

## ВВЕДЕНИЕ

Космическая безопасность Земли – одна из актуальных и жизненно важных проблем современности. Сохранившиеся до наших дней гигантские древние астроблемы на Земле от так называемых импактных событий (ударов астероидов, комет и крупных метеороидов по земной коре), колоссальные энерговыделения в их результате, сравнительно недавние падения Тунгусского\* (1908 г.) и Сихотэ-Алинского метеороидов (1947 г.), атака Юпитера фрагментами кометы Шумейкеров–Леви 9 (1994 г.) – все это красноречиво свидетельствует о грозной опасности подобных явлений [1–7].

Доказано, что верным признаком импактного события является наличие кольцевой структуры или астроблемы на поверхности планеты [6]. Результаты геологических исследований и сканирования Земли из космоса свидетельствуют об изобилии на ней таких структур. Размеры некоторых из астроблем поистине грандиозны. Так, например, одной из них является кратер Чиксулуб близ южного побережья Мексиканского залива (п-ов Юкатан). Этот кратер с диаметром, по разным данным, от 150 до 300 км образовался от удара астероида диаметром  $\approx 10$ –12 км около 65 млн. лет назад (на рубеже мелового и палеогенового периодов геологической истории Земли). Впечатляют и такие астроблемы, как кратер у реки Попигай на севере Якутии ( $\approx 100$  км, 35 млн. лет), подземный кратер близ Хэмптона в штате Вирджиния, США (диаметр 82 км, возраст 35 млн. лет), Пучеж-Катунская впадина ( $\approx 80$  км) близ Нижнего Новгорода, кратер Рис ( $\approx 20$  км) в Германии, Аризонский кратер ( $\approx 1,2$ –1,3 км, 30–50 тыс. лет) в США и многие другие.

Разумеется, аналогичные структуры – не редкость в космосе. Они особенно хорошо видны на планетных образованиях, лишенных атмосферы. Например, Луна, Меркурий, многие спутники

---

\*Его природа до конца не выяснена. По мнению большинства специалистов, это была комета изо льда или его смеси со снегом.

Юпитера и Сатурна, а также крупные астероиды, буквально усеяны кольцевыми структурами и кратерами импактного происхождения.

Опасные последствия импактных событий на Земле общеизвестны. Так, встречи с малыми\* космическими телами (МКТ) типа астероидов обычно приводили к геологическим катаклизмам и резким неблагоприятным климатическим изменениям с последующими катастрофическими вымираниями биоты. Например, при вышеупомянутом импактном событии мел-палеогенового рубежа (Чиксулуб) имели место мощные землетрясения и колоссальные ударно-волновые (УВ) явления в атмосфере, которая помутнела настолько, что Земля на десятки лет погрузилась во мрак. При этом произошли резкие глобальные ухудшения климата и кислородного баланса в атмосфере. В итоге наступила так называемая «ударная зима», что в комплексе с дефицитом кислорода привело к гибели или спровоцировало вырождение до 40 % родов животных, в частности, возможно, динозавров. Аналогичные вымирания отмечены и позднее, 35 млн. лет назад, после Хэмптонского и, спустя несколько тыс. лет, Попигайского (до 20 % родов животных) и ряда других импактных событий. В частности, установлено, что после, так сказать, «двойного» (Хэмптонского и Попигайского) удара по Земле, помутнение атмосферы стало причиной глобального похолодания в последующие 100 тыс. лет [8]. А встреча Земли с астероидом 60-километрового диаметра может стать причиной тотального вымирания высокоорганизованных форм жизни [1].

По статистике МКТ, подобные Тунгусскому, встречаются с Землей в среднем раз в 300 лет, а каждый миллион лет – одно-два МКТ размером  $\approx 1$  км или более [4]. Как отмечено в [7], «угроза падений на Землю больших метеоритов, способных вызвать региональные или даже глобальные катастрофы, совершенно непредсказуема. Опасные пришельцы из космоса могут посетить нас в любой момент, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Поэтому защита Земли от падений больших метеоритов представляет одну из самых насущных задач, стоящих перед человечеством».

---

\*Сравнительно с толщиной атмосферы планеты.

