

УДК 523.6

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ АВСТРАЛО-АЗИАТСКОГО ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ТЕКТИТОВ

© 2024 г. В. В. Шувалов*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: shuvalov@idg.ras.ru*

Методами компьютерного моделирования рассматривается возможность образования Австрало-Азиатского поля рассеяния тектитов в результате падения астероида на остров вулканического происхождения с возвышенностью. Показано, что при ударе в гору увеличивается угол разлета высокоскоростных выбросов, что может объяснить большие размеры Австрало-Азиатского поля рассеяния тектитов. Отсутствие найденного кратера-источника тектитов объясняется тем, что в результате такого удара образуется подводный кратер, который труднее обнаружить, чем расположенный на суше.

Ключевые слова: тектиты, астероид, численное моделирование, выбросы из кратера.

Для цитирования: Шувалов В.В. Возможный механизм образования Австрало-Азиатского поля рассеяния тектитов // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 137–145. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_137

Введение

Тектиты – это ударные стекла, обычно диаметром в несколько сантиметров, которые формируются в процессе кратерообразующего течения из расплава, выбрасываемого в атмосферу [Stöffler, Grieve, 2007]. В процессе полета частицы расплава деформируются аэродинамическими силами и выпадают на поверхность Земли, формируя тектитные поля рассеяния. Как правило частицы однородны по составу, почти не содержат воды и внеземного вещества, образованы из расплава самого поверхностного (10–50 м) слоя мишени [Koeberl, 2007]. Аэродинамическая форма тектитов и почти полное отсутствие в них летучих предполагает, что вещество мишени, из которого образовались тектиты, было сжато в ударной волне до давлений более 100 ГПа, чтобы расплав был достаточно жидким, и менее примерно 300 ГПа, чтобы вещество мишени не испарилось [Artemieva, 2001].

В настоящее время известны четыре тектитных поля – Североамериканское, Центральноевропейское, Берега Слоновой Кости и Австрало-Азиатское, для трех из них известны породившие их кратеры – Чесапик-Бей, Рис и Босумтви. Четвертое – Австрало-Азиатское поле отличается большей площадью рассеяния и массой тектитов, содержанием всех известных их типов, включая микротектиты, отсутствием идентифицированного родительского кратера [Glass, 1990; Koeberl, 1994; Folco, et al., 2008]. Размер ненайденного родительского кратера (при образовании которого могло бы образоваться Австрало-Азиатское поле) варьируется от первых десятков километров до 300 километров [Artemieva, 2013]. То, что такой большой кратер в относительно известном месте до сих пор не найден, кажется странным. Одно из возможных объяснений состояло в том, что тектиты образовались при падении астероида в море с образованием подводного кратера, который обнаружить намного труднее. Однако при ударе в воду заметно уменьшается масса высокоскоростных выбросов, способных образовать тектитные поля рассеяния [Artemieva 2013]. В работах [Sieh et al., 2019; Melosh, 2020] высказано предположение, что источником Австрало-Азиатских тектитов является кратер диаметром 15 км, который погребен под большим молодым вулканическим лавовым полем в Южном Лаосе. Однако в работе [Mizera, 2022] это предположение подвергается сомнению из-за геохимической несовместимости состава тектитов с

составом пород, в которых образован вышеуказанный кратер. Целью данной работы является изучение возможности образования тектитов при падении астероидов на поверхность с разным рельефом, в частности, при падении астероида на остров с возвышенностью. В результате кратерообразующего течения при таком ударе может образоваться подводный кратер (который сложнее найти), а вещество острова, частично расплавленное (из которого могут образоваться тектиты), будет выброшено на большие расстояния. При этом наличие возвышенности может заметно повлиять на угол разлета выбросов из кратера и, соответственно, увеличить площадь поля рассеяния тектитов.

Для достижения поставленной цели проводилось численное моделирование падения километровых астероидов на поверхность с разным рельефом. Расчеты проводились с помощью программного комплекса SOVA [Shuvalov, 1999], который неоднократно использовался для моделирования ударных явлений, в том числе ударов по поверхности с рельефом [Шувалов, 2020] и падений астероидов в море [Shuvalov, Dypvik, 2004]. Для описания термодинамических свойств грунта и ударника использовалось уравнение состояния кварца, полученное, также как и уравнение состояния воды, по программе ANEOS [Thomson, Lauson, 1972], для описания термодинамики воздуха использовались таблицы [Кузнецов, 1965]. Стратификация атмосферы задавалась по модели CIRA [COSPAR International Reference Atmosphere, <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/atmospheric/cira/cira86/>]. Плотность грунта считалась равной 2.65 г/см^2 .

