

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ТЕЛА В СЛУЧАЕ ОПАСНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ С ЗЕМЛЕЙ

В. Г. Заграфов, А. К. Шаненко, В. А. Рыжанский

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, shanenko@obesp.sar.ru

Рассмотрен процесс воздействия ядерных зарядов на опасные космические объекты с целью предотвращения столкновения с Землей. Основное внимание уделено анализу двух задач: сообщение малым космическим телам (МКТ), обнаруженным на достаточном удалении от Земли, импульса, способного отклонить их траекторию на безопасное расстояние от планеты; разрушение МКТ ядерным взрывом на части, достаточно мелкие по сравнению с исходным телом, чтобы их встреча с Землей не привела к катастрофе. Оценено энерговыделение ядерных зарядов, необходимое для выполнения поставленной задачи. На примере гипотетического МКТ типа астероида Икар показан процесс его дробления на существенно меньшие по размеру фрагменты.

Ключевые слова: малое космическое тело, ядерный взрыв, фрагментация, аэродинамическое сопротивление.

Космическая безопасность Земли — одна из насущных проблем современности. Земля периодически переживает так называемые импактные события — подвергается внезапным ударам малых космических тел (МКТ) разного «калибра»: от ≈ 1 м (и менее) до ≈ 1 км (и более). При этом чем массивнее МКТ, тем опаснее для Земли встреча с ним. Внедряясь в атмосферу с гиперзвуковой скоростью, МКТ передает свою кинетическую энергию, подчас колоссальную, окружающей среде — иногда с катастрофическими для нее последствиями. Так, кинетическая энергия каменного астероида радиусом 100 м, движущегося со скоростью 30 км/с, эквивалентна энергии взрыва ≈ 1 Гт в тротиловом эквиваленте (ТЭ). Последствия падения такого астероида в населенной местности были бы губительны.

Известны многие случаи подобных импактных событий как в глубокой древности, так и в недавнем прошлом, оставивших следы на Земле (астроблемы) и в памяти людей. Яркими примерами служат Аризонский кратер (30 ÷ 50 тыс. лет назад, энерговыделение ≈ 5 Мт ТЭ), Тунгусский взрыв (1908 г., ≈ 10 Мт ТЭ), Сихотэ-Алинский «железный дождь» (1947 г., ≈ 5 Мт ТЭ) и др. В 1968 г. возникла опасность столкновения Земли с астероидом Икар (диаметр ≈ 1 км), периодически сближающимся с Землей (до 6 ÷ 7 млн км). В 1989 г. астероид диаметром 800 м пересек орбиту нашей планеты в опасной для нее близости:

Земля находилась на месте пересечения орбит всего за 6 ч до прихода астероида. В последнее время выяснилось, что частота пролета астероидов диаметром десятки и сотни метров в окрестности Земли тревожно высока (примерно один астероид в месяц в круге с радиусом орбиты Луны).

Для борьбы с опасными МКТ предпочтительны в основном два пути:

1) сообщить МКТ, обнаруженному на достаточном удалении от Земли, импульс, способный отклонить его траекторию на безопасное расстояние от Земли;

2) разрушить МКТ мощным взрывом на части, достаточно мелкие, чтобы их встреча с Землей не привела к катастрофе.

Общим для обоих путей является необходимость применения мощных ядерных зарядов и ракетно-космических систем для доставки их к цели, а также эффективных средств космического мониторинга. Земляне обладают всеми этими средствами в полной мере и постоянно совершенствуют их с использованием достижений науки и техники.

Немаловажным аспектом проблемы является и физико-математическое моделирование процессов, связанных с взрывными воздействиями на МКТ и взаимодействием его осколков с атмосферой, в целях обеспечения требуемой эффективности взрывов, а также оценки опасности последствий акции для Земли. Этим вопросам и посвящена настоящая статья. Мо-

дель перехвата МКТ, рассматриваемая в статье, аналогична модели [1].

Предотвращение столкновения астероида с Землей можно представить в двух вариантах: 1) орбита МКТ известна, встреча с ним прогнозируется заранее и есть возможность заблаговременно предпринять действия по его перехвату; 2) МКТ обнаруживается неожиданно на небольшом расстоянии от Земли и меры по его перехвату приходится принимать в условиях ограниченного ресурса времени. Ниже рассмотрены обе ситуации.

