

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ УДАРА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ АСТЕРОИДА

П.В. Григал, Б.В. Замышляев, А.Г. Любимов, А.С. Комаров, С.Н. Родионов,
А.А. Таранов, В.Г. Чистов

Центральный физико–технический институт МО РФ, г. Сергиев Посад, Россия

Введение

Резкое повышение интереса к проблеме предотвращения столкновений с Землей крупных космических тел (астероидов, комет) в последние годы объясняется вполне “земными” причинами.

- Прекращение “холодной” войны, испытаний ядерного оружия в России и США, значительное сокращение ракетно–ядерного потенциала привели к высвобождению большого количества высококвалифицированных научных и технических кадров, прежде занимавшихся разработкой и созданием различных видов оружия. И вполне естественно для этих мощных в интеллектуальном и техническом плане коллективов желание найти применение своим возможностям и соответствующее финансирование.
- Накопленные наукой к настоящему времени данные представляют собой хороший фундамент для исследований в данном направлении. Современная техника располагает принципиальными возможностями для решения этой проблемы: системами обнаружения, ядерными взрывными устройствами, ракетными системами доставки.
- В данной проблеме крайне важным и интересным является чисто научный аспект. По–видимому, он и должен преобладать в первые годы работы. В результате может быть получен уникальный объем научной информации об астероидах — важных объектах Солнечной системы, приобретен опыт мирного интернационального сотрудничества в области, имеющей непосредственное отношение к военным технологиям.

В настоящей работе мы основное внимание уделим различным аспектам кинетического воздействия на опасный космический объект (ОКО). Основная идея здесь — использование большой относительной скорости соударения между астероидом и “перехватчиком” в качестве источника энергии для разрушения астероида. Так, соударение тела массой ~ 1 т со скоростью ~ 30 км/с с астероидом эквивалентно по энергии взрыву ~ 100 т тротила.

Естественно, рассматривая возможности разрушения астероида только с точки зрения кинетического воздействия, мы ограничиваем потенциальное число космических объектов, опасность падения на Землю которых можно предотвратить.

1. Защитные свойства атмосферы

Несомненный интерес представляет сопоставление возможностей элементов системы ПРО по разрушению астероидов с защитным действием атмосферы.

В настоящее время известны несколько теорий дробления крупных космических тел при движении в плотной атмосфере [1–4]. Подробное сравнение и анализ этих теорий показали предпочтительность теории Григоряна с точки зрения более серьезного физического обоснования. Все представленные гипотезы предполагают, что дробление, раз начавшись, происходит непрерывно, а образующееся облако осколков расширяется и растекается в направлении, перпендикулярном вектору скорости, вызывая быстрое последующее дробление образовавшихся фрагментов.

Считается, что наиболее вероятный диапазон углов входа астероидов в атмосферу Земли будет от 20 до 50 градусов. Поэтому в приведенных ниже расчетах взят угол 30 градусов, хотя наиболее тяжелые последствия для Земли могут возникнуть при больших углах входа астероидов.

Ниже приводятся некоторые результаты расчетов разрушения астероидов в атмосфере Земли, полученные на основе теории Григоряна. Полагалось, что каменный астероид имеет форму шара, коэффициент лобового сопротивления постоянен и равен единице, угол входа в атмосферу составляет 30° , скорость входа — 30 км/с.

На рис. 1–3 представлены развитие размера облака дробящегося каменного астероида ($\frac{R}{d}$ — отношение радиуса облака к начальному диаметру астероида), уменьшение его скорости при тор-

можении в атмосфере и темп энерговыделения в зависимости от высоты для начального диаметра 10, 20, 30 метров. Также показаны точка завершения дробления и точка, соответствующая моменту потери фрагментами головной ударной волны. В момент завершения процесса дробления осколки, максимальный диаметр которых равен 0,1, 0,17, 0,23 метра — соответственно для астероида диаметром 10, 20 и 30 м, — имеют еще очень высокую скорость движения — 19,5, 14,0, 10,5 км/с. Очевидно, что при таких условиях будет продолжаться интенсивная абляция поверхности, благодаря чему размер выпавших на Землю осколков существенно уменьшится. На основе расчетных и экспериментальных данных по обгону теплозащитных покрытий космических аппаратов можно предположить, что осколки, имеющие диаметр 5–10 см и скорость 10–20 км/с и прекратившие дробление на высотах 15–30 км, будут практически полностью сгорать в плотных слоях атмосферы. Поверхности Земли будут достигать лишь очень незначительные фрагменты.