Результаты расчетов

Для начала были проведены расчеты удара километрового астероида со скоростью 20 и 35 км/с под наиболее вероятным углом 45° по плоской поверхности. На рис. 1 показано, как распределено изначально в мишени вещество, которое испытывает ударное сжатие от 100 до 300 ГПа.

Результаты этих расчетов количественно совпадают с описанными в [Artemieva, 2001] и показывают, что только небольшая часть образовавшегося жидкого расплава изначально расположена в верхнем

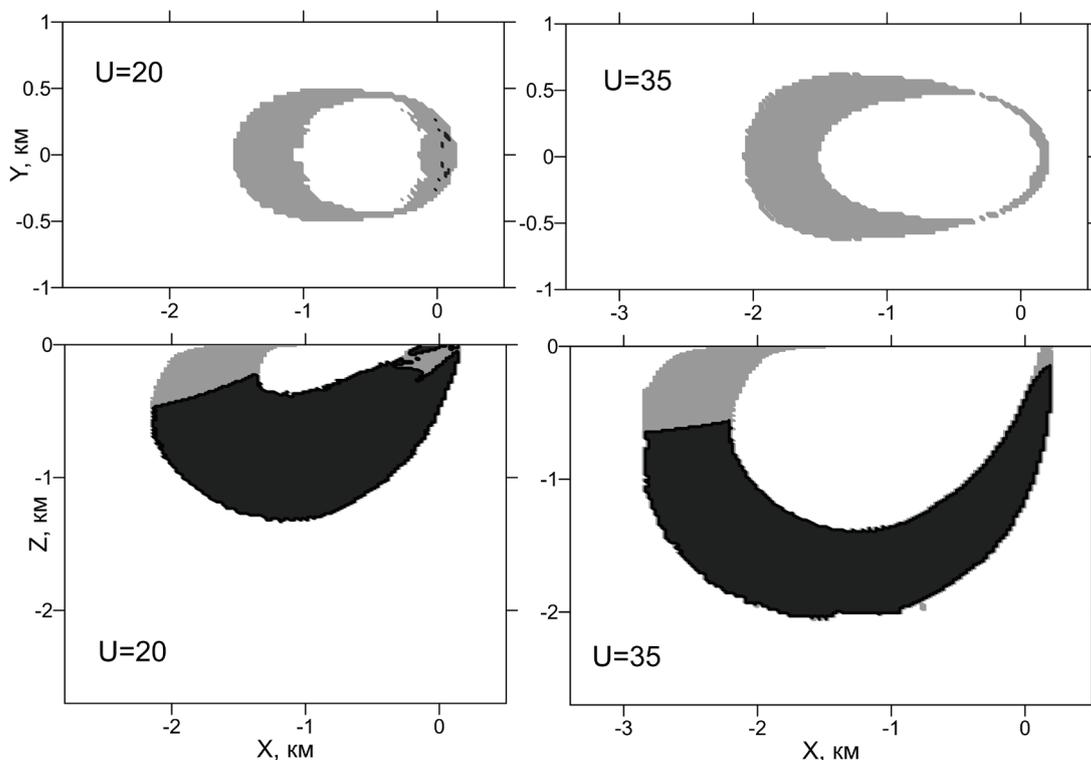


Рис. 1. Начальное распределение вещества, которое будет сжато в ударной волне до давлений от 100 до 300 ГПа. На верхних рисунках показаны плоскости $Z = -0.01 \text{ км}$, на нижних – плоскости $Y = 0$. Серым цветом показан расплав, который выбрасывается со скоростью больше 1 км/с, черным – расплав, который выбрасывается с меньшей скоростью или остается в кратере. Направление удара справа налево

50-метровом слое мишени. Будем дальше называть для краткости часть расплава, образовавшегося из верхнего 50-метрового слоя мишени при давлениях ударного сжатия от 100 до 300 ГПа, тектитным веществом (ТВ). На [рис. 1](#) видно, что почти все ТВ выбрасывается со скоростями более 1 км/с и улетает, соответственно, на большие расстояния от кратера. Более того, часть выбросов может иметь скорость, превышающую первую космическую и даже вторую космическую, и улететь за пределы Земли. Однако большая часть таких супербыстрых выбросов находится в испаренном состоянии. Площадь поверхности мишени, на которой образуется ТВ, невелика. Было интересно выяснить как может повлиять на эту величину этой площади рельеф мишени. Наличие рельефа может также повлиять на угол разлета ТВ из кратера и, соответственно, на площадь его распространения.

