

Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды

Е. Ю. Аристова, А. А. Аушев,
В. К. Баранов, И. А. Белов,
С. А. Бельков, А. Ю. Воронин,
И. Н. Воронич, Р. В. Гаранин,
С. Г. Гаранин, К. Г. Гайнуллин,
А. Г. Голубинский, А. В. Городничев,
В. А. Денисова, В. Н. Деркач,
В. С. Дрожжин, И. А. Еричева,
Н. В. Жидков, Р. И. Ильяев,
А. А. Краюхин, А. Г. Леонов¹,
Д. Н. Литвин, К. Н. Макаров¹,
А. С. Мартыненко, В. И. Малинов,
В. В. Мисько, В. Г. Рогачев,
А. Н. Рукавишников, Е. А. Салатов,
Ю. В. Скорочкин, Г. Ю. Сморгачев,
А. Л. Стадник, В. А. Стародубцев,
П. В. Стародубцев, Р. Р. Сунгатуллин,
Н. А. Суслов, Т. И. Сысоева,
В. Ю. Хатункин, Е. С. Цой,
О. Н. Шубин², В. Н. Юфа¹

Приведены результаты предварительных экспериментов на лазерных установках, в которых на основе принципа физического подобия моделируются процессы заведомого разрушения каменных астероидов (хондритов) в космосе с помощью ядерных взрывов на поверхности астероидов. Приведены результаты сравнительных газодинамических расчетов модельного ядерного взрыва на поверхности крупного астероида и расчетов воздействия импульса лазерного излучения на миниатюрный имитатор астероида, подтверждающих подобие ключевых процессов в натурном и модельном случаях. Описана технология изготовления миниатюрных макетов с механическими свойствами, близкими к свойствам каменных астероидов. Для мини-макетов размером 4–10 мм, различающихся формой и условиями воздействия, при энергии лазерного излучения до 500 Дж сделана экспериментальная оценка энергетического порога заведомого разрушения макета и исследованы параметры его фрагментации. Полученные результаты подтверждают возможность экспериментального определения в лазерных экспериментах критериев разрушения ядерным взрывом астероидов различных типов. Показано, что заведомое разрушение крупного астероида возможно при достижимых значениях энергии ядерного взрыва на его поверхности.

1. Введение

Столкновение с крупным астероидом представляет собой одну из самых больших катастроф для нашей планеты. Его воздействие может превзойти по силе и последствиям другие, более частые естественные катастрофы, такие как извержения вулканов или крупные землетрясения. Сегодня человечество достигло достаточно высокого уровня технического развития и может всерьез рассматривать возможность предотвращения или ослабления астероидной опасности. Угроза пересечения орбит крупных тел с траекторией движения Земли предсказуема, и в настоящее время регистрируются потенциально опасные объекты [1–3].

Сложилось два подхода к возможной активной защите Земли от опасных космических объектов: изменение траектории астероидов [4–7] и фрагментация астероидов на мелкие (неопасные) осколки [8–10]. К недостатку подходов, реализующих первый способ, относится тот факт, что воздействие является сравнительно «слабым» и для существенного отклонения объекта требуется длительный интервал времени [7], что подразумевает весьма высокую точность заблаговременного прогноза столкновения. Очевидно, что на практике важны оба фактора. При реализации второго подхода часть осколков пролетит мимо Земли, а часть из них, особенно малого размера, разрушится и сгорит в ее атмосфере.

Выполним некоторые ориентировочные оценки защиты от астероидов. Пусть скорость сближения астероида с Землей составляет $V_{ast} \approx 20$ км/с, как в случае с чебаркульским метеоритом. Примем скорость, которую получают фрагменты при дроблении астероида ядерным взрывом, равной $V_{frag} \approx 10$ м/с. Тогда для разведения фрагментов на расстояние, большее радиуса Земли $R = 6400$ км, потребуется произвести ядерный взрыв на расстоянии $L = RV_{ast}/V_{frag} \approx 13$ млн км от Земли. При средней скорости ракеты $V_{roc} \approx 10$ км/с она должна стартовать за время $t = L/V_{roc} \approx 15$ сут. до прилета астероида. На этот момент времени астероид будет находиться на удалении $L_1 = L(V_{ast} + V_{roc})/V_{roc} \approx 39$ млн км от Земли. На всем этапе полета должна обеспечиваться высокая точность корректировки, для того чтобы обеспечить контролируемый эффект устранения угрозы. Эти оценки по порядку величины дают представление о пространственно-временных масштабах решаемой проблемы.

Среди способов разрушающего воздействия на астероид подавляющее преимущество перед остальными имеет ядерный взрыв [10, 11], так как именно он обеспечивает максимальное удельное выделение энергии (примерно в миллион раз больше, чем у обычных взрывчатых веществ). Требованием к любому из перспективных способов, имеющих целью воздействие на астероид, является гарантированное устранение угрозы катастрофы. Таким образом, выработка критерия для отклонения или разрушения астероида должна основываться на серьезной доказательной базе. Определить подобный критерий можно на основе расчетных методов либо с помощью модельных экспериментов.

Натурному устранению астероидной опасности с помощью ядерного взрыва на поверхности астероида должны предшествовать расчетные и лабораторные исследования, обеспечивающие адекватную трактовку результатов с учетом эффекта масштабирования. При таком подходе необходимо обеспечить подобные геометрические, структурные и физические (в том числе прочностные) свойства макета-астероида и источника воздействия на него.

Схематически общая картина защиты Земли от астероидной опасности при помощи ядерного взрыва (ЯВ) показана на рис. 1.

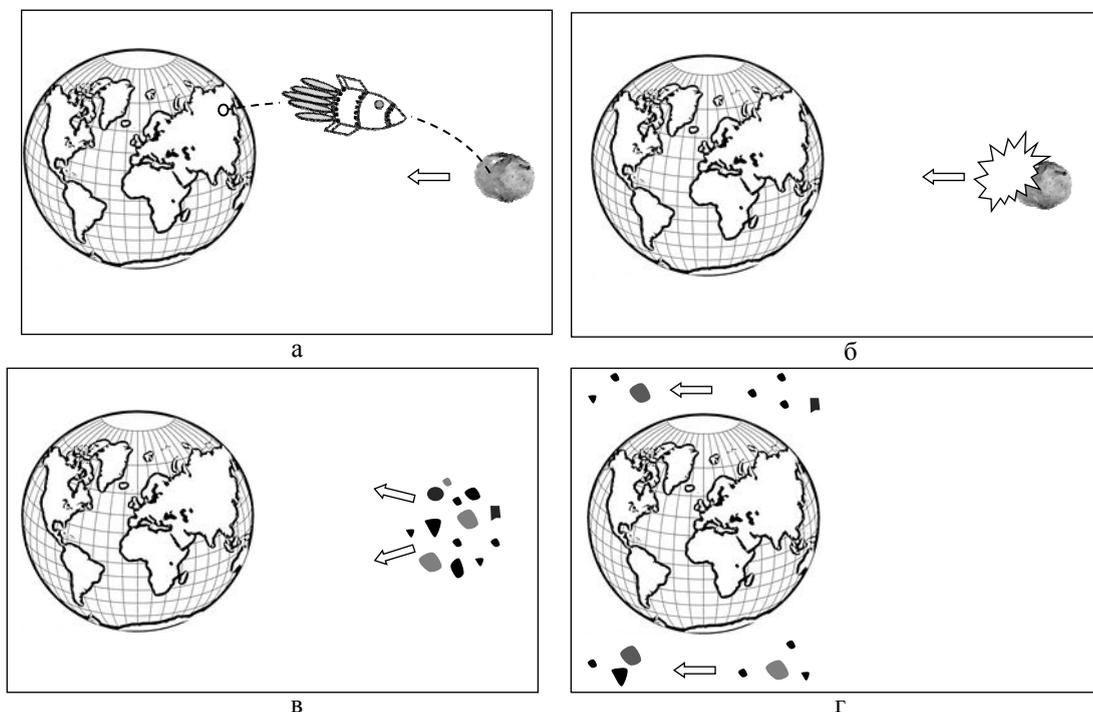


Рис. 1. Последовательность действий при предотвращении астероидной опасности: а – обнаружение астероида, старт и полет ракеты с ядерным зарядом; б – ядерный взрыв на поверхности астероида; в – фрагментация астероида на осколки малых размеров; г – полет осколков мимо Земли

В данной работе предложен и реализован способ моделирования разрушающего воздействия мощного ядерного взрыва на астероиды, основанный на принципах геометрического и физического подобия ключевых газодинамических процессов и процессов разрушения.

Предлагается заменить астероид диаметром в сотни метров имитатором (мини-макетом) диаметром в несколько миллиметров из вещества того же состава и тех же физических свойств.

Выделение энергии ядерного взрыва имитируется импульсным выделением энергии лазерного излучения (ЛИ) на малой площадке поверхности макета, т. е. в обоих случаях реализуется «мгновенное» «точечное» воздействие. Предметом исследования является определение масштабного фактора в данных подходах, а также выработка рекомендаций относительно выбора энергии ядерного заряда и места его эффективного подрыва, зависящих от типа, размера и формы астероида.

