УДК 523.53

Э.Н. Кривякова

ПОТОК ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ В ОКОЛОЛУННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Рассмотрена математическая модель, позволяющая по известному потоку метеороидов на поверхности Луны рассчитать окололунное облако вторичных частиц. Приведены характеристики этого облака в сфере гравитационного действия Луны. Статья предоставляет собой обзор работ, выполненных на кафедре математического анализа Томского государственного университета в 1977 – 1980 годах.

Ключевые слова: *первичный поток метеороидов, кратерообразование, поток вторичных частиц, размеры, масса, скорость, энергия частиц.*

В начале 80-х годов прошлого века возрос интерес исследователей к изучению потоков космических частиц в межпланетном пространстве, в частности вблизи Луны и Марса. Этот интерес был вызван необходимостью обеспечения безопасности полетов космических аппаратов.

Поверхность Луны беспрепятственно подвергается межпланетному потоку метеороидов. Удар каждого метеороида о поверхность Луны вызывает разлет осколков в различных направлениях с различными скоростями и массами. Так формируется поток вторичных частиц на поверхности Луны. И хотя его энергия намного меньше энергии первичного потока метеороидов, но по числу частиц и их суммарной массе вторичный поток значительно превосходит первичный.

Инициатором работ в Томском государственном университете по изучению потоков космических частиц стал доцент кафедры математического анализа Вильгельм Генрихович Фаст. Под его руководством в течение нескольких лет начиная с 1977 года работала группа сотрудников кафедры с привлечением других сотрудников университета, изучая поток вторичных частиц в окололунном пространстве. В.Г. Фаст, Г.Г. Пестов, Э.Н. Кривякова, Н.А. Исаева представляли основной состав группы. На различных этапах в работе группы принимали участие А.П. Бояркина (НИИПММ), Л.Г. Плеханова и Г.В. Сибиряков – сотрудники ММФ. Работа по изучению этого явления проводилась по договору с Институтом геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (г. Москва).

Важность изучения потока вторичных частиц обусловлена его значительной ролью в формировании поверхностного слоя Луны и создании опасной ситуации для находящихся на Луне или в окололунном пространстве космических аппаратов.

Работа, как всякое исследование, началась с изучения результатов, опубликованных к этому времени. Были рассмотрены почти сто статей и книг, из них примерно две трети на английском и немецком языках.

К моменту начала работы нашей группы имелось три основных модели для расчета распределения осколков по массе и объему. А.Н. Колмогоров обосновал использование логнормального распределения для описания размеров фрагментов, А.Н. Мухамеджанов показал, что функция распределения размеров частиц в продуктах ударного разрушения описывается степенной зависимостью, а Л.А. Мержиевский позднее провел эксперименты и предложил свою модель рас-

пределения размеров осколков, образовавшихся при пробивании тонкой преграды высокоскоростной частицей. Анализ указанных моделей нашей группой показал, что применение этих моделей для получения распределения осколков по массе и объему не полностью отражает действительную картину дробления.

Заметим, что при ударе высокоскоростной частицы о преграду в результате выделения кинетической энергии образуется кратер (воронка). Эти кратеры могут быть взрывными или просто ударными. Однако доля метеороидов, не образующих ударные кратеры, составляет менее 1% в потоке метеороидов, падающих на Луну, поэтому в расчетах ею можно пренебречь, ввиду малости вклада таких метеороидов во вторичный поток. Это тем более правомерно, так как поток осколков при возникновении взрывного кратера существенно больше потока при образовании кратера без взрыва.

Нами была построена математическая модель кратерообразования и формирования выброса. Эта модель позволяет по известной модели обстановки кратерообразования на поверхности Луны, содержащей интенсивность и плотность метеорного потока, плотность распределения скоростей метеороидов, в зависимости от их массы и модель плотности лунного грунта (реголита), рассчитать интенсивность потока выбиваемых вторичных частиц на поверхности Луны. Математическая модель образования осколков была предложена для двух вариантов взрыва метеороида: для случая взрыва в центре шара и случая взрыва под поверхностью. Идея такого подхода принадлежит Г.Г. Пестову, в получении необходимых формул участвовала также и вся группа. Опишем кратко оба варианта.