Для этого были проведены (в той же постановке, что и удары по плоской мишени) расчеты ударов в горный хребет, каньон и отдельную гору. Наиболее интересными оказались удары в гору, результаты их расчетов приведены ниже. Начальные данные расчетов (взаимное расположение горы и ударника в момент контакта) показаны на [рис. 2](#). Как и ранее считалось, что диаметр сферического ударника равен 1 км, скорость удара – 20 км/с, рассматривались углы падения α равные 15 и 30 градусам.

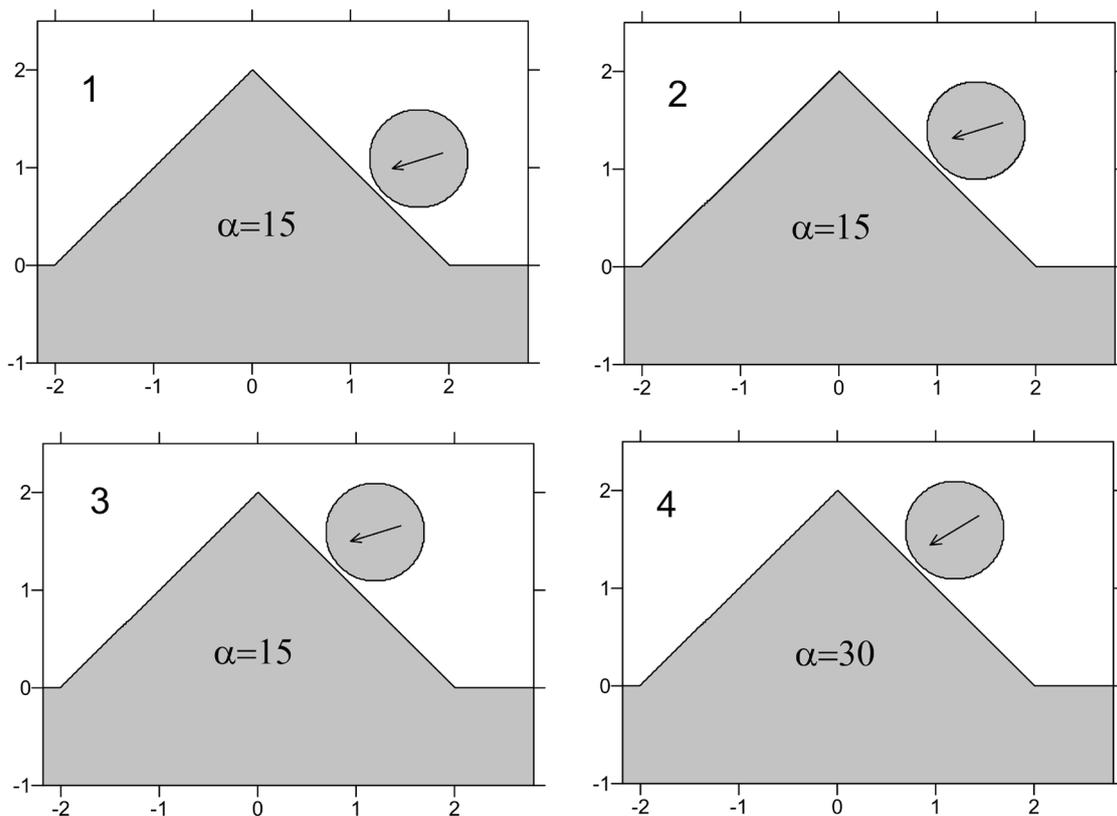


Рис. 2. Начальные данные для четырех вариантов (номера вариантов указаны в левых верхних углах) падения километрового астероида на поверхность с рельефом. Астероид движется справа налево, α – угол наклона траектории к горизонтали. Расстояния указаны в километрах

На [рис. 3](#) показаны основные стадии удара для варианта 2 (см. [рис. 2](#)). От точки контакта ударника и горы во все стороны распространяется ударная волна, за фронтом которой формируется полость, сначала на правом склоне. С границ растущего кратера вещество (в том числе и ТВ) выбрасывается в разные стороны, как и при ударе по плоской поверхности. Потом ударная волна, оставаясь достаточно сильной, чтобы создавать ТВ, выходит на противоположный склон горы. Вещество с поверхности левого склона горы разлетается в направлении движения самой ударной волны. Это видно на [рис. 4](#), аналогичном [рис. 1](#), где показано начальное распределение вещества, которое сжимается в ударной