2. О подобии газодинамических процессов

При ЯВ на поверхности астероида картина протекающих во времени процессов схематически выглядит следующим образом [12, 13].

Энергия взрыва выделяется за короткий промежуток времени в виде высокотемпературного излучения. При этом около половины энергии не попадает в астероид, а в виде излучения и кинетической энергии высокоскоростной плазмы рассеивается в окружающем пространстве.

Часть энергии, которая выделилась в окрестности поверхности астероида, формирует тепловую волну, быстро распространяющуюся вглубь и разогревающую дополнительную массу ве-

щества. Этот процесс сопровождается потерями в виде теплового излучения с поверхности и дополнительного разлета высокотемпературной плазмы.

По мере уменьшения температуры в области, охваченной тепловой волной, в теле астероида формируется сильная ударная волна, фронт которой вскоре обгоняет фронт тепловой волны [12, 13]. После этого процессы теплового переноса энергии затухают и начинают доминировать ударно-волновые процессы.

Площадь фронта ударной волны увеличивается, что приводит к уменьшению ее амплитуды. При уменьшении скачка давления на фронте ударной волны до значения $\Delta P = P_0 = \rho_0 c_0^2$ волна переходит в звуковой режим и начинает двигаться со скоростью, близкой к скорости звука c_0 . Для хондритного вещества каменного астероида плотность составляет $\rho_0 \cong 2,2-3 \text{ г/см}^3$, $P_0 \approx 30 \text{ ГПа}$ и $c_0 = 3,91 \text{ км/с}$.

Гетерогенность структуры астероида приводит к дополнительным потерям энергии, переносимой волной, поэтому ее амплитуда продолжает уменьшаться. С другой стороны, из-за криволинейной формы астероида при отражении ударных волн от поверхности могут происходить следующие «фокусировки», т. е. локальное усиление волн. В конечном счете диссипативные процессы приводят к затуханию возмущений и при уменьшении скачка давления ΔP до значения порядка предела прочности (несколько МПа на растяжение, десятки МПа на сжатие) процессы разрушения прекращаются, а затем происходит разлет раздробленного астероида.

На газодинамической стадии основными процессами являются распространение и интерференция звуковых (слабых ударных) волн, отраженных от кривой поверхности, и волн, рассеянных на внутренних неоднородностях. В этих процессах формируются зоны отрицательных (разрывающих) давлений и происходит нарушение целостности вещества – разрушение астероида.

Сложность процессов, неопределенность в структуре и форме астероидов делают практически невозможным точное численное моделирование. Одновременно описанная выше качественная картина процессов разрушающего воздействия ЯВ на астероид содержит в себе очевидные предпосылки для их количественного моделирования в лабораторных условиях.

Учитывая, что пространственный масштаб, характерный для достижения условия $\Delta P \sim P_0$, как правило, существенно меньше размеров опасных астероидов, все стадии, предшествующие образованию сильной акустической волны, можно рассматривать как мгновенные и точечные. Короткая длительность, возможность фокусировки ЛИ в малое пятно, приемлемая энергия импульса и отсутствие дополнительной привносимой массы делают такой способ моделирования с использованием лазерного излучения наиболее конкурентным. Интерпретация данного подхода продемонстрирована на рис. 2.

Для корректного масштабирования задачи необходимо:

а) изготовить миниатюрный макет, имеющий плотность и прочностные характеристики астероида, его геометрическую форму и подобный ему во всех основных пространственных масштабах;

б) обеспечить равенство характерных давлений в модельном и натурном экспериментах в начале ударно-волновой стадии процесса. Это с точностью до коэффициента соответствует равенству отношения энергии ЯВ к массе астероида и отношения энергии ЛИ к массе моделирующего мини-макета.

Такой коэффициент отвечает за отсутствие точного подобия процессов на начальной стадии натурального и модельного воздействий.

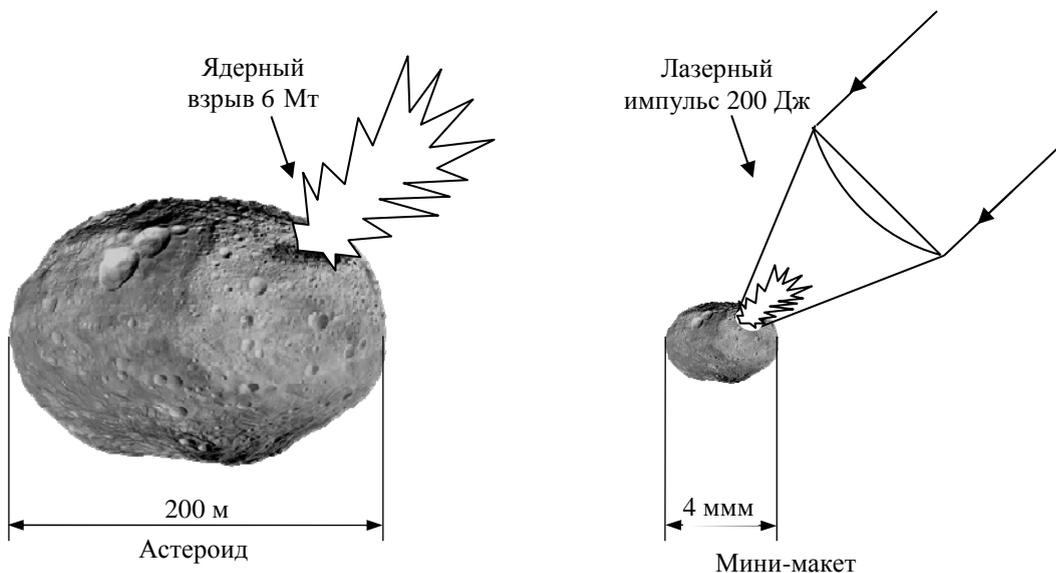


Рис. 2. Naturalный астероид и мини-макет

3. Расчетное обоснование моделирования

В подробных газодинамических расчетах с учетом широкого круга физических процессов исследованы случаи воздействия импульса ЛИ на поверхность малоразмерного мини-макета и контактного ЯВ на полномасштабный астероид. При моделировании рассматривались тела шарообразной формы: макет диаметром $d_1 = 4$ мм и астероид диаметром $d_2 = 200$ м. Энергия импульса ЛИ бралась равной $q_1 = 200$ Дж. Импульс имел трапециевидную временную форму с шириной на полувысоте $\tau_{0,5} = 2$ нс, значение интенсивности лазерного излучения на плато составляло $I = 2 \cdot 10^{14}$ Вт/см² на длине волны $\lambda = 0,527$ мкм, радиус освещенного пятна равен $R_1 = 125$ мкм.

Энергия ЯВ в расчетах задавалась из соображения приближенного энергетического подобия ($d_1/q_1^{1/3} = d_2/q_2^{1/3}$) и для выбранных параметров составила $q_2 = 6$ Мт в тротиловом эквиваленте. Полагалось, что на 1 т веса ядерного взрывного устройства приходилось 1 Мт выделяемой энергии. Стилизованный источник энерговыделения представлял собой алюминиевый шар радиусом $R_2 = 81$ см, центр которого располагался на поверхности астероида, а вся энергия взрыва выделялась в нем мгновенно в виде тепла.

Расчетное моделирование воздействия ЛИ на мини-макет разбивалось на две стадии. На первой стадии рассчитывалось взаимодействие лазерного импульса с веществом мини-макета, на второй – последующее газодинамическое течение среды с учетом ее прочностных свойств и разрушения. Расчеты первой стадии проводились по одномерному радиационному газодинамическому коду СС-9М [14] в неравновесном приближении. Поглощение и перенос энергии ЛИ мини-макетом рассчитывались в волновом квазистационарном приближении на основе решения уравнений Гельмгольца разностным методом. Кинетическое ограничение потока электронной теплопроводности в области плазмы низкой плотности задавалось множителем $f = 0,1$. Перенос рентгеновского излучения описывался в диффузионном приближении. Для описания кинетики населенностей уровней ионов применялась модель среднего иона.

По коду СС-9М были рассчитаны одномерные профили плотности, внутренней энергии и массовой скорости в веществе мини-макета к моменту формирования ударной волны в зоне прогрева. Далее с использованием этих данных в качестве начальных по коду ЭГАК [15] проводился двумерный расчет формирования и распространения ударной волны во всем объеме макета от области прогрева вещества ЛИ. Численное моделирование проводилось в двумерной осесимметричной постановке на квадратной эйлеровой сетке. На радиус мини-макета приходилось 160 счетных ячеек (приведенный размер счетной ячейки $h = 3,44 \text{ см/кт}^{1/3}$). Специальные исследования показали правомерность использования одномерного приближения для расчета начальной стадии взаимодействия ЛИ с веществом мини-макета астероида. При вариации момента времени перехода от одномерного расчета к двумерному в диапазоне $t_0 = 8,3\text{--}13,8 \text{ мкс/кт}^{1/3}$ форма и амплитуда ударной волны в нагружаемом теле в более поздние моменты времени $t > 50 \text{ мкс/кт}^{1/3}$ практически не изменялись.

