

# ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ МАКЕТОВ КАМЕННЫХ, ЛЕДЯНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ АСТЕРОИДОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

## STUDYING FRACTURE CRITERIA OF STONE, ICE AND IRON ASTEROID MOCKUPS UNDER INTENSE PULSE EMISSION IMPACT

*А. Ю. Аристова, И. А. Белов, М. Г. Кузин, Н. С. Мальцева, В. В. Мисько, В. Г. Рогачёв, А. Н. Рукавишников, Ю. В. Скорочкин, А. Л. Стадник, П. В. Стародубцев, С. Н. Стёпушкин, Е. С. Цой*

*E. Yu. Aristova, I. A. Belov, M. G. Kuzin, N. S. Maltseva, V. V. Mis'ko, V. G. Rogachev, A. N. Rukavishnikov, Yu. V. Skorochkin, A. L. Stadnik, P. V. Starodubtsev, S. N. Stepushkin, E. S. Tsoy*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

Приведены результаты экспериментов на лазерных установках, в которых на основе принципа физического подобия моделируются процессы заведомого разрушения различных астероидов в космосе с помощью ядерных взрывов на их поверхности [1–3]. Приведены результаты сравнительных газодинамических расчетов модельного ядерного взрыва на поверхности крупного астероида и расчетов воздействия импульса лазерного излучения на его миниатюрный имитатор, подтверждающих подобие ключевых процессов в натурном и модельном случаях. Описана технология изготовления миниатюрных макетов с механическими свойствами, близкими к свойствам астероидов. Для мини-макетов размером 4–10 мм сделана экспериментальная оценка энергетического порога заведомого разрушения макета и исследованы параметры его фрагментации.

We present the results of experiments at laser facilities in which the processes of the undeniable destruction of different asteroids in space by nuclear explosions on the asteroid surface are simulated based on the principle of physical similarity. We present the results of comparative gasdynamic computations of a model nuclear explosion on the surface of a large asteroid and computations of the impact of a laser pulse on a miniature asteroid simulator confirming the similarity of the key processes in the fullscale and model cases. The technology of fabricating miniature mockups with mechanical properties close to those of asteroids is described. For mini-mockups 4–10 mm in size we have made an experimental estimate of the energy threshold for the undeniable destruction of a mockup and investigated the parameters of its fragmentation.

### Введение

Угроза пересечения орбит крупных тел с траекторией движения Земли вполне предсказуема, и потенциально опасные объекты в настоящее время активно регистрируются [1].

Перспективным способом защиты является разрушение астероида за счет действия мощных ударных волн. Для его реализации предлагается использовать энергию ядерного взрыва (ЯВ) на поверхности астероида. Эта идея высказывалась ранее Эдуардом Теллером и другими разработчиками ядерного оружия, как в США, так и в СССР [2]. Важным преимуществом ядерного взрыва яв-

ляется то, что в расчете на единицу массы конструкции выделение энергии превосходит в миллион раз энерговыделение обычных взрывчатых веществ. То есть, ядерный заряд гораздо более предпочтителен с точки зрения возможности его доставки на поверхность астероида. Наиболее простым способом воздействия на астероид является контактный ядерный взрыв на его поверхности. Эффективность воздействия такого взрыва будет значительно меньше, чем сильно заглубленного взрыва. Тем не менее, воздействие на астероид может оказаться достаточным для его заведомого разрушения.

Астероид необходимо раздробить на фрагменты, которые сгорят в атмосфере, не достигнув поверхности Земли. Как показывает практический опыт, Чабаркульский каменный астероид хондритного типа имел начальный диаметр около 17 метров. При прохождении атмосферы он раздробился на мелкие фрагменты, которые в основном затормозились и сгорели. Поверхности Земли с пониженной скоростью достигла лишь небольшая часть осколков, самый крупный из которых имел размер 0,5–1 метра. Именно из-за демпфирующего действия земной атмосферы реальной катастрофы не произошло. Таким образом, если крупный каменный астероид заведомо раздробить взрывом на фрагменты размерами менее 10–15 метров и обеспечить их разведение на поверхности Земли на расстояние в сотни (тысячи) километров, то их воздействие не будет иметь апокалиптического характера, и задача будет выполнена.

Данная работа посвящена экспериментальному моделированию на основе принципа физического подобия процессов взрывного разрушения астероидов [3].