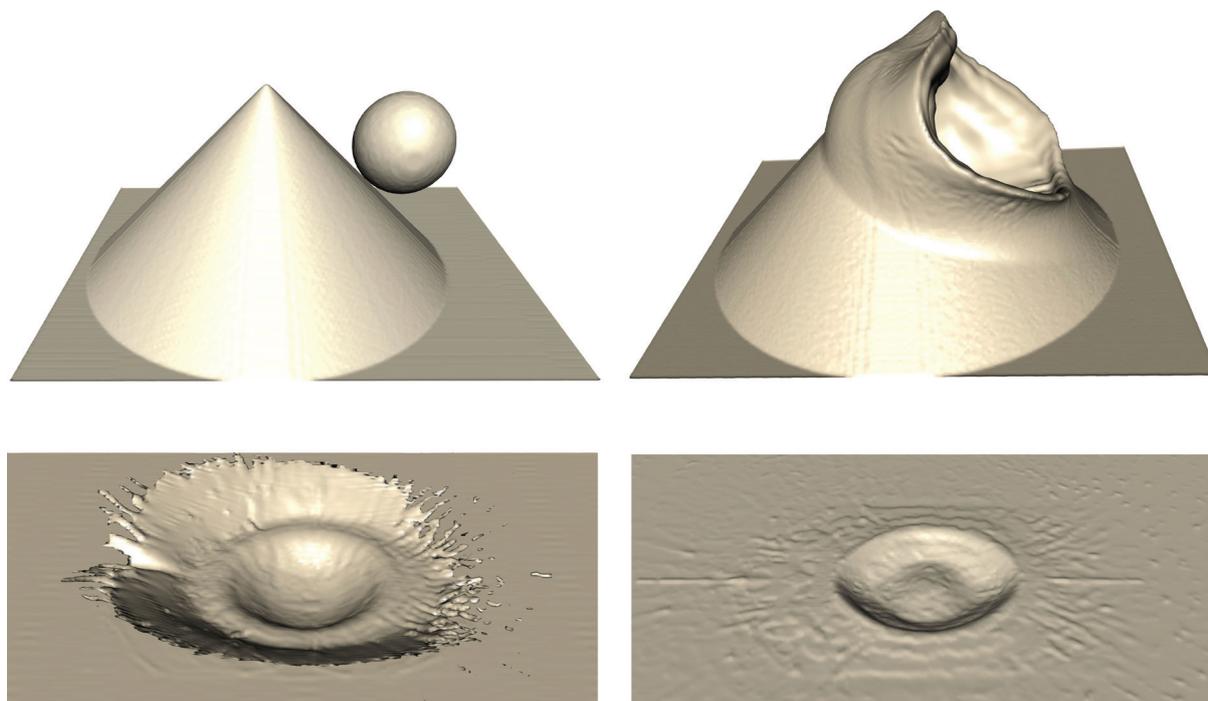


Рис. 3. Последовательные стадии удара километрового астероида в гору (вариант 3). Показаны изоповерхности плотности вещества, соответствующие значению 1 г/см^3

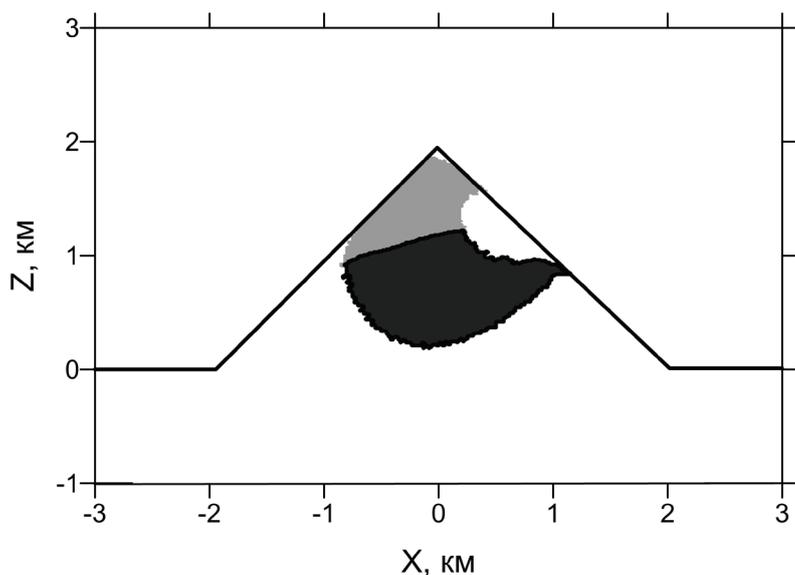


Рис. 4. Начальное распределение в плоскости $Y = 0$ вещества, которое будет сжато в ударной волне до давлений от 100 до 300 ГПа. Серым цветом показан расплав, который выбрасывается со скоростью больше 1 км/с , черным – расплав, который выбрасывается с меньшей скоростью или остается в кратере. Направление удара справа налево