Для борьбы с опасными МКТ предпочтительны, в основном, два пути:

– сообщить МКТ, обнаруженному на достаточном удалении от Земли, импульс, способный отклонить его траекторию от Земли на требуемый угол;

– разрушить МКТ мощным взрывом на достаточно мелкие фрагменты так, чтобы с Землей встретилась только часть из них, и это не привело бы к катастрофе.

Общим для обоих путей является необходимость применения мощных ядерных зарядов и использования ракетно-космических систем для их доставки к цели. Тем и другим современная цивилизация обладает, или близка к обладанию. Оптимизм в реалистичности решения данных задач внушают, например, вполне успешные результаты программ «Вега-1», «Вега-2» и «Джотто» (1986 г.), в рамках которых было произведено фотографирование ядра кометы Галлея с близкого расстояния. Разумеется, для успешной борьбы с опасными МКТ необходим постоянный мониторинг космоса. Средства для этого имеются: наземные и космические телескопы, радарные системы. Важно отметить, что все указанные средства непрерывно совершенствуются с использованием достижений науки и техники.

Одним из аспектов проблемы является прогнозирование возможных последствий встречи Земли с МКТ. В связи с этим представляет значительный интерес изучение процессов, происходящих при его внедрении в атмосферу. В частности, важно исследовать фрагментацию МКТ и взаимодействие фрагментов с атмосферой, оценить ареал их рассеяния на грунте и энерговыделение при протекании этих процессов. Трудность решения этих задач усугубляется недоступностью летящих МКТ и вследствие этого невозможностью своевременно определить его размеры, свойства и параметры движения. Поэтому остается использовать лишь косвенные материалы, такие, как данные астрономических наблюдений, найденные метеориты или их фрагменты (так называемые индивидуальные образцы), характеристики кратеров и кратерных полей, а также свидетельства очевидцев. В этих условиях немаловажным

способом достижения цели является физико-математическое моделирование изучаемых процессов.

В последнее время методы моделирования взаимодействия МКТ с атмосферой планеты разрабатывались весьма интенсивно. Из ранних работ в этом направлении следует отметить [9–11], из поздних – [12–23]. Однако даже располагая фактическими материалами изучения последствий взаимодействия МКТ с планетами, исследователи расходятся в методах моделирования указанных процессов, что приводит к принципиально различным результатам, которые, как представляется, не всегда адекватны реалиям. Главное расхождение состоит в выборе критериев разрушения МКТ, на основе которых и разрабатывается соответствующая модель его фрагментации. Основная дискуссия происходит, по существу, вокруг вопроса о факторах, приводящих к разрушению МКТ. При этом даже его состояние представляется неоднозначно.

Так, в моделях [9, 11–13] фрагментация МКТ представляется как интенсивное одномоментное тотальное раздробление. В моделях [10, 15, 16, 18, 19] фрагментация МКТ представляется как дробление путем последовательного измельчения фрагментов. В частности в [9–13, 19] критерии разрушения основаны на теориях прочности сопротивления материалов (СМ), однако в [10, 19] дополнительно учитывается абляция фрагментов. Модель [19] может, в принципе, учитывать и возможные прочностные неоднородности исходного тела. Модели [10, 19] описывают фрагментацию МКТ как лавинный процесс дробления, в котором акты измельчения фрагментов тела следуют друг за другом непрерывно. В [14] утверждается, что последовательное дробление более характерно для относительно небольших тел, а более крупные тела дробятся «в целом» и далее движутся в виде роя мелких осколков. Однако по мнению авторов работы [19], это утверждение нуждается в наблюдательной проверке.

При использовании моделей, основанных на теориях прочности СМ, ни количество, ни размеры фрагментов МКТ не поддаются определению. Модель, разработанная авторами на основе механики разрушения (МР), а именно механики хрупкого разрушения (МХР)

в современной ее трактовке (см. гл. 1) [15, 16], тоже описывает фрагментацию МКТ как последовательное дробление, но происходящее путем удвоения числа его фрагментов, причем последние остаются геометрически подобными (ГП) родительскому телу. С позиций современной МХР, процесс фрагментации МКТ представляется дискретным, в отличие от вышеупомянутого лавинного дробления, так как в данном случае акты фрагментации следуют друг за другом не непрерывно, а разделены в пространстве и времени.