Прежде всего, отметим, что воздействие ЯВ на астероид имеет характер точечного (заряд диаметром 1 м к астероиду диаметром 200 м) и кратковременного удара (время воздействия много меньше времени прохождения ударной волны через него). Если изготовить из астероидного вещества миниатюрный макет, придав ему геометрическую форму, элементный состав, плотность и внутреннюю структуру астероида, и осуществить на его поверхности точечный короткий удар большой интенсивности, то процессы распространения ударной волны в таком макете и процессы разрушения будут в точности подобны тем, что имеют место при ядерном взрыве на поверхности натурального астероида.

Кроме параметров материала для выполнения требований подобия у макета и астероида также должны совпадать прочность (на сжатие и растяжение) и скорость звука [4]. Особенно важно соблюдать приближенное структурное подобие с тем, чтобы в миниатюрном макете не присутствовали прочные вкрапления слишком больших размеров, что нарушало бы подобие в спектре по размерам крупномасштабных осколков разрушенного астероида. Если, например макет имеет радиус 4 мм, а моделируемый астероид – радиус 200 метров, то осколкам в 5 метров натурной ситуации будут соответствовать песчинки размером в 100 мкм. То есть, необходимо, чтобы прочные

вкрапления в макете имели размеры заведомо меньше 100 мкм.

Представляется естественным моделировать воздействие ядерного взрыва на астероид воздействием короткого импульса лазерного излучения (ЛИ) на миниатюрный макет астероида. Короткая длительность ( $\approx 2$  нс), возможность фокусировки ЛИ в малое пятно ( $\approx 100$  мкм), приемлемая энергия импульса и отсутствие дополнительной привносимой массы делают такой способ моделирования наиболее конкурентоспособным.

Вторым важным условием физического подобия является обеспечение равенства характерных давлений в модельном и натурном эксперименте на начало ударно-волновой стадии процесса. Это приближенно соответствует равенству отношения энергии ЯВ к массе астероида и отношения энергии ЛИ к массе моделирующего микро-макета [5]. В случае камуфлетного взрыва данное требование является точным. Однако в случае взрыва на поверхности оно имеет приближенный характер. Это обусловлено отсутствием точного подобия процессов переноса энергии на начальной высокотемпературной стадии и требует введения соответствующего поправочного коэффициента.

Цель данной работы состояла:

- в проведении сопоставительных расчетов воздействия ЯВ на астероид и воздействия импульса ЛИ на макет, и уточнении поправочного коэффициента  $k$ ;
- в разработке адекватной технологии изготовления макетов микро-астероидов и в измерении их ключевых параметров;
- в проведении экспериментов с целью определения зависимости разрушения астероидов от свойств материала, формы модели и условий выделения энергии.

## Теоретические расчеты

В ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ были проведены расчеты воздействия импульса лазерного излучения с энергией  $q_1 = 200$  Дж на поверхность шарообразного макета астероида диаметром  $d_1 = 4$  мм и контактного ЯВ мощностью  $q_2 = 6$  Мт на шарообразный астероид диаметром  $d_2 = 200$  м [6]. Значения энергии воздействия и размер нагружаемых тел выбирались из соотношения энергетического подобия  $d_1 / q_1^{1/3} = d_2 / q_2^{1/3}$ . Из данных расчетов следует, что поправочный коэффициент  $k \approx 2$

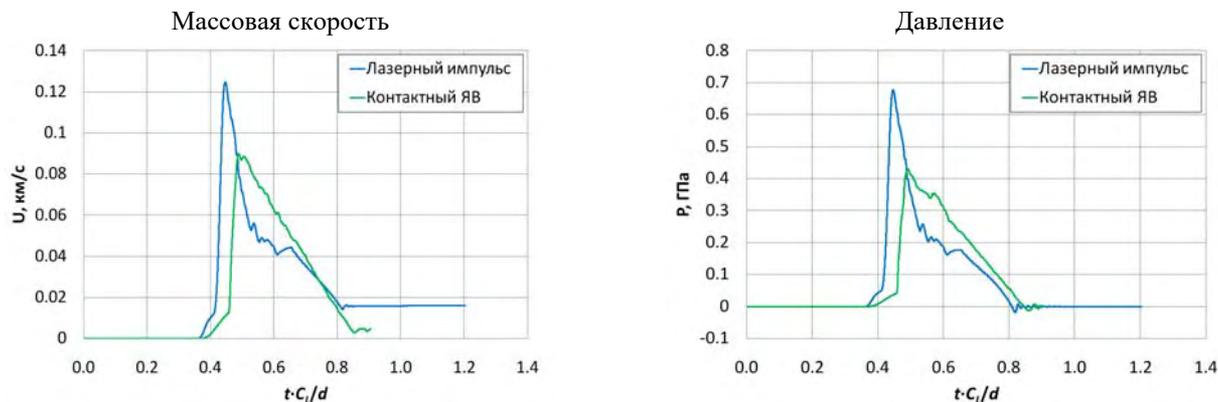


Рис. 1. Зависимости величин от безразмерного времени в центре эллипсоидных макетов

