

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 53.08, 514.862, 531.01  
ГРНТИ 59.41.00, 29.31.27, 29.33.47  
ВАК 01.04.01, 05.11.01

### Методика определения лучевой прочности материалов при однократном облучении

Мкртычев О. В.

353919, Россия, г. Новороссийск, Мыхакское шоссе 75, Новороссийский филиал БГТУ им. В. Г. Шухова

email: mkrtychev-o-v@nb-bstu.ru

В данной статье рассматривается вопрос, относящийся к области силовой оптики, который сводится к определению лучевой прочности поверхности, подвергающейся облучению мощным лазерным импульсом. Поверхность материала, подвергающегося в разных точках такому облучению импульсом лазерного излучения, ввиду стохастической природы явления, в каждом случае либо разрушается, либо нет. Это явление часто называют лазерным абляционным разрушением/ деструкцией или просто лазерной абляцией. Знание динамики лазерного абляционного разрушения поверхности материала, индуцированного лазерным излучением, имеет важное техническое и технологическое значение. В данной работе рассматривается метод прогнозирования динамики лазерного абляционного разрушения с помощью определения лучевой прочности поверхности статистическими методами. Для каждого значения плотности энергии проводится облучение поверхности, фиксируется наличие или отсутствие инициированного этим импульсом разрушения, после чего определяется вероятность  $p$  разрушения образца. По полученным экспериментальным данным строится кривая вероятности данного события. Далее применяется распределение Вейбулла–Гнеденко и определяется лучевая прочность поверхности материала при однократном облучении материала.

*Ключевые слова:* лучевая прочность, лазерная абляция, статистика Вейбулла–Гнеденко, статистические методы исследования

### Введение

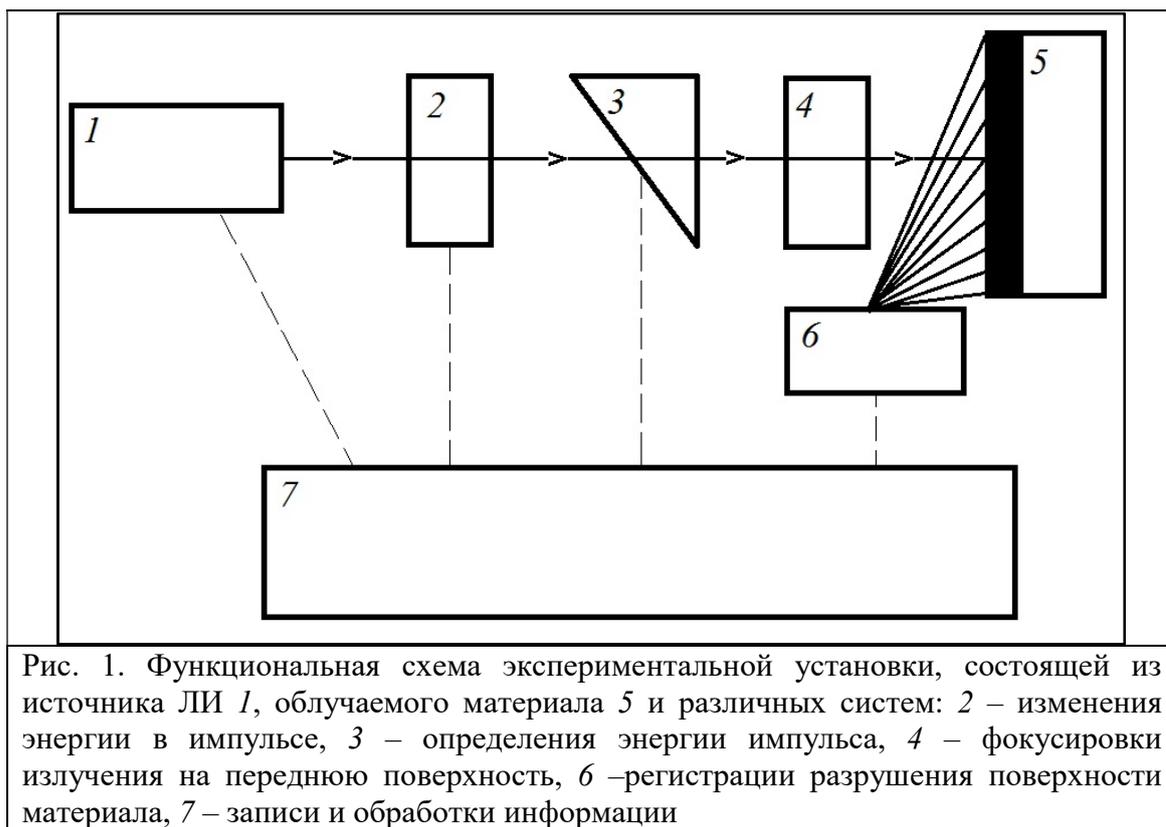
Развитие силовой оптики во второй половине прошлого века поставило перед создателями такой аппаратуры специфическую проблему. При больших мощностях падающего излучения оптические элементы разрушались на поверхности или по всему объёму взаимодействия вещества с излучением. Таким образом, проблема определения лучевой прочности материала встала в ряд актуальных задач для теоретиков и экспериментаторов в связи с тем, что работа оптических элементов в условиях их облучения мощным излучением часто приводит к механическому разрушению. Данное явление по своей природе имеет существенно случайный характер [1–6]. Многие авторы рассматривали способы определения лучевой прочности материала [7–9]. Авторы [7] рассматривают метод определения лучевой прочности при многократном облучении поверхности материала. В этом методе строят зависимость  $\lg \tau = f(E)$ , где  $E$  – напряжённость электрического поля,  $\tau$  – время от начала каждого воздействия до электрического пробоя образца. По этой зависимости определяется искомый предел лучевой прочности материала. Авторы [8] предлагают метод контроля лучевой прочности поверхности по измерению энергетического распределения электронов, эмитируемых поверхностью в заданном интервале температур с поверхности облучаемого материала. Следующая группа авторов [9] предлагает определять лучевую прочность поверхности путём получения зависимости между распределением

