

ЯДЕРНЫЙ ВЗРЫВ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ — II. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЯВЛЕНИЯ

В.З. Нечай, В.Н. Ногин, Д.В. Петров, В.А. Симоненко, О.Н. Шубин

Российский Федеральный Ядерный Центр — ВНИИ технической физики, г. Снежинск, Россия

Введение

Наиболее реальными способами воздействия на опасный космический объект (ОКО), такой, как астероид или комета, являются ядерный взрыв вблизи его поверхности или кинетический удар массивного тела. При этом можно добиться последствий двух основных типов:

- раздробить ОКО на фрагменты такого размера ($<10-30$ м) и придать им такие скорости ($>0,1-1$ м/сек), что вблизи Земли фрагменты эти окажутся на достаточном расстоянии друг от друга и сгорят в верхних слоях атмосферы, не оказав разрушительного воздействия на ее поверхность;
- придать ОКО, не разрушая его, такой импульс, который приведет к изменению его орбиты и обеспечит пролет на безопасном расстоянии от Земли.

Соответственно, возникают две основные задачи, решение которых необходимо для оценки возможности осуществления проекта создания системы защиты Земли на основе ядерного оружия или кинетического ударника и определения характеристик такой системы:

- предсказать состояние ОКО после воздействия;
- оценить импульс, приобретаемый ОКО в результате воздействия.

В настоящем докладе приводятся расчетные оценки результатов воздействия на астероид контактного, заглубленного, приповерхностного ядерных взрывов и кинетического удара. Основные процессы при ядерном взрыве вблизи поверхности астероида более подробно рассмотрены в [1, 2].

1. Подземные камуфлетные взрывы

Данные, полученные при проведении подземных ядерных испытаний, составляют и будут составлять основу для калибровки расчетных методик по определению эффекта воздействия ядерного взрыва на астероиды, ввиду большого количества проведенных испытаний в самых разнообразных средах (коралловые рифы, аллювий, туфы, каменная соль, известняки, граниты, базальты).

В подробных экспериментальных исследованиях, сопровождавших испытания, было получено большое количество данных, в том числе:

- размеры зон интенсивного дробления (~ 25 м/км^{1/3});
- размеры зон трещиноватости (~ 100 м/км^{1/3});
- законы распределения фрагментов раздробленной в УВ породе по размерам.

Отметим, что при подземных ядерных взрывах происходит очень интенсивное дробление горных пород [3], и максимальные размеры образующихся фрагментов породы составляют ~ 5 м. Это позволяет надеяться, что при воздействии на астероид можно добиться не только существенного изменения его импульса, но и обеспечить необходимую его фрагментацию.

2. Контактные ядерные взрывы

Для изменения траектории или фрагментации астероидов с диаметром, превышающим 50–100 м, потребуется использование ядерных взрывных устройств (ЯВУ) мощностью от 1 Мт и выше. Это следует из величин приведенных выше характерных размеров зон разрушения подземных ядерных взрывов.

Движение грунта при взрыве вблизи его свободной поверхности определяется прежде всего долей энергии взрыва, непосредственно ему переданной, которая для контактного взрыва составляет менее 10% и слабо зависит от мощности взрыва в диапазоне 0,1–10 Мт. Количественные характеристики и некоторые качественные особенности явления контактного взрыва подробно рассмотрены, например, в [4, 5, 1, 2]. В частности, оказывается, что:

- область дробления имеет приблизительно форму полусферы с радиусом $R \sim 100$ м/Мт^{1/3};

– импульс, приобретаемый астероидом, составляет $I \sim 10^8 (m \cdot m/сек)/Mm$.

Расчеты контактных взрывов наиболее сложны по сравнению с другими типами взрывов. Это связано с необходимостью описания больших деформаций при ударе паров ЯВУ о грунт и при разлете грунта с одновременным учетом переноса энергии излучением. Особую проблему при расчетном описании контактных взрывов представляет практически полное отсутствие экспериментальных данных.

Чтобы избежать сильного радиоактивного заражения территорий полигонов, контактные взрывы при испытаниях ядерного оружия практически не проводились.

3. Малоуглубленные ядерные взрывы

Воздействие ядерного взрыва на астероид будет наиболее интенсивным, если ЯВУ перед взрывом заглубить в грунт. Это связано, в основном, с тем, что при заглублениях, превышающих $2 m/Mm^{1/3}$, в отличие от контактного и приповерхностного, энергия взрыва на начальной (тепловой) стадии развития явления практически полностью передается грунту астероида. В результате, воздействие на астероид углубленного взрыва оказывается эквивалентным воздействию контактного взрыва в десятки раз большей мощности [4, 5, 1, 2].

По-видимому, реально достижимые величины углублений лежат в пределах первых десятков метров. Для таких глубин характерная величина импульса, переданного астероиду, при использовании ЯВУ мощностью от $\sim 1 Mm$ и выше, будет составлять $I \sim 10^9 - 10^{10} (m \cdot m/сек)/Mm$. Размеры зоны дробления будут по крайней мере в 2 раза превышать размеры зоны дробления контактного взрыва той же мощности.

