

КОЛЕБАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ АСТЕРОИДА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ УДАРНОГО КРАТЕРА (НА ПРИМЕРЕ ФОБОСА)

Б.А. Иванов

На поверхности многих исследованных астероидов обнаружены линейные структуры (борозды). Многие исследователи интерпретируют эти борозды как след катившихся по поверхности валунов. Данная гипотеза существенно зависит от колебаний поверхности астероида при образовании ударных кратеров. В предлагаемой работе приводятся результаты численного моделирования удара на астероиде диаметром 22 км (модельный «Фобос»). Показано, что интенсивность колебаний свободной поверхности зависит от предполагаемой структуры Фобоса. Во многих случаях гипотеза о катящихся камнях представляется неправомерной.

Введение

Изображения поверхности астероидов, переданные космическими аппаратами, показали, что все астероиды Главного пояса покрыты ударными кратерами. Весьма похожая картина была обнаружена на спутнике Марса Фобос [Schmedemann et al., 2014]. Помимо кратеров на поверхности Фобоса были обнаружены протяженные линейные углубления, «борозды», на некоторых участках выглядящие как цепочки кратеров (не обязательно ударных). На рис. 1 показан снимок высокого разрешения, сделанный космическим аппаратом «Mars Reconnaissance Orbiter» (MRO) в 2008 году. Видна одна из нескольких систем борозд и (справа внизу) – крупней-

ший ударный кратер Стикни диаметром около 8 км.

Происхождение борозд до сих пор остается загадкой; две наиболее подробно разработанные гипотезы трактуют борозды (№ 1) как просадку реголита в трещины [Horstman and Melosh, 1989] и (№ 2) – как следы качения валунов, выброшенных из нескольких ударных кратеров [Wilson and Head, 1989; Wilson and Head, 2015]. В рамках гипотезы № 2 была рассчитана динамика предполагаемого качения глыб по реальному Фобосу [Davis et al., 1981] с учетом местной силы тяжести [Hamelin, 2011].

Если гипотеза № 1 о просадке реголита в трещины под поверхностью более-менее соответствует ранним попыткам моделирования образования ударных кратеров на малых телах [Asphaug, 2008; Asphaug and Melosh, 1993], то гипотеза № 2 до сих пор рассматривалась в отрыве от собственно механики удара, сопровождающегося распространением в теле мишени ударных волн, переходящих в сейсмические колебания [Richardson et al., 2005]. Авторы гипотезы «катящихся валунов» мысленно помещают их с некоторой начальной скоростью на поверхность и анализируют сопротивление качению со стороны реголита.

Целью настоящей работы является анализ колебаний поверхности Фобоса при образовании ударных кратеров, сопоставимых по размерам с кратером Стикни.

Фобос как мишень

Фобос представляет собой тело сложной формы, приближенно описываемой как трехосный эллипсоид $27 \times 22 \times 18$ км массой около $1,06 \times 10^{16}$ кг и средней плотностью около 1880 кг/м^3 . Из-за формы гравитационное поле имеет сложное строение при среднем ускорении силы тяжести на поверхности около $0,0057 \text{ м/с}^2$. Для целей моделирования в данной работе «Фобос» представлял собой сферу с диаметром 22 км.

Малая плотность Фобоса предполагает наличие значительного объема пустот (пористости), но неизвестно распределение этих пустот по объему тела и степень его однородности. Обсуждаются способы уточнения строения Фобоса [Le Maistre et al., 2013]. Пока можно лишь констатировать, что видимые на поверхности кратеры 0,1–8 км выглядят, как образованные в более-менее однородном материале. Если допустить, что твердые фрагменты, слагающие Фобос, имеют плотность $2,7\text{--}3,3 \text{ г/см}^3$, типичную для горных пород и метеоритов, то средняя пористость Фобоса оценивается в 40–45%. Эта пористость может быть распределена как в трещиноватом веществе индивидуальных фрагментов, так и в пустотах между относительно большими индивидуальными фрагментами, неплотно прилегающими друг к другу. Заметим, что с точки зрения моделирования учет пористости сам по себе важен лишь вблизи точки удара, где давление ударной волны приводит к локальному уплотнению. На больших расстояниях от точки удара вещество ведет себя как «пе-



Рис. 1. Фотография Фобоса, сделанная в 2008 г. КА MRO с расстояния 5800 км (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA10367.jpg>). Правый нижний угол занимает крупнейший на Фобосе ударный кратер Стикни диаметром 8 км [Basilevsky et al., 2014]

сок», то есть перемещается и деформируется как сплошная среда с примерно постоянной плотностью.

