе расчета скорость набегающего потока изменялась по мере торможения астероида для того, чтобы он во все моменты времени располагался в левом нижнем углу расчетной области. В центральной области $220 \times 220 \times 220$ ячеек вокруг метеороида размер ячейки был равен $D_0/40$, где D_0 – начальный диаметр метеороида. По мере удаления от центральной области размер ячеек постепенно увеличивался, максимальный размер расчетной области составлял $20D_0$ вдоль всех осей. Расчеты начинались в тот момент, когда астероид находился на высоте 70 км. Двумерные расчеты показывают, что деформация и торможение на больших высотах пренебрежимо малы.

Результаты расчетов

На рис. 2 показаны форма астероида и окружающей его баллистической ударной волны на высоте 50 км. На этой высоте астероид начал слегка деформироваться, его скорость близка к начальной 20 км/с.

С уменьшением высоты полета и, соответственно, увеличением давления на лобовой поверхности астероида его деформация усиливается. На боковой поверхности давление меньше, поэтому появляется радиальная (перпендикулярная траектории) скорость, и поперечное сечение астероида увеличивается. На высоте $H = 20$ км он превращается в диск (*pan cake*). На рис. 3 этот диск показан в момент, предшествующий началу фрагментации. К этому моменту астероид потерял 25% своей кинетической энергии, его эффективный диаметр в два раза увеличился. Определяется эффективный диаметр как диаметр цилиндра, ось которого совпадает с главной диагональю куба, параллельной траектории,

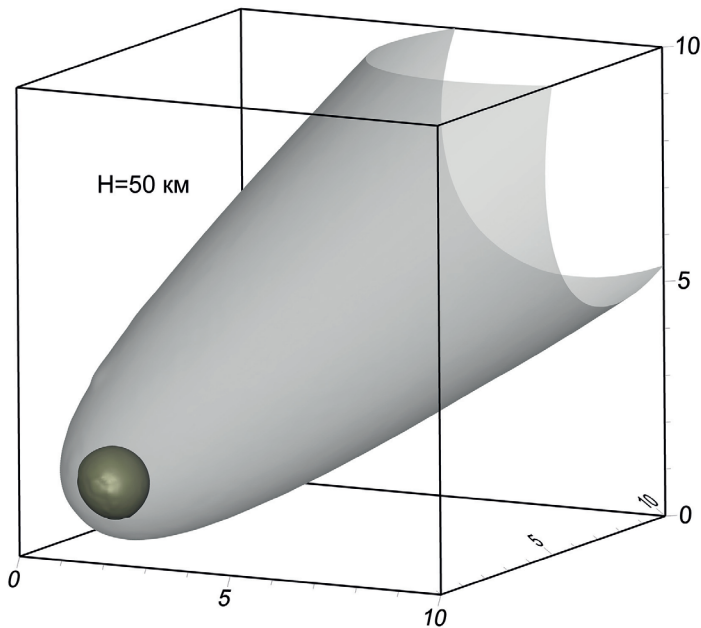
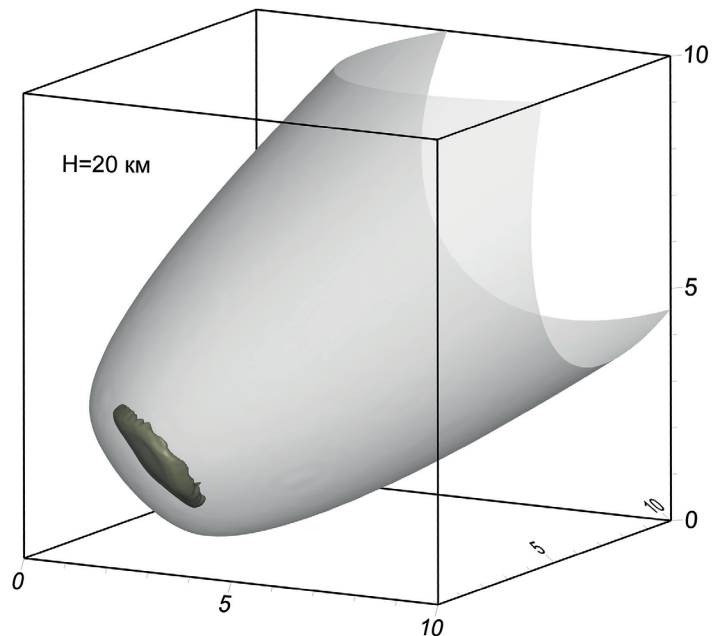


Рис. 2. Движение астероида с начальным диаметром $D_0 = 1.5$ км в венерианской атмосфере на высоте $H = 50$ км. Серым цветом показана ударная волна, оливковым — астероид. Расстояния указаны в километрах

Рис. 3. Движение астероида с начальным диаметром $D_0 = 1.5$ км в венерианской атмосфере на высоте $H = 20$ км. Серым цветом показана ударная волна, оливковым — фрагменты разрушенного астероида. Расстояния указаны в километрах



и внутри которого сосредоточено 95% массы метеороида. Здесь и далее высота H определяется как высота, выше которой расположено 95% массы астероида.