волне до давлений $100 \text{ ГПа} < p < 300 \text{ ГПа}$. Таким образом, механизм выброса вещества из кратера при ударе в гору более сложный и угловая направленность выбрасываемого вещества (в том числе ТВ) должна отличаться от аналогичной зависимости для ударов по плоской поверхности.

Примерно через 10 с размер кратера уже превышает размер основания горы, т.е. гора полностью уничтожена. Через минуту на месте горы образуется кратер, по форме напоминающий обычные кратеры, образующиеся при ударе по ровной поверхности.

На **рис. 5** приведены рассчитанные массы ТВ для всех четырех вариантов удара в гору, а также для удара по ровной поверхности. При ударе в гору образуется масса ТВ, равная примерно 0.4 массы ударника, что на 10%–50% (в зависимости от варианта и скорости выброса) больше, чем при ударе по ровной поверхности. При рассматриваемых ударах в гору основная масса ТВ выбрасывается примерно

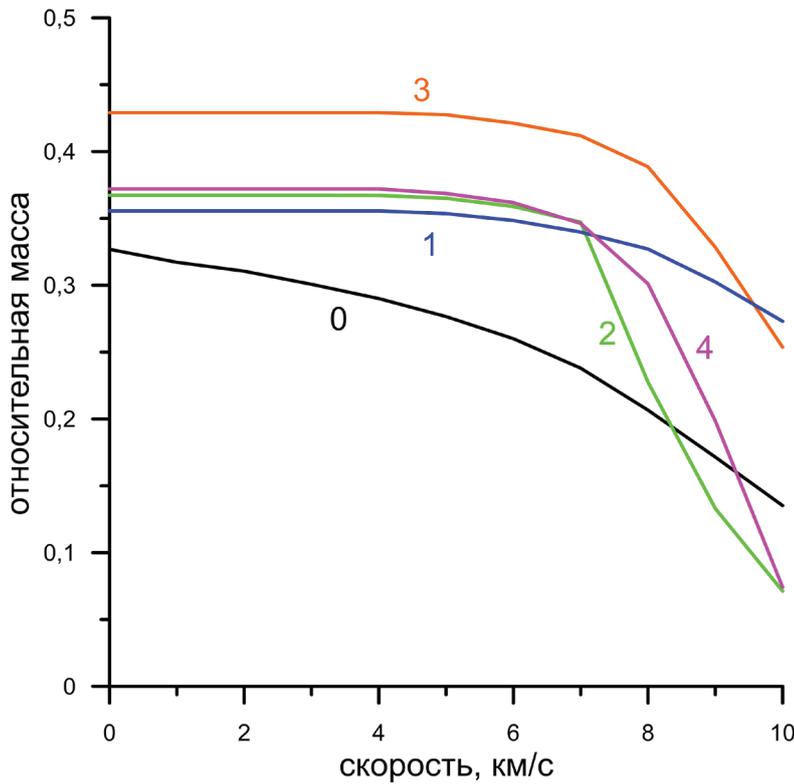
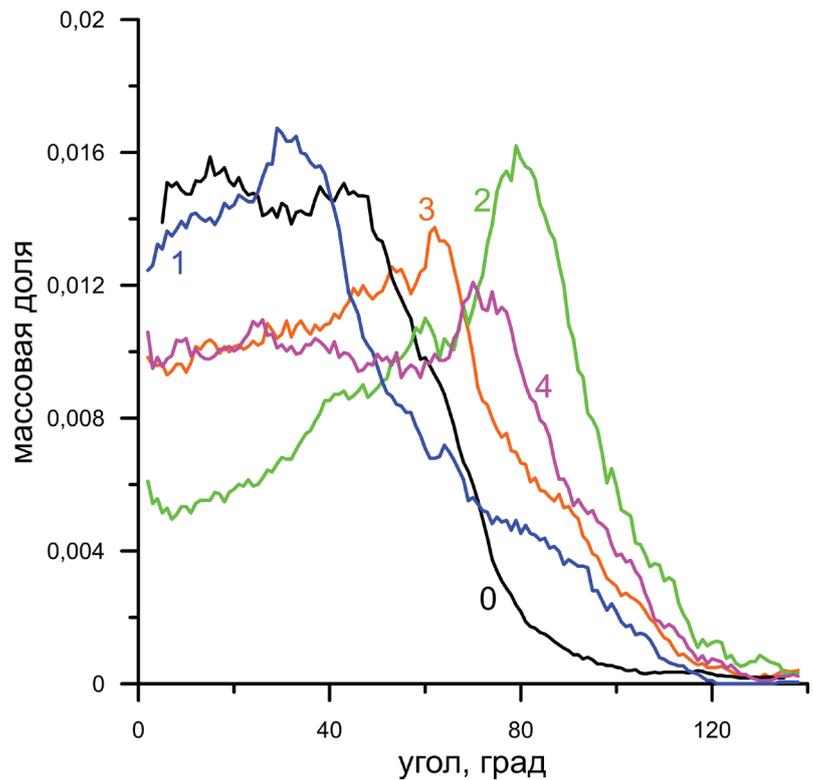