(энергия ЯВ оказалась избыточной). Необходимо отметить, что это очень хороший результат, учитывая, что модель от природы по объему и массе отличается на четырнадцать-пятнадцать порядков. В нижеприведенных расчетах данная поправка была введена в значения энергии ЯВ.

В дальнейшем, для изучения влияния места энерговыделения, химического состава и формы астероида на характер его разрушения были произведены следующие расчеты:

- численное исследование воздействия лазерного импульса  $q = 500$  Дж на образец диаметром  $D = 3$  мм, имитирующий железно-никелевый астероид;

- численное исследование воздействия контактного ЯВ мощностью  $q = 7,45$  Мт на железно-никелевый астероид диаметром  $D = 150$  м;

- численное исследование воздействия лазерного излучения мощностью  $q = 600$  Дж/г на эллипсоидный (вытянутый сфероид) макет астероида с размером осей  $a = 6$  мм и  $b = 3$  мм при фокусировании излучения на полюсе макета;

- численное исследование воздействия контактного ЯВ мощностью  $q = 7,45$  Мт на эллипсоидный хондритный астероид с размером осей  $a = 300$  м и  $b = 150$  м при воздействии ЯВ на полюсе астероида.

Как в случае шарообразного астероида, так и в случае эллипсоидного, сравнение зависимостей массовой скорости  $U$  и давления  $P$  от приведенного времени  $(t/q^{1/3})$ , полученных в точках наблюдения в системе приведенных координат  $(x/q^{1/3}, y/q^{1/3})$ , показало, что эти зависимости совпадают как по амплитуде, так и по форме волны сжатия во всем объеме нагружаемого тела. Например, на рис. 1 приведены полученные зависимости скорости и давления в центре эллипсоидных астероида и макета. Эти результаты подтверждают вывод о принципиальной возможности воспроизведения

качественных и количественных особенностей течения среды, возникающего при контактном ЯВ, в лазерных экспериментах.

### Создание макетов

За исходные данные для получения лабораторных образцов астероидного материала каменного типа были взяты характеристики Чебаркульского хондрита [7]. Образцы искусственного материала были получены из смеси порошков:  $\text{SiO}_2(40\%)$ ,  $\text{MgO}(26\%)$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3(18\%)$ ,  $\text{FeS}(6\%)$ . Дисперсность составляющих образец порошков варьировалась от 10 мкм до 125 мкм. Для получения наиболее соответствующих натуральным параметрам образцов смеси подвергались нагреву и сжатию при различных значениях температуры и давления. Результат испытания на прочность на сжатие представительского образца одной из серий представлены на рис. 2.

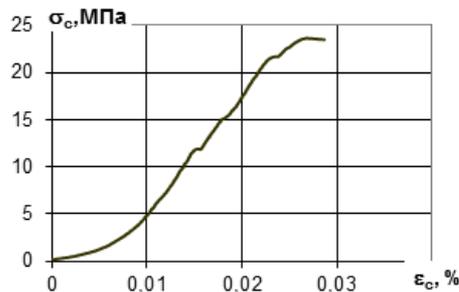


Рис. 2. Результаты испытания на сжатия образцов изготовленных при давлении 3,5 МПа

Как видно из рис. 2, полученные образцы имели прочность 22,5 МПа, что наиболее соответствует натуральному астероиду. Для них были также проведены испытания на растяжение. Разрушение образца произошло при нагрузке растя-

жения  $\approx 0,95$  МПа. Плотность образцов составила  $2,4$  г/см<sup>3</sup>, что несколько ниже плотностей, характерных для натуральных хондритных астероидов. Полученный материал использовался для изготовления макетов разного размера и конфигурации.

