

# ЛАЗЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*И. Н. Бурдонский<sup>1,4</sup>, А. Г. Леонов<sup>1</sup>, В. Н. Юфа<sup>1,4</sup>, А. М. Садовский<sup>1,2</sup>, Д. А. Петушков<sup>2,3</sup>*

1. Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет) МФТИ, Москва, Россия

2. ИКИ РАН Москва, Россия

3. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

4. АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ

Представлены результаты экспериментальных исследований по определению критерия разрушения каменных и ледяных мишеней, имитирующих вещество астероидов и комет. Проведено исследование влияния низкой температуры мишени на величину критерия разрушения ледяных, и хондритовых (каменных) мишеней при воздействии на них лазерного излучения с интенсивностью от  $10^{10}$  до  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для экспериментальных исследований использовался лазерный комплекс «Сатурн» [1], созданный Факультетом проблем физики энергетики МФТИ, ИКИ РАН, «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» и базирующийся в ИКИ РАН. Мишени облучались в двух температурных диапазонах: ледяные – минус 26 °С и минус 155 °С; хондритовые – +22 °С и минус 155 °С.

Эксперименты продемонстрировали, что при качественном изменении характера разрушения охлажденных до минус 155 °С мишеней, величина энергетического критерия разрушения  $E_L/M_m$  (Дж/г) практически не имела критического изменения.

## Введение

В настоящее время проблема столкновения метеоритно-космических тел с Землей является весьма актуальной для человечества. Это связано с разрушительными последствиями падения астероидных тел на Землю и необходимостью оперативно реагировать в случае обнаружения этой угрозы, для уменьшения возможного ущерба и человеческих жертв. Необходимо отметить, что некоторые астероиды представляют смертельную опасность для человечества и нашей планеты в целом.

В последние десятилетия предлагались различные подходы к предотвращению столкновения Земли с астероидами, однако, наиболее эффективным способом защиты, по-видимому, является разрушение астероидов и комет. Под разрушением следует понимать их фрагментацию на мелкие осколки, которые либо сгорают в атмосфере, либо вообще пролетают мимо Земли. Как показано в [1, 2, 5–7], одним из наиболее эффективных средств воздействия остается разрушение астероидов под действием контактного ядерного взрыва или с помощью импульсов мощного лазерного излучения.

Понятно, что необходимым требованием к любому из возможных способов воздействия на астероид является гарантированное устранение угрозы катастрофы.

Необходимо отметить, что разброс «дневной» и «ночной» температур поверхности тела в космическом пространстве может меняться от плюс 150 °С до минус 180 °С в зависимости от его орбиты. Так, к примеру, «дневная» температура поверхности Луны составляет плюс 123 °С, а «ночная» минус 153 °С. Все это может привести к существенному изменению прочностных характеристик как каменных, так и ледяных мишеней. Как показано в [12] при температуре ледяной мишени порядка минус 20 °С критерий ее разрушения лежит в диапазоне от 15 до 40 Дж/г. Критерий разрушения каменных (хондритовых) мишеней при низких температурах в этой работе не рассматривался.

С целью решения этого вопроса в настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению критериев разрушения ледяных и каменных (хондритовых) мишеней, охлажденных до минус 150 °С, при воздействии на них лазерного излучения с интенсивностью от  $10^{10}$  до  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> и проведено сравнение с ранее полученными [2, 12] значениями.

### Экспериментальная установка и мишени

Исследования проводились на лазерной установке «Сатурн» [1]. Все состав входят: мощная многокаскадная лазерная система на Nd<sup>3+</sup>-фосфатном стекле с автоматизированной системой накачки активной среды, вакуумная камера взаимодействия и диагностический комплекс. На выходе лазерное излучение имеет следующие параметры:  $E_L$  до 50 Дж,  $\lambda = 1,054$  мкм,  $\tau_L$  (FWHM) = 30 нс и расходимость  $\theta \sim 1,5 \cdot 10^{-4}$  рад.

В экспериментах использовались искусственные хондритовые мишени сферической формы, предоставлены нам РФЯЦ ВНИИЭФ [2], а также мишени, изготовленные из льда. Химический состав вещества мишеней примерно соответствовал составу вещества метеорита «Челябинск», относящегося к классу обыкновенных хондритов, плотность мишеней составляла  $\sim 2,3$  г/см<sup>2</sup>, прочность на сжатие  $\sigma = 27$  МПа.

