

УДК 523.6

## УДАРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ВЕНЕРЕ КАК РЕЗУЛЬТАТ РАЗРУШЕНИЯ АСТЕРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ

© 2024 г. В. В. Шувалов\*, Б. А. Иванов

*Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия*

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

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 06.10.2023 г.

Принята к публикации 19.10.2023 г.

Плотная атмосфера Венеры способна разрушать тела километрового размера, такие как астероиды, создавая на поверхности следы различных видов. В то время как более крупные космические тела способны достигать поверхности, создавая ударные кратеры или поля рассеяния кратеров, меньшие тела эффективно передают начальную кинетическую энергию в атмосферу, что приводит к “атмосферному взрыву” на некоторой высоте. В этих случаях наиболее заметные следы на поверхности Венеры создаются атмосферными ударными волнами и потоком газа за ударными фронтами, отраженными от твердой поверхности. Переходные размеры ударников, разрушающихся в атмосфере, но достигающих поверхности, порождают кластеры кратеров. В работе приводятся первые результаты трехмерных расчетов разрушения каменных астероидов в атмосфере Венеры, указывающие на существенные отличия от простых двумерных осесимметричных расчетов.

**Ключевые слова:** астероидная опасность, численное моделирование, кратеры, Венера

**DOI:** 10.31857/S0320930X24020036, **EDN:** NUMDXI

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие ударных кратеров на поверхности Венеры под толщей атмосферы было предсказано теоретически (Петров, Стулов, 1975) и обнаружено с помощью радиолокационной съемки с КА Венера-15, -16 (Ivanov и др., 1986). В последующем космическом полете КА Magellan пространственное разрешение радиолокационных снимков поверхности было увеличено с 1–2 км/пиксел на снимках КА Венера-15, -16 до ~75 м/пиксел, что позволило обнаружить, помимо разнообразных геологических структур, ударные кратеры размером до нескольких км и круговые области, поверхности которых, скорее всего, были изменены атмосферной ударной волной от метеороидов, разрушившихся в плотной атмосфере Венеры.

Плотная атмосфера Венеры способна разрушать тела километрового размера, создавая на поверхности следы различных видов (Zahnle, 1992). Крупные космические тела способны достигать поверхности, создавая ударные кратеры или поля рассеяния кратеров, меньшие тела эффективно передают начальную кинетическую энергию в атмосферу, что приводит к “атмосферному взрыву” на некоторой высоте (Zahnle, 1992). В этих случаях наиболее заметные следы на поверхности Венеры создаются атмосферными

ударными волнами и потоком газа за ударными фронтами, отраженными от твердой поверхности (Bondarenko, Kreslavsky, 2018). Округлые радиолокационно-яркие и радиолокационно-темные зоны вокруг эпицентра были названы общим термином “splotches” – “пятна” (Schaber и др., 1992; Zahnle, 1992; Wood, 2000). В русскоязычном тексте их удобно называть “пятна-сплотчи”.

Если условно проследивать следы ударов на поверхности Венеры под толстым слоем атмосферы, то можно примерно описать их представление на снимках радиолокатора бокового обзора по мере увеличения размера ударника как ряд пятна-сплотчи – множественные кратеры – одиночные ударные кратеры. Удары, создавшие пятна-сплотчи, скорее всего отвечают полному разрушению ударников в атмосфере, кластеры кратеров – дроблению ударников на обломки, достигающие поверхности в виде роя, одиночные кратеры – ударам космических тел, “выживающих” при проходе через плотную атмосферу Венеры (Шувалов, 2022).

Похожие ряды мы наблюдаем на планетах земного типа с атмосферой – Земле и Марсе, но абсолютные размеры определяются плотностью атмосферы. На Земле наблюдается переход от бolidов, полностью разрушающихся в атмосфере, к полям рассеяния кратеров и далее к индивиду-

альным ударным кратерам при диаметрах кратеров порядка 1 км и размерах ударника порядка 100 м (Passey, Melosh, 1980; Шувалов, Трубецкая, 2007). На Марсе наблюдаются кластеры кратеров и индивидуальные кратеры диаметром до 50 м, свидетельствуя о различии в механических свойствах малых тел диаметром  $\sim 1$  м (Daubar и др., 2019; 2022).

Помимо изучения космических снимков и радарных изображений поверхности, необходимым подходом представляется анализ и моделирование прохода высокоскоростных космических тел через атмосферы планет. Взаимная калибровка наблюдений и теоретических моделей позволяет нам сделать обоснованные обобщения имеющихся данных для более полного представления о свойствах поверхностей планет и их ударной истории.

### СЛЕДЫ УДАРНЫХ СОБЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

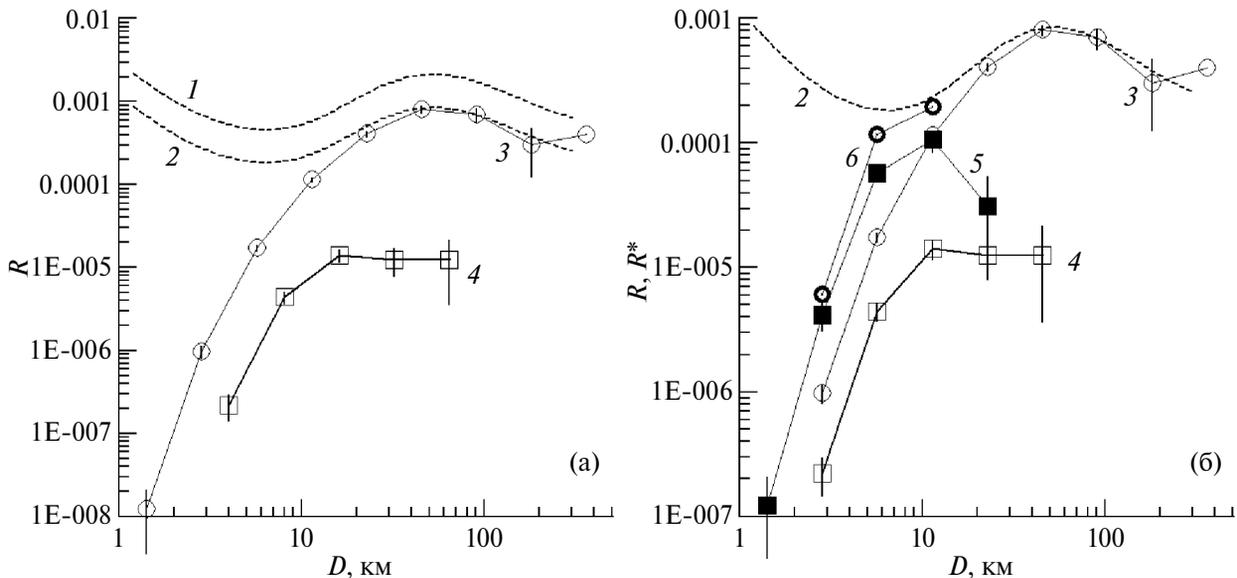
Популяция ударных кратеров на поверхности Венеры была описана в ряде работ по материалам КА Magellan (Phillips и др., 1991; Schaber и др., 1992). Позднее были опубликованы результаты более детального анализа диапазона ударных событий, в котором становится заметным экранирующее влияние атмосферы Венеры (Herrick, Phillips, 1994). Каталоги ударных событий в настоящее время доступны для всех кратеров и кластеров кратеров (<https://www.lpi.usra.edu/resources/vc/vchome.html>), а также для пятен-сплощей

и других объектов, связанных с ударными событиями в атмосфере Венеры (Wood, 2000). Последний каталог доступен на сайте Аризонского университета (<https://repository.arizona.edu/handle/10150/289162?show=full>).

Собственно ударные кратеры, видимые на радарных изображениях, имеют характерное распределение по диаметрам. Ввиду того, что в целом распределение ударных кратеров на планетных телах (с исключением влияния экранировки атмосферой) имеет степенной характер, близкий к  $N_{>D} \sim D^{-n}$  при  $2 < n < 3$ , многие детали этого распределения по размерам лучше видны в так называемом  $R$ -представлении ( $R$ -plot) (Arvidson и др., 1979):

$$R(D) = (N/S) \times D^3 / (D_{\text{right}} - D_{\text{left}}), \quad (1)$$

где  $N$  – число кратеров в области площадью  $S$  в интервале диаметров от  $D_{\text{left}}$  (минимальный диаметр) до  $D_{\text{right}}$  (максимальный диаметр),  $D = (D_{\text{right}} \times D_{\text{left}})^{1/2}$ . На рис. 1 показано  $R$ -представление распределения кратеров Венеры и Луны по диаметрам с шагом  $D_{\text{right}} = D_{\text{left}} \times 2^{1/2}$ . Простой перенос по вертикали лунного распределения  $R(D)$  для возраста поверхности 1 млрд лет приводит к совпадению с  $R(D)$  на Венере при возрасте  $\sim 0.4$  млрд лет. Эта простая оценка может быть уточнена за счет учета соотношения частоты столкновений (числа ударов на единицу площади поверхности за единицу времени) малых тел данного диаметра с Луной и Венерой (примерно 1:1.2), несколько большей средней скорости уда-



**Рис. 1.**  $R$ -представление распределения кратеров Венеры и Луны по диаметрам с шагом  $D_{\text{right}} = D_{\text{left}} \times 2^{1/2}$ : (а) – распределение на Венере по сравнению с аналогичным распределением лунных ударных кратеров (1 – лунные кратеры, накопленные за 1 млрд лет, 2 – то же распределение для возраста 0.4 млрд лет, 3 – все 942 ударных кратера Венеры из каталога USGS, 4 – кластеры ударных кратеров Венеры (89 кластеров, использован эффективный диаметр кратера  $D_{\text{eff}} = (D_1^3 + D_2^3 + \dots)^{1/3}$ ); (б) – те же данные, что и на панели (а) в сравнении с масштабированным распределением по размерам радиоярких (“светлых”) кругов и радиотемных (“темных”) колец/дуг  $R^*(D^*)$  (см. ниже уравнения 3 и 4), (5 – “светлые” круги-сплощцы с условным диаметром  $D^*$ , 6 – темные кольца/дуги с условным диаметром  $D^*$ ).