Расчет воздействия контактного ЯВ на полномасштабный астероид проводился по коду ЭГАК в осесимметричной постановке на квадратной эйлеровой сетке. Для описания переноса излучения по веществам источника и астероида использовалось приближение лучистой теплопроводности. Для экономии вычислительных ресурсов на тепловой стадии взрыва рассматривался не весь астероид, а лишь его часть, расположенная вблизи источника энерговыделения. После отрыва ударной волны от тепловой в веществе астероида учитывалось только газодинамическое движение среды с учетом ее прочностных свойств и разрушения. При этом осуществлялось увеличение размеров счетной области (рассматривался уже весь объем астероида) и укрупнение счетной сетки. На радиус астероида приходилось 160 счетных ячеек (приведенный размер счетной ячейки $h = 3,44 \text{ см/кт}^{1/3}$).

Для описания веществ мини-макета и полномасштабного астероида в области низких давлений ($P \sim 10 \text{ ГПа}$) использовалась обобщенная квазиупругопластическая (ОКУП) модель деформирования и разрушения скального грунта [16] с параметрами для сильнотрещиноватого гранита с плотностью $\rho_0 = 2,4 \text{ г/см}^3$, модернизированная при ее реализации в коде ЭГАК. В ОКУП-модели учитываются сдвиговое и отрывное разрушение среды, разрыхление раздробленного материала, релаксация напряжений и так далее. В области высоких значений термодинамических параметров использовалось уравнение состояния [17], аппроксимирующее расчеты по модели Томаса – Ферми, с параметрами для алюминия. Переход с ОКУП-модели на уравнение состояния [18] происходил при выполнении условия $P \geq P_{cr} = 20 \text{ ГПа}$.

Расчеты показали, что при соблюдении условия энергетического подобия энергия ЯВ избыточна для заведомого разрушения астероида. На рис. 4, 5 представлены расчетные зависимости в случае $q_2 = 3 \text{ Мт}$ для массовой скорости U и давления P от времени в точках, отмеченных на рис. 3. При сравнении результатов расчетов использовались безразмерные значения координат точек наблюдения $(x/d, y/d)$ и времени tC_1/d , где $C_1 = 3,91 \text{ км/с}$ – скорость продольной волны в веществе.

Наблюдается удовлетворительное согласие модельной и натурной зависимостей. В остальных точках расчетные величины согласуются аналогичным образом. Несмотря на гигантское различие в абсолютных масштабах (в 10^{14} раз по массе и энергии), зависимости давления и массовой скорости от нормированного времени близки как по амплитуде, так и по форме во всем объеме астероида (макета). Это свидетельствует о приближенном подобии процессов и о возможности воспроизведения в лазерных экспериментах качественных и количественных особенностей течения среды, возникающего при контактном ядерном взрыве.

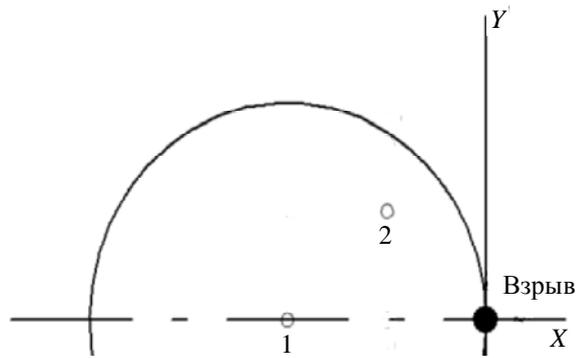


Рис. 3. Расположение точек наблюдения в расчетах

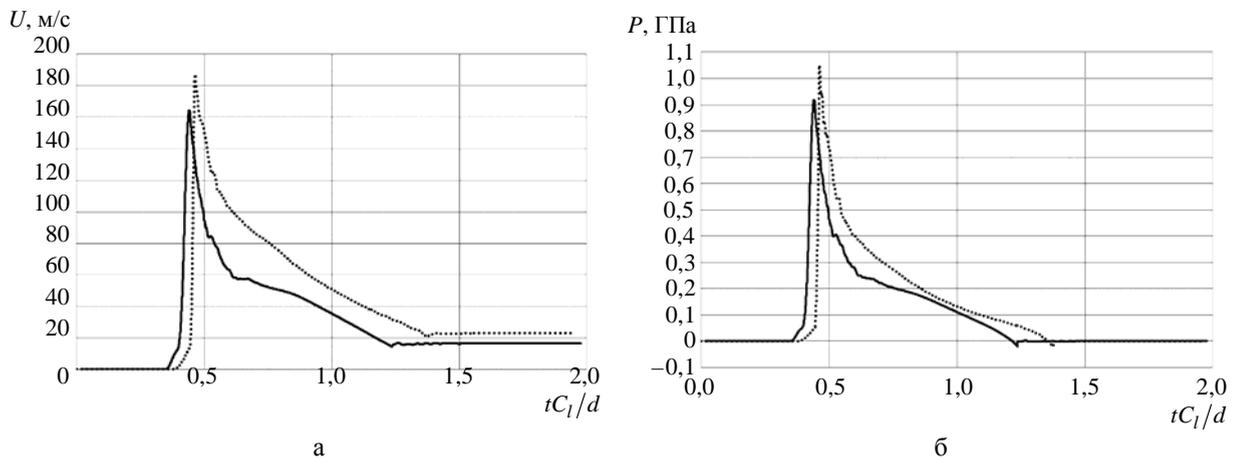


Рис. 4. Зависимости массовой скорости (а) и давления (б) от приведенного времени в точке 1 (см. рис. 3). Сплошные кривые – лазерный импульс $q_1 = 200$ Дж, пунктирные кривые – контактный ядерный взрыв $q_2 = 3$ Мт

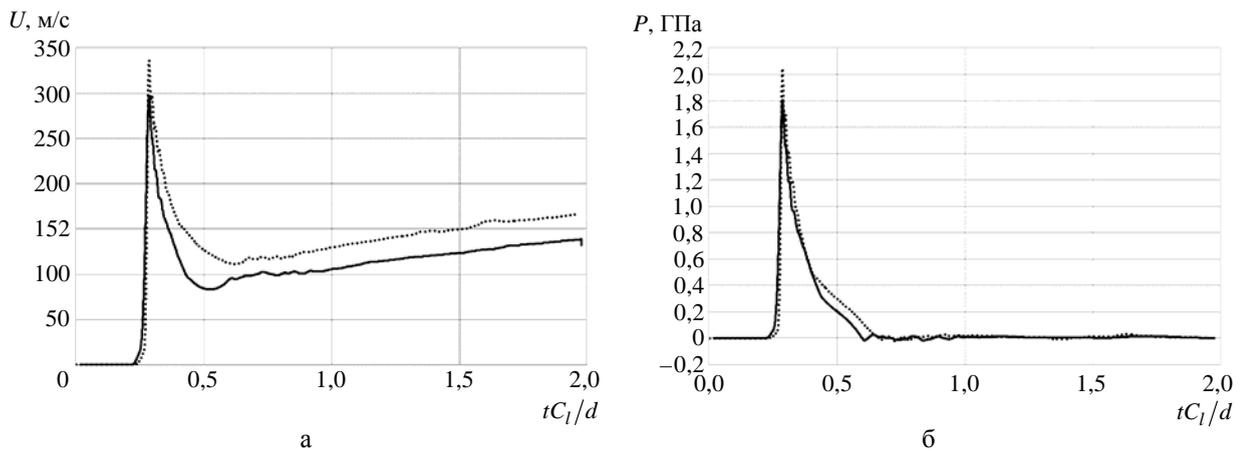


Рис. 5. Зависимости массовой скорости (а) и давления (б) от приведенного времени в точке 2 (см. рис. 3). Сплошные кривые – лазерный импульс $q_1 = 200$ Дж, пунктирные кривые – контактный ядерный взрыв $q_2 = 3$ Мт

4. О технологиях изготовления мини-макетов каменных астероидов

Для обеспечения лазерных экспериментов разработана технология изготовления искусственного вещества каменных астероидов с заданными свойствами.

Химический состав, плотность, пористость, скорость звука, прочность (на сжатие и растяжение) мини-макета и астероида для соблюдения подобия должны совпадать.

Необходимо также соблюдение структурного подобия, а именно в макете астероида не должны содержаться крупные прочные включения, которые бы соответствовали весьма прочным глыбам, отсутствующим в каменных хондритах.

По этой же причине нецелесообразно использование мини-макетов, изготовленных из натуральных хондритов, поскольку размеры прочных оплавленных хондр сопоставимы с размерами макета, что нарушает подобие процессов разрушения.

В основу создания мини-макетов легли данные анализа структуры вещества каменного астероида, упавшего на Землю в феврале 2013 г. рядом с населенным пунктом Чебаркуль [19]. Астероид был отнесен к классу обыкновенных хондритов. Анализ обломков позволил сделать вывод о химическом составе (SiO_2 – 40 масс. %, MgO – 26 масс. %, Fe_2O_3 – 18 масс. %, FeS – 6 масс. %) и некоторых свойствах (плотность примерно $3,3 \text{ г/см}^3$, прочность примерно 9,8 МПа) астероида.