В данной работе использовались четыре (пронумерованных) модели строения: однородный Фобос, построенный из «туфа» (№ 1) или «песка» (№ 4), и «блочный» Фобос, состоящий из слоев (№ 2) или блоков «туфа» (№ 3) с заполненными «песком» пустотами.

В качестве «пористого туфа» выбран материал плотностью $1,97 \text{ г/см}^3$, с продольной скоростью звука $\sim 2,8 \text{ км/с}$. Прочностные свойства и постепенное разрушение за пределом прочности рассчитывались по модели [Collins et al., 2004]. Модельный «песок» имеет плотность $1,76 \text{ г/см}^3$, продольную скорость звука $2,02 \text{ км/с}$, сцепление 10 кПа и сухое трение $0,5\text{--}0,6$. Гидростатическое сжатие рассчитывалось по модели Тиллотсона [Tillotson, 1962], с константами, подобранными для примерного воспроизведения ударных адиабат данных материалов [Trunin et al., 2001].

Численное моделирование

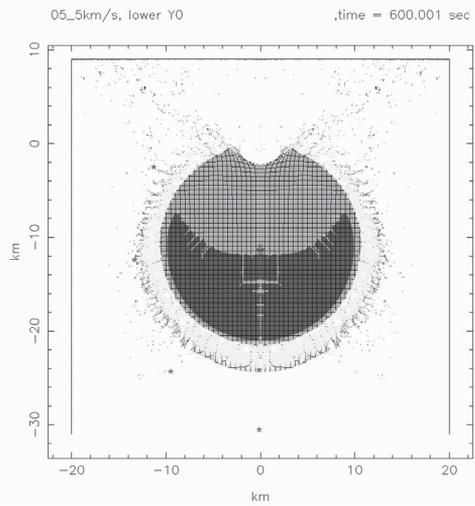
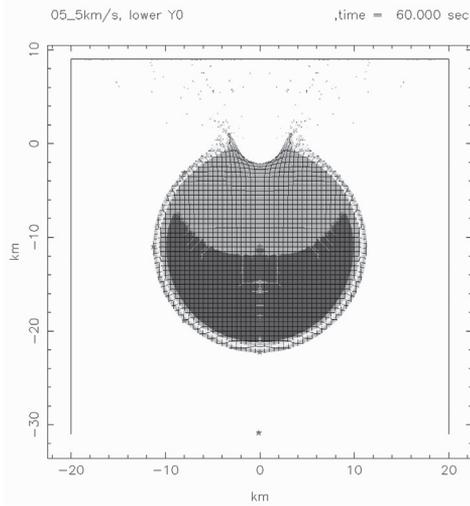
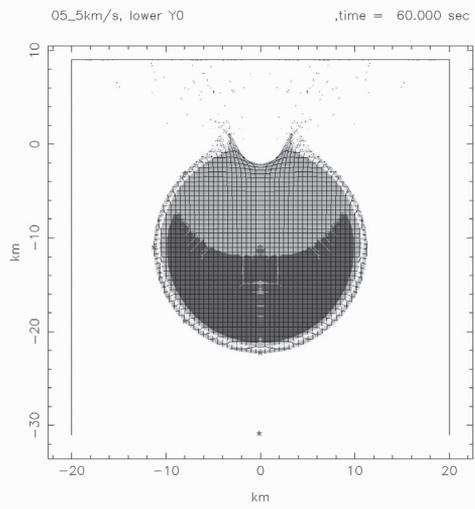
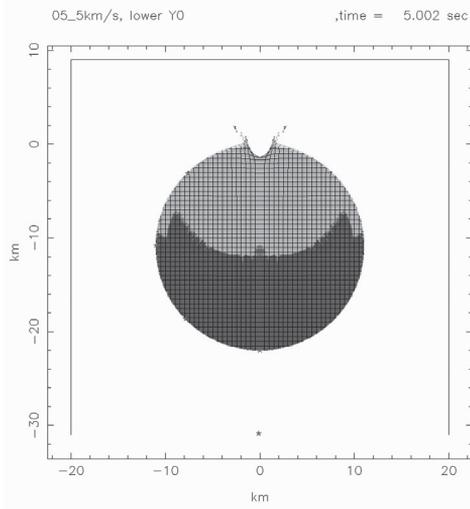
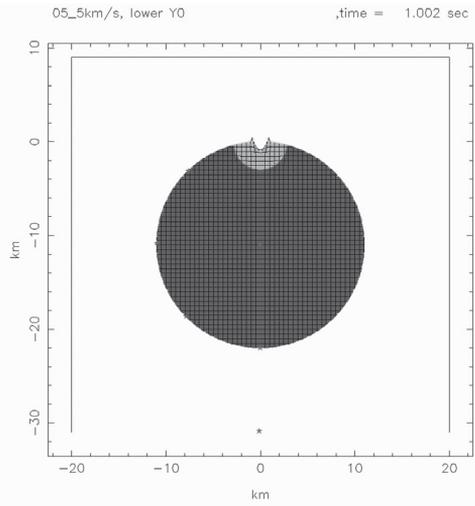
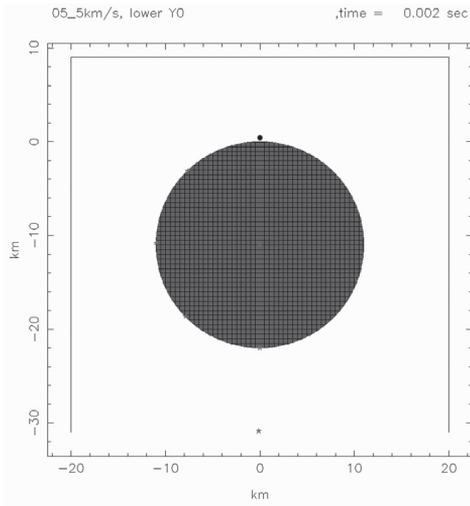
Для интегрирования использовалась двумерная осесимметричная программа SALEB [Иванов, 2005], модифицированная из программы SALE [Amsden et al., 1980]. Использовалась модификация с прямым расчетом силы тяжести по распределению масс в расчетной сетке [Ivanov et al., 2010].