В свете современной МХР модели разрушения МКТ, основанные на теориях прочности СМ, представляются некорректными. В самом деле, с одной стороны, все упомянутые модели, очевидно, описывают фрагментацию хрупкого тела, ведь реальные МКТ состоят из хрупких материалов, таких, как лед (как правило, с включениями инородных минералов), камни из силикатов на основе хондритов (до 90 %) или ахондритов и железоникелевые концентраты (5–6 % от общего количества МКТ). Все они, по своей природе (гетерогенная анизотропная структура, достаточно большие размеры), а также по условиям космоса (низкая температура, проникающая радиация), несомненно, имеют дефекты структуры (найденные метеориты буквально насыщены ими) и являются хрупкими телами. Даже при внедрении в атмосферу температура внутри них (за исключением достаточно мелких фрагментов) не успевает существенно повыситься из-за малого времени взаимодействия с атмосферой и абляции. Однако, с другой стороны, согласно СМ, прочность тела считается исчерпанной при возникновении в нем пластических деформаций (растяжения или сдвига) [24]. Пластические деформации в хрупком теле? Да, они возможны, но не в МКТ при его высокой скорости движения в атмосфере, а при достаточно длительном воздействии высоких давлений. Например, известно, что в этих условиях, если они сохраняются годами и более, текут даже такие хрупкие тела, как стекло и горные породы. Длительность же взаимодействия МКТ с атмосферой исчисляется несколькими секундами, поэтому не может быть и речи о его пластичности. Таким образом, приложение СМ к описанию разрушения

хрупкого МКТ, внедрившегося в атмосферу, приводит к очевидно-му противоречию реальности.

Авторы настоящей книги, будучи специалистами в области газодинамики и прочности, являются сотрудниками Российского федерального ядерного центра-Всероссийского НИИ экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ). В 60–80-е годы прошлого века у нас были проведены две серии исследований ГП сфероидных сосудов на прочность при внутреннем взрывном нагружении из центра. Сосуды были изготовлены из пластичной стали марки 22 К (котельной) и в первой серии имели диаметр (базовый размер) от 1,5 м до 0,1 м при отношении толщины к диаметру (относительной толщине)  $\approx 20\%$ , т. е. по базовому размеру они отличались в 15 раз [25]. Сосуды второй серии отличались по базовому размеру в 10 раз (от 2 м до 0,2 м), но имели переменную толщину (от 9 % на экваторе до 17 % на полюсе) и заполнялись водой [26].

Как известно, при взрывах в центрах ГП сосудов зарядов конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) одинаковой относительной массы (отношения массы ВВ к массе сосуда) из соображений подобия следует, что длина ударной волны (УВ) при подходе к стенкам сосудов будет пропорциональной их базовому размеру, а интенсивность УВ – одной и той же. Остаточное давление газообразных продуктов взрыва в этих сосудах тоже будет одинаковым. Таким образом, теоретически и взрывное разрушение ГП сосудов должно происходить при одной и той же относительной массе ВВ, подобно тому, как, согласно СМ, такие сосуды в условиях статического нагружения должны разрушаться при одинаковом внутреннем давлении.

В опытах сосуды были доведены до разрушения, но результаты эксперимента опровергли наши ожидания, так как произошло следующее:

1. Сосуды первой серии разрушились на 2 части, причем разрушение носило типично хрупкий характер, несмотря на использование для них пластичной стали. Ориентация трещин была меридиональной.

2. Во второй серии большой сосуд разрушился хрупко на 5 примерно равных фрагментов с меридиональной ориентацией трещин и без следов пластической деформации. Разрушение малых сосудов произошло после пластических деформаций и было локальным, т. е. без полного разделения на части, с образованием трещин экваториальной ориентации.

3. При разрушении ГП сосудов имели место проявления сильных масштабных эффектов (МЭ): в первой серии малый сосуд удалось разрушить при относительной массе ВВ, в 15–17 раз большей, а во второй – в 5 раз большей, чем у их крупных прототипов! Кроме того, во второй серии с уменьшением размера сосуда кардинально изменились характер разрушения (от хрупкого к вязкому) и ориентация трещин.

Теории прочности СМ оказались бессильными при объяснении МЭ, обнаруженных как в этих опытах, так и в массе иных аналогичных исследований, проведенных авторами. И всегда оказывалось, что в ряду ГП объектов взрывостойкость меньших из них была относительно выше, чем больших. Лишь с позиций современной МХР (ее основы подробно изложены в главе 1) удалось установить, что природа столь сильных МЭ может быть только энергетической. Поэтому именно энергетическая концепция МХР и была положена авторами в основу их модели фрагментации МКТ, являющегося, как указывалось выше, хрупким (в силу условий космоса).