Ледяные макеты кубической формы с характерными размерами ребра порядка 7,5 мм устанавливались в определенное место массивного медного диска – мишенного узла, охлажденного в той же морозильной камере до температуры минус 26 °С и являющегося «аккумулятором холода». Для точного позиционирования узла служили запрессованные в термоизоляционную прокладку шарики. Для позиционирования мишени на горизонтальной поверхности мишенного узла был выфрезерован бортик. Такая конструкция позволяет при медленном охлаждении мишенного узла жидким азотом получить ледяные мишени с температурой минус 155 °С.

Контроль над температурой льда осуществлялся с помощью многоканального прецизионного измерителя температуры МИТ 8. Измерение температуры медного мишенного узла проводилось непосредственно перед установкой в экспериментальную вакуумную камеру и ее откачкой. Следует отметить, что в невакуумированной камере температура мишенного узла, стоящего на термоизоляции, увеличивалась со скоростью порядка 7,3 °С/ч.

### Эксперименты с ледяными мишенями

Были проведены серии экспериментов по облучению ледяных мишеней с отрицательной температурой порядка 20 °С и порядка 155 °С в диапазоне интенсивности облучения от  $10^{10}$  до  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для выяснения характера разрушения мишени диаметр пятна облучения изменялся от 750 до 100 мкм. Остаточное давление в экспериментальной камере составляло: – при температуре мишени минус 20 °С –  $P \sim 0,03$  тор; при температуре мишени минус 155 °С –  $P \sim 0,01$  тор.

В результате работ обнаружено, что при однократном воздействии лазерного импульса на мишень, порог ее разрушения ( $E_p$  – развал мишени на куски) практически не зависит от температуры мишени и находится в хорошем согласии с данными работы [12]. В таблице представлены усредненные по числу выстрелов в серии результаты этих экспериментов. Для расчета массы мишени были приняты следующие допущения: мишень кубической формы с ребром равным 7,5 мм; плотность льда равна 0,9 г/см<sup>3</sup>.

### Измерение порога разрушения мишени

| T, °С | $\varnothing_{\text{пятна облучения}}$<br>(мкм) | $E_p$ (Дж) | I, (Вт/см <sup>2</sup> ) | $E_p/S_{\text{облучения}}$<br>(Дж/см <sup>2</sup> ) | E/M (Дж/г) |
|-------|---|------------|--------------------------|---|------------|
| -20   | 750   | 20,8       | $1,57 \times 10^{11}$    | $4,71 \times 10^3$                                  | 54,782     |
| -20   | 512   | 17         | $2,75 \times 10^{11}$    | $8,25 \times 10^3$                                  | 44,774     |
| -20   | 312   | 14,6       | $6,37 \times 10^{11}$    | $1,91 \times 10^4$                                  | 38,453     |

| $T, ^\circ\text{C}$ | $\varnothing_{\text{пятна облучения}} \text{ (мкм)}$ | $E_p \text{ (Дж)}$ | $I, \text{ (Вт/см}^2\text{)}$ | $E_p/S_{\text{облучения}} \text{ (Дж/см}^2\text{)}$ | $E/M \text{ (Дж/г)}$ |
|---------------------|--|--------------------|-------------------------------|---|----------------------|
| -20                 | 106  | 13,6               | $5,14 \times 10^{12}$         | $1,54 \times 10^5$                                  | 35,819               |
| -155                | 730  | 21                 | $1,67 \times 10^{11}$         | $5,01 \times 10^3$                                  | 55,309               |
| -155                | 530  | 18,3               | $2,77 \times 10^{11}$         | $8,31 \times 10^3$                                  | 48,198               |
| -155                | 320  | 17                 | $7,05 \times 10^{11}$         | $2,12 \times 10^4$                                  | 44,774               |
| -155                | 105  | 16,4               | $6,31 \times 10^{12}$         | $1,89 \times 10^5$                                  | 43,193               |

Из таблицы следует:

1. С ростом площади облучения мишени энергия ее разрушения  $E_p$  увеличивается не существенно рис. 1;
2. При увеличении величины интенсивности облучения мишени критерий ее разрушения  $E_p/M$  не существенно уменьшается рис. 2;
3. Зарегистрирована слабая зависимость  $E_p$  и  $E_p/M$  от величины температуры мишени.