При имитации астероидного вещества выбрано своеобразное подобие лабораторных технологий естественным процессам его образования в природе, т. е. использовалась комбинация процессов осаждения, сжатия и нагрева.

При изготовлении макетов приближенно учитывался масштабный фактор, а именно использовались исходные материалы минимальной допустимой дисперсности. Так, дисперсность порошков MgO , Fe_2O_3 и FeS не превышала 20 мкм, а дисперсность SiO_2 варьировалась в пределах от 10 до 125 мкм. Полученная смесь перемешивалась в стряхивающем смесителе в течение 5 ч, конечная насыпная плотность смеси для всех случаев составляла около $0,8 \text{ г/см}^3$.

Из приготовленной смеси путем двухстороннего прессования в закрытой пресс-форме на лабораторном гидравлическом прессе были изготовлены образцы цилиндрической формы (диаметром приблизительно 20 мм, высотой приблизительно 20 мм). Удельное усилие прессования варьировалось и составляло от 356 до 900 МПа. Использование двухстороннего прессования значительно улучшило распределение плотности по высоте образца, вследствие чего увеличилась и прочность искусственного астероидного вещества [20]. Плотность модельного астероидного вещества после прессования варьировалась от 1,98 до $2,19 \text{ г/см}^3$.

Спекание образцов проводилось в вакууме под давлением пресса в засыпке нитрида бора. Пресс-форму устанавливали в печь и под давлением 3,5 МПа проводили спекание при температуре 1000 °С. Эта температура выбиралась ниже температуры плавления компонентов исходной смеси. Минимальной температурой плавления 1193 °С обладает FeS .

В результате спекания происходила усадка образцов [21], а плотность вещества возрастала приблизительно до $2,3 \text{ г/см}^3$.

С целью изучения прочностных характеристик искусственных материалов в каждой партии выбирался контрольный образец, который подвергался испытаниям на сжатие: по результатам испытаний строилась зависимость напряжения от деформации при сжатии образца, подобная приведенной на рис. 6.

Прочность на сжатие образцов материала искусственного астероида, изготовленных с усилием при спекании около 20 МПа, составила 134 МПа. Прочность образцов, спеченных с усилием 3,5 МПа, составила 24 МПа. Несмотря на невысокую плотность полученных образцов, их прочность оказалась достаточно высока. Прочность образца, спеченного без усилия и засыпки, невысокая – 2,7 МПа.

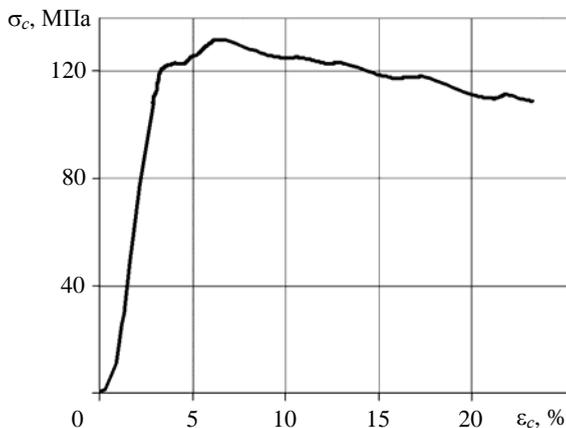


Рис. 6. Диаграмма сжатия образца астероидного вещества с дисперсностью около 10 мкм, спеченного при давлении на пресс-форму 20 МПа

Для изучения структуры искусственного астероидного вещества было проведено микроскопическое исследование среза цилиндрического образца, произведенного алмазным резцом. Методами рентгеноструктурного анализа и электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа была исследована структура и определен элементный состав искусственного астероидного вещества. Исследование структуры проводили с помощью детектора обратноотраженных электронов (BSE), а исследование элементного состава – с помощью аналитической приставки INCA с детектором X-Max. Анализ распределения элементов в структуре астероидного вещества проводили на участках образца, изображения которых были получены при различных увеличениях в режиме атомного контраста.

Анализ данных, представленных на рис. 7 и в табл. 1, показал, что крупные частицы серого цвета размером до 300 мкм представляют собой оксид кремния SiO_2 (участок 1). Область светло-серого цвета образована сложным оксидом $(\text{Mg}, \text{Fe})_x\text{O}_y$ (участок 2). Соединению FeS (участок 3) соответствует область белого цвета. Также в структуре исследуемого материала определены участки, элементный состав которых соответствует соединениям Fe_2O_3 и Fe (участки 4, 5).

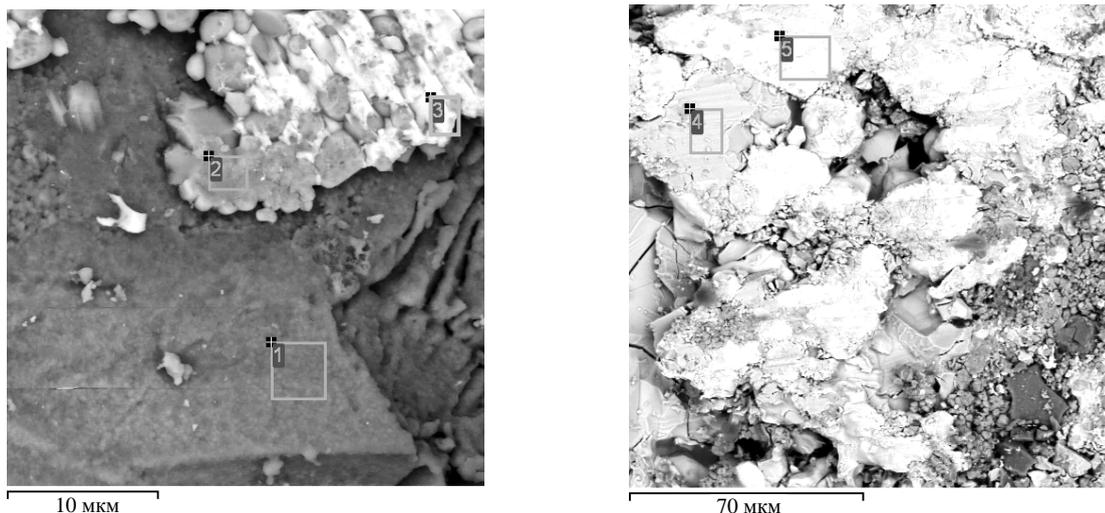


Рис. 7. Изображения участков микроанализа астероидного вещества

Таблица 1

Элементный состав характерного образца астероидного вещества хондритного типа

Номер участка	Массовое содержание, %							Вероятное соединение
	O	F	Mg	Si	S	Ca	Fe	
1	44,6	12,5	11,3	29,0	–	1,2	1,4	SiO ₂
2	31,1	–	32,6	2,3	–	–	34,0	(Mg, Fe) _x O _y
3	–	–	3,8	0,7	35,8	–	57,7	FeS
4	23,8	–	4,6	0,3	0,4	–	70,9	Fe ₂ O ₃
5	–	–	1,3	–	0,7	–	98,0	Fe

На рентгеновском дифрактометре Dmax/RC методом рентгеноструктурного анализа (РСА) был определен фазовый состав искусственного астероидного вещества. Анализ показал, что искусственное астероидное вещество состоит из трех основных фаз: оксида кремния SiO₂ ≈ 56,1 %, сложного оксида Mg_{1-x}Fe_xO ≈ 40,2 % и сульфида железа FeS ≈ 3,7 %.

Из цилиндрических образцов искусственного астероидного вещества были изготовлены образцы шаровидной формы (рис. 8), которые впоследствии использовались в лазерных экспериментах по определению критерия заведомого разрушения каменных астероидов.



Рис. 8. Образец искусственного астероидного вещества шаровидной формы диаметром 4,5 мм и массой 0,1 г

5. Постановка лазерных исследований

Исследования проводились на лазерных импульсных установках ИСКРА-5 [22], ЛУЧ [23] и САТУРН [24].

Лазерное излучение с выхода усилительного канала системой транспортных зеркал вводилось в вакуумную камеру и фокусировалось на мини-макет с использованием объектива. Облучение осуществлялось в режиме «острой фокусировки», диаметр пятна на макете составлял около

100–120 мкм. Схемное решение постановки экспериментов на разных установках отличалось деталями. Длина волны составляла 1,315 и 0,527 мкм, длительность импульса 0,4–0,6 нс и 1,4–2,2 нс на установках ИСКРА-5 и ЛУЧ соответственно. Энергия варьировалась в пределах от ≈ 50 до ≈ 500 Дж.

Макет астероида закреплялся на вертикально ориентированном держателе и помещался в специальный, индивидуально юстируемый бокс, имеющий прозрачные стенки и отверстие для введения ЛИ. Таким образом обеспечивалась возможность боковой и тыльной подсветки для регистрации динамики разлета макета астероида.

Принципиальная схема проведения экспериментов на установке ЛУЧ, размещение макета и систем диагностики приведены на рис. 9; назначение регистрирующих средств указано в табл. 2.