Начальные условия задавались как вертикальный подлет сферического ударника из «туфа» со скоростями от 1 до 5 км/с к «северному полюсу» сферической мишени. Расчет проводился для физических времен в задаче от 10 минут до 1 часа (3600 с). Этого достаточно для формирования кратера, но недостаточно для полной реаккумуляции вещества на центральное тело мишени. Это было хорошо видно для некоторых расчетных вариантов по изменению средней скорости центральной части («ядра») мишени. Модельный «туф» считался изначально неразрушенным со сцеплением и прочностью на разрыв от 1 до 5 МПа и остаточным сцеплением после разрушения $1\text{--}100 \text{ кПа}$. Необходимо упомянуть ряд ограничений, созданных устройством программы SALEB и относительно низким пространственным разрешением ($5\text{--}10$ ячеек на диаметр ударника). Программа SALEB рассчитывает двумерную осесимметричную задачу. Следовательно, в ней невозможно описать образование радиальных трещин. Поэтому при выполнении критериев разрушения в некоторой точке материал считается «разрушенным», хотя в реальности это могут быть единичные радиальные трещины [Ivanov et al., 1997a; Ivanov et al., 1997b].

Общая последовательность событий при ударе со скоростью 5 км/с по мишени № 1 (однородный «туф») показана на рис. 2. Здесь видно распространение ударной волны/волны сжатия, приводящее к «разрушению» материала мишени (переход в состояние сыпучей среды с небольшим сцеплением). Кроме того, разрушение

Рис. 2. Несколько избранных моментов времени при ударе по Фобосу в расчетном варианте «05clu»: ударник диаметром 500 м со скоростью 5 км/с .

Материал мишени – мягкая горная порода («туф») плотностью $1,97 \text{ г/см}^3$, продольной и поперечной скоростями звука $2,86$ и $1,53 \text{ км/с}$ (коэффициент Пуассона $0,3$). Начальная прочность – 10 МПа , коэффициент сухого трения после разрушения – $0,4$. Более темный цвет означает неразрушенный материал мишени



(«откол») происходит вдоль всей окружности мишени. Вещество из откольного слоя поднимается в виде облака обломков и пыли. При начальной скорости менее скорости ухода из поля тяжести (около 11 м/с) это вещество вернется обратно на поверхность. Диаметр ударника в данном варианте составлял 500 м (10 расчетных ячеек).