Так родилась идея применить теорию МЭ и к метеороидам, рвущимся к планете сквозь атмосферу, например, при решении вопроса о том, что произойдет, если в процессе разрушения такого метеороида количество фрагментов будет постепенно удваиваться, но все они будут ГП родительскому телу. По-видимому, каждый новый фрагмент, будучи меньше своего предшественника, станет прочнее. Следовательно, для его разрушения потребуется увеличение аэродинамической (АД) нагрузки, что возможно только при снижении в более плотные слои атмосферы. Таким образом, фрагментация МКТ хоть и будет последовательной, но уже не лавинной, а дискретной, с разделением ее актов в пространстве и времени.

Идея оказалась плодотворной, и в 1994 г. авторы впервые выступили с докладом о ней «Возможная природа взрыва Тунгусского метеорита и распада кометы Шумейкеров–Леви» на международной конференции «Проблемы защиты Земли от столкновения с опасными космическими объектами» в Снежинске, а в 1995 г. и 1997 г. опубликованы материалы [15, 16] о разработанной ими принципиально новой модели последовательной дискретной фрагментации МКТ, основанной на интегральном подходе (ИП) в энергетической концепции современной МР [27, 28]\* (см. гл. 1). Авторы остановили свой выбор на ИП, так как при описании хрупкого разрушения он, хотя и может привести к некоторым количественным погрешностям, зато позволяет сохранить его физически верную картину [29]. Этот подход при анализе разрушения метеорных тел в атмосферах планет представлялся авторам весьма перспективным, что и подтвердилось впоследствии [15, 16, 20–23]. Данная модель, в отличие от вышеупомянутых моделей последовательной лавинной фрагментации МКТ, описывает ее как дискретный процесс, в котором акты дробления фрагментов разделены в пространстве и времени, и позволяет определять не только размеры фрагментов после каждого акта, но и высоты (или координаты точек траектории тела), на которых эти акты совершаются. Наконец, она позволяет определять условия, при которых фрагментация может прекратиться или не произойти вообще. С помощью этой модели исследовались два вида взаимодействия МКТ с атмосферой:

– при его движении под углом к горизонту (или при «косом» падении);

– при его движении мимо планеты (или при своего рода «транзите»).

Оба вида взаимодействия объединяет двухстадийное протекание процессов:

---

\*Ранее материал был представлен в докладе на международной конференции «Параллельные вычисления и математическое моделирование», проходившей в Сарове летом 1996 г.



– I стадия – фрагментация МКТ под действием АД нагружения и торможение роя образовавшихся фрагментов при их дальнейшем движении;

– II стадия – рассеяние (поперечный разлет) образовавшихся фрагментов.

В данной книге представлены:

1. Теория ИП в энергетической концепции современной МХР и пример ее приложения к задаче о разрушении МКТ в атмосфере планеты.

2. Разработанные авторами новые физико-математические модели распада МКТ в атмосфере планеты в двух характерных случаях – при «косом» падении на планету и при «транзите», в том числе модель фрагментации МКТ и модель рассеяния его фрагментов.

3. Примеры приложения моделей распада МКТ к известным природным явлениям, а именно:

– подробный анализ опубликованных работ авторов по проблеме импактных событий в новейшей истории Земли – Сихотэ-Алинского и Тунгусского, или гипотетического «транзита» астероида типа Икара через атмосферу Земли;

– новые исследования древних импактных событий, таких, как Чиксулубское и Аризонское, а также современного астрономического явления – распада кометы Шумейкеров–Леви 9 при «транзите» через атмосферу Юпитера перед падением на него ее фрагментов.

Результаты ряда опубликованных исследований, по возможности, обобщены с внесением в них некоторых дополнений и исправлением обнаруженных, в ряде случаев, неточностей (они оказались незначительными). Поэтому возможны отдельные отличия от соответствующих данных цитируемых авторских работ.

## Литература

1. Jansa L. F., Aubry M.-P., Gradstein F. M. Comets and extinctions: cause and effect? // Geological Society of America Special. 1990. Paper 247. P. 229–239.