ров (17.2 км/с на Луне против 23.3 км/с на Венере) и меньшей силы тяготения ( $1.62 \text{ м/с}^2$  на Луне против  $8.9 \text{ м/с}^2$  на Венере) (Werner, Ivanov, 2015). В целом хорошей оценкой среднего возраста поверхности Венеры, сделанной по кратерам диаметром более 20 км, служит оценка  $500 \pm 200$  млн лет (Phillips и др., 1992), хотя различные авторы предлагали оценки в несколько более широком интервале величин – от 290 (+310, –95) млн лет (Strom и др., 1994) до ~700 млн лет (McKinnon и др., 1997) – см. недавний обзор (Herrick и др., 2023).

Общее представление о размерах ударников, которые могли бы образовать на Венере кратеры, можно получить из простых оценок, обобщающих накопленный опыт изучения ударных кратеров на планетах земного типа – см. обзор (Werner, Ivanov, 2015). В этом обзоре принято, что средняя скорость входа астероидов в атмосферу Венеры составляет 23.3 км/с (среднее по 95 известным астероидам с магнитудой  $H < 17$ , пересекающим орбиту Венеры). Пренебрегая для простоты разницей в ускорении свободного падения на поверхности ( $8.9 \text{ м/с}^2$  на Венере против  $9.81 \text{ м/с}^2$  на Земле) и предполагая количественное сходство в описании перехода от простых к сложным кратерам на этих планетных телах, предположим для сложных кратеров Венеры “земное” соотноше-

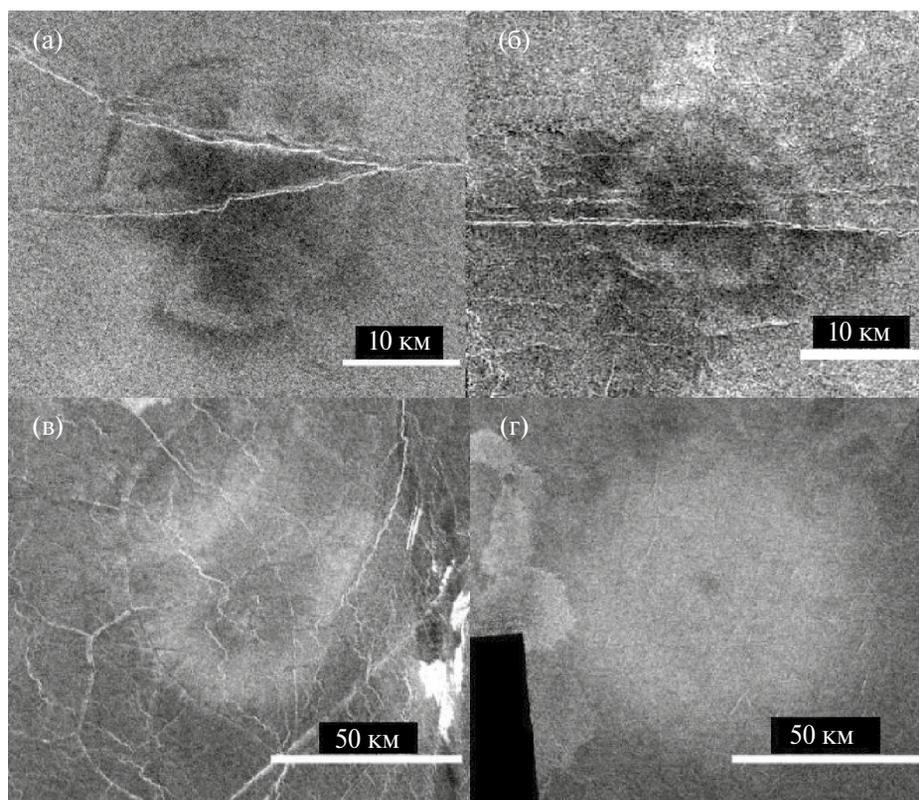
ние между диаметром ударника  $D_p$  (км), диаметром кратера по гребню вала  $D$  (км) и скоростью удара  $U$  (км/с)

$$D = 4 \left( D_p \times U^{0.58} \right)^{0.91}, \quad (2)$$

(Werner, Ivanov, 2015, уравнение 16).

При учете влияния атмосферы Венеры соотношение (2) применимо лишь для самых больших ударных кратеров. Для кратеров диаметром менее ~20–30 км становится заметным разрушение, торможение и абляция ударников и их обломков в атмосфере. Хотя число ударников возрастает по мере уменьшения их диаметров, разрушение в атмосфере сначала ударников на пологих траекториях, а затем и более круто падающих ударников, приводит к “завалу” распределения  $R(D)$  вплоть до полного исчезновения наблюдаемых кратеров с диаметрами менее ~1.5 км (рис. 1). Ударники, полностью разрушающиеся в атмосфере Венеры, оставляют на поверхности следы “воздушного взрыва”, когда наибольшие линейные размеры на поверхности имеют структуры, образовавшиеся, по-видимому, ударными волнами при падении на поверхность Венеры (Takata и др., 1995; Zahnle, 1992).

На рис. 2 показаны типичные следы ударов тел, проходящих через атмосферу Венеры. Рас-



**Рис. 2.** Примеры “отпечатков” воздушной ударной волны на поверхности Венеры без видимых ударных кратеров в центре. “Темные” кольца: (а) – 267.4E, 11.8S; (б) – 314.4E, 32.9N. “Светлые” круги: (в) – 178.1E; 1.4S, (г) – 156.4E, 4N. Изображения построены с помощью программы JMars (<https://jmars.asu.edu/>). Цифры в описании означают координаты в системе “восточная долгота” (“E”) и “широта” (“N”/“S” – “северная”/“южная”).

пределения по размерам структур, показанных на рис. 2, иллюстрируются на рис. 16.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РАЗМЕРАМ “ТЕМНЫХ” КОЛЕЦ И “СВЕТЛЫХ” ПЯТЕН-СПЛОТЧЕЙ

По всем признакам кольца и пятна-сплотчи считаются поверхностными структурами, образованными воздушными ударными волнами, генерируемыми при полном разрушении метеороидов в атмосфере Венеры (Bondarenko, Kreslavsky, 2018; Takata и др., 1995; Zahnle, 1992). С помощью пересмотренного каталога распределение по размерам этих структур было представлено в докладе (Ivanov, 2022). Чтобы сопоставить данные по их площадной плотности с явными ударными кратерами, мы сравнили  $R$ -представление их числа с данными по явным ударным кратерам (рис. 16). Поскольку кратеры и кольца/пятна по-разному соотносятся с изначальным размером ударников, их образовавших, мы предположили (в “нулевом” приближении), что их размеры так или иначе связаны с энергией ударника и могут быть проанализированы в предположении, что эти структуры в  $K_D$  раз превышают диаметр кратера (эффективный диаметр кластера кратеров,  $D^*$ ) — этим мы “смещаем” точки по горизонтали на рис. 16. Тогда “эффективный” диаметр кратера, соответствующий пятну/кольцу диаметром

$$D^* = D_{\text{spotch/ring}} / K_D. \quad (3)$$

В отличие от ударных кратеров, нарушения поверхности Венеры ударными волнами и взрывными течениями в приповерхностном слое вряд ли затрагивают глубинные породы и, скорее всего, имеют меньшее время жизни. Это предположение может быть подтверждено постепенным исчезновением характерных следов смещения ветром облаков выбросов мелких частиц (“парабол” и “темных” гало), видимых только у части малых ударных кратеров (Basilevsky, Head, 2002; Schaller, Melosh, 1998). Как подсчитали Basilevsky и др. (2003), в диапазоне диаметров  $5 \text{ км} < D < 16 \text{ км}$  только ~1% кратеров имеют “параболы” и ~35% — “темное” гало. Чтобы сравнить число кратеров и число подозреваемых взрывных следов, мы оценили коэффициент  $K_N$ , на который нужно разделить число взрывных следов, чтобы совместить их  $R$ -число с числом видимых кратеров:

$$R^* = R / K_N. \quad (4)$$

В целом по всей поверхности Венеры (без разбиения по типам местности) такой простой подход приводит к следующим оценкам:

- для “темных” колец/дуг  $K_D \sim 4$ ,  $K_N \sim 50$ ;
- для “светлых” кругов-сплотчей  $K_D \sim 8$ ,  $K_N \sim 10$ .