интенсивности излучения в пятне облучения и областями разрушения поверхности в этом пятне облучения. Каждому из этих методов присущи свои достоинства и недостатки. Например, в первом методе образец подвергается многократному облучению вплоть до возникновения электрического пробоя образца, а при вычислениях делаются ряд дополнительных допущений. Во втором методе к недостаткам можно отнести ограничение температуры диапазоном 130...150 °С, и существенную зависимость эмиссии электронов от условий измерения. Третий метод также имеет ряд недостатков. К их числу можно отнести ряд дополнительных измерений для изучения профиля распределения интенсивности в пучке, применение специальной аппаратуры, большое число исследуемых образцов и большое количество измерений для получения статистически значимых результатов.

Автор данной статьи вместе с соавторами в течение ряда лет изучал проблемы определения лучевой прочности различных материалов [10–14]. При этом ставилась задача получить значение этой величины с хорошей точностью, используя простое стандартное оборудование. Для этого модель взаимодействия лазерного излучения с веществом упрощается и учитывает только плотность энергии импульса.

### Экспериментальная часть

Для экспериментальной части работы была построена лабораторная установка, функциональные элементы которой показаны на рис. 1. Она состоит из источника 1 лазерного излучения (ЛИ), и различных систем, назначение которых указано в подрисуночной надписи рис. 1.



Экспериментальная часть работы ставит целью получение зависимости вероятности  $p_{\text{эксп}}$  разрушения от плотности энергии  $F$  импульсного падающего ЛИ. Далее полученная кривая вероятности  $p_{\text{эксп}}(F)$  моделируется статистическим распределением Вейбулла–Гнеденко  $p(Y)$  по формуле

$$p(Y) = 1 - e^{-Y},$$

где  $Y$  – риск разрушения, определяемый для объема/поверхности  $V$  как

$$Y = \begin{cases} \int_V \left( \frac{y - y_{np}}{y_{норм}} \right)^m dV, & y > y_{np}, \\ 0, & y < y_{np}, \end{cases}$$

где  $y$  – нагрузка, приложенная к элементу  $dV$ ;  $y_{np}$  – предел прочности, т.е. минимальное напряжение, которое может вызвать разрушение;  $y_{норм}$  – нормировочный параметр, имеющий размерность (ед.напряжения·ед.объёма<sup>1/m</sup>);  $m$  – модуль Вейбулла данного статистического распределения. В данном методе, при определённых допущениях, эти выражения представляют в виде интегральной функции распределения Вейбулла–Гнеденко  $p_{ВГ}(F)$ :

$$p_{ВГ}(F) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \left[ \sum_{j=1}^k \left( \frac{F}{F_{0,5}} \right)^{m_j} \right] \right\}, & F > 0, \\ 0, & F \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