Для моделирования ледяных астероидов и ядер комет были использованы микромоделли состоящие из водяного льда с расчетной прочностью на сжатие  $\approx 4,0$ – $5,0$  МПа [8]. Макет представлял собой сплошной шарообразный кусок водяного льда, удерживаемый на медном стержне в вакуумной камере. Второй конец медного стержня помещался в сосуд, заполненный льдом и играющий роль холодного термостата. Равновесные значения температуры и давления, а также сохранность конфигурации льда поддерживались балансом скорости испарения льда, скоростью откачки паров, охлаждением поверхности льда при испарении и притоком тепла за счет теплопроводности. Удалось установить значение давления в вакуумной камере  $0,04$  Торр, что соответствовало температуре макета минус  $20$  °С.

Так как железно-никелевые астероиды обычно не имеют четко выраженных крупных вкраплений (хондр, как в каменных астероидах), для проведения экспериментов по определению критерия их разрушения решено было использовать непосредственно материал астероида Чинге (тип атаксит, т. е. «лишенный порядка»). Он представлял собой сплав железа с никелем (17 % никеля), имел плотность  $7,8$  г/см<sup>3</sup>, прочность на растяжение  $855$  МПа, т. е. примерно на три порядка больше, чем прочность на растяжение материалов, имитирующих каменные астероиды.

### Экспериментальный стенд, методика измерений и результаты

Исследования проводились на лазерной импульсной установке «Луч» [3]. Облучение макетов осуществлялось на длине волны  $\lambda = 0,527$  мкм в режиме «острой фокусировки» ( $\approx 100$  мкм). С выхода канала установки, ЛИ после преобразователя частоты, через систему транспортных зеркал фокусирующим объективом вводилось в вакуумную мишенную камеру. Макет закреплялся на вертикально ориентированном держателе и помещался в специальный, индивидуально юстируемый бокс для сбора осколков, имеющий прозрачные стенки. Таким образом, обеспечивалась возможность боковой и тыльной подсветки для регистрации динамики разлета макета. Принципиальная схема проведения экспериментов изображена на рис. 3.

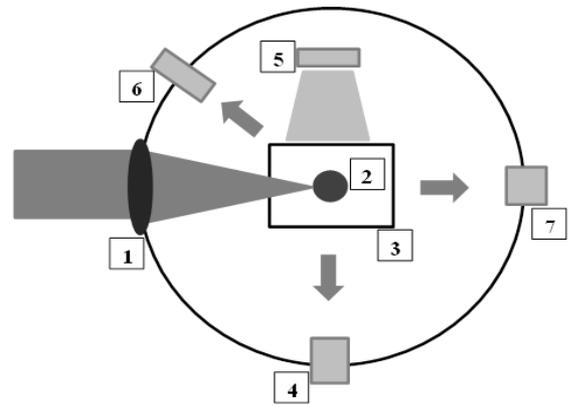


Рис. 3. Схема экспериментального стенда. 1 – объектив; 2 – микро-макет астероида; 3 – бокс улавливающий осколки; 4 – электронно-оптический преобразователь (ЭОП); 5 – лампа-вспышка ЭОП; 6 – камера обскуры; 7 – коллиimator PDV (Photon Doppler Velocimetry)

Размер пятна облучения в экспериментах определялся по его изображению в рентгеновском излучении, зарегистрированном с помощью камеры-обскуры в предположении, что интенсивность рентгеновского излучения прямо пропорциональна интенсивности лазерного излучения. В каждом из экспериментов определялись: площадь пятна облучения по полувысоте от максимальной интенсивности в его изображении и эквивалентный диаметр круглого пятна. Наряду с измерением энергии и длительности импульса ЛИ это позволяло рассчитать интенсивность излучения и скорректировать постановку приведенных выше расчетов.

Для регистрации процесса разрушения макетов использовался стандартный теневой метод. Подсветка была организована с использованием лампы-вспышки с длительностью импульса до  $1$  мс. Регистрация изображений осуществлялась при помощи регистратора СЭР-7 [3] в девятикадровом режиме. На рис. 4 представлена характерная регистрация разлета осколков хондритного эллипсоидного макета. Указано время кадра после прихода ЛИ на макет.

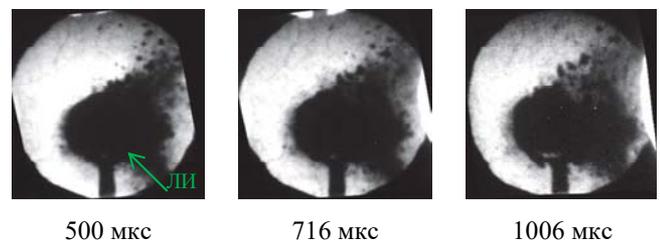


Рис. 4. Покадровый снимок разлета сферического хондритного макета  $d \approx 5$  мм

Движение тыльной стороны макета и продуктов ее распада регистрировались лазерным опти-

гетеродинным методом (PDV) [3]. На рис. 5 представлен пример регистрации динамики разлета конусообразного каменного макета, полученной с использованием методики PDV. В эксперименте зарегистрировано его полное разрушение. Хорошо видны два трека, с сохраняющимся размером, скоростью и отражающей способностью. Скорости осколков составляют примерно 7 и 9 м/с.