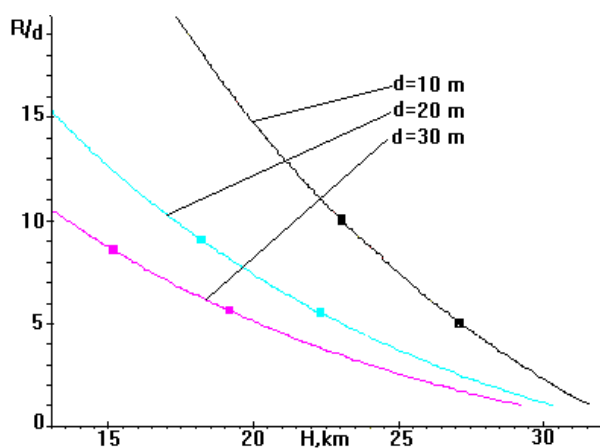


Рис. 1. Развитие размера облака при торможении астероида.

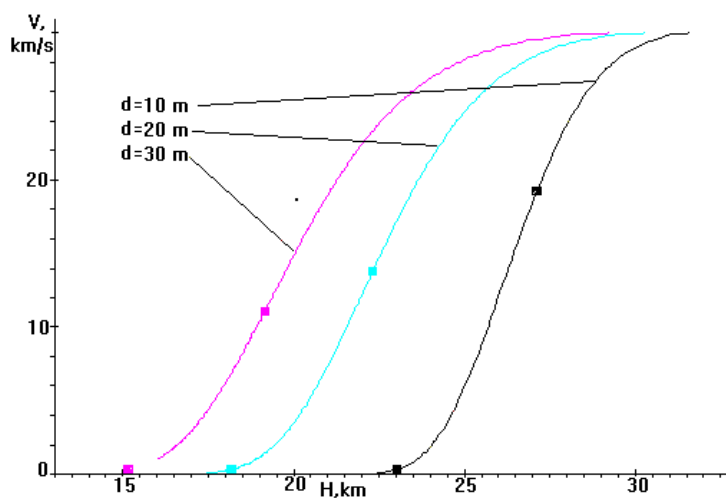


Рис. 2. Скорость астероида при торможении.

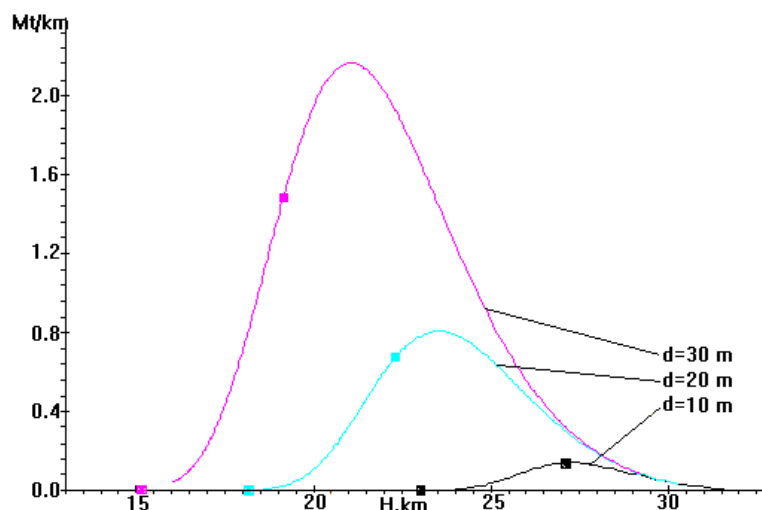


Рис. 3. Темп энерговыделения при торможении астероида.