Согласно экспериментальным данным [7, 8], при углубленном ядерном взрыве так же, как и при камуфлетном, обеспечивается очень интенсивное дробление.

4. Приповерхностные ядерные взрывы

При ядерном взрыве на астероиде эффективным оказывается и взрыв на достаточно большой высоте над его поверхностью. Это связано с отсутствием воздуха, из-за которого в земных условиях происходит трансформация высокотемпературного излучения с поверхности ЯВУ в относительно низкотемпературное в воздушной тепловой волне.

При приповерхностном взрыве рентгеновское излучение с поверхности УЯВ падает на астероид и разогревает поверхностный слой. Это приводит к разлету испаренного поверхностного слоя, сопровождающемуся распространением ударной волны и разлетом частично испаренного и раздробленного вещества. Выбором высоты взрыва при данной мощности ЯВУ можно добиться ситуации, когда начальные температуры поверхностного слоя достаточно малы, чтобы переизлучение со свободной поверхности практически отсутствовало. Соответственно, можно добиться более высокого отбора энергии взрыва астероидным грунтом, чем при контактном взрыве. Для каждого конкретного астероида и конкретного МЯВ будет своя оптимальная (в смысле максимального эффекта воздействия) высота взрыва.

При рассмотрении воздействия приповерхностного взрыва на произвольный астероид, возникает чисто инженерная проблема представления результатов, связанная с многопараметричностью задачи. Эффект воздействия, кроме мощности взрыва, высоты и размера астероида, будет существенно зависеть от его формы, химического состава, плотности, прочности, спектра излучения, выходящего из УЯВ. Более того, даже такие детали, как наличие тонкого слоя пыли на поверхности астероида будут существенно влиять на величину импульса, приобретаемого астероидом. Например, механический импульс, переданный астероиду, будет изменяться в несколько раз при изменении откольной прочности на порядок или при изменении пористости от 0 до 30%.

В связи с вышесказанным, в настоящем докладе мы ограничимся рассмотрением нескольких примеров. При приповерхностном взрыве мощностью $1 Mm$ над астероидом, имеющим форму шара радиусом $750 m$ импульс I , приобретенный астероидом, будет максимален при высоте $\sim 200 - 250 m$ и составит $I \sim 4 \cdot 10^6 m \cdot m/сек$ для рентгеновского излучения ядерного взрыва планковского спектра с температурой $T_{eff} = 3 кэВ$, $I \sim 30 \cdot 10^6 m \cdot m/сек$ для $T_{eff} = 15 кэВ$ и $I \sim 60 \cdot 10^6 m \cdot m/сек$ для $T_{eff} = 30 кэВ$. Последняя величина близка к величине импульса, приобретаемого астероидом при контактном ядерном взрыве той же мощности.

Расчетное описание эффекта приповерхностного взрыва на астероиде в настоящее время не представляет сложности и может проводиться с очень высокой точностью, если хорошо известны физические свойства приповерхностного слоя астероида.

5. Воздействие с помощью кинетического удара

Процессы при высокоскоростном кинетическом ударе о поверхность астероида во многом подобны процессам при взрыве вблизи его поверхности. При достаточно высокой скорости соударения ($V > 10 \text{ км/сек}$) собственный начальный импульс ударника составляет небольшую долю от импульса выбрасываемого при ударе вещества астероида, и, в основном, результат воздействия зависит от энергии ударника. Тем не менее, задача о кинетическом ударе является многопараметрической — решение зависит от скорости соударения, плотности ударника, его формы и т. п. Из соотношений подобия следует, что импульс I , приобретаемый астероидом, будет пропорционален энергии ударника только при подобном увеличении размеров ударника с сохранением всех остальных параметров задачи. Однако, рассматривая ограниченный диапазон скоростей соударения от 10 км/сек до 40 км/сек , практически интересный с точки зрения проблемы астероидной опасности импульс I можно приближенно представить, как функцию энергии ударника.

Согласно численным расчетам, в рассматриваемом диапазоне скоростей соударения и при различных значениях остальных параметров $I \sim 10^9 - 10^{10} \text{ (т}\cdot\text{м/сек)}/Mm$. Эта величина близка к величине импульса, приобретаемого астероидом, при заглубленном ядерном взрыве той же мощности. Соответственно близки и размеры зоны разрушений.

Расчеты эффекта кинетического удара в настоящее время могут быть проведены с высокой точностью с учетом обширного экспериментального материала. Эта точность будет, в основном, определяться точностью наших знаний о веществе астероида.

6. Выводы и обсуждение

В таблице в самой общей форме представлены оценки основных эффектов воздействия ядерных взрывов и кинетического удара на астероид.

