

УДК 535.212

# Алгоритмы автоматизации обработки результатов измерений при определении порога лазерно-индуцированного разрушения

© 2020 г. Р. М. Ахмадуллин, аспирант; А. В. Беликов, доктор физ.-мат. наук;  
С. В. Гагарский, канд. физ.-мат. наук; А. Н. Сергеев, канд. техн. наук

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: 79217973065@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.12.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-03-66-74

Исследованы и сопоставлены между собой три алгоритма анализа изображения оптического материала при определении порога его лазерно-индуцированного разрушения. Первый алгоритм основан на принципе интегрального представления изображения, он позволяет сравнивать суммарную яркость изображения, включающего в себя область лазерного разрушения и яркость фоновой области, не подвергшейся разрушению. Второй основан на детекторе границ Канни с последующим расчетом длины контура разрушения и включает в себя несколько этапов работы с изображением для увеличения его контраста и резкости в области с разрушением по отношению к фону. Третий алгоритм основан на расчете размерности Минковского для выделенного контура разрушения.

**Ключевые слова:** порог лазерно-индуцированного разрушения, анализ изображений, автоматизация процесса, интегральное представление изображения, детектор границ Канни, размерность Минковского.

**Коды OCIS:** 140.3440, 100.2960, 120.1880

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуален вопрос создания оптоэлектронного оборудования и комплексов [1] для ускорения процессов сертификации оптических элементов [2] на лучевую прочность, увеличение точности процедуры тестирования, сокращение времени на обработку результатов и соответственно на ввод инновационной оптики в лазерные комплексы [3–5]. Современные методы измерения порога лазерно-индуцированного разрушения, позволяющие проводить стандартные тесты порогов лазерно-индуцированного разрушения 1-on-1 и S-on-1 [6–8], требуют значительного количества времени на анализ полученных изображений обработанного лазерным излуче-

нием образца и построение диаграммы зависимости вероятности разрушения от энергии лазерного импульса. Процесс анализа полученных в ходе эксперимента данных может быть ускорен за счет алгоритмов компьютерного зрения [9]. В этой связи задача настоящего исследования состоит в автоматизации обработки изображений полей сканирования (рис. 1), полученных в процессе измерения порога повреждения материала под воздействием лазерного излучения, с последующим построением графика зависимости вероятности разрушения от энергии лазерного импульса с помощью адекватных алгоритмов обработки и инструментов компьютерного зрения.



**Рис. 1.** Изображения полей сканирования. а — объемная дифракционная решетка (брэгговская решетка) в фототерморефрактивном стекле, б — многослойное диэлектрическое покрытие  $\text{HFO}_2/\text{SiO}_2$  на поглощающей подложке из карбида кремния.

## 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

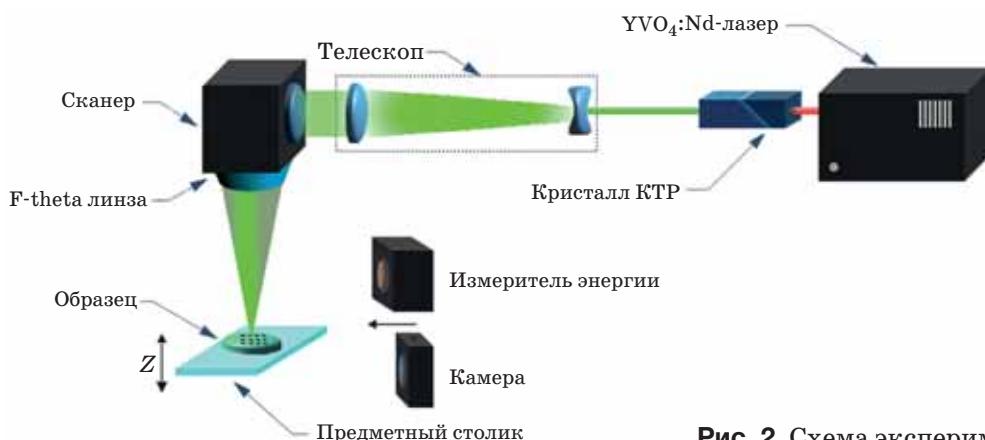
В этом разделе описаны методика измерения порогов лазерно-индуцированного разрушения и установка, на которой проводился эксперимент (подраздел 2.1), а также представлены используемые для анализа и автоматизации детектирования разрушения алгоритмы. В работе опробованы три различных алгоритма детектирования разрушения, а именно: сравнение средней яркости изображения в области лазерно-индуцированного разрушения с яркостью фоновой области (подраздел 2.2), метод идентификации разрушения на основе детектора контуров Канни (подраздел 2.3) и измерение фрактальной размерности Минковского для контура разрушений (подраздел 2.4). Для проверки алгоритмов использо-