“Приведенные” таким образом  $R$ -распределения для колец/пятен показаны на рис. 16. Отсюда можно сделать осторожный вывод о том, что число атмосферных событий, образующих “светлые” круги и “темные” кольца/дуги, на единицу площади может быть на порядок больше чем число обнаруженных кратеров вследствие “старения” этих приповерхностных образований. Если наша аналогия верна, то диаметр темных колец примерно в 4 раза превышает диаметр кратера, который образовался бы не до конца разрушенным метеороидом, долетевшим до поверхности, а диаметр кругов-сплотчей примерно на порядок превышает диаметр такого условного кратера.

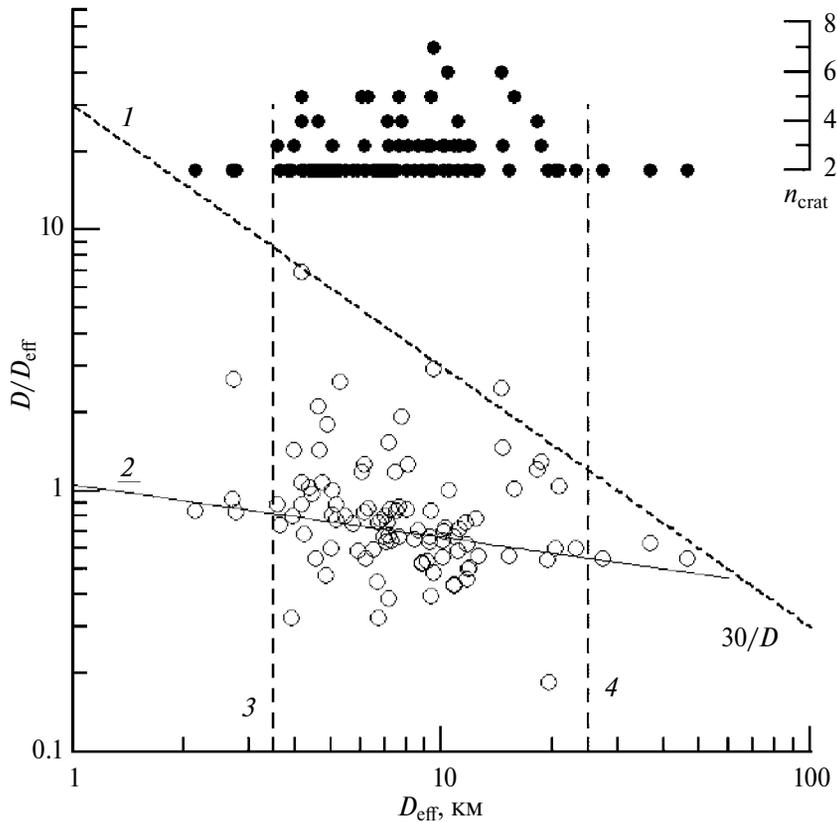
Эти грубые оценки в будущем могут быть улучшены при наличии более адекватных моделей разрушения астероидов разных типов в атмосфере Венеры. Одним из ограничителей может быть известный по безатмосферным телам темп образования ударных кратеров.

### ДВОЙНЫЕ КРАТЕРЫ И КЛАСТЕРЫ КРАТЕРОВ НА ВЕНЕРЕ

В диапазоне эффективных диаметров от 2 до 16 км доля ударов, образующих двойные или множественные кратеры, составляет примерно 25%, снижаясь при больших диаметрах (рис. 1). Отсюда можно предположить, что примерно четверть ударников разрушается в атмосфере с образованием нескольких больших обломков. Остальные  $\frac{3}{4}$  ударных структур образованы или роем обломков, движущихся плотным облаком, с размером при ударе, не превышающим образующийся одиночный ударный кратер, или одним крупным фрагментом начального ударника, выжившим при прохождении атмосферы. На рис. 3 показана зависимость максимального удаления малого кратера  $L$  (одиночного в паре или дальнего в кластере кратеров) от центра главного кратера от эффективного диаметра пары (или кластера) кратера  $D_{\text{eff}}$ . Для компактности показано отношение  $L/D_{\text{eff}}$ .

Как видно на рис. 3, отчетливые пары и множественные кратеры на месте ударов в основном встречаются в диапазоне эффективных диаметров от ~2.5 км до ~25 км. За пределами этого диапазона наблюдается всего несколько ударных структур. Верхним пределом наблюдаемой дальности расхождения обломков исходного ударника можно считать величину порядка 30 км (пунктирная прямая 1,  $L/D_{\text{eff}} \sim 30/D$ , на рис. 3). Более подробно парные кратеры на Венере описаны в работе (Cook и др., 2003).

Для многих парных кратеров видимая на радарных изображениях картина выбросов позволяет оценить направления подлета ударников (см.



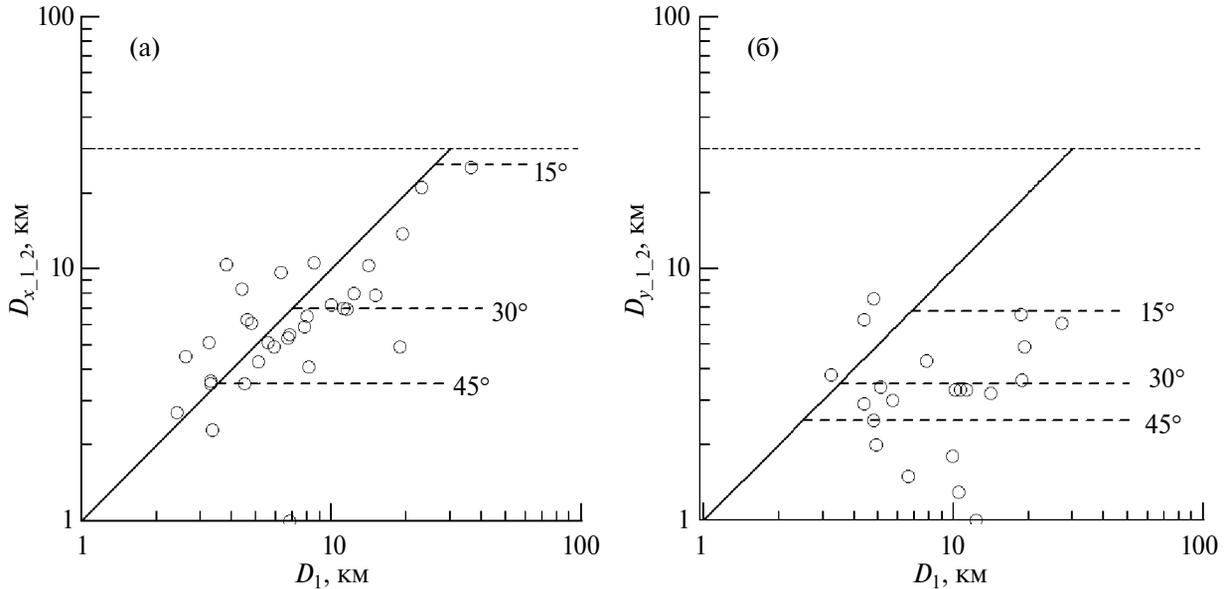
**Рис. 3.** Зависимость от эффективного диаметра пары (или кластера) кратеров,  $D_{\text{eff}}$ , отношения  $L/D_{\text{eff}}$ , где  $L$  – максимальное удаление центра наименьшего кратера (в паре или кластере) от центра главного кратера. В верхней части рисунка черными точками показано число кратеров, распознающихся на месте удара. Пунктир (1) – видимая линия ограничения расхождения  $L \sim 30 D_{\text{eff}}$ . Линия регрессии 2 соответствует соотношению (3). Вертикальные пунктирные линии ограничивают диапазон эффективных диаметров структур от  $\sim 2.5$  км (3) до  $\sim 25$  км (4).

базу данных <https://www.lpi.usra.edu/resources/vc/vchome.html>). На рис. 4 для парных кратеров показана зависимость удаления центра второго кратера от центра первого (наибольшего) кратера по направлению подлета ударников (рис. 4а) и в перпендикулярном направлении (рис. 4б).