На рис. 4 показано как выглядит астероид, когда он долетает до твердой поверхности Венеры. Можно выделить четыре крупных фрагмента и множество мелких. Один из крупных фрагментов (ближний на рис. 4) сам испытал сильную фрагментацию и представляет из себя компактное облако более мелких фрагментов. Суммарная кинетическая энергия всех фрагментов в момент удара по твердой поверхности примерно в пять раз меньше, чем начальная энергия астероида, эффективный диаметр равен примерно $5.5D_0$.

Можно предположить, что при ударе таким образом разрушенного астероида на поверхности образуются четыре близко расположенных (или пересекающихся) крупных кратера и множество мелких. Для того, чтобы оценить возможную конфигурацию образующегося кратерного кластера, было посчитано распределение по поверхности энергии, приносимой фрагментами, оно показано на рис. 5. Однако, если предположить, что основная энергия распределена поровну между четырьмя

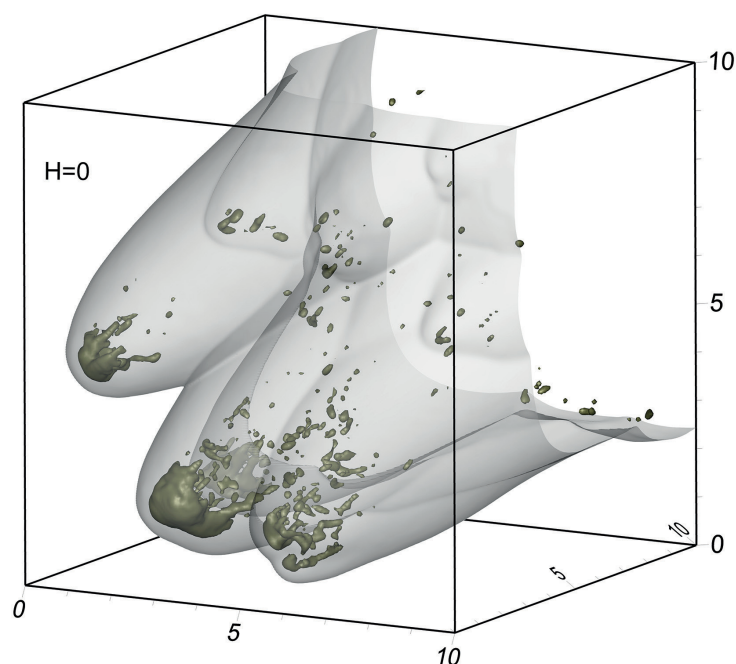
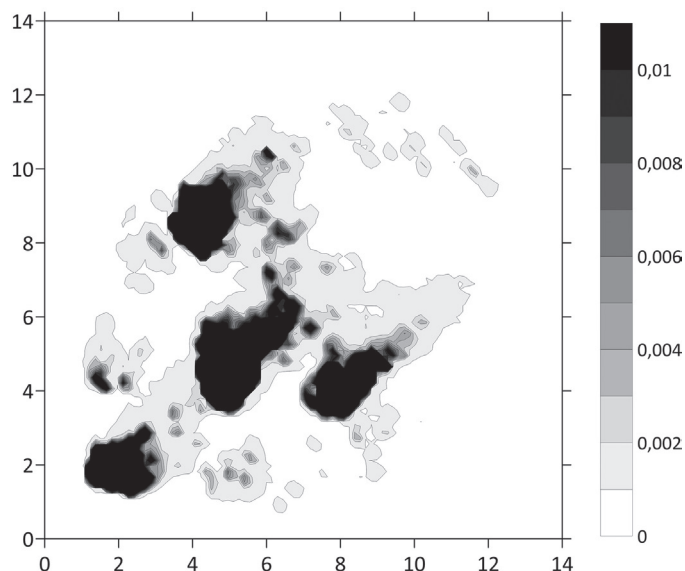


Рис. 4. Движение астероида с начальным диаметром $D_0 = 1.5$ км в венерианской атмосфере непосредственно перед ударом по твердой поверхности. Серым цветом показана ударная волна, оливковым – фрагменты разрушенного астероида. Расстояния указаны в километрах

Рис. 5. Распределение энергии, приносимой на поверхность фрагментами, $d\bar{E}/ds$, где $\bar{E} = E/E_0$, E_0 – начальная энергия астероида, E – энергия всех фрагментов в момент удара, s – площадь поверхности. Расстояния указаны в километрах