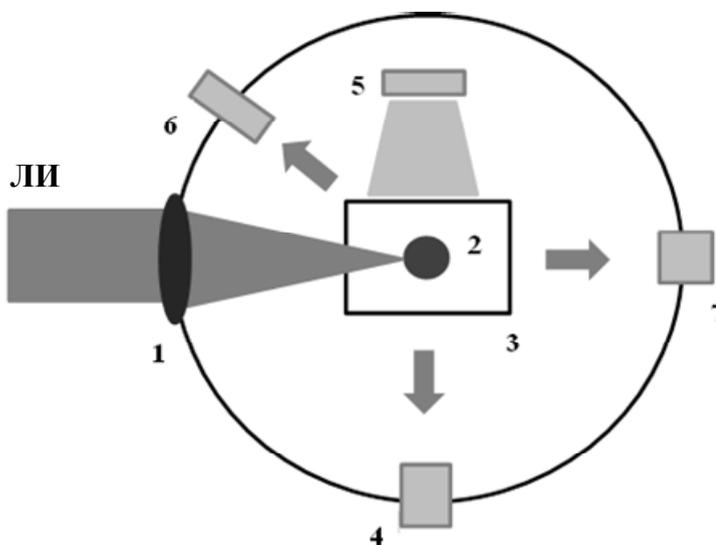


Рис. 9. Принципиальная схема эксперимента на установке ЛУЧ:
 1 – объектив, 2 – мини-макет астероида, 3 – бокс с прозрачными стенками,
 4 – электрооптический преобразователь (ЭОП), 5 – лампа-вспышка,
 6 – камера-обскура, 7 – оптическая гетеродинная регистрация

Размер пятна облучения в экспериментах определялся по его изображению в рентгеновском излучении, зарегистрированном с помощью камеры-обскуры. Увеличение съемки составляло $M^* \approx 1,6–1,7$, пространственное разрешение – приблизительно 15 мкм. Изображение регистрировалось за набором фильтров: 10 мкм Ве + 23,5 мкм лавсана ($C_8H_{10}O_4$) + 0,1 мкм Al. Энергия отсечки составила около 2,6 кэВ.

Для регистрации процесса разрушения мини-макета астероида использовался стандартный теневой метод. Подсветка была организована с использованием лампы-вспышки с длительностью импульса до 1 мс. Регистрация изображений осуществлялась на электрооптическом преобразователе СЭР-7 [25] в девятикадровом режиме. Параметры съемки:

- область изображения 20–25 мм;
- пространственное разрешение в области расположения макета 200 мкм;
- динамический диапазон 700;
- полное время съемки 600 мкс;
- время экспозиции единичного кадра 1–5 мкс.

Таблица 2

Диагностическое оснащение экспериментов

Измеряемый параметр	Диагностика	Метод измерения
Параметры лазерного излучения	Стандартные диагностики	Ближняя и дальняя зоны, контраст, форма импульса, энергия
Пятно облучения (размер, структура)	Рентгеновская камера-обскура	Изображение пятна облучения в рентгеновском излучении
Динамика разлета продуктов разрушения мишени, диаграмма направленности разлета осколков, массогабаритные характеристики осколков, распределение осколков по скоростям и размерам	Теневая регистрация с использованием 9-кадровой «лупы времени» на базе ЭОП	Боковая подсветка мишени синхронизованным импульсным источником
	Измерение скорости движения осколков методикой PDV	Лазерная подсветка тыльной стороны мишени с регистрацией распределения скоростей движения осколков
	Сбор проб, анализ фрагментов	Взвешивание мишени и осколков. Построение гистограммы распределения осколков по размерам

Движение тыльной стороны мини-макета и продуктов его распада регистрировались лазерным оптическим гетеродинным методом PDV (Photonic Doppler Velocimetry) [26]. Измерительный комплекс PDV включал в себя:

- узкополосный лазер с длиной волны $\lambda = 1,55$ мкм;
- фотоприемник с полосой пропускания 20 ГГц;
- осциллограф с полосой пропускания 16 ГГц и дискретизацией 12,5 пс;
- пассивные оптоволоконные элементы для построения оптической схемы.

Установление факта разрушения проводилось на основе массогабаритного анализа осколков.

Для оценки критерия заведомого разрушения был принят во внимание процесс падения чебаркульского астероида. Этот астероид имел начальный размер около 20 м и при прохождении атмосферы раздробился на мелкие фрагменты, не нанеся катастрофического урона. Таким образом, для исходного размера астероида 200 м можно говорить о его заведомом разрушении при дроблении на осколки, имеющие линейный размер в 10 раз и массу в 10^3 раз меньше исходных. Очевидно, что данная оценка справедлива, если траектория движения осколков в атмосфере близка к траектории чебаркульского астероида.

6. Результаты лазерных экспериментов

Первые эксперименты по моделированию были проведены на установке ИСКРА-5 с длиной волны ЛИ 1,315 мкм со сферическими мини-макетами. Для разрушения мини-макетов астероидов, имевших прочность на сжатие 6,5 МПа, использовалось ЛИ с энергией от 100 до 300 Дж при длительности импульса 0,5 нс и пятном фокусировки приблизительно 250 мкм. При этом удельная энергия, необходимая для полного разрушения макета, составила приблизительно 2000 Дж/г. Однако первые испытанные мини-макеты не удовлетворяли критерию подобия, так как были слишком крупнодисперсными (вкрапления размером до 800 мкм) и непрочными (прочность на сжатие 6,5 МПа).

В экспериментах на установке САТУРН варьировались форма мини-макета, место прицеливания, количество импульсов на один мини-макет. Длина волны ЛИ составляла 1,054 мкм

Основная серия экспериментов проведена на установке ЛУЧ с вариацией прочности мини-макетов, их размеров и формы, способа фокусировки ЛИ, количества импульсов на один мини-макет. Длина волны лазерного излучения составляла 0,527 мкм.

В экспериментах на установке ЛУЧ были использованы образцы хондритного типа со следующими параметрами:

- прочность на сжатие 6,5 МПа, 22,5 МПа и 140 МПа;
- размер от 3 до 10 мм;
- сферическая и эллипсоидальная формы.

Прицеливание пучка на макет эллипсоидальной формы осуществлялось:

- в продольном положении – на поверхность, в искусственную каверну или перед поверхностью мини-макета;
- в поперечном направлении – по центру или с края макета.

Для каждого из вариантов облучения производилось от 3 до 10 экспериментов с варьированием энергии, подводимой к макету. Всего проведено свыше 100 экспериментов.

На рис. 10 представлены изображение характерного пятна облучения, зарегистрированного с помощью рентгеновской камеры-обскуры, и изолинии распределения интенсивности в одном из характерных экспериментов.

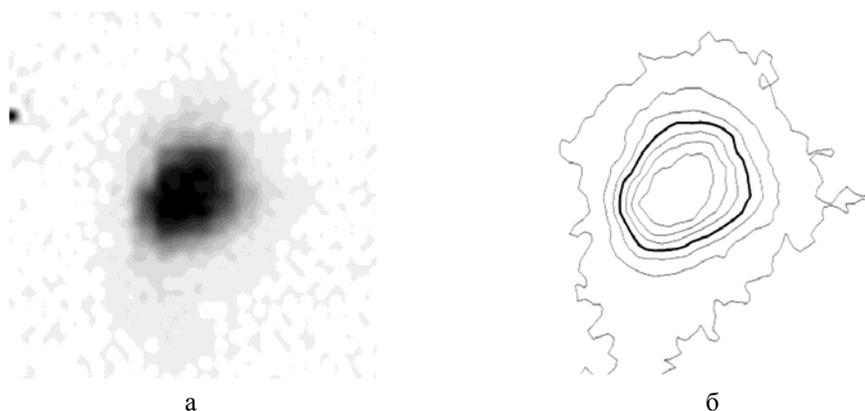
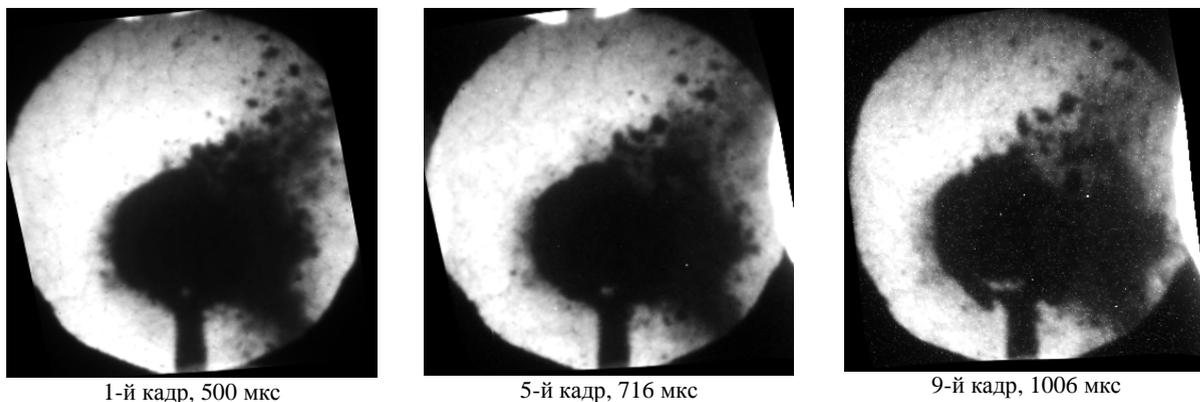


Рис. 10. Пятно облучения, зарегистрированное с использованием камеры-обскуры (а), и изолинии распределения в нем интенсивности (б). Диаметр эквивалентного пятна (FWHM)
 $d_{\text{экв}} = 129 \text{ мкм}$

На рис. 11 представлены кадры регистрации характерного разлета осколков макета для одного из проведенных экспериментов (случай частичного разрушения).