1. Образование осколков при взрыве в центре шара. На первом этапе рассматривается шаровой слой с внутренним радиусом r и толщиной слоя Δr и определяется расход энергии ударной волны в этом слое в предположении, что энергия ударной волны на поверхности сферы равна произведению радиального напряжения и площади поверхности сферы. Расход энергии ударной волны в слое есть разность между энергией на внутренней сфере слоя и энергией на внешней сфере слоя. Далее, предполагается, что энергия, идущая на образование трещин, составляет постоянную часть расхода энергии в слое, а полная площадь трещин пропорциональна этой энергии. Исходя из этого, подсчитывается площадь получившихся трещин на единицу объема. Затем рассматривается шаровой слой, толщина которого равна среднему линейному размеру осколка на расстоянии r от центра взрыва, и находится число осколков в этом слое. Используя этот результат, интегрируя, находится число осколков в слое, толщина которого много больше внутреннего радиуса. И, наконец, задавая конкретный вид радиального напряжения $\sigma^2(r)$, получаем функцию распределения осколков по размерам.

2. Распределение осколков при взрыве под поверхностью. Пусть взрыв происходит под поверхностью грунта на глубине d_c , и при этом зона образования трещин за счет действия ударной волны имеет диаметр, намного превышающий d_c . В этом случае отраженная волна движется по конусу, уже разрушенному ударной волной на достаточно мелкие фрагменты. Следовательно, можно считать, что основной вклад в образование осколков вносит ударная волна, а отраженная волна окончательно разделяет уже образовавшиеся фрагменты и придает ускорение небольшому поверхностному слою лунного грунта. Основное ускорение масса осколков получает за счет расширения газов, образовавшихся при взрыве. Для этой модели взрыва также получены формулы для подсчета числа осколков, образовавшихся внутри тела, ограниченного двумя коническими поверхностями с общей вершиной и с образующими, составляющими с горизонтальной плоскостью

соответственно угол θ_1 и θ_2 . Получены формулы для числа осколков, вылетающих в единичном телесном угле под заданным углом к горизонту при заданных пределах масс; формулы для величины энергии, затраченной на ускорение осколков в этом телесном угле, формулы для вычисления скорости осколков в нем, а также распределения числа осколков по массе, по скорости и по энергии.

Осколки, получающиеся в результате взрыва метеороидов, формируют поток вторичных частиц на поверхности Луны. Часть этих осколков падает на Луну. Другая часть осколков, скорость которых выше второй космической скорости, улетает в космос. Для количества вторичных частиц, падающих обратно на Луну, получены распределения по массе и энергии, а также функция совместного распределения по массе и скорости.

К сожалению, по условиям работы группы многие получаемые результаты не могли быть опубликованы в открытой печати. Некоторые результаты были опубликованы в [1]. В этой работе отмечается также, что у поверхности Луны вычисленный суммарный вторичный поток превосходит первичный на 5 порядков для осколков, масса которых больше чем 10^{-14} г, на 3 порядка для осколков, масса которых больше чем 10^{-6} г, на 4,3 порядка для осколков, масса которых больше чем 10 г. На высоте 10 000 км вторичный поток близок к первичному.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фаст В.Г., Пестов Г.Г., Сибиряков Г.В. и др. Структура окололунного облака частиц, выбиваемых с поверхности Луны метеороидами // Метеорное вещество в межпланетном пространстве. М.; Казань, 1982. С. 41–44.

Статья поступила 16.05.2011 г.

Krivyakova E.N. THE STREAM OF SECONDARY PARTICLES IN THE CIRCUM-LUNAR SPACE. A mathematical model which permits one to calculate a circumlunar cloud of secondary particles by a known meteorite stream on the Moon surface is considered. The cloud characteristics in the sphere of the Moon gravitation are presented. The article gives a review of works executed on the Calculus Department of Tomsk State University in 1977–80.

Keywords: primary meteoroid stream, cratering, secondary particles stream, size, mass, velocity, energy of particles.

KRIVYAKOVA Eleonora Nonovna (Tomsk State University)
E-mail: eleon@sibmail.com