

УДК 523.6

ПАРАМЕТРЫ УДАРНОГО СЖАТИЯ ГРАФИТА НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ПОПИГАЙСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ

© 2024 г. В. В. Ким^{1,*}, С. И. Мартыненко¹, А. В. Острик¹, К. В. Хищенко¹,
член-корреспондент РАН И. В. Ломоносов¹

Поступило 14.12.2023 г.

После доработки 14.12.2023 г.

Принято к публикации 25.12.2023 г.

Для изучения гипотезы о метеоритном происхождении месторождения импактных алмазов, расположенного в бассейне реки Попигай, проведено численное моделирование процесса высокоскоростного удара массивного астероида с поверхностью Земли. В двумерной осесимметричной постановке моделируется нормальное соударение хондритного астероида со слоистой структурой земного грунта со скоростью 25 км/с. Слой природного углерода располагается в приповерхностной зоне нагружаемой области. Расчеты проведены с использованием многомерной параллельной реализации метода конечно-размерных частиц в ячейке. Для описания свойств материала метеорита и грунта используются модели уравнений состояния хондрита, кварца и углерода. Получены термодинамические параметры ударного сжатия материалов грунта на начальных стадиях процессов нагружения и кратерообразования.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, численное моделирование, углерод, хондрит

DOI: 10.31857/S2686740024040024, **EDN:** JPOGGW

Крупнейшие в мире месторождения импактных алмазов “Скальное”/”Ударное”, расположенные в районе Попигайского ударного кратера, вероятно, возникли в результате концентрированного ударного воздействия от падения крупного астероида на поверхность Земли около 36 млн лет назад [1]. В результате удара большие скопления природного углерода подверглись быстрому нагреву и сжатию до экстремальных температур и давлений и, как следствие, фазовому превращению графит-алмаз [2, 3]. В настоящей работе проведено теоретическое исследование методами вычислительной газовой динамики процесса высокоскоростного удара массивного астероида по слоистой структуре земного грунта, для определения значений термодинамических

параметров происходящего при этом процесса ударного сжатия углерода, сконцентрированного в приповерхностных слоях.

В двумерной осесимметричной постановке моделируется удар пористого хондритного микрометеорита ($D = 7$ км, $\rho_0 = 3$ г/см³, $V_0 = 25$ км/с) по поверхности Земли, представленной в виде последовательности слоев углерода и кварца. Мощность углеродосодержащего слоя в районе Попигайского кратера оценивается толщиной от 1 до 1.3 км. В расчете начальные толщины слоев составляют 1.2, 12 и 50 км, с начальными плотностями вещества $\rho_0 = 1.3, 2.6$ и 2.8 г/см³ соответственно. На рис. 1 схематично показана постановка эксперимента.

В настоящей работе для моделирования течения многокомпонентной многофазной сжимаемой среды используется численный метод конечно-размерных частиц в ячейке [4]. Метод относится к лагранжево-эйлеровым методам. Изначально “частичная” природа метода оставляет возможность точного отслеживания

¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
Российской академии наук,
Черноголовка, Московская обл., Россия

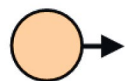
* E-mail: kim@frcp.ac.ru

положения и ориентации контактных и свободных границ в произвольных комбинациях и позволяет в любой момент времени точно сопоставить каждому конкретному элементу среды используемую компоненту / фазу / тело / модель. Практически отсутствуют проблемы расчета “смешанных” и “схлопывающихся” расчетных ячеек, которые присущи чисто эйлеровым методам. Метод успешно использовался для решения задач физики экстремальных состояний, моделирования высокоскоростного пробивания металлических преград [4], космических импактных экспериментов DeepImpact, LCROSS, APOPHIS, задач по генерации экстремальных состояний в металлах интенсивными ионными и протонными пучками. Для описания поведения материалов метеорита и грунта используются широкодиапазонные уравнения состояния [4].

На начальных стадиях процесса внедрения метеорита в грунт давления во фронте головной ударной волны достигают значения 240 ГПа. За первую секунду метеорит проникает на глубину 22 км, диаметр воронки при этом составляет 16 км. Материал ударника разогревается до температуры $T = 110$ КК.

На рис. 2 представлено расчетное поле распределения плотности в материале метеорита и грунта при $t = 10$ с. К этому моменту фронт

Хондрит
 $D = 7$ км
 $\rho_0 = 3$ г/см³
 $V_0 = 25$ км/с



Углерод
 $h_1 = 1.2$ км
 $\rho_0 = 1.3$ г/см³

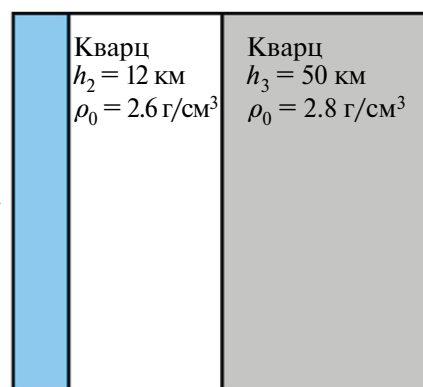


Рис. 1. Постановка задачи.

ударной волны уходит вглубь на глубину 50 км, контактная граница ударника углубляется до 42 км, диаметр воронки составляет 38 км. При этом максимальное давление во фронте волны спадает до 0.9 ГПа.