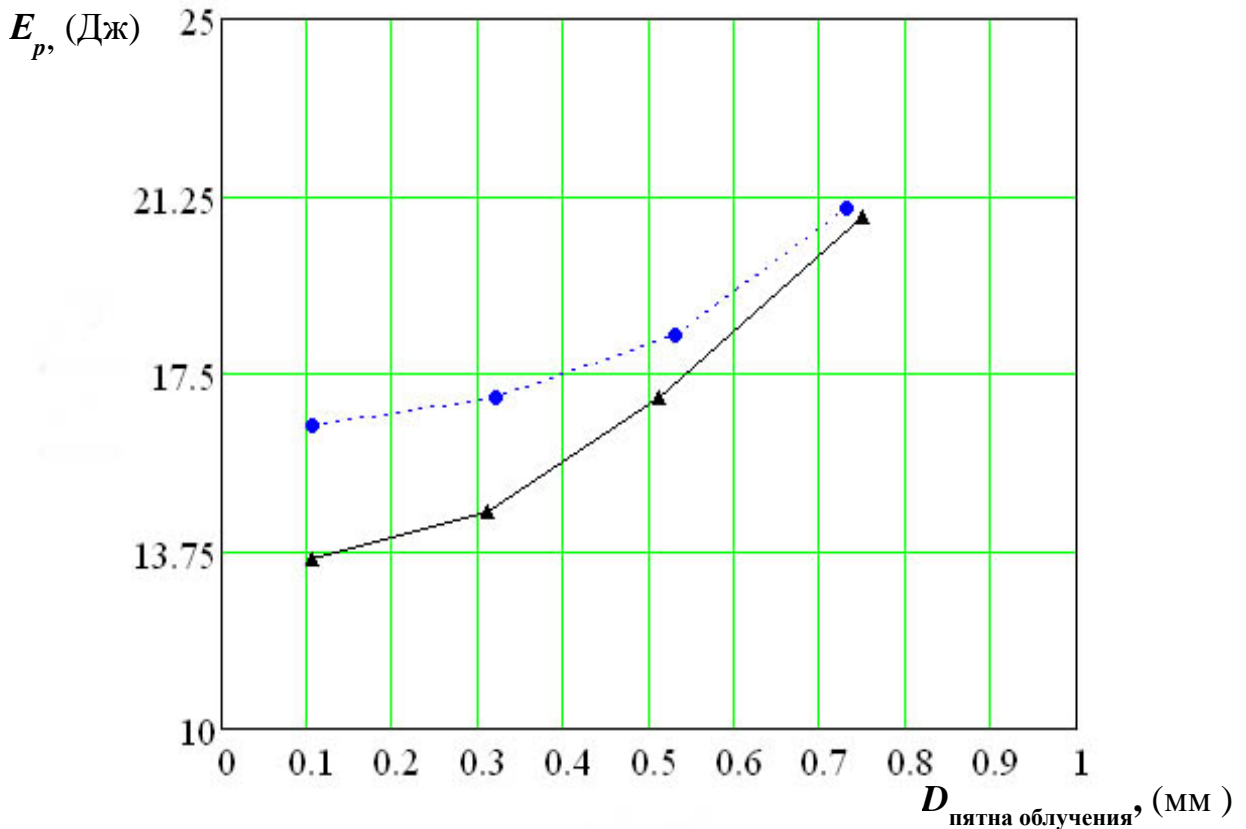


Рис. 1. Зависимость энергии разрушения  $E_p$  от размера пятна  $D$  лазерного излучения на мишени. Температура:

