

# СУБЛИМАЦИЯ ОСКОЛКОВ АСТЕРОИДА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕГО ЯДЕРНЫМ ВЗРЫВОМ

А. К. ШАНЕНКО, И. П. ПОПОВИДЧЕНКО

Ряд наших статей был посвящен рассмотрению возможности предотвращения столкновения Земли с опасными космическими объектами (астероидами, метеороидами и т. д.). Число таких объектов размером не меньше километра на близких к Земле орбитах оценивается примерно в две тысячи. Пока известна лишь сравнительно небольшая их часть. Благодаря организации программ поиска таких объектов обсерваториями мира в последние годы число открытий близких к Земле астероидов существенно возросло — в целом сейчас ежегодно открываются до пятидесяти новых малых космических тел (МКТ).

МКТ имеют небольшие размеры: от нескольких сот метров до нескольких километров. Рекордсменом по малости является астероид 1991ВА, его размер от 6 до 9 м. Самый большой в популяции МКТ — астероид 1036 Ганимед ( $D \sim 39\text{--}41$  км). Два следующих по размерам астероида — 433 Эрос и 3552 Дон Кихот с диаметрами порядка 20 км. Все другие астероиды меньше 10 км и 75 % из них меньше 3 км. Сейчас на Земле известно несколько сотен кратеров (астроблем — «ран Земли») с диаметрами от десятков метров до сотен километров и возрастом от десятков до двух миллиардов лет. При рассмотрении поверхности Луны видно, что таких астроблем на ней неизмеримо больше. Земля и Луна по условию попадания на них астероидов идентичны. Напрашивается вывод, что атмосфера Земли является надежным щитом, закрывающим нашу планету от «космических пришельцев» средних параметров:  $D \sim 1,5$  км, скорость  $< 30$  км/с, «каменных» по составу (кстати, таких большинство). И только астероиды с  $D > 5$  км, железные или железокатенные по составу, к тому же имеющие скорости выше 30 км/с, могут достичь какими-то своими фрагментами, образующимися после воздействия атмосферы, поверхности Земли.

В последнее время в средствах массовой информации все чаще публикуются сообщения о возрастающей космической угрозе. Так появилась информация об астероиде 2000NT 7, орбита которого периодически сближается с орбитой Земли, что может стать причиной его попадания на нашу планету 1 февраля 2019 г. Даже есть заявления, что это самый потенциально опасный астероид, обнаруженный за всю историю иссле-



*Астероид Итокава*



Различные астероиды

дований подобных небесных тел. Однако считается, что эти данные нельзя считать окончательными, поскольку точность оценок по определению орбит МКТ недостаточна.

Неблагоприятная ситуация для Земли может возникнуть в случае, когда ее гелиоцентрическая орбита может пересечься с гелиоцентрической орбитой МКТ. При этом сценарий дальнейших событий может быть следующим. В определенный момент оба объекта находятся на минимальном расстоянии друг от друга. Не исключено, что через определенное время в силу каких-то причин может произойти их столкновение. Упреждающей мерой для избежания этого может быть заблаговременное применение ядерного взрыва на поверхности МКТ с целью отклонения его центра масс на безопасное расстояние от Земли. Но, как показали исследования, такое воздействие может привести к фрагментации МКТ. При этом фрагменты, кроме имеющейся у них продольной скорости, получают поперечную и, в итоге, относительно Земли они движутся в определенном телесном угле.

Ранее было показано, что при взрыве ядерного заряда с энерговыделением 6 мегатонн на поверхности МКТ типа Икар (диаметр тела — 1500 м) оно распадется на  $2 \cdot 10^4$  фрагментов среднего радиуса  $\sim 40$  м, движущихся в сторону Земли в полости конуса с углом при вершине  $\sim 10^{-3}$  радиан. При движении МКТ со скоростью 30 км/с в течение одного года (период обращения вокруг Солнца) радиус скопления осколков в окрестности Земли составит  $5 \cdot 10^5$  км, что почти на два порядка превышает радиус Земли. С большой вероятностью на Землю могут упасть 3–4 осколка, при достаточном разлете их воздействие будет независимым.

Безусловно, заблаговременное дробление крупного астероида ядерным взрывом является

спасительным для Земли. Эти 3–4 осколка, имеющие энергию порядка 100 мегатонн каждый, не могут вызвать катастрофу планетарного масштаба. Однако, падение такого фрагмента в населенной местности будет иметь нежелательные последствия.

Как показало дальнейшее изучение процесса движения этих осколков в атмосфере Земли с гиперзвуковыми скоростями, они под воздействием аэродинамического сопротивления претерпевают дальнейшую фрагментацию. В работах Г.П. Черепанова «Механика хрупкого разрушения» (М.: Наука, 1974) и А.Г. Иванова, В.А. Рыжанского «Хрупкие разрушения метеороидов в атмосферах планет» (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006) была предложена модель, положенная в основу расчета распада образовавшихся осколков метеороида типа Икар в атмосфере Земли. Как показали оценки, фрагментация МКТ начинается практически без потери скорости еще в мезосфере, на высотах 64–66 км. При этом число актов фрагментации  $n = 28\text{--}30$ . Завершается распад в стратосфере на высотах 37–38 км. Размеры образовавшихся фрагментов достигают достаточно небольших величин  $\sim 6\text{--}12$  см в количестве  $10^8 \cdot 10^9$  штук, а маршевые скорости уменьшаются до  $\sim 26$  км/с, т. е. уменьшаются всего на 13 %, что указывает на относительно малые потери энергии при фрагментации.