Сплошная линия на рис. 4а и 4б соответствует двойным кратерам, с центрами на расстоянии, равном диаметру наибольшего кратера  $D_1$ . В простых моделях расхождения обломков метеороида в атмосфере после разделения на два обломка (Passey, Melosh, 1980) считается, что в результате воздействия аэродинамических сил за короткое время после разлома обломки приобретают некоторую боковую скорость в поперечном траектории направлении и расходятся с некоторой скоростью  $v_T$ . Для оценки максимальной величины расхождения предполагается, что вектор скорости расхождения перпендикулярен вектору скорости движения в атмосфере. Пусть время полета от точки разлома до поверхности равно  $t^*$ . Тогда расстояние между обломками при ударе о поверхность составит примерно  $S_{\text{max}} \sim v_T \times t^*$  (точное время и скорость зависят от торможения в атмосфере). При произвольной пространственной

ориентации направления расхождения обломков огибающая их возможного положения в плоскости, перпендикулярной направлению полета, аппроксимируется окружностью диаметром  $S_{\text{max}}$ . Проекция этой окружности на плоскость поверхности является эллипсом с малым диаметром  $S_y = S_{\text{max}}$  и с большим диаметром (вдоль проекции траектории на поверхность)  $S_x = S_{\text{max}}/\sin\theta$ , где  $\theta$  – угол наклона траектории полета к горизонту.

На рис. 4а и 4б пунктиром показаны наблюдаемые расстояния между точками падения обломков (центров парных кратеров) и оценки для углов падения  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$ . Как видно на рис. 4, во многих случаях расхождение обломков на поверхности гораздо меньше диаметра наибольшего кратера, поэтому можно предположить, что при расхождении, меньше максимального теоретического, на имеющихся радарных изображениях можно не отличить индивидуальные кратеры от падения отдельных обломков. Тогда содержащиеся в каталоге число парных и число множественных кратеров могут включать лишь часть ударных событий, в которых при имеющемся пространственном разрешении 75 м/пиксель можно различить индивидуальные кратеры. Весьма воз-



**Рис. 4.** Для парных кратеров показана зависимость удаления центра второго кратера от центра первого (наибольшего) кратера  $D_1$ : (а) — вдоль предполагаемого направления полета ударников; (б) — в перпендикулярном направлении. Точечные горизонтальные линии соответствуют верхнему пределу рассеяния кратеров в кластерах  $\sim 30$  км, показанных на рис. 3. Толстая наклонная прямая соответствует расстоянию центров кратеров в паре, равному диаметру наибольшего кратера. Пунктирные линии соответствуют ожидаемому расхождению двух фрагментов ударника с траекторией падения с наклоном  $45^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $15^\circ$ .

можно, что одиночные кратеры в диапазоне диаметров 2.5–25 км (рис. 3) созданы разрушающимися в атмосфере метеороидами, обломки которых не разошлись достаточно далеко для образования индивидуальных кратеров. По этой причине исследование процесса расхождения обломков метеороидов в атмосфере Венеры нуждается в дальнейшем анализе.

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ АСТЕРОИДОВ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ВЕНЕРЫ

Плотная атмосфера Венеры заметно влияет даже на фрагменты размером порядка километра (Kogucansky и др., 2002; Шувалов, 2022). В работе (Шувалов, 2022) на основе численных двумерных расчетов были получены оценки энергии и эффективного диаметра астероида или облака его фрагментов после пролета через атмосферу Венеры для астероидов размером от 1 до 6 км. Развивая результаты Kogucansky и Zahnle (2003), Шувалов и Иванов (2023) показали, что двумерные расчеты в предположении осевой симметрии задачи приводят к торможению разрушенных астероидов в атмосфере на высотах, больших чем в трехмерных расчетах. Соответственно, энергия выделяется в атмосфере на большей высоте.

Как уже отмечали Шувалов и Иванов (2023), численное решение задачи торможения в атмосфере с разрушением ударника в осесимметрич-

ной постановке приводит к ряду искусственных эффектов:

1. Любое возмущение, возникающее на каком-либо расстоянии от оси симметрии, имеет тороидальную форму и генерирует сходящуюся волну сжатия, которая усиливается при приближении к оси симметрии. На оси возникает сильное возмущение (эффект кумуляции), которое может быть значительно сильнее начального и может вызывать образование нефизичных, направленных вдоль оси струй.

2. В численных решениях схемная вязкость сглаживает резкие градиенты потоков тем сильнее, чем больше скорость потока. В осесимметричной постановке на оси симметрии радиальная скорость равна нулю, уменьшая схемную вязкость, что ведет к искусственным эффектам на оси.

3. В осесимметричной постановке разлетающиеся “обломки” фрагментированного тела удаляются от оси симметрии в виде торов с осью вращения вдоль траектории падающего тела. В качестве примера на рис. 5 показана картина разрушения астероида при торможении в двумерной осесимметричной постановке. На панели (а) показано двумерное распределение плотности в плоскости, проходящей через траекторию тела, на панели (б) — соответствующая ему трехмерная картинка. Сохранение массы (объема) “тороидального обломка” при удалении от оси симметрии приводит к тому, что “мидель” тора увеличивается. Соответственно, усиливается его

торможение в набегающем потоке. Это может существенно изменить высоту и характер выделения энергии в атмосфере, а также ударное воздействие на поверхность.

4. В двумерной постановке нельзя адекватно моделировать образование кластеров кратеров на поверхности, описанных в предыдущем разделе.

Ранее трехмерная постановка задачи о движении фрагментов метеороида в трехмерной постановке рассматривалась в цикле работ (Korycansky, Zahnle, 2003; Korycansky и др., 2002) с помощью программы ZEUS (Stone, Norman, 1992). Это чисто эйлерова программа с существенным сглаживанием границ между твердым веществом и газом. Из-за схемного “размазывания” происходит искусственное занижение плотности вещества на границах, ведущее к уменьшению плотности твердого вещества в ячейках, что влияет на торможение обломков астероида. В итоге в работах Korycansky и др. (2002) и Korycansky, Zahnle (2003) качественно воспроизводилось торможение в атмосфере и соответствующее уменьшение эффективного размера кратера, но не описывалось образование кластеров кратеров.

В нашей предыдущей работе (Шувалов, Иванов, 2023) опубликован расчет разрушения в атмосфере Венеры ударника диаметром 1.5 км в трехмерной постановке с более аккуратным описанием границ твердого вещества и атмосферы, который показал, насколько отличаются результаты в трехмерной и осесимметричной постановках. Данная работа представляет дальнейшее развитие этих исследований: рассматри-

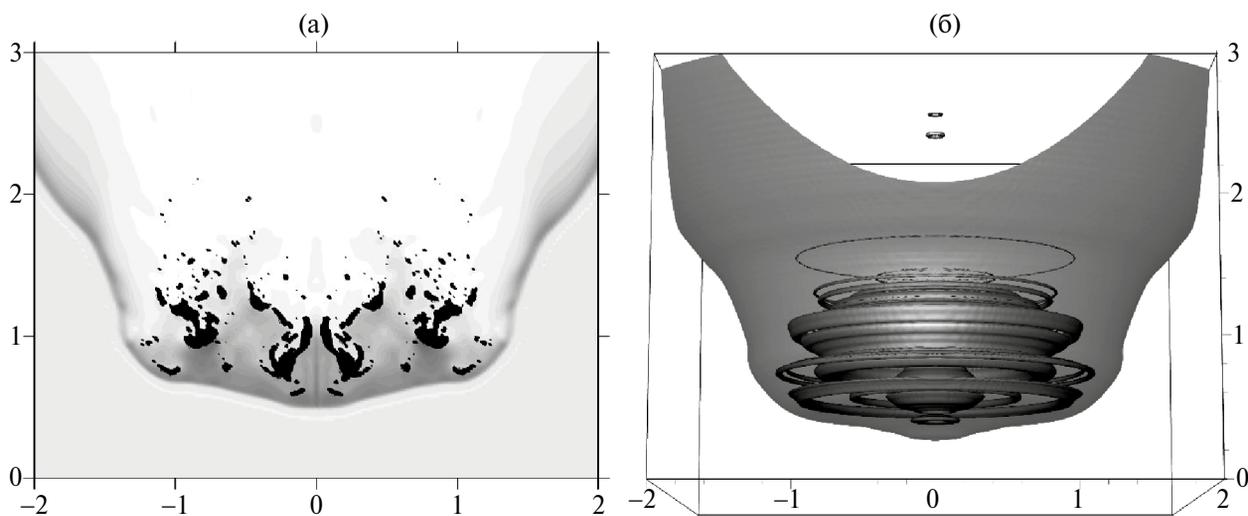
вается падение астероидов размером от 0.5 до 3 км под углом  $90^\circ$  и  $45^\circ$  и их воздействие на поверхность планеты.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПО ПРОГРАММЕ SOVA

Учитывая особенности использованной в работе трехмерной версии алгоритма SOVA (Shuvalov, 1999), задача решалась в квазижидкостной постановке – учитывалось только инерциальное удержание более плотного вещества ударника. Примеры использования этого метода приведены, например, в работе (Shuvalov и др., 2014). Ранее было показано, что это приближение применимо для больших ударников, начинающих заметно деформироваться только при высоких нагрузках в нижних слоях атмосферы (Svetsov и др., 1995).