Расчеты показали, что высота зоны основного энерговыделения при разрушении астероида быстро падает с увеличением его начальных размеров.

В табл. 1 приведены приблизительные значения высоты границ диапазонов энерговыделения и его величина при разрушении каменного астероида в атмосфере в зависимости от размера при угле входа 30 градусов.

Учитывая, что разрушение астероида может происходить над густонаселенной местностью, крупными городами, возникающая при этом ударная волна не должна создавать существенных последствий с серьезным нарушением жизнедеятельности города и значительными человеческими жертвами. На наш взгляд, к таким существенным последствиям может быть отнесено уже полное разрушение остекления городов, что чревато многочисленными жертвами в результате поражения осколками, падающими с большой высоты, и разморозкой инженерных сетей в зимнее время.

Таблица 1

Приближенные значения высоты границ диапазонов энерговыделения и его величина при разрушении каменного астероида в атмосфере в зависимости от размера при угле входа астероида в атмосферу 30 градусов

Радиус астероида, м	10	20	30
Диапазон высот основного энерговыделения, км ($R/r = 5-10$)	23–27	17–23	14–20
Энерговыделение при разрушении, Мт ТЭ	0,6	4	12

Известно, что массовое разрушение остекления с значительным метательным эффектом происходит при давлении в фронте ударной волны на уровне $0,05-0,1 \text{ кгс/см}^2$ [5].

Оценки, выполненные на основе данных, представленных в табл. 1, показали, что максимальное давление в ударной волне у поверхности Земли при разрушении каменного астероида диаметром 10 м составит $0,03 \text{ кгс/см}^2$, 20 м — $0,15 \text{ кгс/см}^2$, 30 м — $0,43 \text{ кгс/см}^2$. Поэтому можно считать, что каменные астероиды диаметром от 10 до 20 м могут представлять серьезную опасность для населенных пунктов с высокой плотностью жилых построек.

Несомненно, что вопрос о существенных различиях в темпе и начальных масштабах энерговыделения при ядерном взрыве и взрыве астероида требует дальнейшего обсуждения.

2. Некоторые возможности и средства неядерного перехвата астероидов

Проблема ОКО для Земли и человечества и разработка возможных мер, которые смогли бы предотвратить эту опасность, имеет много общего с проблемой развития систем вооружений (например, с созданием средств ПРО, ПВО), но в тоже время имеет и свои особенности.

В качестве особенностей следует отметить следующее:

- мы имеем дело с природой, а не с разумным противником;
- из космоса возможно появление объектов с такими свойствами, которые до сих пор неизвестны человечеству и которые не могут быть, в принципе, спрогнозированы;
- чем больше человечество будет изучать опасные космические объекты, тем меньше будет неопределенность в свойствах этих объектов, тем выше будет эффективность мер противодействия.

Проблема разработки и создания системы защиты Земли от опасных космических объектов распадается на несколько этапов, причем одним из важнейших является этап рационального выбора на возможно более ранней стадии адекватной реакции на существующую угрозу Земле и человечеству.

Известно [6], что метеороидные объекты размером свыше нескольких метров могут быть обнаружены оптическими средствами на расстоянии ~ 1 млн. км от Земли. Более крупные объекты (десятки и сотни метров в диаметре) могут быть обнаружены и на больших расстояниях. Таким образом, при перехвате таких опасных космических объектов мы будем располагать временем от одних до нескольких суток.

В зависимости от времени обнаружения астероида, его размеров и опасности, которую он несет, требования по дальности его перехвата могут составлять от миллионов до сотен километров, а масса полезной нагрузки, необходимой для его разрушения, может составлять от сотен килограмм до десятков тонн. В зависимости от этих условий могут потребоваться носители различного класса.