Поскольку мы не можем достоверно смоделировать пористость Фобоса, мы изучили поведение модельного «Фобоса» сделанного из блоков и слоев «туфа», разделенных акустически мягким «песком». В этом случае волна сжатия в теле мишени затухает быстрее, и скорость откола уменьшается (рис. 3). Рис. 3 иллюстрирует существенное влияние предполагаемой структуры мишени на скорость откола поверхности. Если для однородной мишени эта скорость составляет не менее 30 м/с (втрое выше скорости ухода на бесконечность), то для слоистой мишени скорость может составлять 1–5 м/с (большая часть откола вернется на поверхность).

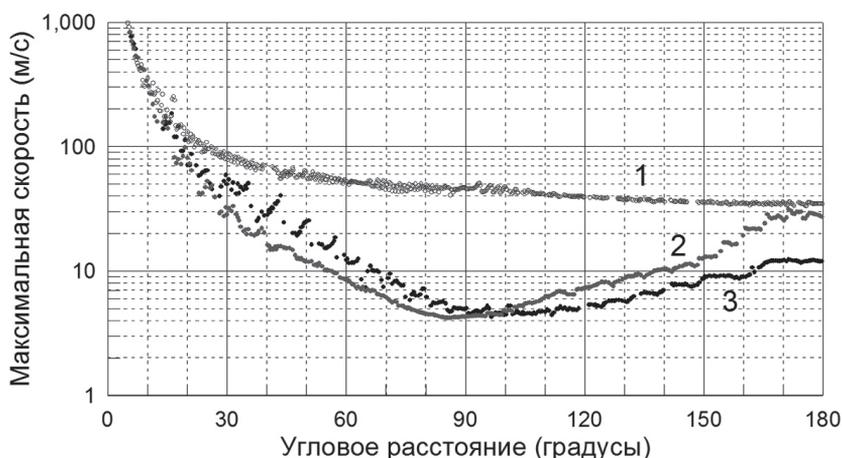


Рис. 3. Максимальная скорость лагранжевых частиц, изначально расположенных на глубине $0,5 \Delta X$ (размер ячейки) при ударах по мишени ударников диаметром 1 км со скоростью 5 км/с. 1 – однородная мишень № 1 из «туфа», 2 – слоистая мишень № 2 «туф/песок» с горизонтальными слоями, 3 – слоистая мишень с вертикальными слоями

Рис. 3 построен с точки зрения моделирования (сравниваются удары одного и того же ударника), но для планетологии важнее сравнить удары, образующие один и тот же кратер на поверхности. На рис. 4 показаны три модельных профиля, наиболее близко воспроизводящие профиль кратера Стикни, построенные картографическими методами по снимкам Фобоса [Basilevsky et al., 2014]. Учитывая значительный возраст кратера Стикни [Schmedemann et al., 2014] и возможное частичное засыпание кратера выбросами и сейсмическим действием более поздних ударов [Richardson et al., 2005], можно констатировать неплохое воспроизведение природного кратера в численной модели.

Рис. 5 показывает убывание скорости откола с угловым расстоянием от точки удара. В данном варианте скорость достигает минимума $\sim 0,35$ м/с на «экваторе» и возрастает до $\sim 0,6$ м/с в антиподальной точке. В «северном» полушарии угол вектора скорости отклоняется \sim на 45° радиального направления из центра мишени и линейно уменьшается до нуля в «южном» полушарии. Это означает, что при прохо-

де волны сжатия все предметы, лежащие на поверхности, будут брошены 0,3–1 м/с вверх и вперед по направлению подлета ударника.