Со снижением давления сжатия происходит замедление процесса углубления кратера, после чего моделируемая стадия сжатия заканчивается. Далее на стадии экскавации происходит модификация воронки с обрушением стенок кратера.

Таким образом, проведено теоретическое исследование газодинамики начальных этапов процесса удара метеорита по поверхности Земли методами численного моделирования в двумерной постановке. Получены значения газодинамических параметров ударного сжатия

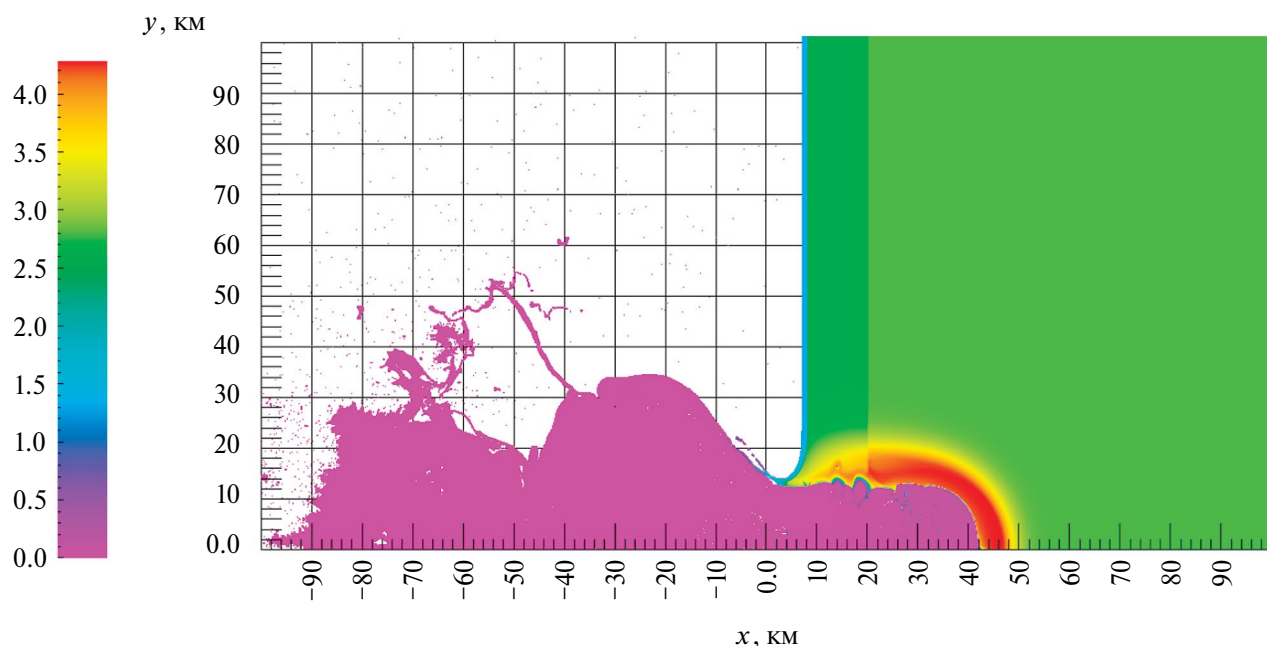


Рис. 2. Результаты расчета. Поле распределение плотности в момент времени 10 с.

и результирующие параметры образовавшегося кратера.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 21-72-20023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков И.А. Некоторые приоритетные результаты, полученные в области физики в 2019 году (из отчетного доклада академика-секретаря ОФН РАН) // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 492. № 1. С. 4–53.
2. Масайтис В.Л. Там, где алмазы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2016. 384 с. ISBN 978-5-93761-241-0
3. Hazards due to comets and asteroids. Ed. T. Gehrels. Univ. of Arizona Press. 1996. 1300 p.
4. Fortov V.E., Kim V.V., Lomonosov I.V., Matveichev A.V., Ostrik A.V. Numerical modeling of hypervelocity impacts // Int. J. Impact Eng. 2006. V. 33 (1–12). P. 244.

PARAMETERS OF GRAPHITE SHOCK COMPRESSION AT THE INITIAL STAGES OF POPIGAI ASTROBLEME FORMATION

V. V. Kim^a, S. I. Martynenko^a, A. V. Ostrik^a, K. V. Khishchenko^a,
Corresponding Member of the RAS I. V. Lomonosov^a

^a*Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry,
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region, Russia*

A numerical modeling of the process of a high-speed impact of a massive asteroid with the Earth's surface was carried out to study the hypothesis of the meteoritic origin of the impact diamond deposit located in the Popigai River basin. A normal collision of a chondritic asteroid with a layered structure of the Earth's soil at a speed of 25 km/s is simulated in 2D axisymmetric formulation. The natural carbon deposit layer is located in the near-surface zone of the loaded area. The calculations were carried out using a multidimensional parallel implementation of the finite-size particle-in-cell method. Models of the equations of state of chondrite, quartz and carbon are used to describe the properties of the meteorite and soil material. Thermodynamic parameters of impact compression of soil materials at the initial stages of loading and crater formation processes are obtained.

Keywords: hypervelocity impact, numerical modeling, graphite, chondrite