▲ – минус  $20^\circ\text{C}$ , ● – минус  $155^\circ\text{C}$

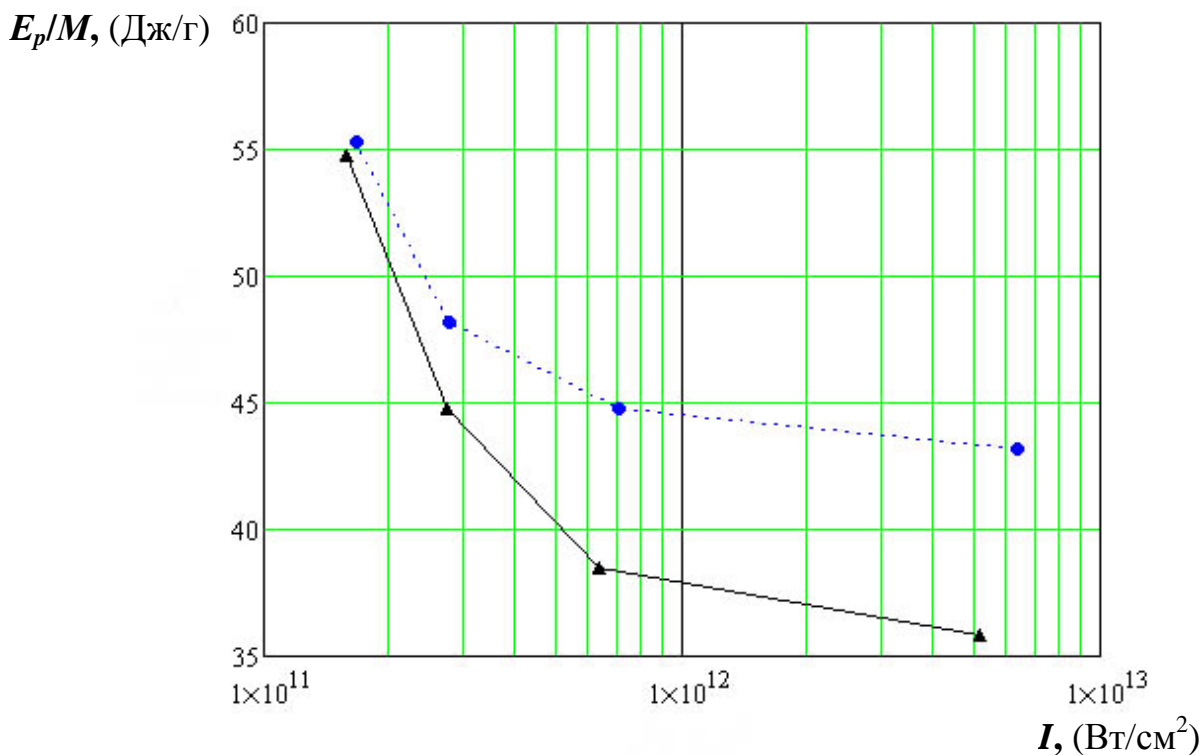
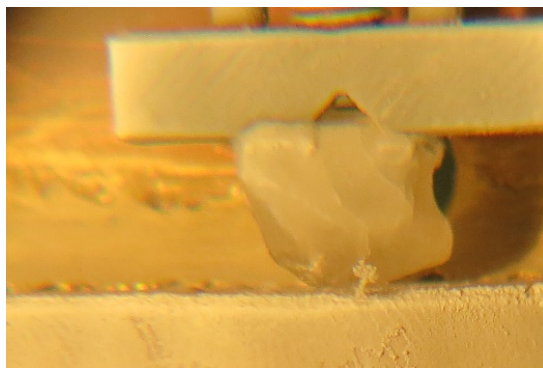


Рис. 2. Зависимость критерия разрушения  $E_p/M$  от интенсивности лазерного излучения на мишени. Температура:

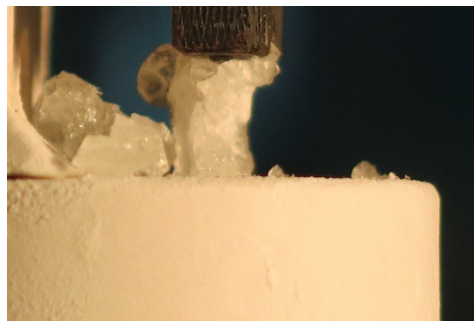
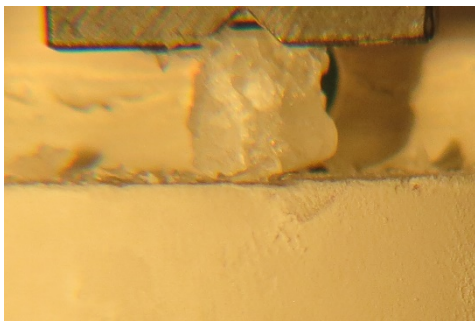
▲ – минус 20°C, ● – минус 155°C

Для выяснения динамики возникновения разрушения ледяной мишени при разных отрицательных температурах были проведены серии стрельб с энергией облучения заведомо меньшей порога разрушения. В этих экспериментах, при последовательном увеличении энергии облучения, были обнаружены существенные различия в характере разрушения ледяных мишеней. Так, при облучении мишени с температурой ~ минус 20 °C наблюдается последовательное «выедание» фронтальной поверхности и возникновение микротрещин, приводящих к дальнейшему расколу. В отличие от этого, у мишеней, охлажденных до минус 155 °C, помимо «выедания» фронтальной поверхности, отчетливо наблюдаются откольные явления на тыльной поверхности. Характерные фотографии динамики разрушения ледяной мишени охлажденной до минус 155 °C приведены на рис. 3.