Оценим импульс, сообщаемый МКТ ядерным взрывом на его поверхности с энерговыделением E . При взрыве происходит выброс грунта с образованием кратера. Импульс $MV_{\text{взр}}$, получаемый МКТ (M — масса тела, $V_{\text{взр}}$ — скорость, сообщаемая МКТ взрывом), равен импульсу выброшенного грунта массой m и скоростью v .

Из соотношения сохранения энергии

$$\frac{MV_{\text{взр}}^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \mu E, \quad (1)$$

где μ — доля энергии, переходящая в кинетическую энергию движения выброшенного грунта и МКТ, с учетом того, что

$$MV_{\text{взр}} = mv, \quad (2)$$

получаем

$$MV_{\text{взр}}^2(m + M) = 2m\mu E. \quad (3)$$

Так как для обычных МКТ $m \ll M$, то можно принять

$$M^2V_{\text{взр}}^2 = 2m\mu E. \quad (4)$$

Согласно данным [1] объем кратера ∇ и масса m выброшенной из кратера породы составляют

$$\nabla = \frac{1}{8}\pi D^2 H, \quad D = aE^{0.3}, \quad H = bE^{0.3}, \quad (5)$$

$$m = \rho \nabla = \frac{1}{8}\pi \rho a^2 b E^{0.9},$$

где D , H — диаметр и глубина кратера; a , b — «приведенные» размеры кратера, определяемые как отношение фактических размеров к $E^{0.3}$; ρ — плотность породы.

Соотношение (5) является приближенным, поскольку некоторый вклад в образование кратера вносит эффект вдавливания грунта. Для

контактного взрыва на твердой породе по данным [1] $a = 29.9 \text{ м/кт}^{0.3}$, $b = 6.71 \text{ м/кт}^{0.3}$.

Согласно (5) эффективность ядерного взрыва в соотношении выброса породы из кратера m/E снижается с увеличением энерговыделения пропорционально $E^{-0.1}$. Это связано с тем, что передача энергии взрыва грунту зависит от начальной плотности энергии в месте взрыва. Чем выше начальная плотность энергии, тем меньшая доля энергии передается грунту. Объясняется это ростом потерь энергии на пластическую деформацию и разрушение породы. Начальная плотность энергии увеличивается с ростом энерговыделения. Вследствие этого механическое действие на грунт взрыва с большим энерговыделением менее эффективно в расчете на единицу энергии, чем действие малого взрыва.

Согласно [1]

$$\mu = \mu_0 E^{-0.1}, \quad (6)$$

где $\mu_0 = 0.067 \text{ кт}^{0.1}$, E — в кт.

Для отклонения траектории МКТ на расстоянии L от точки падения с помощью взрыва на его поверхности под углом Θ к направлению на Землю ему необходимо сообщить компоненту скорости $V_{\text{взр}} = L/T \sin \Theta$, где T — время до падения.

Объединяя уравнения (4)–(6), получим, что для сообщения МКТ компоненты скорости $V_{\text{взр}}$ необходимо энерговыделение (рассматриваем случай $\Theta = \pi/2$)

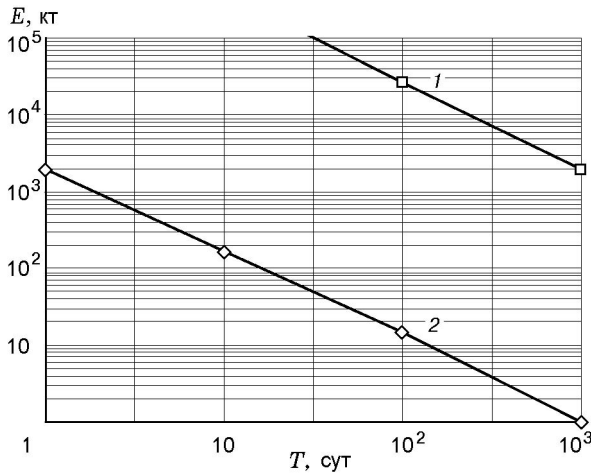
$$E_{\perp} = \left(\frac{2ML}{T \sqrt{4.2\pi a^2 b \rho \mu_0 \cdot 10^9}} \right)^{1/0.9} = 1.85 \cdot 10^{-7} \left(\frac{ML}{T \sqrt{\rho}} \right)^{1/0.9} [\text{кт}]. \quad (7)$$

Величины в уравнении (7) выражены в единицах метр — тонна — секунда (согласно [1] $1 \text{ кт} = 4.2 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$).