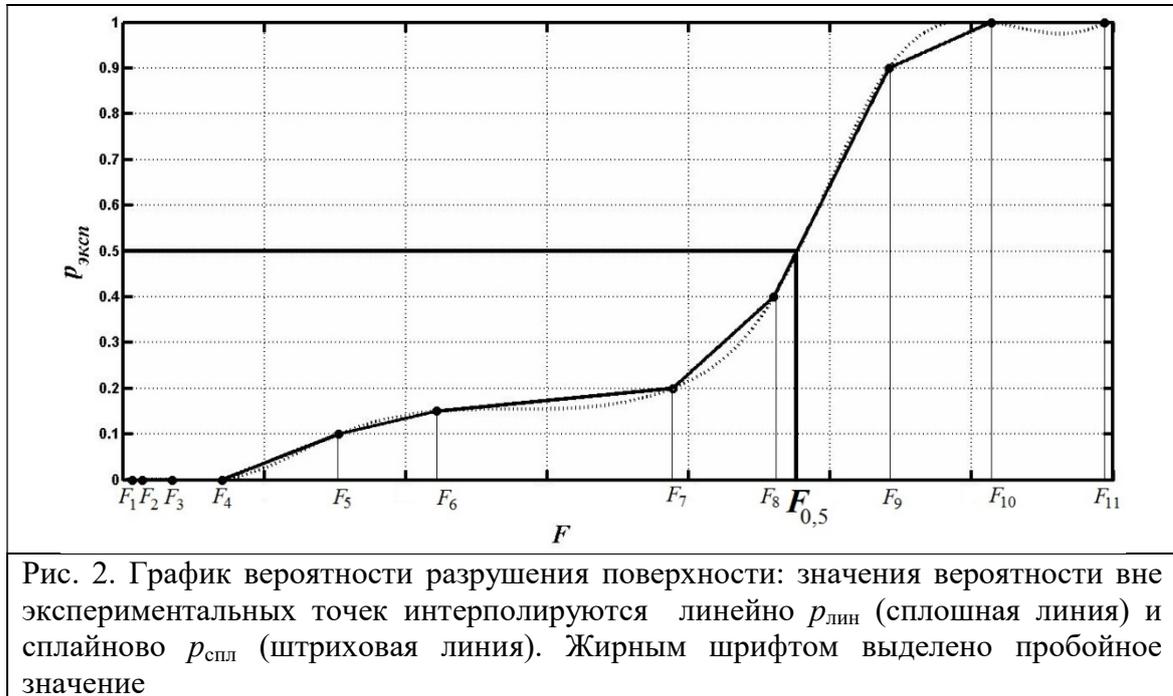
где  $F_{0,5}$  – пробойная плотность энергии, для которой вероятность пробоя равна  $p_{экс}(F) = 0,5$ ;  $m_j$  – модуль Вейбулла для данного  $j$ -го типа дефекта, если дефектов более одного типа.

При выполнении экспериментальной части точки поверхности подвергают однократному облучению импульсом ЛИ с заданной плотностью энергии  $F_i$  и регистрируют разрушение поверхности материала, индуцированного ЛИ. После проведения цикла измерения из  $N_i$  облучений, среди которых произошло  $N_{разр,i}$  разрушений, вычисляют экспериментальное значение вероятности  $p_{экс}(F_i)$  разрушения поверхности

$$p_{экс}(F_i) = \frac{N_{разр,i}}{N_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

при заданной плотности энергии  $F_i$ . Далее по этим точкам строят график вероятности разрушения поверхности материала, показанный на рис. 2. На рис. 2 экспериментальные значения отмечены точками. В качестве основного значения берут среднее арифметическое этих величин

$$p_{экс}(F) = \frac{p_{лин}(F) + p_{спл}(F)}{2}. \quad (2)$$



Полученная график вероятности  $p_{экс}(F)$  важен для последующей аналитической части предлагаемого метода. По этой кривой определяют две необходимые для вычислений величины. Первая – пороговое значение плотности энергии разрушения. Оно находится непосредственно на графике. Это значение  $F_{0,5}$  плотности энергии при вероятности  $p = 0,5$ , которое необходимо при вычислениях согласно [15]. Вторая необходимая величина – модуль  $m$  Вейбулла, которая вычисляется уже во второй аналитической части предлагаемого метода.