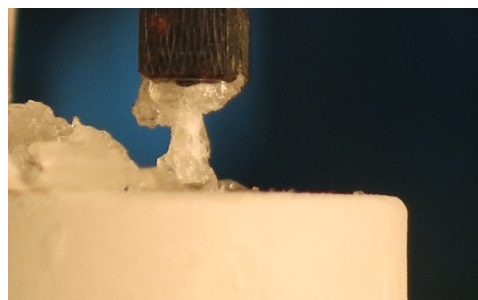
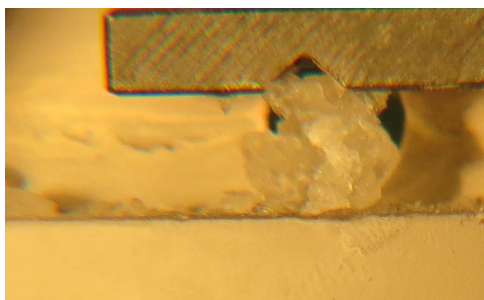


Мишень до выстрела

Рис. 3. Динамика разрушения ледяной мишени при температуре минус 155 °C. Окончание рисунка на с. 44



Энергия облучения  $E = 13,4$  Дж



Энергия облучения  $E = 17,9$  Дж

Рис. 3. Окончание

Все это свидетельствует о возрастании скорости ударной волны, образовавшейся при взаимодействии, ее выходе на тыльную поверхность мишени и рождению волны разгрузки.

### Эксперименты с хондритовыми мишенями

В качестве мишеней использовались шарообразные искусственные модели, изготовленные в РФЯЦ-ВНИИЭФ, технология изготовления таких мишеней и их параметры подробно указаны в [2, 11], а их внешний вид до и после тех экспериментов приведен на рис. 4 и 5.

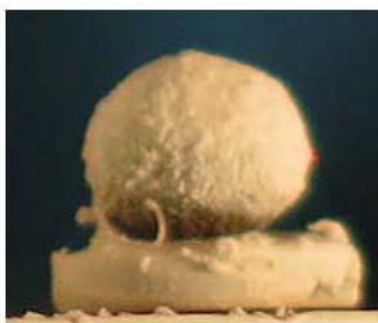
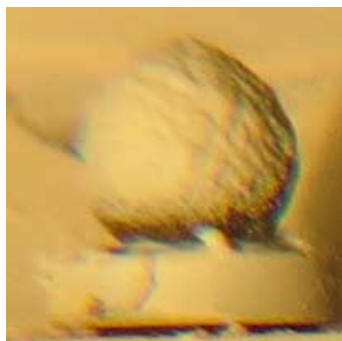


Рис. 4. Внешний вид мишеней

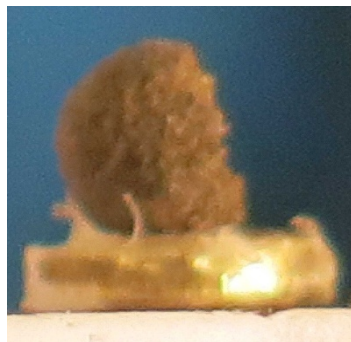
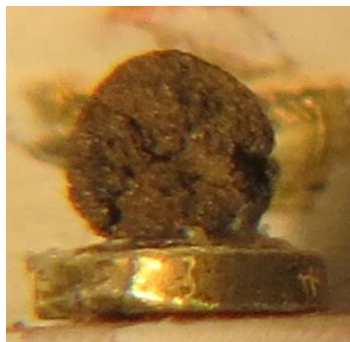


Рис. 5. Остатки шаровой мишени. Пятно фокусировки 160 мкм.  $E = 51,8$  Дж.  $T = -22^\circ\text{C}$

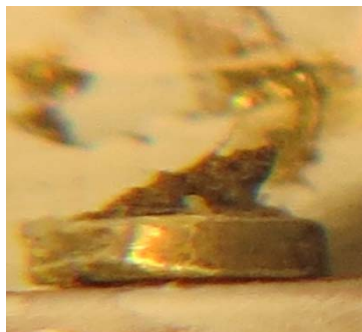
На рис. 6 приведены фотографии, демонстрирующие разрушение охлажденной до минус  $155^\circ\text{C}$  хондритовой мишени. Пятно фокусировки 160 мкм.  $E_p = 60,3$  Дж.