Постановка задачи предполагала внедрение сферического ударника (дунит плотностью  $3.32 \text{ г/см}^3$ ) со скоростью 20 км/с в атмосферу Венеры с профилем давления и температуры по модели (Moroz, 1981). Атмосфера описывалась как идеальный газ с показателем адиабаты 1.3. Свойства вещества метеороида задавались по модели уравнения состояния ANEOS (Thompson, Lauson, 1972).

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 параллельно основной диагонали куба



**Рис. 5.** Полученные в двумерном расчете двумерная и трехмерная картинки облака фрагментов, образующегося при падении астероида диаметром 1 км, падающего под углом  $45^\circ$  в атмосфере Венеры: (а) – в плоскости, проходящей через траекторию, серым цветом показано распределение относительной плотности атмосферного газа (чем темнее, тем выше плотность), черным – фрагменты астероида; (б) – то же облако фрагментов показано в трехмерной геометрии (светло-серая поверхность соответствует фронту ударной волны, темно-серым цветом показано вещество разрушенного астероида). Рисунки соответствуют высоте 15 км. По осям координат указаны расстояния в километрах.

(чтобы направления  $x$ ,  $y$  и  $z$  были равноправны), соединяющей левую нижнюю и правую верхнюю вершины куба (см. рис. 6). 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 этой области размером  $220 \times 220 \times 220$  ячеек вокруг метеороида размер ячейки был равен  $D_0/40$ , где  $D_0$  – начальный диаметр метеороида. По мере удаления от левого нижнего угла размер ячеек постепенно увеличивался, максимальный размер расчетной области составлял  $20 \times D_0$  вдоль всех осей. В начальный момент метеороид находился на высоте 70 км, где его деформация от аэродинамической нагрузки еще пренебрежимо мала.

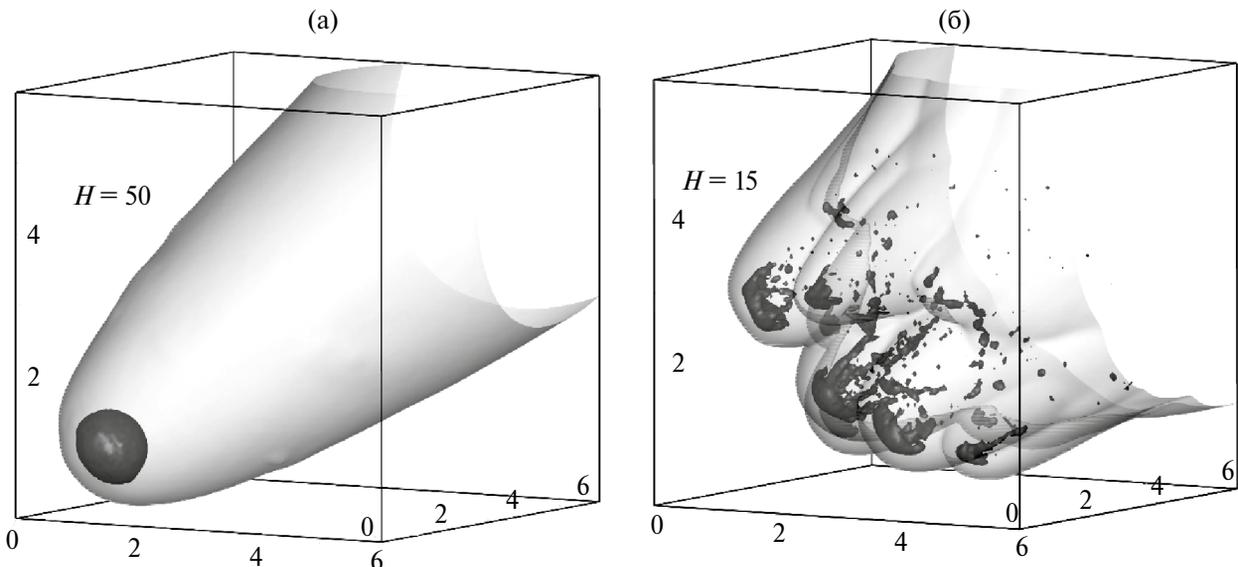
Основное внимание уделялось процессу прохождения через атмосферу, но один вариант был просчитан до удара фрагментов о твердую поверхность. Для этого в момент касания головной ударной волны поверхности задача переводилась в режим неподвижной мишени. Конденсированное полупространство так же описывалось как дунит.

Для иллюстрации результатов рассмотрим вариант расчета, в котором астероид с начальным диаметром 1 км падает под углом  $45^\circ$ . На рис. 6 показана форма астероида и окружающей его баллистической ударной волны на высотах 50 и 15 км. На высоте 50 км астероид начал слегка деформироваться, его скорость близка к начальной, 20 км/с. На высоте 15 км астероид разрушился, образовалось несколько крупных фрагментов и много мелких. При этом фрагменты еще окружены общей ударной волной, хотя на ее фронте

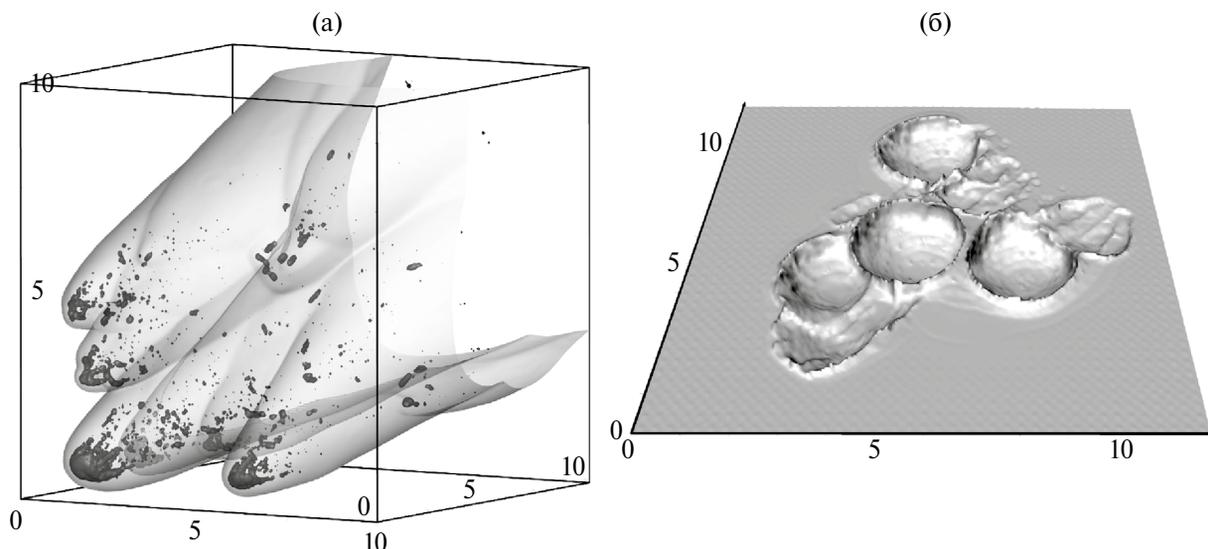
выделяются выпуклости, соответствующие крупным фрагментам. Скорость астероида к этому моменту уменьшилась до 14 км/с. Структура облака фрагментов на высоте 15 км сильно отличается от полученной в двумерном расчете и показанной на рис. 5.

На рис. 7 показана структура облака фрагментов в момент касания поверхности головной ударной волны. К моменту удара по поверхности фрагменты летят независимо друг от друга, с независимыми головными волнами. Скорость лидирующего наибольшего фрагмента составляет около 7 км/с. Однако средняя (по всем фрагментам с учетом их массы) скорость примерно в два раза меньше. Соответственно, кинетическая энергия облака фрагментов в момент удара по твердой поверхности составляет 3.5% от начальной энергии астероида.

В нашей предыдущей работе (Шувалов, Иванов, 2023) для оценки возможной конфигурации кратерного кластера, образующегося при падении разрушенного астероида, было построено распределение по поверхности энергии, приносимой фрагментами. В данной работе мы рассчитали распределение по поверхности энергии и массы, приносимых фрагментами, и использовали это распределение для оценки размеров кратеров. На рис. 7 показано образующееся кратерное поле через 5 с. после достижения головной ударной волны поверхности планеты. В этот момент уже сформировались переходные кратеры. Стадия модификации (обрушение кратеров) не рассчитывалась из-за слишком большого времени, необходимого для таких расчетов. В целом полученный кратерный кластер размером в попе-



**Рис. 6.** Деформация и разрушение астероида с начальным диаметром  $D_0=1$  км, падающего под углом  $45^\circ$  в венерианской атмосфере: (а) – на высотах 50 км; (б) – 15 км. Светло-серым цветом показана ударная волна в атмосфере, темно-серым – астероид и его фрагменты. Расстояния по осям указаны в километрах.