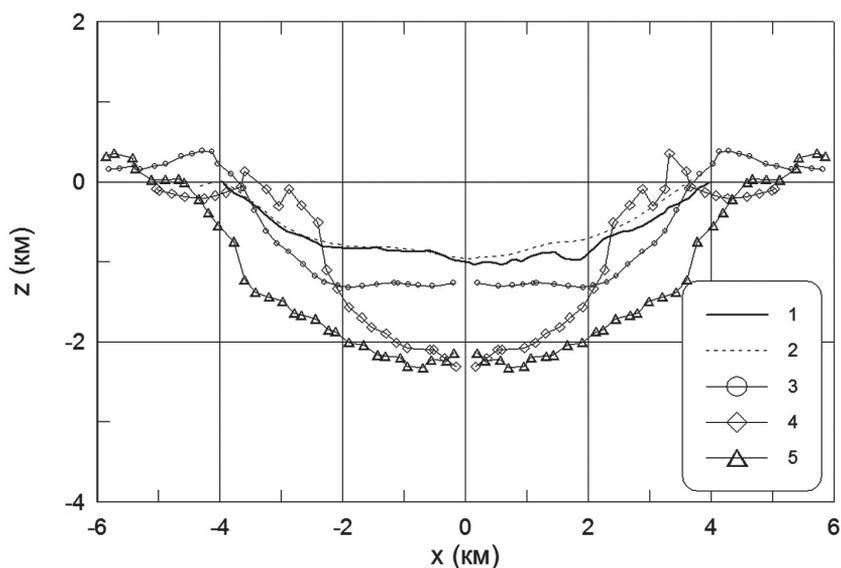


Рис. 4. Наблюдаемые профили кратера Стикни.

1 и 2 – из [Basilevsky et al., 2014]; 3 – расчет «662clu» («песчаный» Фобос № 4, $D_{\text{пр}} = 0,6$ км, $v = 1$ км/с); 4 – расчет «05clu» (прочная мишень № 1 из «туфа», $D_{\text{пр}} = 0,5$ км, $v = 5$ км/с); 5 – расчет «601_AS» («песчаный» Фобос № 4, $D_{\text{пр}} = 0,39$ км, $v = 5$ км/с)

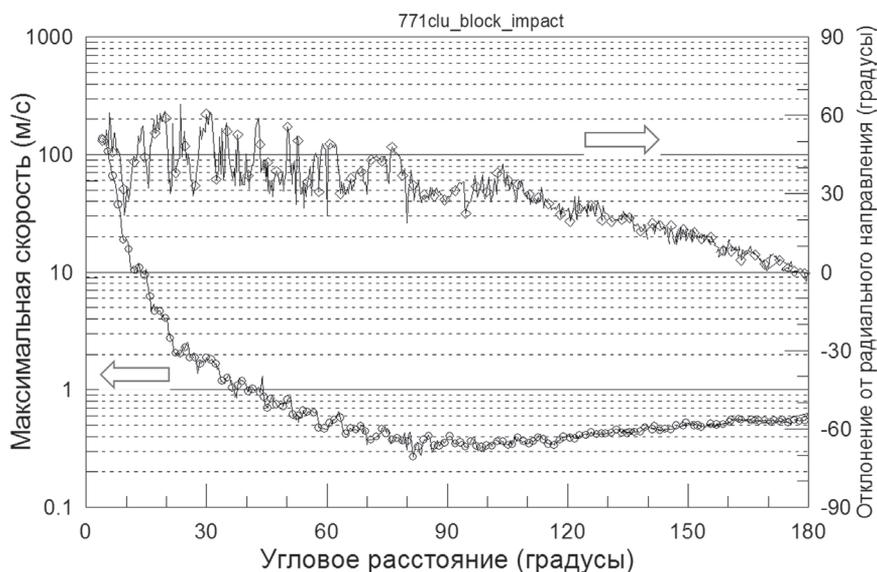


Рис. 5. Скорость «откола» в «блочной» мишени № 3 (левая шкала) и отклонение вектора скорости от радиального направления (правая шкала) при ударе тела диаметром 0,5 км со скоростью 2 км/с, образующего кратер диаметром 7,5 км