## Аналитическая часть

Во время проведения аналитической части метода график вероятности из (2) аппроксимирую с помощью распределения Вейбулла–Гнеденко из (1). При этом на ЭВМ создают сетку шаблонов распределений Вейбулла–Гнеденко, используя наборы из разных значений параметров  $k$  и  $m$ , с заданными диапазонами изменений и заданным шагом. Все эти значения определяют из допущений модели и желаемой точности результата. Итак, получена сетка шаблонов:

$$p_{BG}(k, m, F) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \left[ \sum_{j=1}^k \left( \frac{F}{F_{0,5}} \right)^{mj} \right] \right\}, & F > 0, \\ 0, & F \leq 0. \end{cases}$$

Достоверность модели оценивают, минимизируя среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma(k, m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_F} \{p_{BG}(k, m, F_i) - p_{эксн}(F_i)\}^2}{N_F - 1}}.$$

Распределение с наименее отклоняющимся от экспериментального графика вероятности в указанном смысле, т.е. соответствующее минимуму функции  $\sigma_{\min}(k, m) \equiv \sigma^*(k, m)$ , и будет искомым. Таким образом предлагаемый метод получает функцию вероятности  $p^*(k, m, F_{0,5}, F)$  разрушения поверхности материала вида

$$p^*(k, m, F_{0,5}, F) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \left[ \sum_{j=1}^k \left( \frac{F}{F_{0,5}} \right)^{mj} \right] \right\}, & F > 0, \\ 0, & F \leq 0, \end{cases}$$

с найденными в ходе экспериментов и вычислений параметрами  $k$ ,  $m$ ,  $F_{0,5}$  и абсциссой  $F$ .

После этого, согласно известным определениям и алгоритмам действий со статистическим распределением Вейбулла–Гнеденко остаётся только записать выражение для оптической прочности поверхности материала, которая будет иметь вид

$$Q(F) = 1 - p^*(k, m, F_{0,5}, F),$$

или подставляя это в предыдущее уравнение

$$Q(k, m, F_{0,5}, F) = \begin{cases} \exp \left\{ -\ln 2 \left[ \sum_{j=1}^k \left( \frac{F}{F_{0,5}} \right)^{mj} \right] \right\}, & F > 0, \\ 1, & F \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Специальными экспериментами показано, что погрешность вычислений, установленная на основании измерений для минимума набора параметров из (3) с доверительной вероятностью 0,9 не превышает 18 %.

## Заключение

В предложенном методе решается задача определения лучевой прочности облучаемого материала с точностью 18 % при доверительной вероятности на уровне 0,9. При этом используется стандартное оборудование. Поэтому описанный в данной статье метод может найти широкое применение в тех областях науки и техники, где необходима определение значений лучевой прочности и прогноз динамики этих значений при взаимодействии материала с импульсным ЛИ. Это поможет контролировать работу элементов силовой оптики и нанофотоники и определять оптимальные параметры работы таких элементов. К преимуществам описываемого метода можно отнести и возможность прогноза пороговых значений плотности энергии, которую можно пропустить через данный силовой элемент без разрушения его поверхности или объёма, а также прогнозирование срока службы таких элементов. По данному методу получен патент РФ на изобретение [16].

## Конфликт интересов

Автор статьи заявляет, что у него нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и ему ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

## Благодарности

Автор благодарит своих более опытных коллег и старших товарищей за ценные замечания, сделанные во время исследования. Особую благодарность автор высказывает своему научному руководителю, Шеманину Валерию Геннадьевичу, за многолетний труд наставника и многотрудные лета учителя.