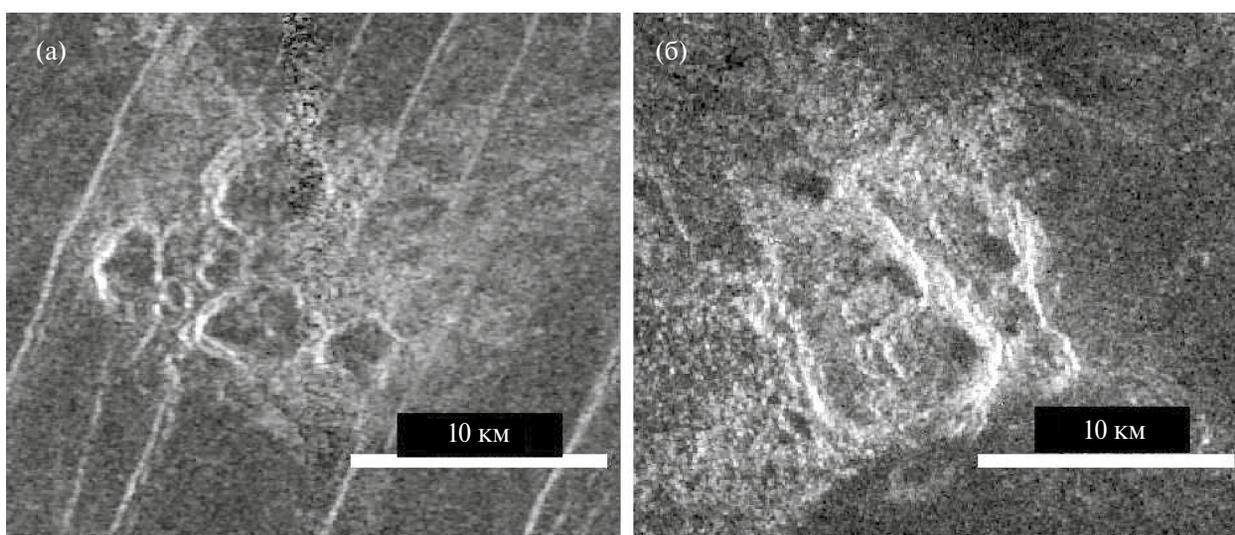
**Рис. 7.** Образующееся кратерное поле через 5 с. после достижения головной ударной волной поверхности планеты: (а) – облако фрагментов того же астероида, что и на рис. 6, и окружающая его ударная волна непосредственно перед ударом по твердой поверхности (светло-серым цветом показана ударная волна, темно-серым – вещество астероида); (б) – кластер кратеров, образовавшихся после удара. Расстояния указаны в километрах.

речнике около 10 км качественно похож на кластеры кратеров, наблюдающиеся на поверхности Венеры – два примера таких кластеров показаны на рис. 8. Подробные наблюдательные данные о кластерах кратеров на Венере можно найти, например, в работе (Herrick, Phillips, 1994).

На рис. 9 показаны зависимости от высоты относительной энергии и эффективного диаметра астероида (или облака его фрагментов) для астероидов разного начального диаметра  $D_0$ , падающих под углом  $45^\circ$ . Эффективный диаметр определялся как диаметр цилиндра, ось которого совпадает с главной диагональю куба, параллельной траектории, и внутри которого сосредоточе-

но 95% массы астероида. Даже трехкилометровые астероиды теряют 49% своей энергии при пролете через атмосферу и заметно деформируются (расплющиваются), их диаметр увеличивается примерно в 2 раза. Астероиды размером 0.8 км и меньше теряют практически всю свою энергию (более 99%) при пролете через атмосферу. Максимальный диаметр облака фрагментов, которое еще способно образовать кратерное поле, составляет  $10\text{--}12 D_0$ .

На рис. 10 сравниваются результаты трехмерных и двумерных модельных расчетов (Шувалов, 2022), которые подтверждают приведенные выше (и ранее – в работе (Шувалов, Иванов, 2023))



**Рис. 8.** Радарные изображения кластеров кратеров на Венере: (а) – безымянный кластер, 126 в. д., 46.3 ю. ш. (№ 642 в каталоге); (б) – кластер Qulzhan, 165.4 в. д., 23.5 с. ш. (№ 610 в каталоге). Изображения построены с помощью программы JMars (<https://jmars.asu.edu/>).

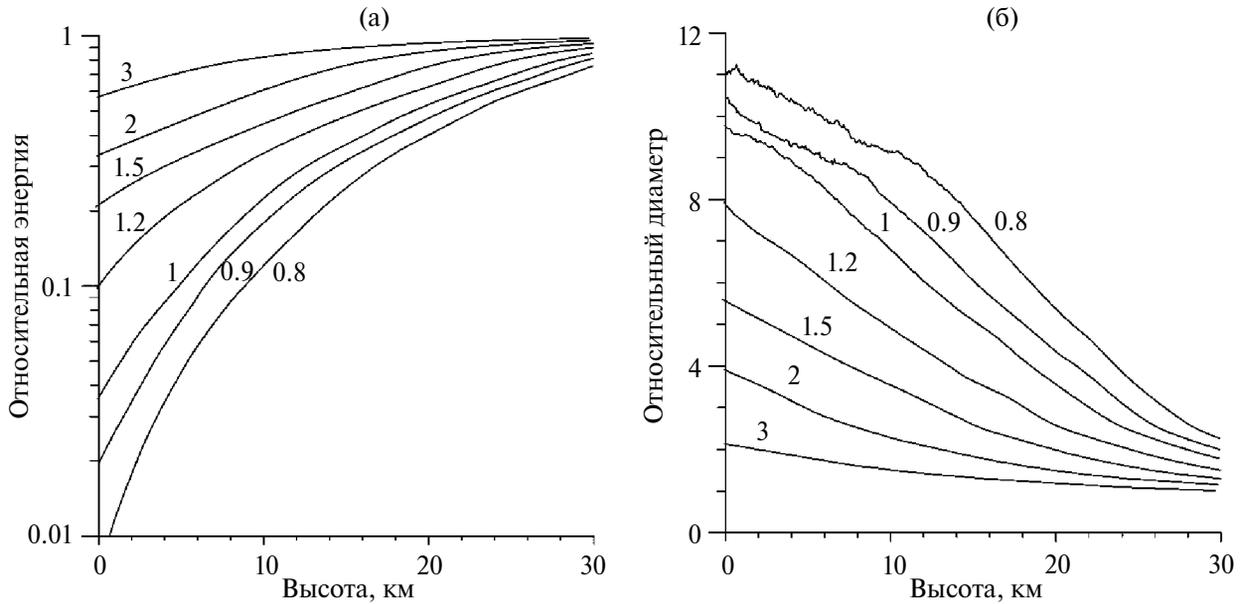


Рис. 9. Зависимости от высоты при падении астероидов разного диаметра  $D_0$  (на графиках около каждой кривой указаны значения  $D_0$  в километрах) под углом  $45^\circ$ : (а) – энергии астероида  $E/E_0$ ; (б) – эффективного диаметра астероида  $D/D_0$ .