В табл. 2 представлены данные по максимальной полезной нагрузке некоторых типов ракет при перехвате ОКО в околоземном космическом пространстве (1-й вариант) и за его пределами (2-й вариант), в пределах Солнечной системы. Возможности носителей взяты согласно их характеристикам из работ [7, 8].

Существующие в настоящее время системы наведения позволяют обеспечить попадание с точностью несколько метров, правда такая точность обеспечивается при скоростях движения в несколько км/с. Ситуация, когда скорость сближения может составить 30–50 км/с, потребует создания принципиально новых систем наведения.

Таблица 2

Максимальная полезная нагрузка некоторых типов ракет при перехвате ОКО в околоземном космическом пространстве (1-й вариант) и за его пределами (2-й вариант) в пределах солнечной системы

Тип носителя		“HEDI”	SS-25	“Трайидент”, MX, SS-17	SS-18, “Титан-34D-7”, “Атлас-Центавр-56”
Полезная нагрузка, т	Вариант 1	$\leq 0,1$	~ 1	~ 3	10–20
	Вариант 2	–	$\sim 0,3$	$\sim 0,5$	1,0–3,0

Наиболее полно наработки в области систем ПРО можно использовать при рассмотрении возможности перехвата астероидов малых размеров (\sim нескольких десятков метров) на небольших расстояниях от Земли (менее 100 км). Если такой астероид падает в район, удаленный от мест жизнедеятельности людей, то его воздействие на Землю не приведет к катастрофическим последствиям. Однако такое падение может произойти на экологически опасный народнохозяйственный объект, например АЭС, а это уже приведет к катастрофе регионального масштаба. Принципиальная возможность защиты таких объектов неядерными средствами и будет рассмотрена ниже.

Полагая, что полезная нагрузка носителей, которые могут быть задействованы для доставки перехватчика к ОКО, ограничена массой 0,7–1 т, оценим размеры астероида, который может быть разрушен с помощью удара тела такой массы. При этом для рассматриваемых условий перехвата мы не будем требовать оснащения перехватчика даже обычными взрывчатыми веществами. Связано это с тем, что при скоростях соударения более 3 км/с удельная кинетическая энергия удара существенно превышает удельное энерговыделение взрывчатых веществ. Например, при скорости соударения перехватчика и ОКО 30 км/с удельная энергия соударения приблизительно в 100 раз превышает энерговыделение взрывчатки. Очевидно, что перехватчик, в котором отсутствует какая-либо взрывчатка не представляет никакой опасности для населения Земли.

При проведении расчетов полагалось, что перехватчик и астероид имеют форму шара. Перехватчик изготовлен из железа, а веществом астероида является алюминий, плотность которого

приблизительно соответствует возможным значениям плотности каменных астероидов, а прочностные характеристики выше, чем у последних.

Размеры разрушенного астероида можно оценить, например, из следующих соображений. Известно, что предельная толщина пробиваемой преграды приблизительно в 1,5 раза больше глубины кратера, формируемого ударником в полубесконечной преграде (ударник и преграда изготовлены из одного и того же материала) [9]. Учитывая, что ОКО имеет конечные размеры, приближенно можно считать, что $D_a \approx 2h_a$, где D_a — предельный размер астероида, который способен разрушить перехватчик, а h_a — глубина кратера, создаваемого перехватчиком в полупространстве вещества астероида.

Расчеты, выполненные при сделанных допущениях по зависимостям работы [9], показали, что при скорости соударения 10–30 км/с перехватчиком массой 0,5 т могут быть разрушены астероиды размером 8–16 м, а при массе перехватчика 1 т — размером 9–19 м.

Для подтверждения приведенных оценок было проведено численное моделирование удара шарообразного железного перехватчика массой 0,7 т в астероид, также в форме шара, размером 16,2 м со скоростью 30 км/с. Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 5–8.