На рис. 12 представлен пример регистрации динамики разлета осколков мини-макета, полученной с использованием оптической гетеродинной методики. В данном эксперименте было зарегистрировано полное разрушение макета. На интервале 0–300 мкс хорошо виден одиночный трек с сохраняющимся размером, скоростью и отражающей способностью. Трек идентифицируется как отражение от компактной группы осколков макета астероида, движущихся практически как единое целое. Их скорость составляет около 5 м/с. Примерно через 300 мкс наблюдается расщепление треков, соответствующих осколкам со скоростями примерно от –5 м/с (осколки летят в направлении, противоположном источнику подсветки) до 7 м/с. Группа осколков, имеющих отрицательные значения скорости, появляется с некоторой задержкой из-за их экранирования другими фрагментами. В поле зрения прибора имеются отдельные прослеживаемые треки наиболее крупных частиц.



1-й кадр, 500 мкс

5-й кадр, 716 мкс

9-й кадр, 1006 мкс

Рис. 11. Регистрация процесса разрушения макета астероида в режиме девятикадровой съемки. Отсчет времени ведется от момента воздействия ЛИ на макет астероида

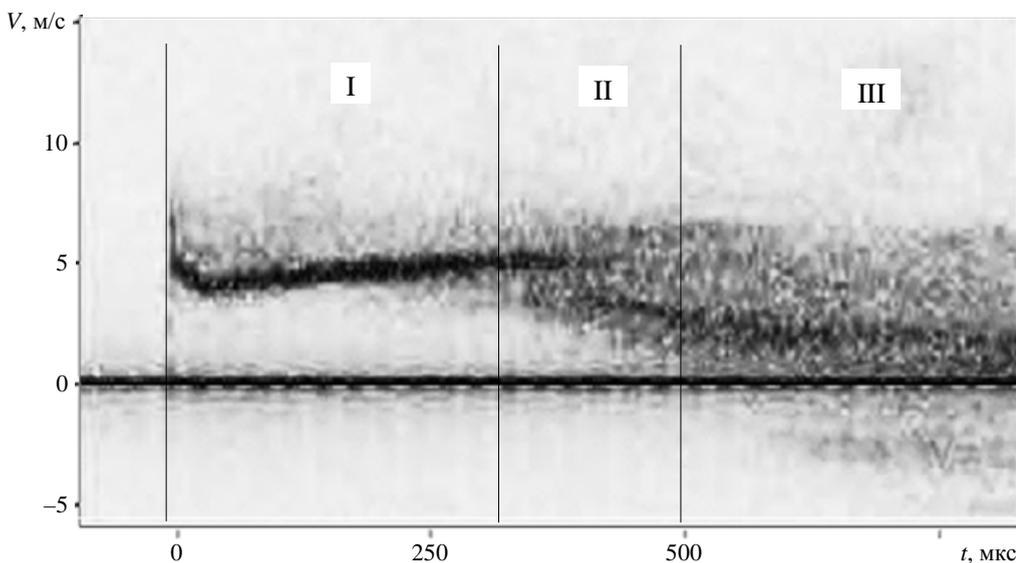


Рис. 12. Регистрация движения тыльной стороны макета оптической гетеродинной методикой (PDV): I – макет движется как целое со скоростью 5 м/с; II – макет разрушается; III – осколки движутся со скоростями от -5 м/с до 7 м/с

На рис. 13 представлено распределение крупных осколков мини-макета по размерам после воздействия импульса ЛИ. Испытывался макет с прочностью на сжатие 6,5 МПа, массой 0,1050 г и средним диаметром 4,34 мм.

В табл. 3 приведены подробные данные, характеризующие этапы подготовки и проведения типичного эксперимента с мини-макетом средней прочности. В графическом виде результаты серии экспериментов (по облучению образцов одного типа) представлены на рис. 14, а результаты всех проведенных серий обобщены на рис. 15 и в табл. 4.

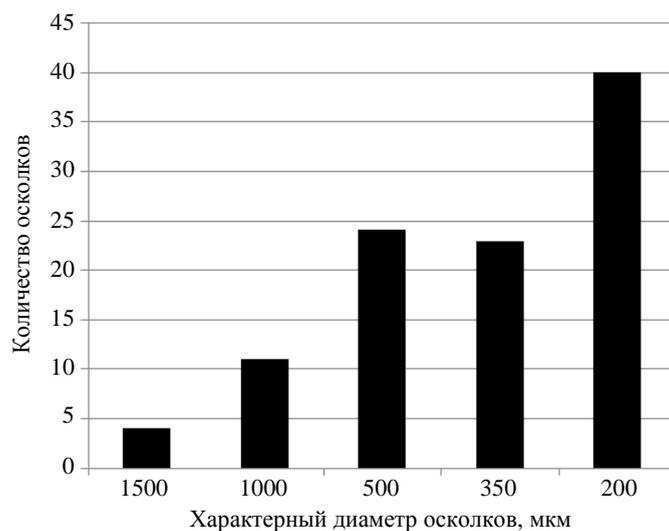


Рис. 13. Распределение осколков мини-макета астероида по размерам в эксперименте с удельной энергией излучения 1143 Дж/г

Таблица 3

Тип макета, условия эксперимента и основные результаты

Макет астероида		Излучение		Результат	
Прочность на сжатие, МПа	22,5	Энергия ЛИ, Дж	153	Удельная энергия, Дж/г	500
Прочность на растяжение, МПа	1,3	Энергия ЛИ на макете, Дж	126	Полное разрушение	Нет
Дисперсность, мкм	10–125	Длительность, нс	1,6	Наличие крупных осколков	Один
Диаметр макета, мм	5,0	Контраст	$>1,5 \cdot 10^5$	Масса крупного осколка, г	0,087 (35 %)
Плотность, г/см ³	2,21	Диаметр пятна (обскура), мкм	171	Масса мелких осколков, г	0,113 (45 %)
Масса, г	0,251	Интенсивность ЛИ, Вт/см ²	$4,4 \cdot 10^{14}$	Скорость крупных осколков, м/с	4,5–7
Каверна	Нет	Прицеливание	Центр	Скорость мелких осколков, м/с	До 13

Из рис. 14 следует, что мини-макет (астероид) хондритного типа заведомо разрушается при удельной энергии воздействия свыше 400–500 Дж/г.

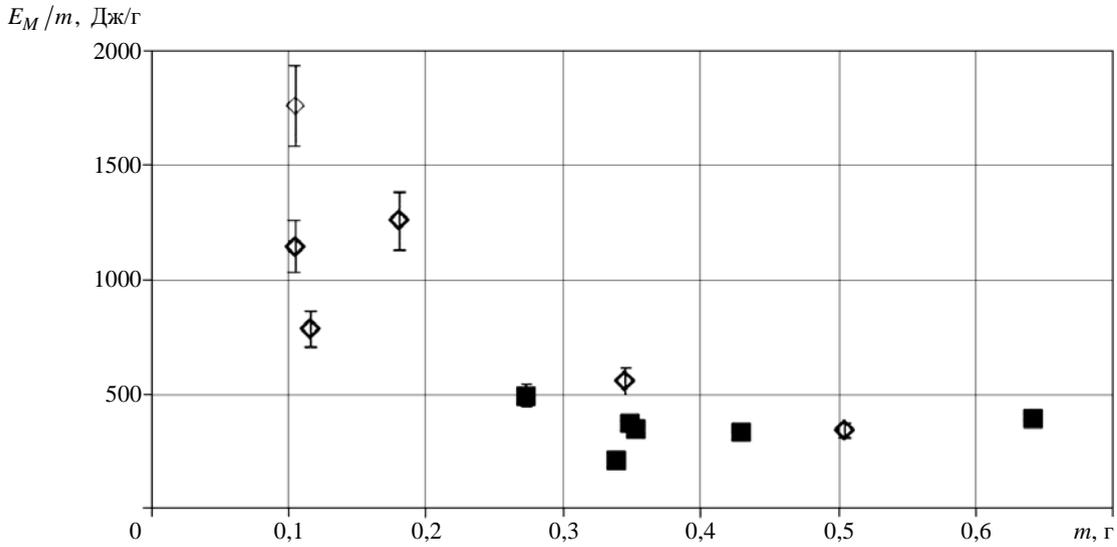


Рис. 14. Удельная энергия разрушения мини-макетов с прочностью на сжатие 6,5 МПа в зависимости от их массы. Квадраты – не полностью разрушенные макеты, ромбы – разрушенные макеты. Погрешность по оси ординат 10 %