ван математический комплекс Matlab R2018b (*The MathWorks*, США). Результаты работы алгоритмов представлены в разделе 3.

### 2.1. Установка для измерения лучевой прочности

На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки для измерения порогов лазерно-индуцированного разрушения оптических покрытий и материалов.

В качестве источника лазерных импульсов в экспериментальной установке [10] используется излучатель на основе  $\text{YVO}_4:\text{Nd}$  с электрооптической модуляцией добротности и генерацией второй гармоники в кристалле кадмий-титано-рутуть (КТР). Выходные параметры лазерного излучения: длина волны — 532 нм, энергия лазерного импульса — до 200 мкДж



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки.

при длительности импульса 4,5 нс, частота повторения лазерных импульсов — до 2 кГц.

Излучение лазера проходит через расширяющий пучок телескоп и вводится в сканирующую систему с F-theta-линзой. Предметный столик, установленный на подвижной оси  $Z$ , обеспечивает возможность перемещения образца вдоль перетяжки и фокусировку лазерного излучения на поверхности или в заданной плоскости в объеме образца.

Управление энергией в лазерном импульсе осуществляется с помощью изменения времени задержки открытия электрооптического затвора после окончания импульса накачки [10]. Контроль энергии в импульсе осуществляется измерителем энергии *Ophir Nova II* (*Ophir Optronics*, Израиль) с пироэлектрическим датчиком. Поперечное распределение и размер пятна в перетяжке определяются с помощью камеры *WinCamD* (*DataRay*, США).

Установка позволяет проводить измерения порогов лазерно-индуцированного разрушения в режимах 1-on-1 и S-on-1. Изображение обработанной лазерным излучением области, полученное с помощью микроскопа *Zeiss Axio Imager 2* (*Zeiss*, Германия), приведено на рис. 1.

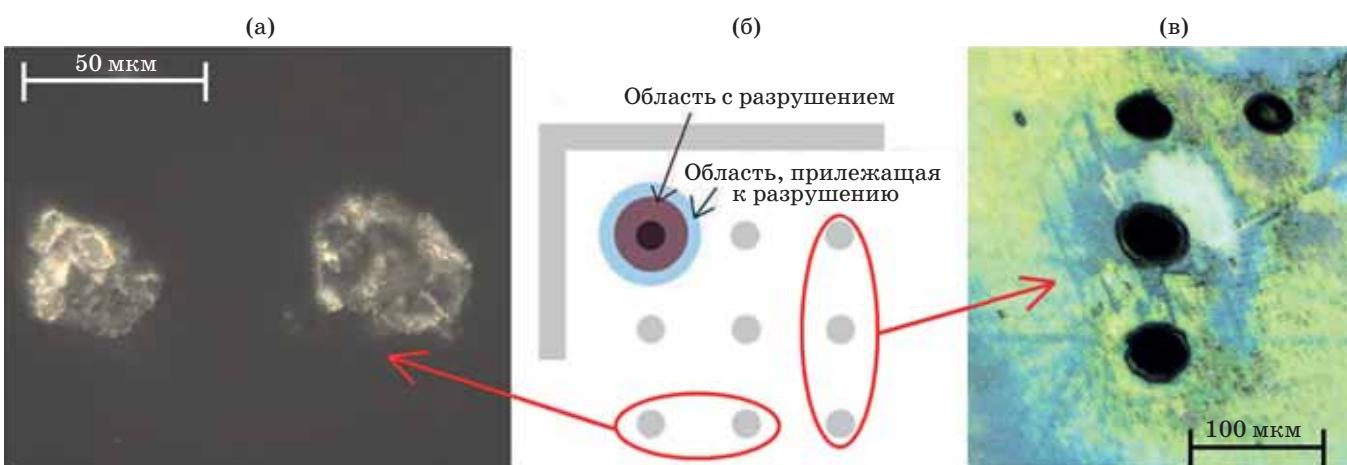
## 2.2. Сравнение средней яркости изображения в области лазерно-индуцированного разрушения с яркостью не подвергшейся разрушению (фоновой) области