Решение рассматриваемой задачи проводилось с использованием метода “ЧАС” (частицы на ассоциированной сетке) и разработанного на его основе комплекса вычислительных программ для решения двумерных динамических задач механики сплошной среды с большими деформациями, произвольной геометрией в газодинамической и упругопластической постановке, учитывающий разрушение материалов и кинетику ударноволнового инициирования взрывчатых веществ. Данный метод был разработан и программно реализован группой сотрудников под руководством В.Л. Загускина [10].

Исходная конфигурация рассматриваемой задачи и значения параметров соударения представлены на рис. 4. Выделенные в “теле” астероида области 1–5 представляют собой “датчики”, в которых фиксируется изменение параметров среды. На рис. 5, 7 показаны распределение скорости вещества астероида и “перехватчика”, а также характер разрушения астероида через 5,6 мс после соударения. Цветовая палетка в правой области рис. 5 отображает диапазон изменения скорости движения вещества астероида. Как показали расчеты, в результате действия волн разгрузки слои вещества астероида приобретают скорость разлета от 100 до 400 м/с, что иллюстрируется результатами, представленными на рис. 5.

В следствии воздействия “перехватчика” астероид практически полностью разрушается (рис. 7). Цветовая гамма рисунка отображает распределение зоны разрушения вещества астероида в поле осевого сечения. Цвет, соответствующий нулю на размещенной справа от рисунка цветовой палетке, выделяет области полного разрушения вещества астероида. На рис. 6, 8 показаны изменение скорости движения вещества астероида в “датчиках” от времени, а также меры сохранности вещества астероида.

Предложенный вариант кинетического воздействия на астероид, возможно, не является наиболее оптимальным с точки зрения использования кинетической энергии ударника. Можно варьировать плотностью ударника, его формой и т. д., однако общая масса ударника должна быть ограничена максимальной массой полезной нагрузки ракеты–перехватчика. Исходя из этого, нами был проведен еще один вариант расчета с исходными данными полностью аналогичными первоначальному варианту, однако, перехватчик представлял собой два, разнесенных на 2 м между собой, железных шара массой по 0,35 т каждый.

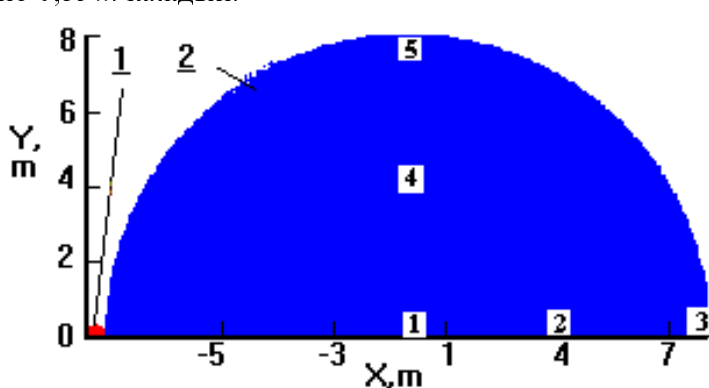


Рис. 4. Исходная схема задачи о разрушении астероида кинетическим ударом.

Исходные данные:

1 — перехватчик (железный шар, $m = 700$ кг, $r = 0,28$ м, $V = 30$ км/с);

2 — модель астероида: шар из алюминия, $m = 6 \cdot 10^6$ кг, $r = 8,12$ м.

1 2 3 4 5 — датчики изменения параметров среды.

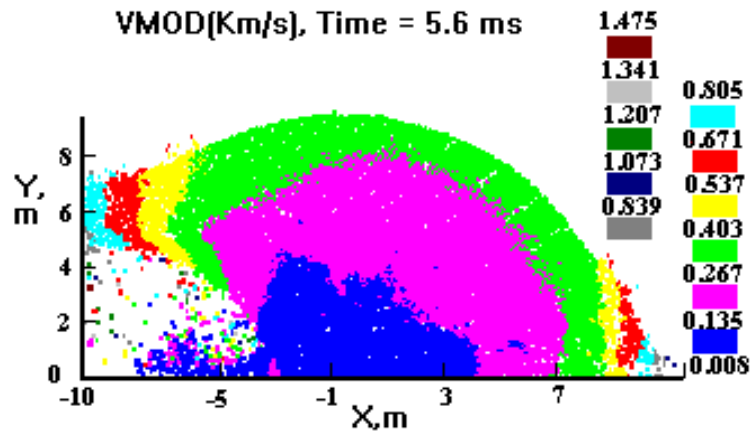


Рис. 5. Распределение скорости вещества астероида и перехватчика.