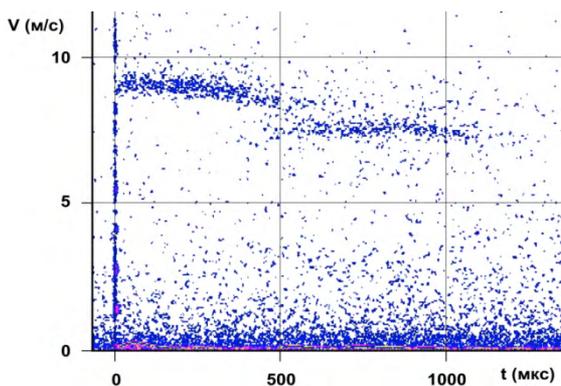


Рис. 5. PDV-регистрация движения осколков тыльной стороны макета

На рис. 6 представлены результаты экспериментов по разрушению макетов астероидов с прочностью на сжатие 22,5 МПа. Как полностью разрушенные классифицированы макеты, не образовавшие в результате воздействия на них излучения фрагментов крупного размера (больше 10 % от первоначального линейного размера макета).

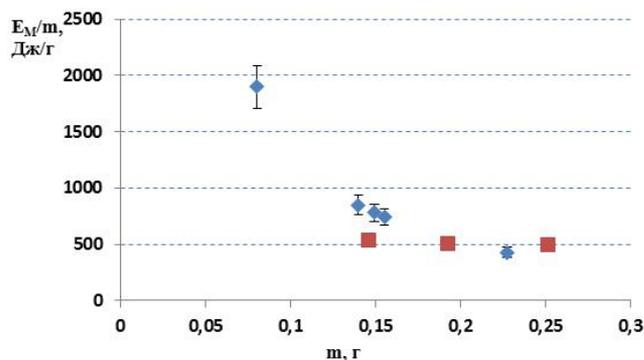


Рис. 6. Удельная энергия в экспериментах по разрушению каменных макетов с характерным размером микровключений до 125 мкм и прочностью на сжатие 22,5 МПа

На рис. 6 синим цветом отмечены эксперименты, в которых получено полное разрушение макета, красным – макеты частично разрушены с образованием крупных осколков. Погрешность приводится только для оси ординат, определяется погрешностью измерения энергии, подведенной к макету, и оценивается величиной  $< 10\%$ . Из рис. 6

видно, что испытанный тип макета имеет порог разрушения около 650 Дж/г. Вместе с тем, в единичных случаях данная закономерность нарушается, что свидетельствует о наличии неучтенных факторов.

Также, приближенно был смоделирован случай «заглубленного» ЯВ, для чего в макетах предварительно проделали каверны диаметром 400 мкм и глубиной 500 мкм. Облучение заводилось на дно каверны, однако показания обскуры в ряде случаев показывают попадание излучения и на стенку каверны. Результатом данных экспериментов стало снижение на 25 % удельной энергии необходимой для полного разрушения макета.

Для макетов с прочностью на сжатие 22,5 МПа проведены эксперименты по облучению эллипсоидных (вытянутые сфероиды) макетов с фокусировкой на полюсах макета и экваторе макета. Сравнительный анализ данных, полученных в ходе эксперимента, показывает, что при вытянутой форме макета 1:2 и попадании излучения на полюс макета удельная энергия, необходимая для полного его разрушения, увеличивается до 3000 Дж/г. При более низких значениях энергии тыльная часть (противоположная приходу излучения) макета отделяется без заметных разрушений. При попадании излучения на экваториальную часть эллипсоидного макета результат не отличается заметно от случая сферической формы макета.

На рис. 7 представлены сравнительные результаты экспериментов по хондритным макетам разной прочности и формы при разных условиях облучения.