На рисунке показана определяемая формулой (7) зависимость энерговыделения E_{\perp} от времени до ожидаемого падения T .

МКТ под действием взрыва может разрушиться. В этом случае следует считать, что данная модель описывает движение центра масс фрагментов МКТ.

Из рисунка видно, что отклонение траектории МКТ радиусом $\approx 100 \text{ м}$ возможно с помощью взрыва с энерговыделением менее 2 Мт



Зависимость необходимого энергосодержания взрыва от времени до ожидаемого столкновения с Землей для отклонения на два радиуса Земли траектории астероидов радиусом 1 000 (1) и 100 м (2) с типичной для них плотностью 3.4 г/см^3

ТЭ в широком диапазоне времени. Для отклонения траектории астероида Икар радиусом $\approx 1000 \text{ м}$ на два радиуса Земли за время одного периода его обращения вокруг Солнца (около года) требуется энергосодержание $\approx 6 \text{ Мт ТЭ}$.

Рассмотрим условия перехвата МКТ при ограниченном ресурсе времени после его обнаружения.

По данным работы [2] МКТ размером $\approx 100 \text{ м}$ может быть обнаружен наземными оптическими средствами на расстоянии свыше миллиона километров, т. е. при разрешающей способности оптических приборов $\delta \approx 10^{-7}$ рад. Если астероид диаметром d движется со скоростью $V_{\text{отн}}$, то он будет обнаружен за время $T^* = d/V_{\text{отн}}\delta$ до столкновения. Пусть в момент обнаружения с Земли в направлении на МКТ стартует перехватчик с ядерным зарядом. Его движение относительно центра Земли $r(t)$ описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= W, \\ \frac{dW}{dt} &= -\frac{W_k^2 r_0}{2r^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где W — скорость перехватчика; $W_k = \sqrt{2gr_0}$ — вторая космическая скорость; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ — ускорение силы тяжести на поверхности Земли; r_0 — радиус Земли. Начальные

условия — $t = 0$, $r = r_0$, $W = W_0$. Время прохождения перехватчиком активного участка его траектории мало по сравнению с характерными для перехвата временными параметрами. Для перехвата МКТ на достаточно большом расстоянии от Земли необходимо, чтобы перехватчику была сообщена скорость, превышающая вторую космическую, $W_0 > W_k$.

Решение системы (8):

$$\tau = \frac{1}{1-\alpha} \left\{ \frac{\sqrt{1-\alpha\beta}}{1-\beta} - 1 - \frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha}} \ln \left[\frac{\sqrt{1-\alpha\beta} + \sqrt{1-\alpha}}{(1 + \sqrt{1-\alpha})\sqrt{1-\beta}} \right] \right\}, \quad (9)$$

где $\tau = tW_0/r_0$, $\beta = 1 - r_0/r$, $\alpha = (W_k/W_0)^2$.

В реальных ситуациях встреча перехватчика с МКТ должна происходить на большем по сравнению с радиусом Земли расстоянии, т. е. $1 - \beta \ll 1$. В этом случае $r = t\sqrt{W_0^2 - W_k^2}$.

Расстояние от МКТ до Земли $r_{\text{МКТ}} = V_{\text{отн}}(T^* - t)$. Из условия $r = r_{\text{МКТ}}$ находим время от момента взрыва до ожидаемого падения МКТ:

$$\begin{aligned} T &= T^* \left(1 + \frac{\sqrt{W_0^2 - W_k^2}}{V_{\text{отн}}} \right)^{-1} = \\ &= \frac{d}{V_{\text{отн}}\delta} \left(1 + \frac{\sqrt{W_0^2 - W_k^2}}{V_{\text{отн}}} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Полученные соотношения являются оценкой предельных возможностей коррекции траектории МКТ с помощью взрыва, предполагающей немедленное обнаружение, оценку параметров (размер, удаленность, скорость) и старт перехватчика в момент появления МКТ в пределах области его обнаружения.