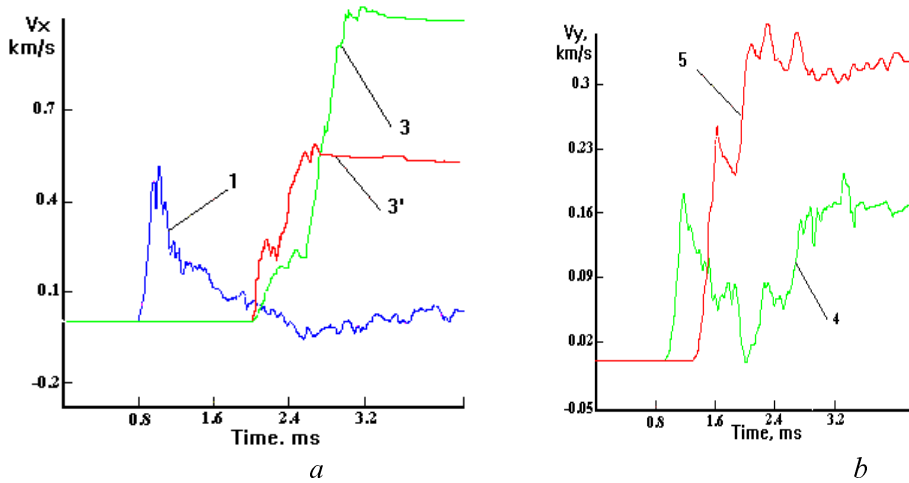


Рис. 6. Изменение скорости по $X(a)$ и по $Y(b)$ в датчиках.

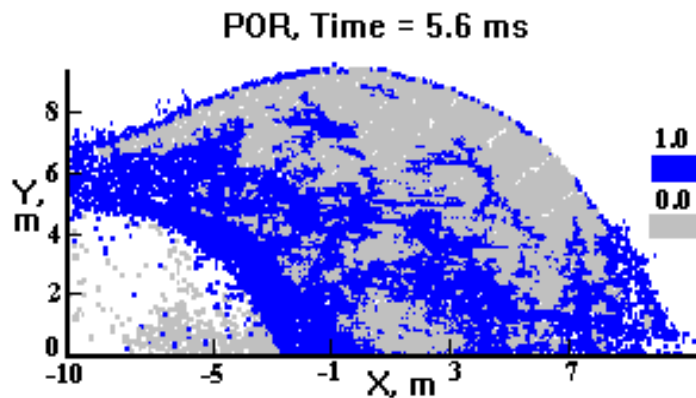


Рис. 7. Характер разрушения астероида через 5,6 мс после соударения.