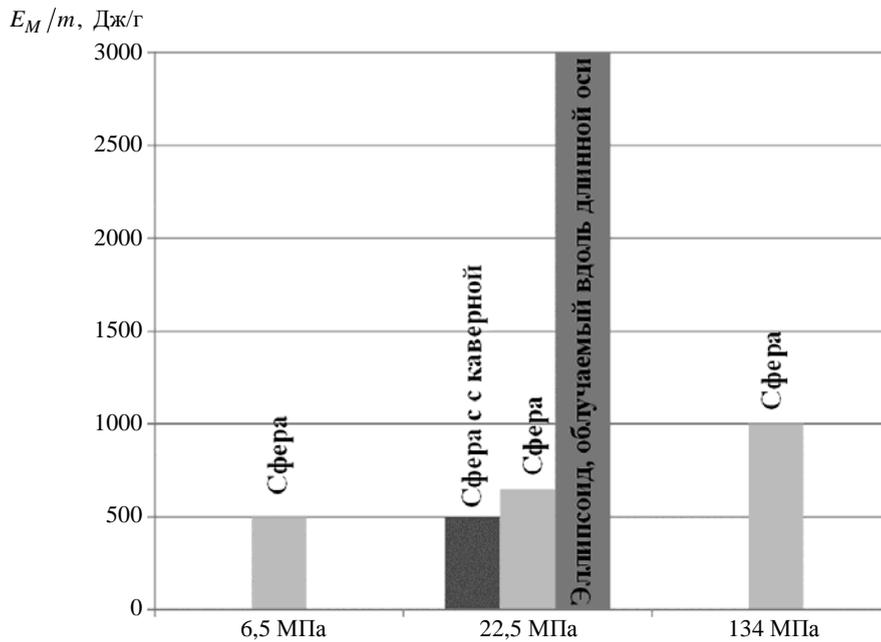
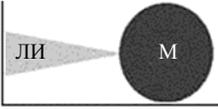


Рис. 15. Удельная энергия ЛИ, необходимая для разрушения мини-макетов разной формы и прочности

Результаты исследований удельной энергии, необходимой для разрушения мини-макетов хондритного типа различной формы

Тип макета и способ облучения	Макет			Излучение		Результат	
	σ , МПа	d , мм	M , г	E , Дж	I , 10^{14} , Вт/см ²	E/M , Дж/г	Полное разрушение
	6,5	4,4–8	0,1–0,7	70–350	2–10	200–490	Нет
						340–1760	Да
	134	4–5,5	0,16–0,35	120–350	1,1–12	550–1000	Нет
						950–1100	Да
	22,5	3–5	0,08–0,24	95–155	2,5–38	500–550	Нет
						450–1900	Да
	22,5	5	0,2–0,26	60–140	4,5–6	240–570	Нет
						530–560	Да
	22,5	3×6	0,05–0,12	50–230	1,5–9,2	390–2900	Нет
						2700–3000	Да
	22,5	3×6	0,07–0,11	20–190	1,1–9,6	180–400	Нет
						850–2400	Да

Из табл. 4 видно, что для мини-макетов сферической формы удельная энергия заведомого разрушения увеличивается с ростом прочности. Разрушение наблюдается при превышении удельной энергии:

- 500 Дж/г для макетов с прочностью на сжатие 6,5 МПа,
- 650 Дж/г для макетов с прочностью на сжатие 22,5 МПа,
- 1000 Дж/г для макетов с прочностью на сжатие 134,1 МПа.

Отклонение от сферической формы приводит к увеличению порогового значения удельной энергии. Наиболее существенным образом это наблюдается, когда ударное возмущение распространяется вдоль большей оси мини-макета (увеличение примерно в 5 раз для эллипсоида с прочностью на сжатие 22,5 МПа и отношением осей 1:2), см. рис. 16.

Наличие каверны, напротив, ощутимо (до 25 %) снижает требуемую удельную энергию за счет ее заглубленного выделения.

Близкие по постановке эксперименты проводились также на установке САТУРН. В этих экспериментах использовались макеты из аналогичного вещества сферической и кубической формы с прочностью на сжатие 22,5 и 134 МПа.

Получено, что с увеличением длины волны ЛИ несколько (приблизительно на 10 %) увеличивается удельная энергия излучения, необходимая для заведомого разрушения мини-макета, что объясняется меньшей эффективностью передачи энергии ЛИ во внутреннюю энергию макета [27].

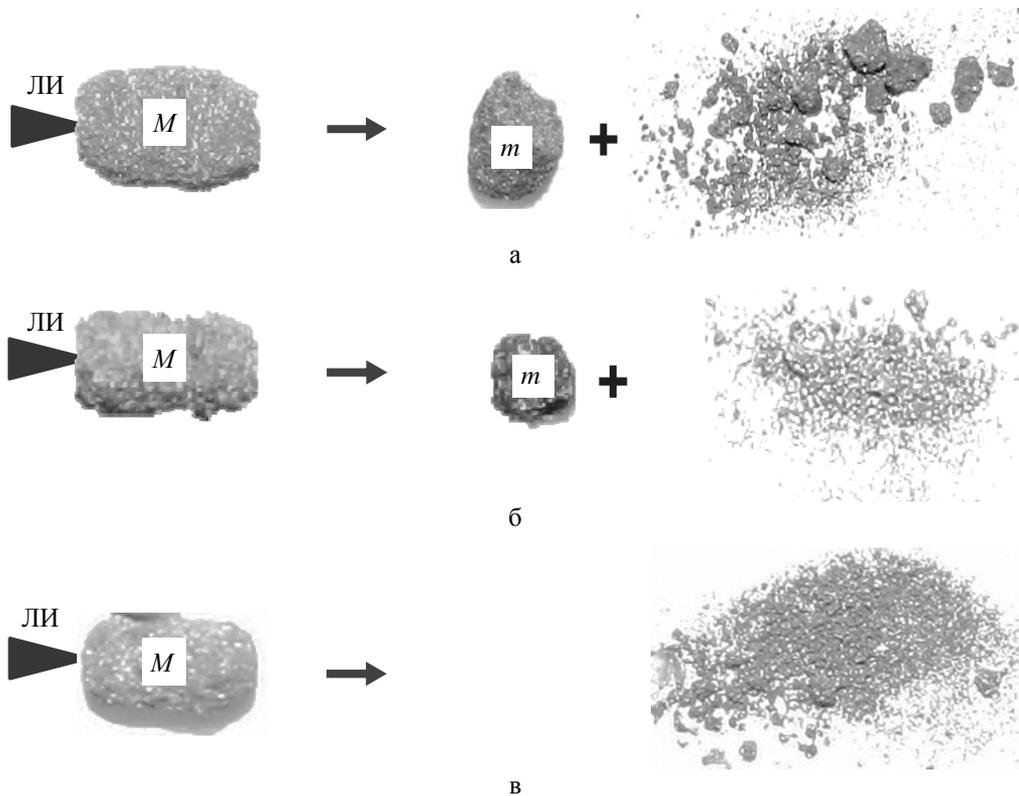


Рис. 16. Разрушение эллипсоидальных мишеней при различных значениях удельной энергии E/M :
 а – $E/M = 1300$ Дж/г, $m = 0,45$ %; б – $E/M = 2900$ Дж/г, $m = 0,23$ %; в – $E/M = 3000$ Дж/г

Изменение формы мини-макета со сферической на кубическую приводит к росту удельной энергии, необходимой для разрушения макета, приблизительно на 10–20 %.

На установках САТУРН и ЛУЧ исследовался также характер разрушения мини-макетов последовательностью импульсов ЛИ. Данная постановка принципиальна для выяснения механизмов нарушения целостности прочностных связей: может ли эффект разрушения «накапливаться» или имеет пороговую величину, и может ли эта величина снижаться с учетом оказанного предварительного воздействия.

Для проведения этих исследований использовались мини-макетки хондритного типа диаметром 3 мм и прочностью на сжатие 22,5 МПа. Энергия в импульсе варьировалась, а облучение проводилось либо в то же прицельное положение с образованным кратером от предыдущего импульса, либо в другое.

Исследования проводились

- на установке САТУРН в многократном (3–7 раз) режиме облучения с характерной энергией в выстреле от 10 Дж до 30 Дж;
- на установке ЛУЧ в двукратном режиме облучения с характерной энергией в выстреле от 100 Дж до 200 Дж.

Пример разрушения шаровидного макета астероида несколькими импульсами на установке САТУРН показан на рис. 17.



Рис. 17. Остатки шарового макета после пяти выстрелов при пятне фокусировки радиусом 160 мкм и полной энергии $E = 51,8$ Дж

Во всех случаях получено примерное равенство полной энергии, необходимой для заведомого разрушения мини-макетов, вне зависимости от количества и энергетике единичных выстрелов.

7. Заключение

Получена экспериментальная оценка критерия разрушения астероида хондритного типа ядерным взрывом на его поверхности. Исследования базировались на физическом подобии гидродинамических явлений, сопровождающих ядерный взрыв на поверхности астероида, и аналогичных явлений при воздействии импульса мощного лазерного излучения на поверхность миниатюрного макета.

Физические свойства искусственного вещества мини-макета (плотность, пористость, прочность, скорость звука и др.) подбирались близкими к свойствам натуральных астероидов хондритного типа.