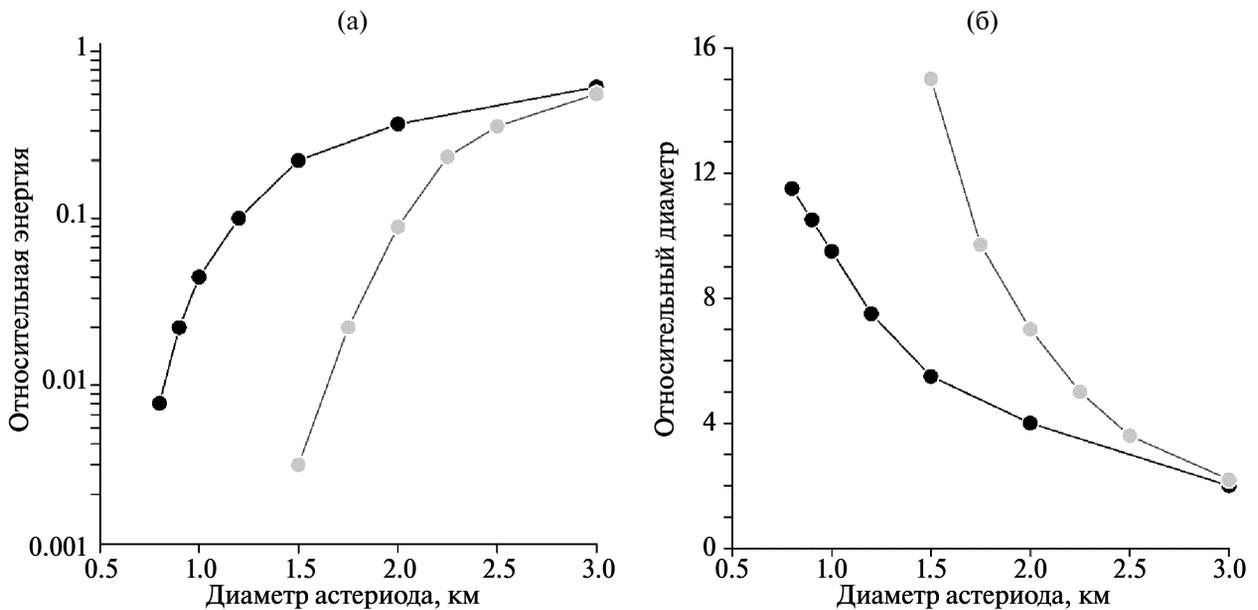
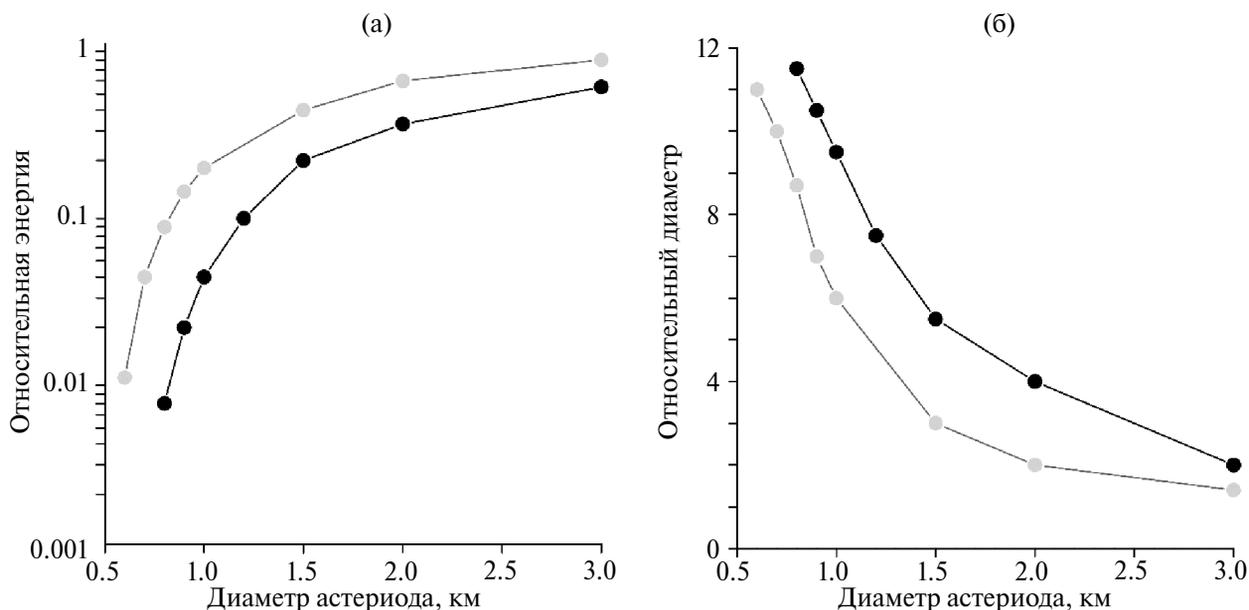


Рис. 10. Зависимости от начального диаметра  $D_0$  при угле наклона траектории  $45^\circ$ : (а) – относительной энергии  $E/E_0$ ; (б) – относительного эффективного диаметра  $D/D_0$  астероида (или облака его фрагментов) в момент удара по твердой поверхности. Черные кривые показывают результаты трехмерных расчетов, серые – результаты двумерных расчетов (Шувалов, 2022).

суждения о недостатках двумерных осесимметричных расчетов. Из двумерных расчетов следует, что уже полуторакилометровый астероид теряет более 99% энергии в атмосфере Венеры, трехмерное моделирование показывает, что даже астероид диаметром 0.9 км сохраняет 2% своей кинетической энергии. А облако фрагментов километрового астероида, сохраняющее около 4% начальной кинетической энергии, приводит

к образованию кластера из нескольких кратеров размером 2–3 км.

Для начального анализа влияния угла входа в атмосферу на рис. 11 сравниваются результаты расчета для двух углов наклона траектории:  $90^\circ$  (вертикальный удар) и  $45^\circ$ . Как и следовало ожидать, при вертикальных ударах астероиды теряют меньше энергии при пролете через атмосферу. И при вертикальных ударах, и при ударах под



**Рис. 11.** Зависимости от начального диаметра  $D_0$  при угле наклона траектории  $45^\circ$  (черные кривые) и  $90^\circ$  (серые кривые): (а) — относительной энергии  $E/E_0$ ; (б) — относительного эффективного диаметра  $D/D_0$  астероида (или облака его фрагментов) в момент удара по твердой поверхности.

углом  $45^\circ$  максимальный диаметр облака фрагментов, которое еще способно образовать кратерное поле, составляет  $10\text{--}12 D_0$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ ранее опубликованных каталогов кратеров, кластеров кратеров и пятен-сплощечей на поверхности Венеры показывает закономерное изменение их обилия по мере уменьшения размеров ударника. Обращает на себя внимание тот факт, что оцениваемые по различным моделям размеры ударников перекрываются для всех трех видов следов ударов. Скорее всего, такое перекрытие объясняется различиями в плотности, пористости и начальной нарушенности структуры тел различного состава и происхождения. Впервые такие различия обсуждались в работе (McKinnon и др., 1997), но более детальное описание свойств метеороидов, оставивших следы на поверхности Венеры, требует улучшения имеющихся моделей.

В диапазоне диаметров ударных кратеров от  $\sim 2$  км до  $\sim 8$  км данные КА Magellan позволяют предположить, что  $\sim 25\%$  обнаруженных ударных структур являются двойными кратерами и кластерами кратеров. В диапазоне от  $\sim 8$  км до  $\sim 64$  км доля парных и множественных кратеров снижается от  $10\%$  до  $1\%$ . То, что  $75\%$  и более кратеров являются одиночными, может означать, что или часть ударников остается сконцентрированной в виде «одного тела», или в большинстве случаев обломки разрушенного в атмосфере ударни-

ка не расходятся далеко друг от друга и образуют видимый единый кратер, как это предполагалось ранее (Artemieva, Pierazzo, 2011; Schultz, Gault, 1985). Хотя вторая альтернатива представляется более вероятной, на данном этапе следует глубже исследовать все возможности.

За последние годы возможности численного моделирования возросли, и теперь мы можем вернуться к ранее поставленным вопросам с новыми методиками моделирования. Проведенные с использованием трехмерной квазижидкой модели расчеты деформирования, фрагментации и торможения астероидов в атмосфере Венеры показали, что используемая в двумерных расчетах осевая симметрия (и, соответственно, тороидальная форма фрагментов после разрушения) приводит к более сильному торможению разрушенных астероидов. В более близких к реальности трехмерных расчетах астероиды тормозятся и выделяют энергию на меньших высотах, чем в двумерных расчетах. Показано, что полученная в трехмерных расчетах структура разрушенного астероида, перед ударом по твердой поверхности состоящего из нескольких крупных и множества мелких фрагментов, может приводить к формированию кратерных кластеров, ранее описанных для Венеры в работе (Herrick, Phillips, 1994).

В наших расчетах не учитывалось испарение астероида и его фрагментов под действием излучения ударно-нагретого атмосферного газа. В случае падения Тунгусского космического тела (ТКТ) именно такое испарение обсуждалось как причина полного отсутствия найденных метеори-

тов в районе катастрофы (Svetsov, 1996). Однако в рассматриваемом случае Венеры масса долетающих до поверхности астероидов на 3–4 порядка больше массы ТКТ, время полета в атмосфере примерно такое же, поэтому, скорее всего, основная масса фрагментов не испарится. Тем не менее этот вопрос требует уточнения.

Результаты наших расчетов качественно отличаются от полученных в (Korycansky, Zahnle, 2003; Korycansky и др., 2002) с использованием чисто эйлерового кода ZEUS (Stone, Norman, 1992). Во-первых, в этих эйлеровых расчетах меньшая масса вещества астероида долетает до поверхности. В наших расчетах долетает практически вся начальная масса, как и должно быть, если пренебречь испарением, которое в цитируемых работах тоже не учитывается. Во-вторых, в наших расчетах в двумерной постановке астероид тормозится быстрее, чем в трехмерной, а в расчетах (Korycansky, Zahnle, 2003; Korycansky и др., 2002) – наоборот. Объясняется это различие, по-видимому, точностью описания границ между веществом астероида и атмосферным газом. В расчетах (Korycansky, Zahnle, 2003; Korycansky и др., 2002) в начальный момент времени астероид имеет плотность, близкую к нормальной плотности твердого вещества метеороида  $\rho_m$ . В процессе расчета из-за сильного размазывания границ между веществом астероида и атмосферным газом, неизбежного в чисто эйлеровой методике, фрагментированный астероид представляет собой непрерывное облако вещества астероида с плотностью от  $0.001\rho_m$  до  $\rho_m$  (см. рис. 1–2 в Korycansky и др., 2002). Фрагменты представляют собой области повышенной плотности (но заметно меньшей, чем  $\rho_m$  в поздние моменты времени), окруженные менее плотным веществом астероида. В наших же расчетах границы между веществом астероида и атмосферным газом описываются явно. Поэтому астероид и фрагменты во все моменты времени имеют плотность, близкую к нормальной плотности твердого вещества метеороида  $\rho_m$ , между фрагментами пространство заполнено атмосферным газом (в действительности – смесью паров и атмосферного газа). Количественно результаты сравнить трудно, поскольку (Korycansky, Zahnle, 2003; Korycansky и др., 2002) рассматривали торможение астероида специфической формы.