Первый алгоритм для автоматизации основан на принципе интегрального представления изображения [11] из метода Виолы–Джонса

[12, 13]. Интегральное представление изображения дает возможность оперативно рассчитывать суммарную яркость произвольного прямоугольника на данном изображении. Для данного алгоритма детектирования лазерно-индуцированного разрушения необходимо сравнить две области на изображении образца после лазерной обработки (область лазерно-индуцированного разрушения и фоновая область) по средней яркости.

Видно, что разрушение на изображении образца представлено светлым участком (рис. 3а), тогда как фоновый участок изображения — темным (либо наоборот, см. рис. 3в). Логично предположить, что критерием наличия разрушения будет существенная разница между средней яркостью двух областей изображения. Ввиду того, что количества пикселов, входящих в область с предполагаемым разрушением и в фоновую область, могут быть различны, стандартный инструмент интегрального представления необходимо дополнить вычислением средней яркости пикселя в заданной области.

Для реализации алгоритма в комплексе Matlab R2018b (*The MathWorks*, США) необходимо воспользоваться операциями с массивами. Первый этап — это расчеты средней яркости пикселов в области с разрушением и средней яркости пикселов в не подвергшейся разрушению области. Второй этап — это сравнение средних значений яркости изображения в этих двух областях и в зависимости от схемы подсветки (светлая область разрушения и темный фон или темная область разрушения



**Рис. 3.** Изображения (а — в отраженном свете, в — в проходящем свете) и схема расположения (б) разрушений на образце.

и светлый фон) — выбор условия сравнения. Ограничить область пикселов в окружности позволит уравнение окружности. Основной недостаток данного алгоритма заключается в высокой чувствительности к условиям освещения. Кроме того, при большой зоне трещинообразования в области, прилегающей к разрушению, и/или плотном расположении точек сканирования могут возникать сложности с разделением области разрушения и фоновой области.

### 2.3. Идентификация разрушения на основе детектора контуров Канни

Для данного алгоритма [9] было выделено несколько подготовительных этапов перед непосредственным расчетом длины контура разрушения. Первое действие алгоритма — это «сглаживание» изображения. Этот шаг нужен для того, чтобы уменьшить цифровой шум на изображении, который может определиться детектором как отдельный контур. Следующий шаг состоит в определении градиентов изменения яркости. Далее происходит пороговая обработка результатов вычисления градиентов. В процессе подавляются скачки яркости на изображении. Таким образом, алгоритм сохраняет только те значения вычисленных градиентов, которые превышают значения градиентов в двух соседних точках на изображении по направлению градиента. В результате сохраняются значения только в точках с максимальным изменением яркости на границе. Затем проводится расчет

длины контура. Если он удовлетворяет длине, заданной заранее пользователем в качестве критерия, то подтверждается факт наличия разрушения. Пример выделения контуров на изображении представлен на рис. 4. Результатом работы алгоритма является однозначная идентификация наличия разрушения при выполнении условия граничной минимальной длины контура разрушения.