Проведено расчетно-теоретическое обоснование данного метода моделирования с помощью одномерных и двумерных газодинамических расчетов, выполненных в детальной физической постановке с учетом электронного, ионного и радиационного переноса тепла, уравнений состояния веществ в натурном и модельном случаях, поглощения лазерного излучения в плазме и ряда других процессов.

Расчетным путем выполнена оценка влияния начальной стадии процессов на точность газодинамического подобия явлений. Показано, что при разнице в массе между реальным астероидом и его лабораторным аналогом в 14–15 порядков удельная энергия, необходимая для полного разрушения астероида, почти в два раза меньше, чем удельная энергия, необходимая для подобного разрушения мини-макета.

Для реализации программы экспериментальных исследований на нескольких лазерных установках созданы стенды по изучению разрушения макетов искусственных астероидов. Стенды

оснащены средствами диагностики, обеспечивающими измерение параметров лазерного излучения и параметров его воздействия на макеты.

Предложена и отработана методика изготовления искусственных материалов, подобных материалам натуральных хондритов. Их анализ и испытания показали, что плотность, химический состав, микроструктура, прочность на растяжение и сжатие и др. действительно близки к характеристикам реальных астероидов. Особое внимание уделено вопросу структурного подобия для того, чтобы макеты не содержали слишком крупных включений и пустот, не соответствующих структуре натуральных астероидов.

Выполнена серия лазерных экспериментов. Заведомое разрушение мини-макетов сферической формы наблюдалось, если отношение энергии лазерного излучения к массе макета превосходит:

- приблизительно 500 Дж/г для макетов с прочностью 6,5 МПа,
- приблизительно 650 Дж/г для макетов с прочностью 22,5 МПа,
- приблизительно 1000 Дж/г для макетов с прочностью 134 МПа.

В нескольких экспериментах лазерное излучение вводилось в каверну, предварительно подготовленную в мини-макете. Для разрушения макетов при таких условиях необходимо меньшее количество удельной энергии (500 Дж/г вместо 650 Дж/г), что связано с большей эффективностью воздействия заглубленного взрыва.

Проведены испытания мини-макетов астероида эллипсоидальной формы с соотношением сторон 1:2. Экспериментально показано, что при облучении эллипсоида в направлении большой оси для разрушения требуется больше удельной энергии, чем в случае макета сферической формы той же массы (3000 Дж/г вместо 650 Дж/г). При облучении эллипсоидальных макетов в поперечном направлении отличий от сферического случая не наблюдалось.

Показано, что с точки зрения интегрального критерия разрушения несколько более слабых взрывов (как одновременных, так и последовательных) не дают заметного преимущества по сравнению с однократным взрывом суммарной мощности.

С учетом масштабного фактора и результатов лабораторных экспериментов показана возможность заведомого разрушения ядерным взрывом с энергией свыше 3 Мт астероида хондритного типа диаметром 200 м.

Работы с мини-макетами различной прочности и состава, в том числе с макетами каменно-ледяных и железоникелевых астероидов, а также работы по уточнению влияния формы макетов и наличия каверн на критерий заведомого разрушения требуют отдельного исследования.

Список литературы

1. Прохоров М. Е., Захаров А. И. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 6 (39). С. 118–123.
2. Charter H. Near-Earth objects: status of the survey program and review of NASA's 2007. Report to Congress. 2318, Rayburn House Office Building, November 8, 2007.
3. Сурдин В. Г. Туринская шкала астероидной опасности. Энциклопедия «Кругосвет», 2002. С. 1–4.
4. Герценштейн М. Е., Клавдиев В. В., Швилкин Б. Н. и др. О защите цивилизации Земли от падения астероидов // Наука и технологические разработки. 2010. Т. 89, № 1. С. 45–49.
5. Chu J. Paintballs may deflect an incoming asteroid // MIT, 26 Oct. 2012 [Electronic resource]. – <http://newsoffice.mit.edu>.

6. Пилотируемые космические полеты: бюллетень новостей и аналитических материалов. 2013. Вып. 29.
7. Chapman C. R., Durda D. D., Gold R. E. The comet/asteroid impact hazard: a system approach [Electronic resource]. – https://space.nss.org/wp-content/uploads/The_Comet_Asteroid_Impact_Hazard_Chapman-Durda-Gold.pdf.
8. Vardaxis G., Winkler T., Wie B. et al. Conceptual design of a hypervelocity asteroid intercept. – Asteroid Deflection Research Center, Iowa State University, USA, 2012.
9. Asteroid Initiative Idea Synthesis Workshop Selected Abstracts, NASA. Nov. 20–22, 2013.
10. Шубин О. Н. О разработке мер по обеспечению планетарной защиты от космических рисков и угроз [Электронный ресурс]. – <http://www.defense.council.gov.ru>.
11. Saisy E., Messier D. Nuking dangerous asteroids might be the best protection // SPASE.com Contributor, 29 May, 2013.
12. Физика ядерного взрыва. Т. 1 «Развитие взрыва». – М.: ЦФТИ МО РФ, 2000.
13. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966.
14. Воинов Б. А., Гаспарян П. Д., Кочубей Ю. К., Рослов В. И. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы числен. решения задач матем. физики. 1993. Вып. 2. С. 39.
15. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Городничев А. В. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 2003. Вып. 1. С. 20–28.
16. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. – М.: Наука, 1990.
17. Collins G. S., Melosh H. J., Ivanov V. A. // Meteoritic and Planetary Sci. 2004. Vol. 39, N 2. P. 217–231.
18. Елисеев Г. М., Клинишов Г. Е. Уравнение состояния твердых веществ и их сплайн-аппроксимация: препринт ИПМ АН СССР № 173. – М., 1982.
19. Авраменко М. И., Глазырин И. В., Ионов Г. В., Карпеев А. В. Расчеты параметров взрывной волны, вызванной челябинским болидом. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2013.
20. Виноградов Г. А., Радомысльский И. Д. Прессование и прокатка металлокерамических материалов. – Киев: Машгиз, 1963.
21. Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия. – М.: Металлургия, 1980.
22. Анненков В. И., Багрецов В.А., Безуглов В. Г. и др. Импульсный лазер мощностью 120 ТВт «Искра-5» // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 5. С. 536.
23. Безнасюк Н. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Четырехканальная лазерная установка ЛУЧ – модуль установки ИСКРА-6 // Сб. докл. междунар. конф. «IV Харитоновские научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 82.
24. Timofeev I. S., Aleksandrov N. L., Burdonskiy I. N. et al. Temperature measurement in plasma torch generated by moderate laser irradiation of multicomponent polycrystal rock surface // Laser Phys. 2014. Vol. 24, N 12. P. 126002.
25. Кравченко А. Г., Литвин Д. Н., Мисько В. В. и др. Фотохронографическая методика исследования динамики развития плазменных образований // Физика плазмы. 2006. Т. 2. С. 1–4.

26. Sargis P. D., Molau N. E., Sweider D., Lowry M. E. Photonic Doppler Velocimetry. LLNL Report UCRL-ID-133075, 1999.
27. Бурдонский И. Н., Гольцов А. Ю., Леонов А. Г. и др. Генерация ударных волн при взаимодействии мощного лазерного излучения с поликристаллическими мишенями // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2013. Т. 36. Вып. 2. С. 8–18.

Laser Simulations of the Destructive Impact of Nuclear Explosions on Hazardous Asteroids

E. Yu. Aristova, A. A. Aushev, V. K. Baranov, I. A. Belov, S. A. Bel'kov, A. Yu. Voronin, I. N. Voronich, R. V. Garanin, S. G. Garanin, K. G. Gainullin, A. G. Golubinskii, A. V. Gorodnichev, V. A. Denisova, V. N. Derkach, V. S. Drozhzhin, I. A. Elicheva, N. V. Zhidkov, R. I. Il'kaev, A. A. Krayukhin, A. G. Leonov, D. N. Litvin, K. N. Makarov, A. S. Martynenko, V. I. Malinov, V. V. Mis'ko, V. G. Rogachev, A. N. Rukavishnikov, E. A. Salatov, Yu. V. Skorochkin, G. Yu. Smorchkov, A. L. Stadnik, V. A. Starodubtsev, P. V. Starodubtsev, R. R. Sungatullin, N. A. Suslov, T. I. Sysoeva, V. Yu. Khatunkin, E. S. Tsoi, O. N. Shubin, V. N. Yufa

We present the results of preliminary experiments at laser facilities in which the processes of the undeniable destruction of stony asteroids (chondrites) 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 full-scale and model cases. The technology of fabricating miniature mockups with mechanical properties close to those of stony asteroids is describe. For mini-mockups 4–10 mm in size differing by the shape and impact conditions we have made an experimental estimate of the energy threshold for the undeniable destruction of a mockup and investigated the parameters of its fragmentation at a laser energy up to 500 J. The results obtained confirm the possibility of an experimental determination of the criteria for the destruction of asteroids of various types by a nuclear explosion in laser experiments. We show that the undeniable destruction of a large asteroid is possible at attainable nuclear explosion energies on its surface.