Таким образом, в данной работе показано, что для атмосферы Венеры адекватное описание задачи перехода от “нормального” ударного кратерообразования к чисто атмосферным “взрывам”, когда изменение свойств поверхности происходит в основном из-за отражения воздушной ударной волны, представляет определенные трудности как для численного моделирования, так и для количественной интерпретации ударных струк-

тур, наблюдаемых на радарных изображениях. Нам представляется актуальным продолжить исследования в ожидании новых результатов планируемых космических полетов к Венере (Zasova и др., 2020; 2021).

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Петров Г.И., Стулов В.П.* Движение больших тел в атмосфере планет // Космич. исслед. 1975. № 13. С. 587–594.
- Шувалов В.В., Трубецкая И.А.* Гигантские болиды в атмосфере Земли // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 3. С. 241–251. (*Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A.* Aerial bursts in the terrestrial atmosphere // Sol. Syst. Res. 2007. V. 41. № 3. P. 220–230).
- Шувалов В.В.* Численное моделирование торможения астероидов в атмосфере Венеры // Динамич. процессы в геосферах. 2022. Т. 14. № 2. С. 92–98.
- Шувалов В.В., Иванов Б.А.* Трехмерное моделирование торможения астероида в атмосфере Венеры // Динамич. процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 1. С. 54–62.
- Artemieva N., Pierazzo E.* The Canyon Diablo impact event: 2. Projectile fate and target melting upon impact // Meteoritics and Planet. Sci. 2011. V. 46. № 6. P. 805–829.
- Arvidson R.E., Boyce J., Chapman C., Cintala M., Fulchignoni M., Moore H., Neukum G., Schultz P., Soderblom L., Strom R., Woronow A., Young R.* Standard techniques for presentation and analysis of crater size-frequency data // Icarus. 1979. V. 37. № 2. P. 467–474.
- Basilevsky A.T., Head J.W.* Venus: Analysis of the degree of impact crater deposit degradation and assessment of its use for dating geological units and features // J. Geophys. Res.: Planets. 2002. V. 107. № E8. P. 5–1–5–38.
- Basilevsky A.T., Head J.W., Setyaeva I.V.* Venus: Estimation of age of impact craters on the basis of degree of preservation of associated radar-dark deposits // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 18.
- Bondarenko N.V., Kreslavsky M.A.* Surface properties and surficial deposits on Venus: New results from Magellan radar altimeter data analysis // Icarus. 2018. V. 309. № 7. P. 162–176.
- Cook C.M., Melosh H.J., Bottke W.F.* Doublet craters on Venus // Icarus. 2003. V. 165. № 1. P. 90–100.
- Daubar I.J., Banks M.E., Schmerr N.C., Golombek M.P.* Recently formed crater clusters on Mars // J. Geophys. Res.: Planets. 2019. V. 124. № 4. P. 958–969.
- Daubar I.J., Dundas C.M., McEwen A.S., Gao A., Wexler D., Piqueux S., Collins G.S., Miljkovic K., Neidhart T., Eschenfelder J., and 8 co-authors.* New craters on Mars: An updated catalog // J. Geophys. Res.: Planets. 2022. V. 127. № 7. id. e2021JE007145.
- Herrick R.R., Bjonnes E.T., Carter L.M., Geria T., Ghail R.C., Gillmann C., Gilmore M., Hensley S., Iva-*

- nov M.A., Izenberg N.R., Mueller N.T., O'Rourke J. G., Rolf T., Smrekar S.E., Weller M.B.* Resurfacing history and volcanic activity of Venus // *Space Sci. Rev.* 2023. V. 219. № 4. id. 29.
- Herrick R.R., Phillips R.J.* Effects of the Venusian atmosphere on incoming meteoroids and the impact crater population // *Icarus.* 1994. V. 112. № 1. P. 253–281.
- Ivanov B.A., Basilevsky A.T., Kryuchkov V.P., Chernaya I.M.* Impact craters of Venus: Analysis of Venera 15 and 16 data // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 1986. V. 91. № B4. P. 413–430.
- Ivanov B.A.* Footprints of Asteroid Atmospheric Explosions at the Surface of Venus // 13th Moscow Int. Sol. Syst. Symp. (13M-S3), October 10–14, 2022. Abstract Book. Moscow: Space Research Institute, 2022. P. 314–316.
- 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. V. 157. P. 1–23.
- Korycansky D.G., Zahnle K.J.* High-resolution simulations of the impacts of asteroids into the Venusian atmosphere III: Further 3D models // *Icarus.* 2003. V. 161. P. 244–261.
- McKinnon W.B., Zahnle K.J., Ivanov B.A., Melosh H.J.* Cratering on Venus: Models and observations // *Venus II* / Eds: Bougher S.W., Hunten D.M., Phillips R.J. Tucson, Arizona: Univ. Arizona Press, 1997. P. 969–1014.
- Moroz V.I.* The atmosphere of Venus // *Space Sci. Rev.* 1981. V. 29. № 1. P. 3–127.
- Passey Q.R., Melosh H.J.* Effects of atmospheric breakup on crater field formation // *Icarus.* 1980. V. 42. № 2. P. 211–233.
- Phillips R.J., Arvidson R.E., Boyce J.M., Campbell D.B., Guest J.E., Schaber G.G., Soderblom L.A.* Impact craters on Venus: Initial analysis from Magellan // *Science.* 1991. V. 252. № 5003. P. 288–297.
- Phillips R.J., Raubertas R.F., Arvidson R.E., Sarkar I.C., Herrick R.R., Izenberg N., Grimm R.E.* Impact craters and Venus resurfacing history // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1992. V. 97. № E10. P. 15923–15948.
- Schaber G.G., Strom R.G., Moore H.J., Soderblom L.A., Kirk R.L., Chadwick D.J., Dawson D.D., Gaddis L.R., Boyce J.M., Russell J.* Geology and distribution of impact craters on Venus: What are they telling us? // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1992. V. 97. № E8. P. 13257–13301.
- Schaller C.J., Melosh H.J.* Venusian ejecta parabolas: Comparing theory with observations // *Icarus.* 1998. V. 131. № 1. P. 123–137.
- Schultz P.H., Gault D.* Clustered impacts – Experiments and implications // *J. Geophys. Res.: Solid Earths.* 1985. V. 90. № P. 3701–3732.
- 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., Kürt E., De Niem D., Wünnemann K.* Impact induced erosion of hot and dense atmospheres // *Planet. and Space Sci.* 2014. V. 98. P. 120–127.
- Stone J., Norman M.* ZEUS2D. A radiation magnetohydrodynamic code for astrophysical flows in two space dimensions // *Astrophys. J. Suppl.* 1992. V. 80. P. 753–790.
- Strom R.G., Schaber G.G., Dawsow D.D.* The global resurfacing of Venus // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1994. V. 99. № E5. P. 10899–10925.
- Svetsov V.V., Nemtchinov I.V., Teterev A.* Disintegration of Large Meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus.* 1995. V. 116. № 1. P. 131–153.
- Svetsov V.V.* Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska Explosion // *Nature.* 1996. V. 383. P. 697–699.
- Takata T., Ahrens T.J., Phillips R.J.* Atmospheric effects on cratering on Venus // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1995. V. 100. № E11. P. 23329–23348.
- Thompson S.L., Lauson H.S.* Improvements in the Chart-D radiation hydrodynamic code III: Revised analytical equation of state // Rep. SC-RR-71 0714. Albuquerque, NM: Sandia Laboratories, 1972. 119 p.
- Werner S.C., Ivanov B.A.* Exogenic dynamics, cratering, and surface ages (chapter 10.10) // *Treatise on Geophysics (Second Edition)* / Ed. Schubert G. Oxford: Elsevier, 2015. P. 327–365.
- Wood (Jr) D.A.* Effects of Airbursts on the Surface of Venus. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 2000. 263 p.
- Zahnle K.J.* Airburst origin of dark shadows on Venus // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1992. V. 97. № E6. P. 10243–10255.
- Zasova L.V., Gorinov D.A., Eismont N.A., Kovalenko I.D., Abbakumov A.S., Bober S.A.* Venera-D: A design of an automatic space station for Venus exploration // *Sol. Syst. Res.* 2020. V. 53. № 7. P. 506–510.
- Zasova L.V., Zeleny L.M., Korablev O.I., Sedykh O.Y., Venera-D Science Definition Team.* VENERA-D Mission for Comprehensive Study of Venus // 19th Meeting of the Venus Exploration Analysis Group, 8–9 November, 2021, abs. #8055.