2. Chapmen C. R. Comet on target for Jupiter // *Nature*. 1993. Vol. 363. P. 492–493.

3. Chapmen C. R., Morrison D. Impact on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard // *Nature*. 1994. Vol. 367. P. 33–40.

4. Медведев Ю. Д., Свешников М. Л., Сокольский А. Г. и др. Астероидно-кометная опасность / Под ред. А. Г. Сокольского. – СПб: ИТА РАН, 1996.

5. Немчинов И. В. и др. Внедрение крупных метеороидов в атмосферу. Теория и наблюдения // *Инженерно-физический журнал*. 1999. Т. 2, № 6. С. 1233–1265.

6. Зейлик Б. С. Разномасштабные кольцевые структуры – следствие катастрофических столкновений астероидов и комет с Землей // *Большая Медведица*. 2000. № 1. С. 16–23.

7. Вишневский С. А. Импактные события и вымирания организмов // Там же. С. 7–15.

8. Метеоритная атака // 1000 чудес природы. – Издательский Дом Ридерз Дайджест. 2002. С. 364–365.

9. Фадеенко Ю. И. Разрушение метеорных тел в атмосфере // *Физика горения и взрыва*. 1967. Т. 3, № 2. С. 276–280.

10. Baldwin B., Sheaffer Y. Ablation and breakup of large meteoroids during atmospheric entry // *Journal of Geophysical Researches*. 1971. Vol. 76, N 19. P. 4653–4668.

11. Григорян С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // *Космические исследования*. 1979. Т. 17, № 6. С. 875–893.

12. Hills J. H., Goda M. H. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere // *Astronomical Journal*. 1993. Vol. 105, N 3.

13. Коробейников В. П., Власов В. И., Волков Д. Б. Моделирование разрушения космических тел при движении в атмосферах планет // *Математическое моделирование*. 1994. Т. 6, № 8. С. 61–75.

14. Svetsov V. V., Nemtchinov I. V., Teterev A. V. Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus*. 1995. Vol. 116. P. 131–153.

15. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Возможная природа взрыва Тунгусского метеорита и распада кометы Шумейкеров-Леви // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 117–124 (поправка: Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 3. С. 143).

16. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Фрагментация малого небесного тела при его взаимодействии с атмосферой планеты // Доклады АН. 1997. Т. 353, № 3. С. 334–337.

17. Немчинов И. В., Попова О. П. Анализ Сихотэ-Алинского события 1947 г. и его сравнение с явлением 1 февраля 1994 г. // Астрономический вестник. 1997. Т. 31, № 5. С. 458–471.

18. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Анализ процесса дробления Сихотэ-Алинского метеорита с позиций механики разрушения // Там же. 1998. Т. 32, № 2. С. 164–168.

19. Стулов В. П. Аналитическая модель последовательного дробления и абляции метеорного тела в атмосфере // Там же. 1998. Т. 32, № 3. С. 455–458.

20. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Влияние формы малого космического тела на процесс его фрагментации в атмосфере планеты // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 3. С. 120–125.

21. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Фрагментация малого космического тела в атмосфере планеты при пролете мимо нее // Там же. 1999. Т. 35, № 5. С. 127–137.

22. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Модель рассеяния фрагментов малого космического тела в атмосфере планеты // Доклады АН. 2004. Т. 398, № 6. С. 759–763.

23. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Модель распада и рассеяния малого космического тела в атмосфере планеты // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 3. С. 121–132.

24. Ильюшин А. А., Ленский В. С. Соппротивление материалов. – Физматгиз. М.: 1959. 372 с.

25. Иванов А. Г., Сеницын В. А., Новиков С. А. Масштабные эффекты при динамическом разрушении конструкций // Доклады АН СССР. 1970. Т. 194, № 2. С. 316–317.

26. Иванов А. Г., Рыжанский В. А., Цыпкин В. И., Шитов А. Т. Экспериментальное исследование влияния масштаба на прочность котла высокого давления при внутреннем взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 102–108.

27. Иванов А. Г. Разрушение при взрывных нагрузках. Масштабные эффекты // Ударные волны и экстремальные состояния вещества. – М.: Наука. 2000. С. 388–421.

28. Иванов А. Г. Об адекватности описания процесса разрушения в расчетах на ЭВМ // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40, № 3. С. 191–195.

29. Рыжанский В. А., Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Огородников В. А. и др. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под ред. А. Г. Иванова. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2001.