Проследим судьбу образовавшихся в большом количестве мелких осколков, представляющих собой так называемые болиды, внедряющиеся в более плотные слои атмосферы. В этом случае рассматривается движение затупленных тел в атмосфере Земли при больших скоростях входа.

В монографии В.П. Стулова «Аэродинамика болидов» рассмотрена задача о прямолинейном торможении болида в верхних слоях атмосферы Земли и его абляция. Основным в этом случае является определение характеристик космических тел по детальным динамическим и фотометрическим наблюдениям.

Согласно указанной монографии уравнения метеорной физики в безразмерных переменных после исключения из них времени имеют вид:

$$m \frac{dv}{dy} = \alpha \rho v s; \quad \frac{dm}{dy} = 2\alpha \beta_1 \rho v^2 s.$$

Масштабом скорости  $v$ , массы  $m$  и площади миделева сечения тела  $s$  выбраны их значения при входе в атмосферу, которые, обозначаются индексом  $e$ . Масштабами высоты полета  $y$  и плотности атмосферы  $\rho$  служит высота однород-

ной атмосферы  $h_0$  (около 8 км) и значения плотности на уровне моря соответственно.

В уравнения входят два безразмерных параметра:

$$\alpha = \frac{1}{2} C_d \frac{\rho_0 h_0 S_e}{M_e \sin \gamma}; \quad \beta = \frac{C_h V_e^2}{2 C_d H^*}.$$

Параметр  $\alpha$  называется коэффициентом торможения (он пропорционален отношению массы столба атмосферы с поперечным сечением  $S_e$  вдоль траектории к массе тела),  $\beta$  — параметр уноса массы (он пропорционален отношению доли кинетической энергии единицы массы тела, поступающей к телу в виде тепла, к эффективной энтальпии испарения).

В работах В. П. Стулова, М. И. Грицевич, Н. В. Попеленской уделяется внимание идентификации динамических параметров болидов по фотометрическим измерениям, проводимым в Канадской и Прерийской (США) сетях. Осуществляется это путем аппроксимации данных наблюдений методом наименьших квадратов, то есть максимального приближения экспериментальной траектории болида к траектории теоретической, полученной при оптимальном наборе параметров  $\alpha$  и  $\beta$ .

В нашем случае задача противоположная. В связи с известными массово-габаритными характеристиками рассматриваемых тел и скоростью их движения в атмосфере возможно рассчитать параметры  $\alpha$  и  $\beta$ , характеризующие торможение и абляцию метеорного тела в атмосфере. Известно, что значение эффективной энтальпии  $H^*$  достаточно крупных болидов ( $M_e > 5$  кг) лежит в относительно узких пределах от 1000 до 2000 Дж/г. С уменьшением массы разброс значений возрастает, хотя большинство болидов имеют значение  $H^*$  в тех же пределах.

Принимая значение  $C_d \approx 1$ ,  $C_h \approx 0,1$  согласно работам В. П. Стулова, значение скорости движения болида в атмосфере  $V = 25$  км/с, получим значение  $\alpha$ , значение  $\beta \approx 7,5-15$ .

Для получения аналитического решения уравнений принимаются также два условия:  $\rho = \exp(-y)$  (барометрическая зависимость для изотермической атмосферы) и  $S = m^\mu$ ,  $\mu = \text{const}$  (режим абляции). Тогда решением уравнения с начальными условиями  $y = \infty$ ,  $v = 1$ ,  $m = 1$  и при  $\beta \gg 1$  будет  $v = 1$ ,  $m = 1 - 2\alpha\beta \exp(-y)$ .

Наконец, определим значения высоты погасания метеора, которые получаются из условия  $m_t = 0$  или  $v = v_t$  с использованием полученных  $\alpha$  и  $\beta$ . Высота погасания  $h$  определяется при усло-



вии  $m_t = 0$  соотношением  $y_t = \ln(2\alpha\beta)$ . Вычисления показали, что  $y_t = h/h_0 \approx 4,3$ , т. е.  $h \approx 34$  км.

Итак, поток болидов в количестве  $10^8-10^9$  шт., возникших на высотах 37–38 км, по результатам оценок сгорает на высоте 34 км. На рисунке представлена примерная картина, которая может возникнуть при этом в атмосфере Земли. Иными словами, имеется цилиндроподобный объем с радиусом основания 35 м и образующей 4000 м, содержащий каменную пыль с плотностью  $0,046$  г/см<sup>3</sup>. Скорость каждой пылинки — 25 км/с и их векторы почти сонаправлены. Высота над Землей переднего торца цилиндра 34–35 км.

Таким образом, при взрыве на поверхности астероида типа Икар диаметром 1,5 км ядерного заряда с энерговыделением 6 мегатонн образуется сгусток пыли (частички, молекулы, атомы, ионы) с очень большой кинетической энергией, который не сможет достичь поверхности земли, сгорев в плотных слоях атмосферы.

**ШАНЕНКО Аркадий Константинович** — ведущий научный сотрудник ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физико-математических наук

**ПОПОВИДЧЕНКО Ирина Петровна** — научный сотрудник ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