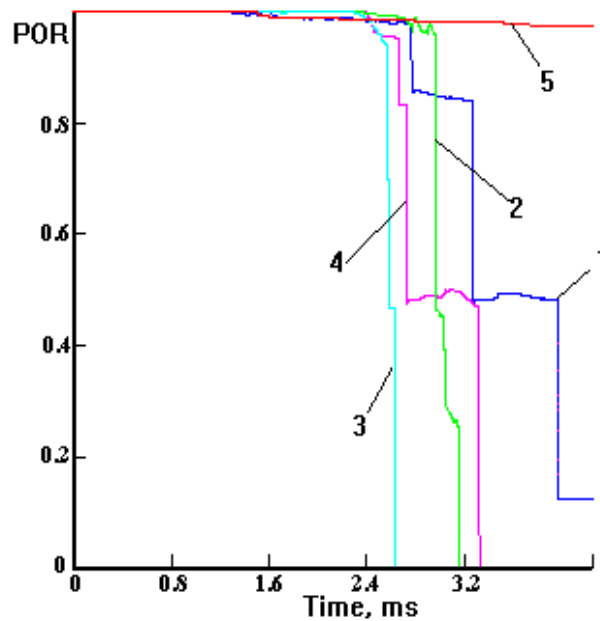


Рис. 8. Разрушение вещества астероида в датчиках.

Схема воздействия на астероид отличается от первоначальной тем, что сначала на астероид воздействует первый ударник (лидер), и уже затем в образовавшуюся каверну внедряется второй ударник. Анализ результатов расчетов показал, что такой вариант воздействия менее эффективен, т. к. в веществе астероида образуется не одна (как в первоначальном варианте), а две ударных волны меньшей интенсивности, причем ударная волна, образовавшаяся от столкновения второго ударника работает практически “вхолостую” по веществу астероида, уже разгруженного первой ударной волной. На рис. 6,а кривая 3' соответствует скорости V_x в третьем датчике для второго варианта расчета. Из рисунка видно, что скорость разлета вещества примерно в 2 раза меньше, чем в первоначальном варианте (кривая 3 рис. 6,а).

В целом, приведенные выше оценки убедительно свидетельствуют о следующем:

- атмосфера может считаться надежной защитой от космических тел размером в единицы, максимум до десяти — пятнадцати метров;
- перехватчик массой до 1 т способен полностью разрушить астероид размером не менее 20 м, а при массе перехватчика 10 т разрушается астероид размером 50 м. Не исключено, что при таком воздействии удастся разрушить астероид большего размера, разнородный по составу и имеющий меньшую прочность.

Таким образом, изыскание возможностей кинетического воздействия на опасные космические тела представляется актуальным. И вполне естественно для решения этой задачи использовать технологический задел, созданный при разработке элементов систем ПРО.

Воздействие на астероид или какой-либо другой опасный космический объект с целью его дробления целесообразно осуществлять на высотах >100–150 км, с тем, чтобы его обломки, имея практически начальную скорость астероида перед входом в плотные слои атмосферы, полностью прекращали свое существование на высотах 25–30 км.

Литература

1. Григорян С.С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет. Космические исследования, 1979, т. 17, № 6, с. 875–893.
2. Brown W.K. A theory of sequential fragmentation and its astronomical applications. Los Alamos Techn. Report LA-11043, 1988.
3. Hills J.G., Goda M.P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere”. Astron J., 1993, v. 105. № 3, p. 1114–1144.
4. Chyba C.F., Thomas P.J., Zahnle K.J. The Tunguska 1908 explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. Nature. 1993, v. 36, № 1, p. 40–44.
5. Действие ядерного оружия (перевод с англ.). Москва, Изд. МО СССР, 1965. (The effects of nuclear weapons, USA department of defense, 1962).

6. Микеша А.М., Смирнов М.А., Смирнов М.А. Малоразмерные тела в околоземном космическом пространстве: опасность столкновения с Землей и возможность предотвращения катастрофы. Сб. "Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор)", Москва, изд. "Космосинформ", 1995, с. 91–103.
7. Ядерные вооружения и республиканский суверенитет. Москва, изд. Международные отношения, 1992.
8. Ракетная и космическая техника, ЦНТИ "Поиск" № 21(1386), № 22(1387), 1986.
9. Высокоскоростные ударные явления (перевод с англ.). Под ред. В.Н. Николаевского. "Мир", 1973. ("High Velocity Impact Phenomena", Edited by Ray Kinslow, Academic Press New York and London, 1970).
10. "Метод ЧАС, Отчет по НИР, адаптированный к задачам высокоскоростного взаимодействия. Дзержинск, НИИМАШ, 1991.