крупными фрагментами, то каждый из них, имея массу равную примерно 10^{15} г и энергию примерно 60 Гт, образует согласно оценкам [Holsapple and Schmidt, 1982] кратер диаметром 7–9 км. Это означает, что в рассматриваемом случае кратеры, образованные отдельными фрагментами, объединятся и образуется один кратер, примерно такой же, какой бы образовался при падении исходного астероида с в пять раз меньшей кинетической энергией. Если бы разрушенный астероид, показанный на рис. 4, продолжал лететь, то расстояние между фрагментами увеличилось бы, их энергия за счет торможения уменьшилась, и они смогли бы, по-видимому, образовать кластер, в котором можно было бы выделить отдельные кратеры. К такому же эффекту должно привести уменьшение в 1.5–2 раза начального размера астероида D_0 .

На рис. 6 приведено сравнение зависимостей размера и энергии астероида от высоты в двумерном и трехмерном расчетах. До высоты примерно 30 км зависимости с хорошей точностью совпадают.

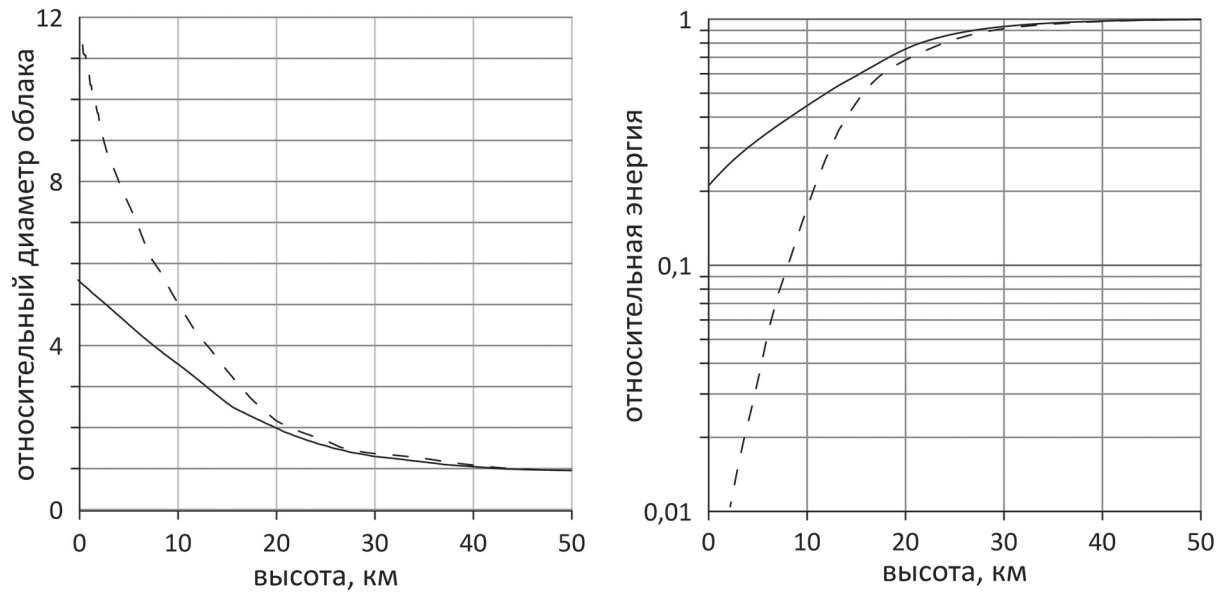


Рис. 6. Зависимость эффективного диаметра астероида (или облака фрагментов) D/D_0 и относительной энергии астероида (или облака фрагментов) E/E_0 от высоты полета. Сплошные кривые соответствуют трехмерному расчету, пунктирные – двумерному

На высоте ниже 30 км в двумерном случае астероид превращается в тор (см. рис. 1 работы [Шувалов, 2022]) из-за развития углубления на оси симметрии. В трехмерном случае астероид сохраняет форму сплошного диска до высоты около 20 км. Ниже 20 км в обоих случаях астероид испытывает сильную фрагментацию, но в двумерном случае образуется более или менее однородное облако фрагментов, а в трехмерном – несколько крупных и множество мелких фрагментов. Расчеты подтвердили приведенные во введении рассуждения о том, что в двумерном случае фрагменты астероида тормозятся быстрее из-за их специфической тороидальной формы в осесимметричной задаче. Это приводит к тому, что в момент удара по твердой поверхности в двумерном случае энергия фрагментов примерно в 30 раз меньше, чем в трехмерном. Наличие осевой симметрии приводит также к более быстрому расширению облака фрагментов.