Для использования детектора контуров Канни в математическом комплексе Matlab R2018b (*The MathWorks*, США) существует встроенная библиотека обработки изображений. Чтобы обратиться к данному оператору при обработке изображения необходимо указать команду `edge(x, 'canny', y)`, где  $x$  — выбранное изображение или фрагмент изображения, а  $y$  — уровень чувствительности детектора. Для удаления побочных бликов, чьи размеры меньше размера разрушения, используется функция `bwareaopen(x, y)`, где  $x$  — выбранный бинарный двумерный массив с замкнутыми контурами, а  $y$  — минимальная необходимая площадь, которая является порогом для удаления фрагмента изображения. Недостаток данного алгоритма состоит в необходимости переопределения критерия длины контура при изменении разрешения изображения скана.

### 2.4. Измерение размерности Минковского для контура разрушений

Алгоритмы расчета размерности Минковского нашли применение в промышленности [14], в частности, в металлопрокате для выявления



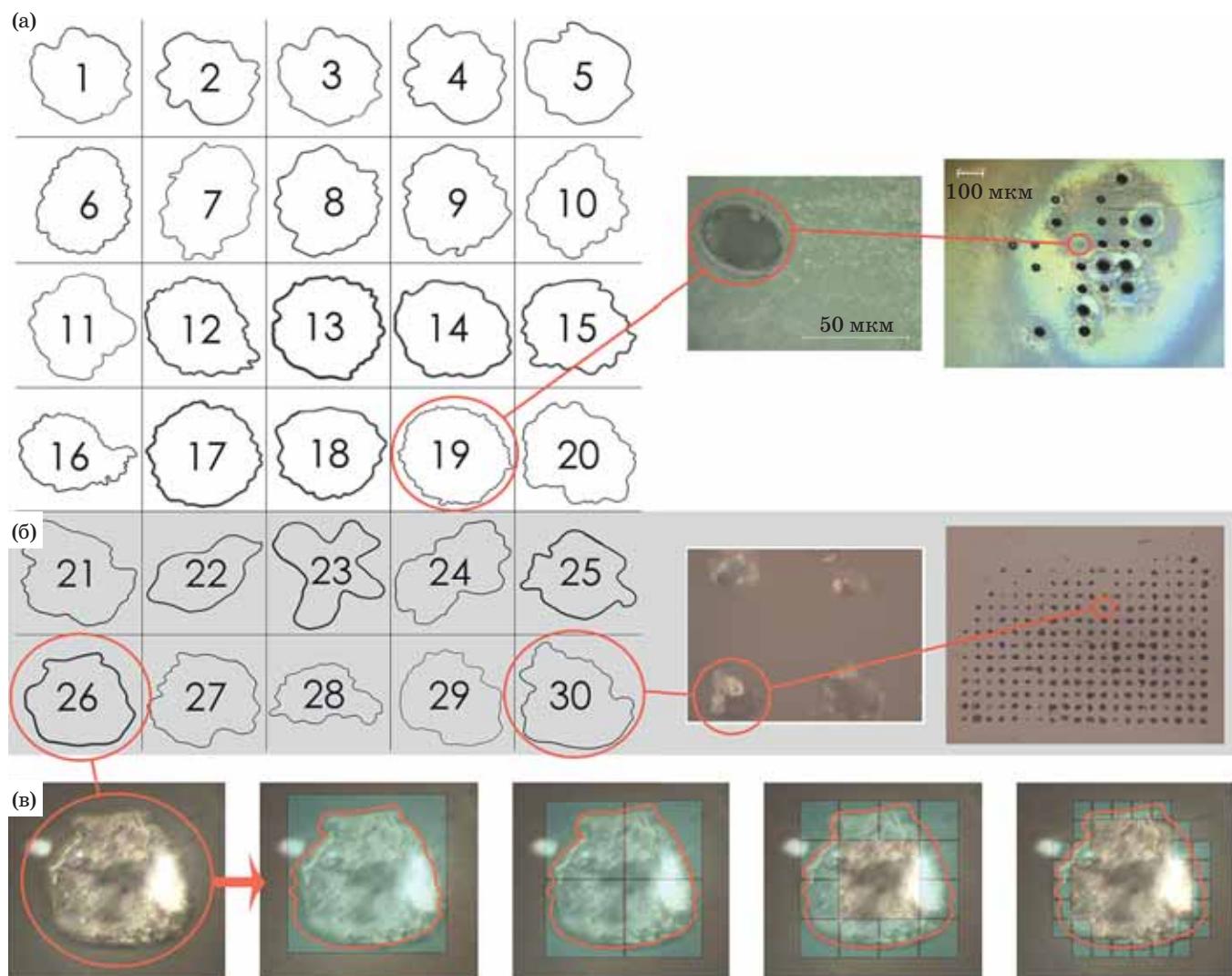
**Рис. 4.** Результат детектирования границ оператором Канни на изображении с массивом лазерно-индированных разрушений на поверхности оптического элемента (а — исходное изображение образца в отраженном свете, б — контуры Канни).