## Список литературы

1. Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН. 2002. Т. 172, №3. С. 301–333.
2. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Механическое разрушение прозрачных твёрдых тел лазерными импульсами разной длительности // Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 4. С. 335–340.
3. Бессараб А. В., Кормер С. Б., Павлов Д. В., Фунтиков А. И. Статистические закономерности поверхностного разрушения оптического стекла под действием широких пучков лазерного излучения // Квантовая электроника. 1977. Т. 4, № 2. С. 328–334.
4. Алешин И. В. и др. Оптический пробой прозрачных сред, содержащих неоднородности // ЖЭТФ. 1976. Т. 70, вып.4. с.12–14.
5. Кортон В. С., Перлов Д. И., Шифрин В. П. О взаимосвязи параметров экзоэмиссии с лучевой стойкостью элементов ОКГ // Квантовая электроника. 1976. Т. 3, № 5. С. 1143–1145.
6. O. Connel. Single and multip.-shot laser damage properties of commercial grade PMMA // Appl. Optics. 1984. V. 23, N 5. p. 682–688.
7. Патент № 2034245, Российская Федерация, G01J 5/50. Способ определения предела оптической прочности материала / В. А. Петров, А. Е. Чмель, А. М. Кондырев; патентообладатель Петров А. В. Заявл. 26.11.1991; опубл. 30.04.1995.
8. Патент № 2034245, Российская Федерация, G01B 7/34 G01N 23/22. Способ контроля лучевой прочности поверхности оптических материалов / Л. Б. Глебов, А. Ф. Зацепин, В. С. Кортон, Н. В. Никоноров, В. В. Тюков, В. И. Ушкова; патентообладатель Уральский государственный технический университет. Заявл. 26.12.1990; опубл. 30.04.1995.
9. Патент № 2430352, Российская Федерация, G01N 17/00. Способ определения лучевой прочности поверхности оптической детали / Д. И. Дмитриев, И. В. Иванова, В. Н. Пасункин, В. С. Сиразетдинов; патентообладатель федеральное государственное унитарное предприятие Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем (ФГУП НИИКИ ОЭП) (RU). Заявл. 28.11.2010; опубл. 27.09.2011.
10. Аткарская А. Б., Шеманин В. Г., Мкртычев О. В. Изменение показателя преломления наноразмерных плёнок при модифицировании стеклянных подложек // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. № 8/2. С. 238–239.
11. Atkarskaya A. B., Privalov V. E., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Laser ablation of the glass nanocomposites studies // Optical Memory and Neural Networks. 2014. V.23, Issue 4. p. 265–270.
12. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г., Мкртычев О. В. Лазерная абляция нанокompозитов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2015. № 1 (213). С. 128-135.
13. Шеманин В. Г., Привалов В. Е., Мкртычев О. В. Метод оценки оптической прочности облучаемой поверхности при лазерной абляции // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 34–37.  
URL: [http://izmt.ru/note.php?type=TAMI\\_izmt&notes\\_id=281](http://izmt.ru/note.php?type=TAMI_izmt&notes_id=281)
14. Mkrtychev O. V., Privalov V. E., Shemanin V. G., Shevtsov Yu. V. Study of Laser Ablative Destruction of Composites with Nanoscale Coatings of Hafnium and Zirconium Dioxides // Opt. Mem. Neural Networks. 2020. V. 29. P. 142–146.  
URL: <https://doi.org/10.3103/S1060992X20020095>
15. Маненков А. А., Прохоров А. М. Лазерное разрушение прозрачных твёрдых тел // УФН. 1986. Т. 148, вып. 1. С. 179–211.
16. Патент № 2694073, Российская Федерация, G01N 17/00 G01M 11/02. Способ определения предела оптической прочности материала при однократном облучении / О. В. Мкртычев,

В. Г. Шеманин; патентообладатель Мкртычев О. В. Заявл. 26.03.2018; опубл. 09.07.2019. Бюл. № 19.

## Method for determining the radiation resistance of materials with a single irradiation

Mkrtychev O. V.

*Novorossiysk Branch of Belgorod V G Shukhov State Technology University, 353919, Russia,  
Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75*

email: mkrtychev-o-v@nb-bstu.ru

This article discusses an issue related to the field of power optics, which boils down to determining the radiation strength of a surface exposed to a powerful laser pulse. Due to the stochastic nature of the phenomenon, the surface of a material exposed at different points to such irradiation by a laser pulse, in each case either collapses or not. This phenomenon is often referred to as laser ablative destruction or simply laser ablation. Knowledge of the dynamics of laser ablative destruction of a material surface induced by laser radiation is of great technical and technological importance. This paper discusses a method for predicting the dynamics of laser ablation damage by determining the radiation strength of the surface by statistical methods. For each value of the energy density, the surface is irradiated, the presence or absence of destruction initiated by this pulse is recorded, after which the probability  $p$  of destruction of the sample is determined. Based on the experimental data obtained, the probability curve of this event is plotted. Further, the Weibull–Gnedenko distribution is applied and the radiation strength of the material surface is determined with a single irradiation of the material.