С помощью соотношений (7) и (10) можно получить зависимость энергосодержания взрыва, необходимого для отклонения траектории МКТ на два радиуса Земли (при ограниченном ресурсе времени после обнаружения) от размера МКТ, его скорости и начальной скорости перехватчика W_0 .

Пусть в гелиоцентрической системе координат МКТ движется со скоростью $V_{\text{МКТ}}$ по нормали к орбите Земли, скорость которой $V_3 = 30 \text{ км/с}$. Скорость МКТ относительно Земли $V_{\text{отн}} = (V_{\text{МКТ}}^2 + V_3^2)^{1/2}$. Рассмотрим

Энерговыведение ядерных зарядов, применяемых для воздействия на МКТ
в условиях ограниченного ресурса времени

$R_{\text{МКТ}}, \text{ м}$	$M_{\text{МКТ}}, \text{ т}$	$V_{\text{МКТ}}, \text{ км/с}$	$V_3, \text{ км/с}$	$T, \text{ с}$	$V_{\text{отн}}, \text{ км/с}^*$	$E_{\perp}, \text{ кт ТЭ}$
10	$1.42 \cdot 10^4$	30	30	$1.9 \cdot 10^3$	$30\sqrt{2}$	71
100	$1.42 \cdot 10^7$	30	30	$1.9 \cdot 10^4$	$30\sqrt{2}$	$1.1 \cdot 10^4$
1000	$1.42 \cdot 10^{10}$	30	30	$1.9 \cdot 10^5$	$30\sqrt{2}$	$1.1 \cdot 10^6$

Примечание. * Относительно Земли.

случай $V_{\text{МКТ}} = V_3$, $W_0 = 0.5V_3$. В таблице приведены результаты оценок энерговыведения ядерных зарядов, применяемых в условиях ограниченного ресурса времени после обнаружения МКТ, для отклонения траектории МКТ на два радиуса Земли ($12.8 \cdot 10^3$ км).

Как видно из таблицы, в условиях дефицита времени требуется заметно большее энерговыведение, чем в условиях, когда МКТ находится под наблюдением и выбирается тактика воздействия на них.

Рассмотрим процесс фрагментации МКТ при воздействии на него контактного ядерного взрыва. Воспользуемся концепцией фрагментации, изложенной в работах [3, 4].

Концепция базируется на соотношениях баланса между поверхностной и кинетической энергией при расширении тела после динамического нагружения. Из энергетических соотношений определяется средний радиус фрагментов ξ расширяющегося жидкого тела в зависимости от его начального кинематического состояния, заданного плотностью ρ и скоростью ее изменения $\dot{\rho}$:

$$\xi = 3 \left(\frac{10\rho\gamma}{3\dot{\rho}^2} \right)^{1/3}, \quad (11)$$

где γ — коэффициент поверхностного натяжения.

В твердом теле фрагментация происходит путем развития трещин, при этом $\gamma = K_{i,cr}^2 / 2\rho c^2$, где $K_{i,cr}$ — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений в устье трещины при одноосной деформации, c — скорость звука в породе. В [3, 4] проведено сравнение рассчитанных по этой модели размеров фрагментов при ударном нагружении с экспериментальными данными для образцов из стали с коэффициентом трещиностойкости $20 \div 60 \text{ МН/м}^{3/2}$. Получено удовлетворительное согласие, что доказывает адекватность модели реальным условиям разрушения. Приме-

ним указанную модель для решения нашей задачи.

Используя (11), найдем полную поверхностную энергию всех фрагментов МКТ с начальным радиусом R_0 :

$$W_s = \frac{(4/3)\pi R_0^3}{(4/3)\pi \xi^3} 4\pi \xi^2 \gamma = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \gamma \left(\frac{3\dot{\rho}^2}{10\rho\gamma} \right)^{1/3}. \quad (12)$$

Кинетическая энергия относительно центра масс тела, соответствующая его начальному кинематическому состоянию, определяется следующим образом:

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho, \\ \dot{m} = \frac{4}{3} \pi R^3 \dot{\rho} + \frac{4}{3} \pi \rho 3R^2 \dot{R} = 0, \\ \dot{R} = -\frac{\dot{\rho}R}{3\rho} = -\frac{\dot{\rho}}{3\rho} R, \quad (13)$$

$$W_k = \int_0^{R_0} \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{\rho}}{3\rho} \right)^2 R^2 4\pi \rho R^2 dR = \frac{2\pi}{45} R_0^5 \frac{\dot{\rho}^2}{\rho}.$$

Исключая из (12) и (13) кинематический параметр $\dot{\rho}^2/\rho$, получим

$$\frac{W_s}{W_k} = \left(\frac{\gamma S}{W_k} \right)^{2/3}, \quad \text{где } S = 4\pi R_0^2.$$

Примем, что коэффициент передачи энергии

$$\mu = \frac{W_n}{E}, \quad \text{где } \mu = \mu_0 E^{-0.1}.$$

Выполним оценку [1] для гранитоидных пород, предел прочности которых не превышает $\sigma = 400$ МПа. Тогда коэффициент трещиностойкости

$$K_{i,cr} = \sigma \sqrt{\pi l} \quad [\text{МН/м}^{3/2}],$$

где $l \approx 1$ мм — характерный размер неоднородностей (зерен).

При значениях параметров МКТ $\rho_b = 3.4$ г/см³, $c_b = 5$ км/с, $\gamma = 3 \cdot 10^3$ Н/м, $R_0 = 100$ м затрата энергии на разрушение равна

$$W_s = W_k \cdot 1.22 \cdot 10^{-2} = 0.067E^{0.9} \cdot 1.22 \cdot 10^{-2},$$

что составляет незначительную часть энергии взрыва.

Оценим количество и размер осколков, образующихся при разрушении малого космического тела. Исключив из соотношений (11) и (13) параметр $\dot{\rho}^2/\rho$, получим, что при взрыве МКТ распадается на $N = R_0^3/\xi^3 = W_k/\gamma S$ фрагментов среднего радиуса $\xi = R_0/N^{1/3}$.

Соотношение (13) определяет скорость расширения астероида $\dot{\rho}/\rho$ в зависимости от его размера и переданной энергии.

Можно показать, что фрагменты относительно Земли движутся в телесном угле $\Omega = 5\pi W_k/3E \downarrow$, ограниченном поверхностью конуса с углом при вершине $\varphi = 2(5W_k/3E \downarrow)^{1/2}$ [рад], где $E \downarrow = MV_{\text{отн}}^2/2$ — кинетическая энергия МКТ. Из соотношений (13) $\dot{R} = -(\dot{\rho}/3\rho)R$, $\dot{\rho}/\rho = -3\dot{R}/R$. После преобразований имеем

$$\dot{R} = \left(\frac{5W_k}{2\pi R^3 \rho} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

$$V_{\text{отн}} = \left(\frac{2E \downarrow}{M} \right)^{1/2},$$

$$\text{tg } \frac{\varphi}{2} \approx \frac{\varphi}{2} = \left(\frac{5W_k}{3E \downarrow} \right)^{1/2},$$

$$\varphi = 2 \left(\frac{5W_k}{3E \downarrow} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Проиллюстрируем полученные соотношения на примере МКТ (типа Икара). При взрыве на его поверхности с энерговыделением 6 Мт ТЭ он распадается на $N \approx 2 \cdot 10^4$ фрагментов среднего радиуса $\xi \approx 40$ м, движущихся в сторону Земли в полости конуса с углом при вершине $\varphi \approx 10^{-3}$ рад. При движении МКТ со скоростью $V_{\text{МКТ}} = 30$ км/с в течение одного года (период обращения вокруг Солнца) радиус скопления осколков в окрестности Земли составит $V_{\text{отн}}T(\varphi/2) \approx 5 \cdot 10^5$ км, что почти на

два порядка превышает радиус Земли. С большой вероятностью на Землю упадут 3–4 осколка, т. е. их воздействие будет независимым при достаточном разлете.

Кинетическая энергия каждого фрагмента, которая выделяется при его падении на Землю, составит $E \downarrow \approx 100$ Мт ТЭ. Катастрофы планетарного масштаба при этом не произойдет, однако падение такого осколка в населенной местности будет иметь губительные последствия.