Фас и профиль до выстрела



Энергия облучения  $E = 40$  Дж



Энергия облучения  $E = 60,3$  Дж

Рис. 6. Разрушение хондритовой мишени.  $T$  – минус  $155$  °С,  $\varnothing$  –  $160$  мкм.  $E_p = 60,3$  Дж

Из проведенных экспериментов можно сделать вывод, что низкая температура хондритовой мишени несущественно влияет на величину энергии и критерия ее разрушения. Хотя сам характер разрушения немного меняется, так после второго выстрела в структуре мишени заметны появления разломов и глубоких каверн. В ранее проведенных экспериментах при комнатной температуре таких явлений не наблюдалось.

### Заключение

Проведенные исследования взаимодействия мощного лазерного излучения с ледяными мишенями, охлажденными до температуры минус  $155$  °С, хоть и не сказались на существенном изменении критерия разрушения  $E/M$ , который оставался на уровне  $35\text{--}55$  Дж/г, что лежит в хорошем согласии с данными работы [12], но выявили существенные различия в характере возникающих повреждений, которые могут быть интересны и полезны для расчета величины необходимого уничтожающего заряда, а также для материаловедения и создателей различных инженерных и технологических проектов, предназначенных для эксплуатации в космическом пространстве при температуре минус  $155$  °С.

Величины энергии разрушения ( $E_p$ ) и критерия разрушения охлажденной до минус  $155$  °С хондритовой мишени, по сравнению с проведенными ранее при комнатной температуре исследованиями, не изменились. Заметные сильные изменения характера разрушения мишени, а именно возникнове-

ние больших трещин, каверн и разломов, свидетельствует о рождении ударной волны с большей величиной энергии, чем в случае экспериментов с мишенью при комнатной температуре, а отсутствие откольного эффекта мы связываем с сильным затуханием в пористом веществе мишени.

Таким образом:

–  $E_p$  ледяного ядра комет лежит в диапазоне от 15 до 22 Дж. Наблюдается слабое (около 5 %) увеличение  $E_{раз}$  при охлаждении льда до температуры минус 155 °С;

–  $E_{рхондритовой}$  мишени не зависит от отрицательной температуры.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам ИЛФИ «РФЯЦ-ВНИИЭФ»: Е. Ю. Аристовой, С. Г. Гаранину, В. Н. Деркачу, В. Г. Рогачеву, П. В. Стародубцеву за постоянный интерес, ценные обсуждения и помощь в работе.

### Список литературы

1. Бурдонский И. Н., Гольцов А. Ю., Леонов А. Г., Макаров К. Н., Тимофеев И. С., Юфа В. Н. // Вопросы атомной науки и техники. Серия термоядерный синтез, том 36, выпуск 2. С. 8–18, 2013.
2. Аристова Е. Ю., Аушев А. А., Баранов В. К. и др. // ЖЭТФ, 2018, том 153, вып. 1. С. 1–16.
3. Зеленый Л. М., Есин В. И., Кокшин А. А. // Наука в России, 2013, № 4. С. 31–36.
4. Шустов Б. М., Рыхлова Л. В. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. – М.: Физматлит, 2013).
5. Phipps C. AIP Conference Proceedings, 1278, 502 (2010).
6. Thiry N., Vasile M. Acta Astronautica, 140, 293 (2017).
7. Бурдонский И. Н., Леонов А. Г., Макаров К. Н., Юфа В. Н. Экспериментальное исследование лазерной абляции каменных поликристаллических мишеней // Квантовая электроника, 2020, 50 (8), 763–769.
8. Белов И. А., Бельков С. А., Воронин А. Ю. и др. // ЖЭТФ, 2020, том 157, вып. 5. С. 928–935.