Вид воздействия	Импульс, приобретаемый астероидом	Размеры зоны дробления
Контактный ядерный взрыв	$\sim 10^8 \text{ (т}\cdot\text{м/сек)}/Mm$	$\approx 100 \text{ м}/Mm^{1/3}$
Заглубленный ядерный взрыв	$\sim 10^9 - 10^{10} \text{ (т}\cdot\text{м/сек)}/Mm$	$\approx 200 \text{ м}/Mm^{1/3}$
Приповерхностный ядерный взрыв	$\sim 10^6 - 10^8 \text{ т}\cdot\text{м/сек}$ (для 1 Mm)	
Кинетический удар ($V \sim 10 - 40 \text{ км/сек}$)	$\sim 10^9 - 10^{10} \text{ (т}\cdot\text{м/сек)}/Mm$	$\approx 200 \text{ м}/Mm^{1/3}$

С помощью ядерного взрыва и кинетического удара можно обеспечить очень интенсивное воздействие на астероиды. При этом наиболее интенсивным будет воздействие заглубленных взрывов и кинетического удара. Контактные и приповерхностные взрывы обеспечивают примерно одинаковое воздействие с точки зрения импульса, передаваемого астероиду, при этом контактный взрыв обеспечивает более интенсивную фрагментацию астероида.

С помощью контактного взрыва мощностью $\sim 1 \text{ Mm}$ можно разрушить астероид диаметром $\sim 100 \text{ м}$. С помощью заглубленного взрыва той же мощности можно разрушить астероид диаметром $\sim 200 \text{ м}$. Если рассматривать перехватчик разумной массы (до $\sim 20 \text{ т}$), то мощность ЯВУ может быть поднята примерно на два порядка (до $\sim 100 \text{ Mm}$). Соответственно, максимальный диаметр астероида, который возможно разрушить с помощью единичного ядерного взрыва, можно оценить в $300 - 600 \text{ м}$. При воздействии с помощью кинетического удара, в настоящее время практически возможно реализовать доставку к астероиду ударника массой $\sim 20 \text{ т}$. При скорости соударения 30 км/сек энергия ударника составит $\sim 1 \text{ кт}$. Соответственно, воздействие с помощью кинетического ударника такой энергии позволит разрушить астероид с минимально интересными, с точки зрения проблемы астероидной опасности, размерами $\sim 30 - 50 \text{ м}$.

При воздействии на астероид с целью придания ему определенного импульса и изменения его траектории, возможность использования того или иного способа воздействия определяется временем от момента воздействия до предполагаемого столкновения с Землей. При соответствующих условиях оптимальным может оказаться любой из рассмотренных выше способов воздействия, в том числе и кинетический удар (для небольших астероидов).

Явления ядерного взрыва и кинетического удара являются в значительной степени изученными как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения. Однако, это не означает, что мы можем предсказать результат воздействия на астероид с высокой степенью точности. Это свя-

зано, прежде всего, с тем, что физические свойства вещества, из которого состоят астероиды, нам практически неизвестны или известны с очень большой погрешностью.

С точки зрения численного моделирования наиболее просто описываются приповерхностные взрывы, наиболее сложно контактные. Наиболее достоверные численные оценки воздействия на астероид могут быть получены для заглубленного взрыва и кинетического удара, наименее достоверные — для приповерхностного.

В целом, в условиях ограниченного знания о свойствах конкретного астероида, оценка необходимой для воздействия мощности ЯВУ или энергии ударника может меняться в несколько раз в зависимости от предполагаемых параметров грунта астероида. Соответственно, с инженерной точки зрения, для обеспечения гарантированного достижения эффекта, мощность ЯВУ или энергия ударника должна быть несколько избыточной.

Литература

1. Simonenko V.A., Nogin V.N., Petrov D.V., Shubin O.N., J. Solem, "Defending the Earth Against Impacts From Large Comets and Asteroids", in "Hazards Due To Comets and Asteroids", ed. T. Gehrels, University of Arizona Press, Tucson & London, 1994.
2. Shubin O.N., Nechai V.Z., Nogin V.N., Petrov D.V., Simonenko V.A.. "Nuclear Explosion near Surface of Asteroids and Comets. Common Description of the Phenomenon", report, "Planetary Defence Workshop", Livermore, May 1995.
3. Rabb D.. "Particle-size distribution study: Piledriver event", Proc. Symp. Eng. Nucl. Explos., Las Vegas, Nev., 1970, V. 2, Springfield, Va, 1970.
4. Cooper H.F., Brode H.L., Leigh G.G.. "Some Fundamental Aspects of Nuclear Weapons", Technical Report No. AWFL-TR-72-19, Kirtland Air Force Base, N. M.: Air Force Weapons Laboratory, 1972.
5. Cooper H.F.. "A summary of explosion cratering phenomena relevant to meteor impact events", in "Impact and Explosion Cratering", Roddy D.J., Pepin R.O. & Merrill R.B., editors, 1977.
6. Mild D. Nordyke "Nuclear cratering experiments: United States and Soviet Union", in "Impact and Explosion Cratering", Roddy D.J., Pepin R.O. & Merrill R.B., editors, 1977.
7. Anderson B.D.. "A simple technique to determine the size distribution of nuclear crater fallback and ejecta", Proc. Symp. Eng. Nucl. Explos., Las Vegas, Nev., 1970, V. 2, Springfield, Va, 1970.
8. Tewes H.A.. "Results of the Schooner Excavation Experiment", Proc. Symp. Eng. Nucl. Explos., Las Vegas, Nev., 1970, V. 1, Springfield, Va, 1970.