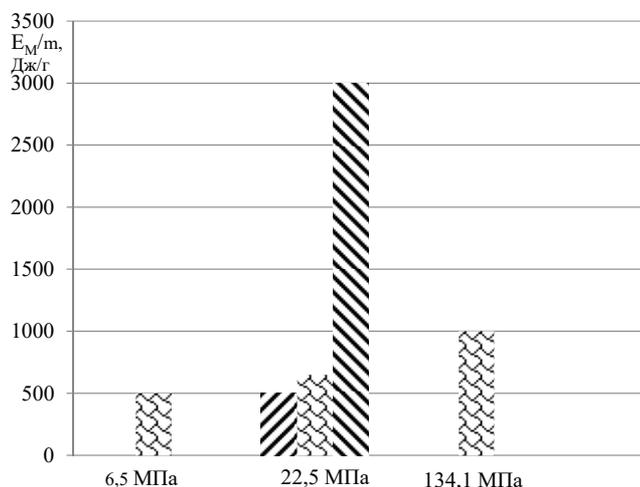


Рис. 7. Сравнительная гистограмма критериев разрушения макетов разной формы и прочности на сжатие.  – сфера;  – сфера с каверной;  – эллипсоидный, облучаемый на полюсе

Для дальнейшего изучения влияния формы астероида и места воздействия на характер разрушения были использованы конусовидные (высота и диаметр основания равны 4–5 мм) макеты из материала с прочностью на сжатие 13 МПа: граница полного разрушения для случая фокусировки ЛИ на центре основания мини-макета лежит в пределах от 900 до 1100 Дж/г, а при фокусировке на полувысоте боковой поверхности – от 600 до 800 Дж/г. Наименее результативным в плане разрушения является выбор фокусировки ЛИ на вершине конуса.

В ходе исследований были высказаны предположения о том, что можно добиться выигрыша в суммарной энергии воздействия на астероид применением нескольких последовательных слабых ЯВ или одновременными двумя ЯВ, разнесенными по поверхности астероида. В первом случае расчет основывался на предположении, что первый ЯВ нарушает структуру астероида, делая ее менее прочной. Во втором случае рассчитывали на взаимодействие ударных волн от двух ЯВ. Однако лазерные эксперименты с двумя последовательными и одновременными лазерными импульсами эти предположения не подтвердили.

Во всех экспериментах по моделированию ЯВ на ледяных астероидах девятикадровой съемкой зарегистрировано полное разрушение макета при понижении удельной энергии до значений 20–40 Дж/г. Однако, так как собрать осколки не удалось, делать выводы о характере фрагментации макетов невозможно. Необходимо проведение экспериментов с применением более совершенных криотехнологий, которые позволят точнее регистрировать массогабаритные данные макетов и их осколков.

В предварительных экспериментах, проведенных по железно-никелевым макетам, не удалось достичь их разрушения при значениях удельной энергии в 5000 Дж/г. В перспективе предполагается проведение экспериментов с повышенным энерговыделением, а также рассмотрение других вариантов воздействия на данный тип мини-макетов астероидов (многократное облучение или воздействие с целью изменения траектории астероида).

На данный способ определения удельной энергии, необходимой для разрушения опасного астероида ядерным взрывом была подана заявка на патент (№ 2017115608 от 03.05.2017).

### Список литературы

1. Прохоров М. Е., Захаров А. И. Сравнительный анализ стратегий обзора неба из космоса в задачах астероидно-кометной опасности и контроля космического мусора. Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, 2011, № 6(39). С. 118–123.
2. Dillow C. Destroying an Incoming Killer Asteroid With a Nuclear Blast. ICMAR XV, Bonnier. 9 April 2012.
3. Аристова А. Ю., Аушев А. А., Баранов В. К. и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды. ЖЭТФ, 2018. Т. 153. Вып. 1. С. 157–172.
4. Слюта Е. Н. Особенности гравитационной деформации малых тел Солнечной системы в зависимости от их химического и минерального состава. ГЕОХИ РАН, Москва, 2014.
5. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. [под ред.] Полак Л. С. Наука, 1989.
6. Белов И. А., Бельков С. А., Воронин А. Ю. и др. Исследование на лазерной установке «Луч» критериев разрушения астероидоподобных тел из хондрита при воздействии на них мощного импульсного излучения. Сборник тезисов XIV-й научно технической конференции молодежь в науке. Саров, 2015.
7. Авраменко М. И., Глазырин И. В., Ионов Г. В., Карпеев А. В. Расчеты параметров взрывной волны, вызванной Челябинским болидом. Труды ЗНЧ-2014. XII Международная конференция, г. Снежинск. 2013.
8. Лобанов В. А. Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой. Дифференциальные уравнения и процессы управления, электронный журнал. 2008, № 4.