Рис. 5. Зависимость массы тектитного материала (выраженной в массах ударника), выбрасываемой из кратера в атмосферу со скоростью большей, чем заданная после падения астероидов со скоростью 20 км/с. Номера около кривых соответствуют номерам вариантов на рис. 2. Нулевая кривая соответствует удару по плоской поверхности

Рис. 6. Зависимость массы тектитного материала (выраженной в массах ударника), выбрасываемой из кратера, от азимутального угла (угла между направлением скорости выбрасываемого вещества и проекцией траектории падающего тела) после падения астероидов со скоростью 20 км/с. Номера около кривых соответствуют номерам вариантов на рис. 2. Нулевая кривая соответствует удару по плоской поверхности



с одной и той же и достаточно большой скоростью около 7 км/с, но под разными углами наклона. При ударе по плоской поверхности разброс по скоростям более заметен.

На рис. 6 приведены зависимости массы выбрасываемого ТВ от азимутального угла (угла между направлением скорости выбрасываемого вещества и проекцией траектории падающего тела). Видно, что при ударе в гору угол разлета ТВ может быть значительно больше, чем при ударе по ровной поверхности, что может привести к заметному увеличению площади распространения выбросов ТВ.

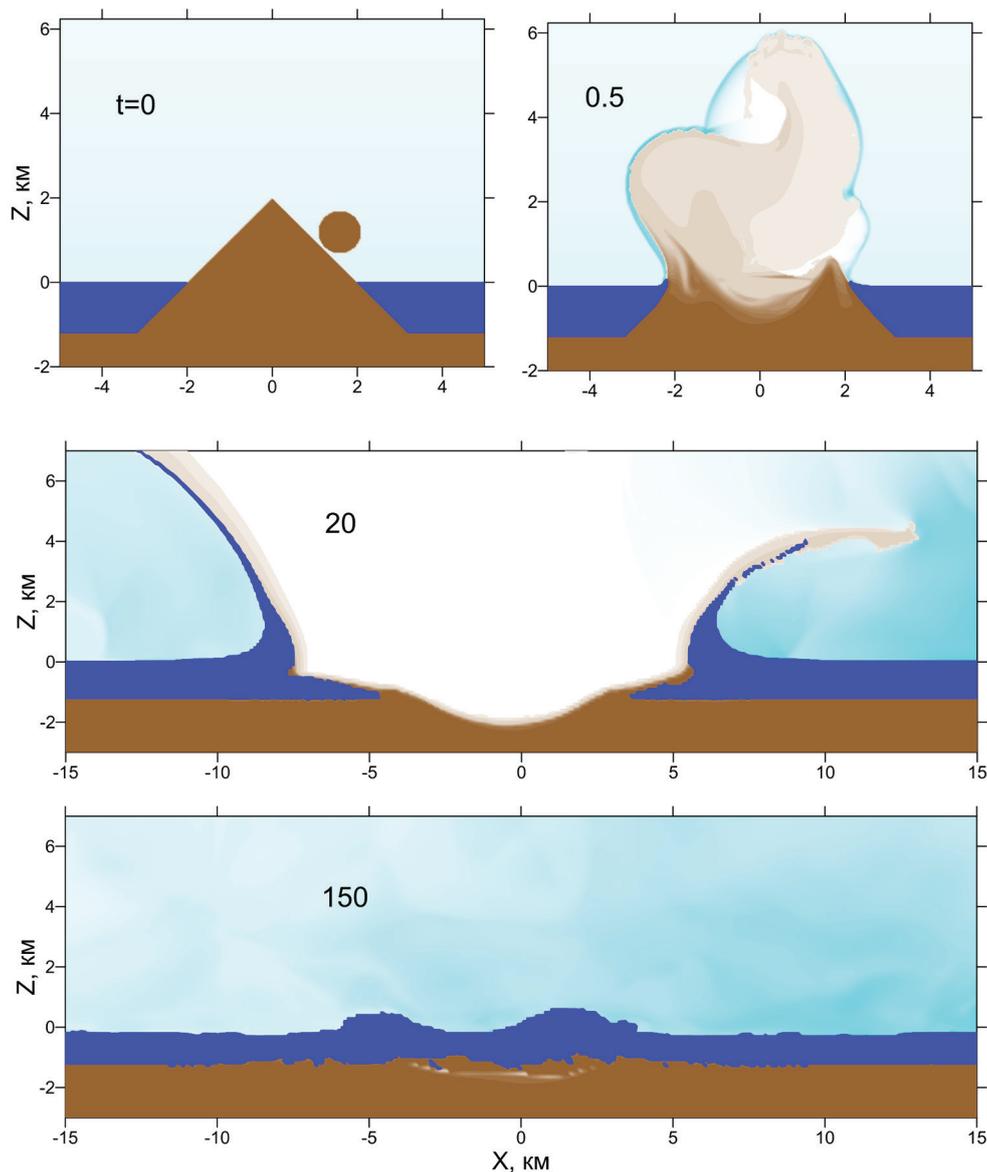


Рис. 7. Последовательные стадии удара километрового астероида в гору на острове. Синим цветом показана вода, коричневым – грунт, голубым – воздух. Более интенсивная закрашка соответствует большей плотности вещества. Время t указано в секундах

Однако удар в гору не решает проблему ненайденного родительского кратера. Более того, образующийся в результате удара плоскодонный кратер в горном ландшафте должен быть еще более заметен. Одним из возможных решений может быть удар в гору, расположенную на острове. Район распространения Австрало-Азиатских тектитов известен своей вулканической активностью, и многие острова имеют вулканическое происхождение. Падение астероида на такой остров, в отличие от просто падения астероида в воду, приводит не к уменьшению, а увеличению массы ТВ, а также увеличивает площадь его рассеяния. Образующийся кратер оказывается под водой, поэтому его не просто найти.