*Keywords:* radiation resistance, laser ablation, Weibull–Gnedenko statistics, statistical research methods

### References

1. Anisimov S. I., Luk'yanchuk B. S. Selected problems of laser ablation theory // *Phys. Usp.* 2002. V. 45. p. 293–324.
2. Koldunov M. F., Manenkov A. A., Pokotilo I. L. Mechanical damage in transparent solids caused by laser pulses of different durations // *Kvantovaya Elektronika*. 2002. V. 32, N 4. p. 335–340 (in Russian).
3. Bessarab A. V., Kormer S. B., Pavlov D. V., Funtikov A. I. Statistical relationship governing the surface damage of optical glass by wide laser radiation beams // *Kvantovaya Elektronika*. 1977. V. 4, N 2. p. 328–334 (in Russian).
4. Alyoshin I. V. and others. Optical breakdown of transparent media containing inhomogeneities // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1976. V. 70, Iss. 4. p. 12–14 (in Russian).
5. Kortov V. S., Perlov D. I., Shifrin V. P. Relationship between exoemission parameters and optical strength of laser elements // *Kvantovaya Elektronika*. 1976. V. 3, N 5. p. 1143–1145 (in Russian).
6. O. Connel. Single and multip.-shot laser damage properties of commercial grade PMMA // *Appl. Optics*. 1984. V. 23, N 5. p. 682–688.
7. Patent № 2034245, Russian Federation, G01J 5/50. Method for determining the optical strength limit of a material / V. A. Petrov, A. E. Chmel, A. M. Kondyrev; patentee Petrov A. V. 26.11.1991; 30.04.1995 (in Russian).
8. Patent № 2034245, Russian Federation, G01B 7/34 G01N 23/22. Method for controlling the radiation resistance of the surface of optical materials / L. B. Glebov, A. F. Zatsepin, V. S. Kortov, N. B. Nikonorov, V. V. Tyukov, V. I. Ushkova; patentee Ural State Technical University. 26.12.1990; 30.04.1995 (in Russian).
9. Patent № 2430352, Russian Federation, G01N 17/00. Method for determining the radiation resistance of the surface of an optical part / D. I. Dmitriev, I. V. Ivanova, V. N. Pasunkin, V. S. Sirazetdinov; patentee Federal State Unitary Enterprise Research Institute for Comprehensive Testing of Optoelectronic Devices and Systems (FGUP NIIKI OEP) (RU). 28.11.2010; 27.09.2011 (in Russian).

10. Atkarskaya A. B., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Change in the refractive index of nanoscale films upon modification of glass substrates // Proceedings of higher educational institutions. Physics. 2012. N 8/2. p. 238–239 (in Russian).
11. Atkarskaya A. B., Privalov V. E., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Laser ablation of the glass nanocomposites studies // Optical Memory and Neural Networks. 2014. V.23, Issue 4. p. 265–270.
12. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Laser ablation studies of nanocomposites // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics (SPJPM). 2015. P. 1–5. [URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.spjpm.2015.03.007>].
13. Privalov V. E., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Method of Assessing the Optical Resistance of an Irradiated Surface Under Laser Ablation // Meas Tech. 2018. N. 61: p. 694.  
URL: <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1486-2>
14. Mkrtyche O. V., Privalov V. E., Shemanin V. G., Shevtsov Yu. V. Study of Laser Ablative Destruction of Composites with Nanoscale Coatings of Hafnium and Zirconium Dioxides // Opt. Mem. Neural Networks. 2020. V. 29. P. 142–146.  
URL: <https://doi.org/10.3103/S1060992X20020095>
15. Manenkov A. A., Prokhorov A. M. Laser-induced damage in solids // Sov. Phys. Usp. 1986. V. 29. p. 104–122.
16. Patent № 2694073, Russian Federation, G01N 17/00 G01M 11/02. Method for determining the optical strength limit of a material with a single irradiation / O. V. Mkrtychev, V. G. Shemanin; patentee Mkrtychev O. V. 26.03.2018; 09.07.2019. Bull. No 19 (in Russian).