дефектов на поверхности металла [15], в медицине при анализе изображений, полученных с помощью компьютерной томографии [16], а также в космических приложениях [17] и в искусстве [18]. Для детектирования лазерно-индуцированного разрушения оптических материалов размерность Минковского ранее не применялась [19].

Следует отметить, что применительно к задаче анализа изображений лазерно-индуцированных разрушений данный алгоритм дополняет алгоритм идентификации разрушения на основе детектора контуров Канни, и в качестве входного изображения использу-

ет контур разрушения, получение которого описано в подразделе 2.3. На рис. 5 приведены контуры лазерно-индуцированных разрушений многослойных диэлектрических покрытий (рис. 5а) и поверхности фототерморефрактивного (ФТР) стекла (рис. 5б), полученные авторами настоящей работы при воздействии излучения второй гармоники YVO<sub>4</sub>:Nd-лазера с электрооптической модуляцией добротности (рис. 2).

Размерность Минковского иногда называют “*boxcounting dimension*” в соответствии с названием используемого алгоритма расчета. При ее вычислении изображение объекта



**Рис. 5.** Выборка контуров лазерно-индуцированных разрушений для оценки, а также принцип расчета размерности Минковского. Контуры под номерами с 1-го по 20-й соответствуют разрушениям многослойных диэлектрических покрытий (а), контуры с 21-го по 30-й соответствуют разрушениям поверхности ФТР стекла (б), изображения этапов работы алгоритма *box counting*, иллюстрирующие принцип расчета размерности Минковского (темным тоном отмечены элементы, включенные в  $M(\varepsilon)$ ) (в).

разбивается на ячейки одинакового размера  $\varepsilon$  и рассматривается  $M(\varepsilon)$  — число элементов, покрывающих объект. При этом процесс начинается с разбиения на одну единственную область, которая полностью перекрывает обрабатываемый контур. А затем продолжается итерационно, с каждым шагом уменьшая размер ячейки разбиения. В математическом комплексе Matlab R2018b (*The MathWorks*, США) для реализации такого алгоритма используется функция *boxcount* [19].

Размерность Минковского  $D$ , или грубая размерность ограниченного множества в метрическом пространстве, определяется по формуле