На рис. 7 показаны результаты расчета падения километрового астероида на остров, представляющий собой такую же гору, какая рассматривалась в приведенных выше расчетах (вариант 2), но погруженную в море глубиной 1.5 км (модель вулканического острова). Все результаты, касающиеся параметров образующегося ТВ, такие же как описанные выше для варианта 2. В результате удара остров полностью исчезает и на его месте образуется подводная структура, которая не видна с поверхности, но может быть идентифицирована по большому количеству расплава и ударно-модифицированного вещества.

Заключение

Проведенные расчеты показали, что при ударе астероида в гору азимутальный угол разлета высокоскоростных (со скоростями более 1 км/с) выбросов и масса вещества, из которого могут образоваться тектиты (изначально расположенного на глубине не более 50 м, сжатого ударной волной до давлений в диапазоне от 100 до 300 ГПа и вылетающего из кратера со скоростями более 1 км/с), больше, чем при ударе по плоской поверхности. Скорость разлета «потенциальных тектитов» также выше при ударе в гору. Все это могло бы объяснить большие размеры Австрало-Азиатского поля рассеяния тектитов по сравнению с тремя другими полями рассеяния тектитов.

Возможным объяснением того, что кратер-источник Австрало-Азиатских тектитов до сих пор не найден, может быть падение астероида на один из островов вулканического происхождения, каких много в рассматриваемом регионе. Расчеты показали, что в этом случае остров может быть полностью уничтожен и на его месте образуется подводный кратер, который обнаружить намного сложнее, чем кратер, расположенный на поверхности.

Предложенный механизм описывает возможность образования Австрало-Азиатского поля рассеяния тектитов с точки зрения механики кратерообразования. Для более детального обоснования такой гипотезы необходим серьезный геохимический анализ возможности образования различных видов тектитов, составляющих рассматриваемое поле рассеяния.