Оценим, какую дополнительную энергию нужно сообщить МКТ при боковом воздействии, чтобы отклонить от Земли не только траекторию центра масс, но и конус разлета осколков. Для этого подставим в соотношение (7) $L = V_{\text{отн}}T(\varphi/2)$, где угол разлета φ определяется соотношением (15), и получим

$$E_{\perp} = \left(\frac{160}{9} \frac{R_0^3}{a^2 b} \right)^{1/0.9} \quad [\text{кт ТЭ}]. \quad (16)$$

Обратим внимание, что дополнительная энергия, необходимая для отклонения осколков МКТ, не зависит от времени перехвата, скорости движения МКТ и плотности его породы, а определяется только его объемом.

Нетрудно убедиться, что величина этой энергии намного превышает энергию, необходимую для отклонения траектории центра масс осколков, приведенную на рисунке. Так, для астероида радиусом 100 м эта энергия, определенная по соотношению (16), составляет ≈ 7.2 Мт ТЭ, а для астероида радиусом 1000 м — $1.4 \cdot 10^4$ Мт ТЭ. Таким образом, в последнем случае отклонение траектории осколков МКТ от Земли с точки зрения энергозатрат можно считать нереальным.

Суммируем результаты. Проведены оценки энерговыделения ядерного взрыва на поверхности МКТ, необходимого для отклонения его траектории или фрагментации на осколки. Рассмотрены два возможных сценария перехвата. В первом варианте орбита метеороида заранее известна и его обнаружение не является неожиданным. Действия по перехвату могут быть предприняты заблаговременно. В этом случае требуемое для коррекции его траектории энерговыделение сравнительно невелико. Так, для отклонения траектории астероида Икар радиусом ≈ 1 км (обладающего кинетической энергией $\approx 10^6$ Мт ТЭ, которая выделялась бы при его падении на Землю) на расстоянии двух радиусов Земли при перехвате

за время одного периода его обращения вокруг Солнца (около года) достаточно энерговыделения ≈ 10 Мт ТЭ.

Более сложным является перехват в случае ограниченного ресурса времени. Оценки показывают, что для отклонения траектории МКТ радиусом 10, 100, 1000 м на расстояние двух радиусов Земли необходимо энерговыделение $\approx 0.1, 11$ и $1.1 \cdot 10^3$ Мт ТЭ соответственно.

В связи с тем, что на разрушение МКТ идет незначительная часть энергии взрыва, отклонение траектории астероида как целого объекта оказывается невозможным без его разрушения. Так, при взрыве на поверхности МКТ (типа Икар) он распадается на $2 \cdot 10^4$ фрагментов среднего радиуса ≈ 40 м, движущихся в сторону Земли в полости конуса с углом при вершине $\approx 10^{-3}$ рад. С большой вероятностью в атмосферу Земли войдут 3–4 осколка. В рамках принятой модели показано, что аэродинамическое сопротивление приведет их к дальнейшей фрагментации до сантиметровых размеров последующих осколков.

В связи с вышеизложенным представляется интересным в дальнейшем проследить

непрерывный процесс трансформации МКТ как от воздействия ядерным оружием, так и от воздействия атмосферы Земли (аэродинамического сопротивления с последующей абляцией фрагментов МКТ).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Заграфов В. Г., Шаненко А. К.** Использование ядерных взрывов для перехвата опасных космических объектов // Атомная энергия. — 1996. — Т. 80, вып. 4.
2. **Багров А. В., Микишин М. А., Рыхлова Л. В., Смирнов М. А.** Оценка возможности раннего обнаружения опасных космических объектов наземными оптическими средствами с целью предотвращения их столкновения с Землей // Междунар. конф. «Проблемы защиты Земли от столкновения с опасными космическими объектами (SPE-94), 26–30 сентября 1994 г., г. Снежинск (Челябинск-70)»: Тез. докл. — Снежинск, 1994. — Ч. 1. — С. 80.
3. **Grady D. E.** Local inertial effects in dynamic fragmentation // J. Appl. Phys. — 1982. — V. 53. — P. 322–325.
4. **Glenn L. A., Chudnovsky A.** Strain-energy effects on fragmentation // J. Appl. Phys. — 1986. — V. 59, N 4. — P. 1379–1380.

*Поступила в редакцию 17/IX 2008 г.,
в окончательном варианте — 14/III 2009 г.*
