

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая монография посвящена актуальной проблеме космической безопасности Земли, угрозой для которой представляют эпизодические атаки малых планет (астероидов), комет и метеороидов, объединенных общим понятием «малые космические тела». Угроза обусловлена тем, что, двигаясь с космической скоростью, малое космическое тело способно пронизать атмосферу до столкновения с планетой. При этом окружающей среде за короткое время сообщается кинетическая энергия тела, уровень которой, при достаточно больших его размерах и скорости движения, может быть колоссальным, что чревато тяжелыми или даже глобальными катастрофическими последствиями для обитателей планеты, вплоть до вымирания значительной их части. Приведены примеры таких событий, случившихся как в древности, так и в новейшей истории Земли.

Одним из аспектов проблемы является прогнозирование возможных последствий встречи Земли с малым космическим телом. Трудность этой задачи в значительной степени обусловлена неизвестностью характеристик тела, поэтому немаловажным способом достижения цели является физико-математическое моделирование процессов, протекающих при взаимодействии космического «гостя» с планетой. При этом важным звеном является выбор критерия разрушения, способного привести к адекватному описанию процесса фрагментации малого космического тела в атмосфере планеты.

В нашей работе приведен краткий обзор известных физико-математических систем, моделирующих фрагментацию хрупкого малого космического тела в атмосфере планеты. Часть моделей разработана ранее без участия авторов на основе критериев разрушения твердого тела, принятых в теориях прочности, сопротивления материалов, использование которых для описания хрупких разрушений представляется некорректным. В этих моделях фрагментация описывается либо как одноразовое тотальное раздробление тела, либо как лавинообразный процесс постепенного измель-

чения его фрагментов, причем ни их количество, ни размеры не поддаются определению.

Авторами предложен оригинальный комплекс новых физико-математических моделей распада малого космического тела в атмосфере планеты. При этом рассматриваются случаи как «косого» падения тела на планету, так и его «транзитного» пролета мимо нее. В данном комплексе распад малого космического тела представляется как двухстадийный, где на первой стадии происходит фрагментация хрупкого тела, а на второй – рассеяние (поперечный разлет) его фрагментов в пространстве, вплоть до образования первичного кратерного поля на грунте (при «косом» падении). Для каждой из двух стадий разработана специфичная модель, но они объединены общей аэродинамической природой действующих в них факторов и в комплексе позволяют детально проанализировать весь процесс распада метеороида в атмосфере.

Первая стадия распада малого космического тела представляется как двухфазная: первая фаза – фрагментация под действием аэродинамического сопротивления атмосферы, и вторая – торможение образовавшихся фрагментов при их дальнейшем движении. При разработке первой фазы авторы впервые использовали критерий разрушения хрупкого тела, разработанный в результате интегрального подхода в энергетической концепции современной механики хрупкого разрушения. Описание хрупкого разрушения на основе этого критерия, хотя и может привести к некоторым количественным погрешностям, зато позволяет сохранить его физически верную картину. Дано описание интегрального подхода в указанной концепции, согласно которой разрушение, как разделение целого тела на части, есть результат совершения работы трещинообразования, выполненной за счет энергии упругих деформаций, накопившейся в теле при его аэродинамическом торможении.

Оригинальность модели фрагментации малого космического тела заключается, главным образом, в том, что она базируется на энергетическом критерии разрушения и поэтому описывает фрагментацию тела совершенно по-новому, как процесс его дробления путем последовательного удвоения фрагментов родительского те-

ла, которые при этом геометрически подобны ему. Это существенно, так как именно поэтому фрагментация является дискретным процессом, в котором дробление малого космического тела разделено в пространстве и времени на чередующиеся акты все большего измельчения фрагментов. Это обусловлено проявлением сильного масштабного эффекта энергетической природы, поскольку по мере измельчения фрагментов прочность их резко возрастает, и для разрушения требуется погружение в более плотные слои атмосферы. Такой режим фрагментации дает возможность рассматривать следующий акт дробления фрагментов по той же схеме, что предыдущий.