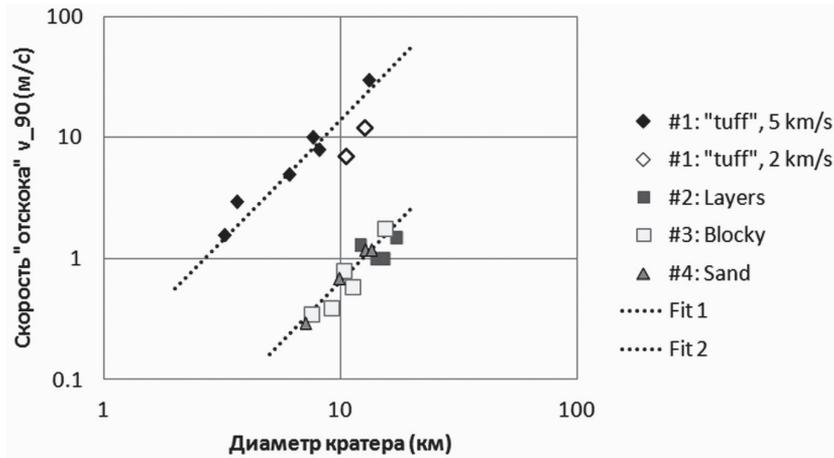


Рис. 6. Корреляция скорости откола на угловом расстоянии 90° от точки удара и диаметра модельного кратера для мишеней различной структуры

В слабом поле тяготения Фобоса даже такие небольшие скорости броска приведут к баллистическому полету свободно лежащих валунов в течение 30–40 с и их приземлением в нескольких метрах от исходного положения. Таким образом, вся поверхность Фобоса должна обновиться даже в случае его неоднородного строения, ослабляющего (рассеивающего на неоднородностях) волну сжатия от удара.

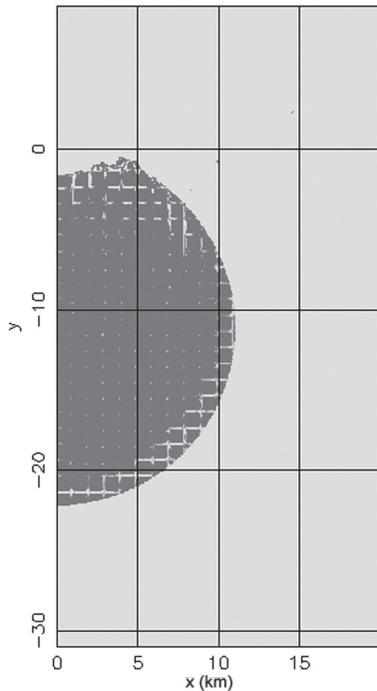


Рис. 7. Распределение пониженной плотности песка (светло-серый тон для плотности $<1750 \text{ кг/м}^3$ при нормальной плотности 1760 кг/м^3) через 2600 секунд после удара, образующего кратер диаметром около 7,5 км

Наши расчеты можно обобщить в виде корреляции максимальной скорости откола на угловом расстоянии 90° от точки удара (где эта скорость минимальна – рисунки 3, 5) и диаметра кратера (рис. 6). Эту корреляцию можно представить в виде зависимости $v_{90} \sim 0,14 D^2$ для однородной мишени из «туфа», в виде $v_{90} \sim 0,0065 D^2$ для «мягких» мишеней.

Последним результатом в нашем кратком описании проекта является тот факт, что «откол» происходит не только в верхних слоях поверхности. По образующимся трещинам или по исходным «песчаным» прокладкам происходит «разбухание» мишени, сдерживаемое собственной силой тяжести. Из-за слабости силы тяжести разуплотнение мишени за счет раскрытия трещин длится довольно долго. На рис. 7 показано распределение плотности в «блочной» мишени № 3 при ударе, описанном на рис. 5. Этот вариант расчета был доведен до 2600 с физического времени. Видно, что даже спустя 40 минут после удара под поверхностью мишени еще

остались вновь образованные пустоты, создавая условия для просыпания реголита в щели субстрата.

Заключение

Моделирование удара в мишень, приблизительно воспроизводящую Фобос, показало, что (1) образование кратеров более 5 км диаметром сопровождается «подскоком» (отколом) свободной поверхности с амплитудой от 0,2 до 3 м/с (рис. 5), возрастающую пропорционально квадрату диаметра кратера. Наличие неоднородностей в мишени способствует снижению этой амплитуды. Вместе с тем «блочная» мишень легко разуплотняется за счет многочисленного прохождения и отражения волн напряжения. «Наведенная» пористость закрывается очень медленно из-за слабого тяготения. С точки зрения образования борозд на Фобосе, представленные результаты моделирования скорее поддерживают гипотезу о просадке реголита в приоткрывшиеся трещины [Horstman and Melosh, 1989], в то время как гипотеза катящихся валунов [Wilson and Head, 2015] ставится под сомнение из-за активного движения поверхности за счет волн напряжения. Однако гипотеза трещин остается неподтвержденной, как и ранее, из-за непонимания причин образования необходимых систем параллельных трещин.