Финансирование

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

Благодарности

Автор благодарен к.ф.-м.н. Н. А. Артемьевой за полезные обсуждения и анонимному рецензенту за внимательное прочтение статьи, ценные замечания и советы.

Список литературы

- Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М. : Машиностроение. 1965. – 463 с.
- Шувалов В.В. Влияние рельефа местности на последствия ударов космических тел. *Астрономический Вестник*. 2020. Т. 54. № 2. С. 183–190. <http://doi.org/10.31857/S0320930X20020073>
- Artemieva N. Tektite Origin in Oblique Impacts: Numerical Modeling of the Initial Stage. In: Jüri Plado and Lauri J. Pesonen (Ed) *Impacts in Precambrian Shields*. Springer Berlin, Heidelberg. 2001. P. 257–276. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05010-1_10
- Artemieva N. Numerical modeling of the australasian tektite strewn field : 44 Lunar and Planetary Conference. 2013. P. 142.
- Folco L., Rochette P., Perchiazzi N., D’Orazio M., Laurenzi M.A., Tiepolo M. Microtektites from Victoria Land Transantarctic Mountains // *Geology*. 2008. Vol. 36. P. 291–294. <https://doi.org/10.1130/G24528A.1>
- Glass B.P. Tektites and Microtektites Key Facts and Inferences // *Tectonophysics*. 1990. Vol. 171. P. 393–404. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90112-L](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90112-L)
- Koeberl C. Tektite origin by hypervelocity asteroidal or cometary impact: Target rocks, source craters, and mechanisms. In: *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution* (Ed. B.O. Dressler, R.A.F. Grieve, and V.L. Sharpton), GSA Special Paper. 1994. Vol. 293. P. 133–152. <https://doi.org/10.1130/SPE293-p133>
- Koeberl C. The geochemistry and cosmochemistry of impacts. In: Davis A (ed) *Treatise of Geochemistry*, online edition. Elsevier, Amsterdam. 2007. Vol. 1. P. 1.28.1–1.28.52. <https://doi.org/10.1016/B978-008043751-4/00228-5>
- Melosh H.J. The Australasian tektite source crater: Found at last?: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2020. Vol. 117 (3). P. 1252–1253. <https://doi.org/10.1073/pnas.1920576117>
- Mizera J. Quest for the Australasian impact crater: Failings of the candidate location at the Bolaven Plateau, Southern Laos // *Meteoritics and Planetary Science*. 2022. Vol. 57. P. 1973–1986. <https://doi.org/10.1111/maps.13912>

Sieh Kerry, Jason Herrin, Brian Jicha, Dayana Schonwalder Angel, James D.P. Moore, Paramesh Banerjee, Weerachat Wiwegwin, Vanpheng Sihavong, Brad Singer, Tawachai Chualaowanich, Punya Charusiri. Australasian impact crater buried under the Bolaven volcanic field, Southern Laos : Proceedings of the National Academy of Sciences. 2019. Vol. 117 (3). P. 1346–1353. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904368116>

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect. // Shock Waves. 1999. Vol. 9 (6). P. 381–390. <https://doi.org/10.1007/s001930050168>

Shuvalov V., Dypvik H. Ejecta formation and crater development of the Mjolnir impact // Meteoritics & Planetary Science. 2004. Vol. 39 (3). P. 467–479. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00105.x>

Stöffler D., Grieve R. Impactites, Chapter 2.11 in Fettes, D. and Desmons, J. (eds.) Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2007. Vol. 82–92. P. 111–125; 126–242.

Thompson S.L., Lauson H.S. Improvements in the Chart D radiation hydrodynamic code III: Revised analytic equation of state. Report SC-RR-71 0714. Sandia National Laboratories. 1972. Albuquerque, NM.

A POSSIBLE MECHANISM FOR THE FORMATION OF THE AUSTRALASIAN TEKTITE STREWNFIELD

© 2024 V. V. Shuvalov*

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

**E-mail: shuvalov@idg.ras.ru*

Computer modeling methods are used to examine the possibility of the formation of the Australasian tektite strewnfield as a result of an asteroidal impact on an island of volcanic origin with a hill. It is shown that, when an asteroid hits a mountain, the angle of dispersion of high-speed ejecta increases, which can explain the large size of the Australasian tektite strewnfield. The absence of a found crater-source of tektites is explained by the fact that such an impact would result in the formation of an underwater crater, which is more difficult to detect than one located on land.

Keywords: tektites, asteroid, numerical modeling, crater ejecta.