В данной модели фрагментации малое космическое тело считается гомогенным и непористым, но имеющим дефекты структуры. Тело является хрупким, как и все тела космического происхождения, т. е. находившиеся в условиях низких температур, проникающей радиации и пр., причем рассматриваются тела двух форм: сферы и прямоугольного параллелепипеда. Нагрев тела, радиационное охлаждение и абляция не учитываются, так как считаются относительно незначительными. Основными факторами фрагментации являются аэродинамическое сопротивление атмосферы, определяющие параметры которой суть плотность и стандартная толщина, а также размеры, плотность и прочность малого космического тела, скорость его движения и угол наклона траектории (при «косом» падении) или минимальная высота сближения с планетой (при «транзите»).

Важной частью модели фрагментации являются рекуррентные формулы, позволяющие рассчитать параметры движения фрагментов в любой точке траектории. При этом имеется возможность определять не только размеры фрагментов при каждом акте дробления, но и высоты (или координаты точек траектории тела), на которых происходят акты дробления. Наконец, модель позволяет определять условия, при которых фрагментация может прекратиться или не произойти вообще. Затраты кинетической энергии малого космического тела на его фрагментацию весьма малы, тем не менее в расчетах и они учитываются автоматически. Результаты

расчетов фрагментации малого космического тела служат исходными данными для анализа процессов на следующем этапе его взаимодействия с атмосферой, когда рассматривается рассеяние фрагментов в пространстве.

Модель рассеяния фрагментов малого космического тела так же оригинальна и, как и модель его фрагментации, разработана для тех же форм тела: сферы и прямоугольного параллелепипеда. Факторы движения фрагментов в данной модели имеют аэродинамическую природу, так как ими являются аэродинамическое сопротивление атмосферы и обусловленные им инерционные силы малого космического тела. При этом фрагменты совершают сложные движения, симметричные относительно траектории движения общего центра масс, а именно: поступательное движение по инерции вперед и ускоренный поворот вокруг своих центров масс на определенный угол с соответствующим смещением этих центров от общей траектории движения. Именно в таком представлении движения фрагментов и состоит оригинальность модели их рассеяния.

Как и фрагментация малого космического тела, рассеяние его фрагментов тоже представляется как двухфазный процесс. В первой фазе совершается поворот фрагментов относительно плоскости разделения при сохранении взаимного контакта на лобовой поверхности в точке их касания (сфера) или по линии касания ребер (параллелепипед). Во второй фазе, наступающей сразу после прекращения контакта, фрагменты вращаются вокруг своих центров масс и свободно разлетаются перпендикулярно направлению движения общего центра их масс по траектории. Эти движения происходят со скоростями, достигнутыми в первой фазе, и продолжают до следующего разрушения, если, конечно, оно состоится, в противном случае фрагменты будут и дальше разлетаться с этими скоростями. Важной особенностью первой фазы является сохранение взаимного контакта фрагментов на лобовой поверхности, так как это обуславливает поперечное ускорение их центров масс. При анализе этой фазы рассеяния, получены дифференциальные уравнения кинестатики фрагментов, решение которых позволяет определять параметры движения фрагментов, в частности, их угло-

вую и поперечную скорости, в зависимости от угла поворота. При расчетах на данной стадии определяющими параметрами являются те же, что и на первой стадии (кроме прочности), а также высота и скорость, при которых произошла фрагментация, плотность и размеры фрагментов. Доля кинетической энергии малого космического тела, затраченной на его рассеяние, пренебрежимо мала, и поэтому допустимо ее не учитывать.

Полученное на примере Сихотэ-Алинского метеороида удовлетворительное (если не сказать, хорошее) согласие расчетных и фактических данных позволило авторам сделать следующие важные выводы.

- Во-первых, комплекс новых моделей распада (фрагментации и рассеяния) малого космического тела в атмосфере планеты, разработанных авторами на принципах современной механики хрупкого разрушения, способны не только приводить к результатам, адекватным реальности, но и достаточно корректно и детально анализировать процесс взаимодействия малого космического тела с атмосферой. Основным фактором, влияющим на течение этого процесса, является аэродинамический фактор.

- Во-вторых, различия расчетных результатов взаимодействия с атмосферой планеты малого космического тела исследованных форм (сфера или прямоугольный параллелепипед) в рамках принятых допущений, при прочих равных условиях, несущественны. Это дает основание ожидать такого же эффекта и для промежуточных форм малого космического тела.