Работа поддержана программой Президиума РАН № 9 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд», проект «Ударные кратеры на Луне, планетах и астероидах».

Литература

Иванов Б.А. Численное моделирование крупнейших земных метеоритных кратеров // *Астрон. вестн.*, 39, 381–409, 2005.

Amsden A.A., H.M. Ruppel, and C.W. Hirt. SALE: A simplified ALE Computer Program for Fluid Flow at All Speeds // *Los Alamos Laboratory Report LA-8095*, pp. 101, Los Alamos, NM, 1980.

Asphaug E. Critical crater diameter and asteroid impact seismology // *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 1075–1084, 2008.

Asphaug E., and H.J. Melosh. The Stickney impact of PHOBOS – A dynamical model // *Icarus*, 101, 144–164, 1993.

Basilevsky A.T., C.A. Lorenz, T.V. Shingareva, J.W. Head, K.R. Ramsley, and A.E. Zubarev. The surface geology and geomorphology of Phobos // *Planetary and Space Science*, 102, 95–118, 2014.

Collins G.S., H.J. Melosh, and B.A. Ivanov. Modeling damage and deformation in impact simulations, *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 34, Supplement, p. A57, 39 (2), 217–231, 2004.

Davis D.R., K.R. Housen, and R. Greenberg. The unusual dynamical environment of PHOBOS and Deimos // *Icarus*, 47, 220–233, 1981.

Hamelin, M., Motion of blocks on the surface of Phobos: New constraints for the formation of grooves // *Planetary and Space Science*, 59, 1293–1307, 2011.

Horstman, K.C., and H.J. Melosh, Drainage pits in cohesionless materials – Implications for the surface of PHOBOS // *Journal of Geophysical Research*, 94, 12433–12441, 1989.

Ivanov, B.A., A.T. Basilevsky, and G. Neukum, Atmospheric entry of large meteoroids: implication to Titan // *Planetary and Space Science*, 45, 993–1007, 1997a.

Ivanov, B.A., D. Deniem, and G. Neukum, Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering // *International Journal of Impact Engineering, Hypervelocity Impact Proceedings of the 1996 Symposium*, 20 (1–5), 411–430, 1997b.

Ivanov, B.A., H.J. Melosh, and E. Pierazzo, Basin-forming impacts: Reconnaissance modeling, in *GSA Special Papers 465*, edited by R.L. Gibson, and W.U. Reimold, pp. 29–49 // *Geological Society of America, Boulder, Colorado, USA*, 2010.

Le Maistre, S., P. Rosenblatt, N. Rambaux, J.C. Castillo-Rogez, V. Dehant, and J.C. Marty, Phobos interior from librations determination using Doppler and star tracker measurements // *Planetary and Space Science*, 85, 106–122, 2013.

Richardson, J.E., H.J. Melosh, R.J. Greenberg, and D.P. O'Brien, The global effects of impact-induced seismic activity on fractured asteroid surface morphology // *Icarus*, 179, 325–349, 2005.

Schmedemann, N., G.G. Michael, B.A. Ivanov, J.B. Murray, and G. Neukum, The age of Phobos and its largest crater, Stickney // *Planetary and Space Science*, 102, 152–163, 2014.

Tillotson, J.H., Metallic equations of state for hypervelocity impact, pp. 141, *Advanced Research Project Agency // General Atomic Report GA-3216*, San Diego, California, 1962.

Trunin, R.F., L.F. Gudarenko, M.V. Zhernokletov, and G.V. Simakov, *Experimental Data on Shock Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter*, 446 pp., RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia, 2001.

Wilson, L., and J.W. Head, Dynamics of Groove Formation on PHOBOS by Ejecta from Stickney, in *Lunar and Planetary Science Conference*, pp. 1211, 1989.

Wilson, L., and J.W. Head, Groove formation on Phobos: Testing the Stickney ejecta emplacement model for a subset of the groove population // *Planetary and Space Science*, 105, 26–42, 2015.