$$D = \lim[(\ln M(\varepsilon)) / (-\ln \varepsilon)],$$

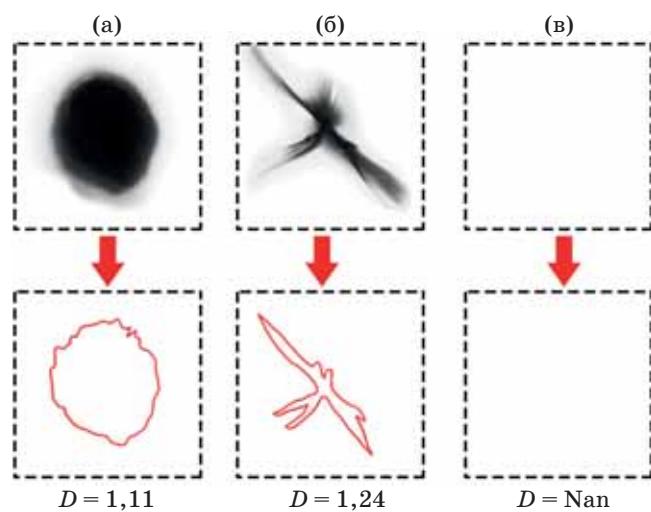
где  $M(\varepsilon)$  — минимальное число множеств диаметра  $\varepsilon$ , которыми можно покрыть исходное множество [20] (в нашем случае это объект, ограниченный контуром Канни).

Если предел не существует, то рассматривают верхний и нижний пределы и говорят соответственно о верхней и нижней размерности Минковского. Применение размерности Минковского целесообразно для дробленых, разбитых структур, какими являются контуры лазерно-индуцированных разрушений (рис. 5). На рис. 5в представлены результаты последовательных этапов работы алгоритма, иллюстрирующие принцип расчета размерности Минковского для одного из контуров («26») лазерно-индуцированных разрушений, полученных авторами настоящей работы на поверхности ФТР стекла. Видно, что в процессе вычисления изображение лазерно-индуцированного разрушения сначала покрывает одна ячейка, затем четыре, шестнадцать и т.д. Множество  $M(\varepsilon)$  в случае одной и четырех ячеек равно 1 и 4 соответственно, для шестнадцати ячеек  $M(\varepsilon) = 12$  (на рис. 5в элементы, принадлежащие этому множеству, выделены более темным тоном, а размер  $\varepsilon$  равен 256, 128 и 64 пкс в случаях одной, четырех и шестнадцати ячеек соответственно). При этом, значение размерности Минковского последовательно изменяется от 2 для одной ячейки до 1,84 и 1,67 для четырех и шестнадцати соответственно, и в конечном итоге для данного контура рассчитанная размерность Минковского достигает  $D = 1,11$ . Размерность Минковского для контура «30» составила 1,09, а для кон-

тура «23» — 1,19. Видно, что форма контура «23» существенно отличается (она более «разветвлена») от формы контуров «26» и «30», таким образом, размерность Минковского чувствительна к форме — чем более «разветвлена» форма, тем выше  $D$ .

Значение размерности Минковского чувствительно к форме объекта и соответственно — к морфологии пробоя. Следует отметить, что выявление пробоя в заданной точке считается действительным, если фрактальная размерность отличается от единицы. На рис. 6 приведены характерные изображения двух видов разрушения — оплавления (рис. 6а) и хрупкого (трещиноватого) разрушения (рис. 6б), полученные авторами работы [18], а также соответствующие им границы разрушения, полученные с помощью детектора контуров Канни, и значения размерности Минковского. Видно, что для трещиноватого разрушения (более «разветвленного») характерное значение размерности Минковского ( $D = 1,24$ ) больше, чем для равномерного (менее «разветвленного») оплавления ( $D = 1,11$ ). При отсутствии разрушения («пустое» пространство на рис. 6в) размерность Минковского неопределена.

Размерность Минковского нечувствительна к размеру изображения, т.е. подобные объекты, отличающиеся только масштабом, будут обладать одинаковой размерностью Минковского. Таким образом исчезает необходимость вруч-



**Рис. 6.** Результат детектирования границ оператором Канни на изображениях с трещиноватым (хрупким) разрушением (а), дефектов в виде оплавления (б) и «пустого» пространства (в).

ную задавать критерий наличия разрушения (минимальную длину контура для алгоритма детектора Канни) при изменении размера и разрешения обрабатываемого изображения, что повышает степень автоматизации обработки данных.