- В-третьих, разработанный авторами комплекс моделей фрагментации и рассеяния позволил предложить альтернативный механизм распада кометы Шумейкеров–Леви 9 в атмосфере Юпитера.

Возможности применения данных моделей распада малого космического тела в атмосфере планеты продемонстрированы на примерах природных явлений, случившихся как в новейшей истории, так и в глубокой древности:

- падения на Землю Тунгусского (1908) и Сихотэ-Алинского (1947) метеороидов,

- распад кометы Шумейкеров–Леви 9 в атмосфере Юпитера (1992),
- удары по Земле Чикскулубского астероида на рубеже мелового и палеогенового периодов и Аризонского метеороида в палеолите.

Кроме того, рассмотрен гипотетический случай распада астероида типа Икара при «транзите» через атмосферу Земли.

На основе результатов моделирования указанных событий авторами впервые сделаны выводы о характере соответствующих малых космических тел и их возможных параметрах, значительная часть которых уже долгое время является предметом дискуссий. Авторы, разумеется, далеки от претензий на совершенство разработанного ими комплекса физико-математических систем, моделирующих распад метеороида в атмосфере планеты. Модели, конечно, не свободны от недостатков, часть которых известна и авторам.

Так, например, модель фрагментации тела дает в определенной степени идеализированную картину процесса, так как, вследствие неизбежного разброса физико-механических свойств материала в объеме метеороида, на самом деле размеры его фрагментов будут характеризоваться некоторой дисперсией. При этом нельзя исключить, что в некоторых актах разрушения метеороид или его фрагменты могут распадаться не на 2, а на три части и более, что и случается на практике. Поэтому естественно ожидать, что статистическое распределение фрагментов по размерам фактически будет асимметричным, с резким ограничением в области больших размеров.

Да и комплекс моделей в целом нельзя признать безупречным. Так, его упрощенная структура уже приводит к погрешностям. А именно, методика расчетов состоит из двух этапов, на первом из которых проводится сквозной расчет фрагментации без учета рассеяния, которое рассчитывается потом. А следовало бы, по-видимому, после каждого акта фрагментации проводить расчет рассеяния фрагментов, и по его результатам, принимаемым в качестве исходных данных, рассчитывать параметры следующего акта фрагментации и т. д. В свое оправдание заметим, что в ряде случа-

ев мы провели подобные расчеты, но они не привели к существенным уточнениям, хотя и оказались более трудоемкими.

Некоторые погрешности могут быть обусловлены естественными причинами, например, неизбежным отсутствием точных данных о трещиностойкости тела ( $K_{IC}^2$ ). Поэтому ничего другого не остается, как использовать опубликованные данные, которые, как правило, получены в лабораторных условиях и не всегда в достаточной мере адекватны реалиям. Вследствие этого модели теряют универсальность, и результаты расчетов могут грешить отклонениями от теории, такими, как повышенная динамичность нагружения тела при фрагментации, т. е.  $\tau < 1$ , где  $\tau$  определяется формулой (2.21), или невыполнение условия (3.57) при рассеянии фрагментов, т.е. недостижение ими критических значений угла поворота и угловой скорости между актами фрагментации. Примерами таких случаев являются некоторые промежуточные результаты расчетов распада Чикскулубского астероида и Аризонского метеороида. Однако, по мнению авторов, несмотря на указанные неточности, окончательные результаты расчетов вполне удовлетворительно отражают реалии.

В любом случае, авторы надеются на снисходительность любезного читателя и, если он обнаружит еще какие-то неточности или, не дай бог, ошибки, они будут ему только благодарны, утешаясь сознанием того, что натура необъятна, и во всех подробностях ее не описать, даже используя могучие возможности современной математической физики и вычислительной техники.

Авторы глубоко благодарны академику РАН В. М. Титову, директору Института экспериментальной газодинамики и физики взрыва РФЯЦ-ВНИИЭФ доктору технических наук А. Л. Михайлову, а также начальнику лаборатории кандидату физико-математических наук М. А. Сырунину и младшему научному сотруднику Н. В. Ефремовой за внимание и неоценимую помощь в работе над книгой.