Обсуждение и выводы

Проведенные с использованием квазижидкой модели трехмерные расчеты деформирования, фрагментации и торможения астероидов в атмосфере Венеры показали, что используемая в двумерных расчетах осевая симметрия приводит к тому, что разрушенные астероиды сильнее тормозятся и выделяют энергию на больших высотах, чем в более соответствующих реальности трехмерных расчетах. Полученная в трехмерных расчетах структура разрушенного астероида, состоящего из нескольких крупных и множества мелких фрагментов, по-видимому, может объяснить причину образования кратерных кластеров размером порядка 10 км (см., например, [Herrick and Phillips, 1994]) и темных и ярких пятен (*splotches*) размером порядка 100 км [Bondarenko, Kreslavsky, 2018; Ivanov, 2022], наблюдаемых на поверхности Венеры. Крупные фрагменты могут образовать кластер из близко расположенных ударных кратеров, а мелкие фрагменты вместе с окружающей их высокоскоростной струей плотного атмосферного газа могут существенно возмутить поверхность, что может вызвать образование «радио-темных» и «радио-светлых» пятен, которые хорошо видны на изображениях, построенных по отраженному радарному сигналу, полученных космическим аппаратом «Магеллан». Описанные выше результаты могут быть начальными данными для решения задачи о формировании кратерных кластеров и *splotches* на поверхности Венеры.

И в двумерных. и трехмерных 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.

Все фрагменты в описываемых расчетах имеют плотность, близкую к нормальной плотности твердого вещества метеороида ρ_m , между фрагментами пространство заполнено атмосферным газом (в действительности смесью паров и атмосферного газа). В расчетах [Korycansky et al., 2002; 2003] из-за сильного размазывания границ между веществом астероида и атмосферным газом фрагментированный астероид представляет собой непрерывное облако вещества астероида с плотностью от $0.001 \rho_m$ до ρ_m (см. рисунки 1–2 в [Korycansky et al., 2002]). Фрагменты представляют собой области повышенной плотности (но заметно меньшей, чем ρ_m в поздние моменты времени), окруженные менее плотным веществом астероида. Видимо, такая разница приводит к некоторому качественному различию между описываемыми результатами и расчетами [Korycansky et al., 2002; 2003]. Во-первых, в расчетах [Korycansky et al., 2002; 2003] меньшая масса вещества астероида долетает до поверхности. В наших расчетах долетает практически все, как и должно быть, если пренебречь испарением. Во-вторых, в наших расчетах в двумерной постановке астероид тормозится быстрее, чем в трехмерной, а в расчетах [Korycansky et al., 2002; 2003] наоборот. Количественно результаты сравнить трудно, поскольку в [Korycansky et al., 2002; 2003] рассматривалось торможение астероида специфической формы.

В заключение следует отметить, что трехмерные расчеты требуют очень много времени, почти на два порядка больше, чем двумерные. При рассмотрении торможения астероидов в плотной атмосфере Венеры ситуация облегчается тем, что вблизи поверхности разрушаются и тормозятся достаточно крупные тела, размером порядка километра, и шаг по пространству, который определяется размером падающего тела, может быть не очень маленьким. На Земле вблизи поверхности разрушаются тела размером порядка 50–100 м. Соответственно, шаг по пространству будет в 10–20 раз меньше, а время расчета во столько же раз больше.

Финансирование

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

Благодарности

Авторы благодарны анонимным рецензентам за внимательное прочтение статьи и ценные замечания.

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>
- Шувалов В.В. Численное моделирование торможения астероидов в атмосфере Венеры // *Динамические процессы в геосферах*. 2022. 14(2), с. 92–98. http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_92.
- 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>
- Korycansky D.G., Zahnle K.J., Mac Low M.-M. High-Resolution Simulations of the Impacts of Asteroids into the Venusian Atmosphere II: 3D Models // *Icarus*. 2002. 157, p. 1–23. <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6795>
- Korycansky D.G., Zahnle K.J., Mac Low M.-M. High-Resolution Simulations of the Impacts of Asteroids into the Venusian Atmosphere II: Further 3D Models // *Icarus*. 2003. 161, p. 244–261. <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6795>
- Crawford D.A. Models of fragment and fireball evolution. (1996). 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>
- Holsapple K.A. and Schmidt R.M.* On the scaling of crater dimensions 2. Impact processes // *Journal of Geophysical Research*. 1982. 87 (B3), p. 1849–1870. <https://doi.org/10.1029/JB087iB03p01849>
- 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
- 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>
- Stone J., Norman M.* ZEUS 2D: 2002. A radiation magnetohydrodynamic code for astrophysical flows in two space dimensions // *Astrophysical Journal Supplement*. 2002. 80, p. 753–790.
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1992ApJS...80..753S/doi:10.1086/191680
- 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>

3D NUMERICAL SIMULATION OF ASTEROID DECELERATION IN THE VENUS ATMOSPHERE

© 2023 V. V. Shuvalov^{1,*}, B. A. Ivanov¹

¹*Sadovsky 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.