Недостаток данного алгоритма расчета размерности Минковского состоит в том, что для качественного анализа необходимо чтобы размер области разрушения был не менее чем  $10 \times 10$  пикселов. Это обстоятельство особенно важно при анализе большого числа расположенных на одном изображении (скане) лазерно-индукционных разрушений, учитывая, что, как правило, расстояние между разрушениями на скане существенно больше размера разрушения, а количество элементов в скане лежит в диапазоне от сотен до тысяч элементов.

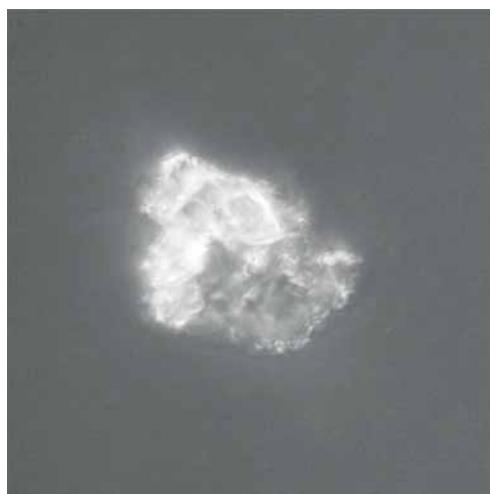
### 3. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для сравнения алгоритмов на предмет их быстродействия был проведен численный эксперимент. На тестовом изображении (рис. 7) приведено лазерно-индукционное разрушение поверхности объемной брэгговской решетки [21], записанной в ФТР стекле [22]. Такие оптические элементы являются перспективными для применения в силовой оптике и лазерных комплексах [23–25]. Их отличительной особенностью является существенно большая толщина, достигающая нескольких миллиметров, по сравнению с традици-

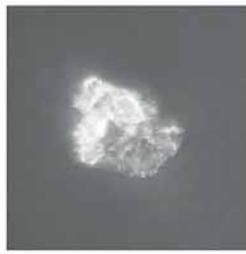
онными многослойными диэлектрическими зеркалами, где отражающей является тонкая приповерхностная область толщиной в десятки микрометров. Данный факт ведет к различиям в морфологии лазерно-индукционных разрушений и соответственно в форме контуров при проведении теста лучевой прочности. Результаты расчетов показывают, что разрушениям с различной морфологией соответствуют разные значения размерности Минковского (рис. 6).

Для оптимизации работы алгоритмов необходимо перевести изображение из цветовой схемы RGB в оттенки серого. Сравнение быстродействия алгоритмов проведено на примере обработки изображений одиночного микроразрушения, имеющих различные разрешения —  $1000 \times 1000$  (исходное),  $500 \times 500$  и  $250 \times 250$  пикселов. Время работы алгоритма оценивается с момента начала работы алгоритма и до момента вывода ответа (имеется разрушение или нет). Результаты эксперимента приведены в таблице. Расчеты проводились на компьютере с процессором Core i7-8750H и 16 Гб ОЗУ (DDR4).

Необходимо учитывать, что для получения достоверной информации о пороге лазерно-индукционного разрушения материала необходимо проанализировать выборку из сотни микроразрушений, сформированных в материале после воздействия лазерного излучения с различной энергией, что существенно увеличивает время обработки.



1000×1000 пикселов



500×500 пикселов



250×250 пикселов

**Рис. 7.** Тестовые изображения для численного эксперимента.

## Оценка быстродействия алгоритмов

Обработка изображения	Быстродействие, с		
	Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 3
Разрешение изображения, пиксели	Сравнение средней яркости изображения в области лазерно-индуцированного разрушения с яркостью, не подвергшейся разрушению (фоновой) области	Идентификация разрушения на основе детектора контуров Канни	Измерение размерности Минковского для контура разрушений
1000×1000	0,07354	0,1908	0,2306
500×500	0,0596	0,1468	0,1633
250×250	0,0298	0,1389	0,1531

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для автоматизации процесса тестирования оптических элементов на лучевую прочность опробован ряд алгоритмов. После проведения численного эксперимента можно заключить, что при увеличении разрешения изображения и детализации области разрушения на изображении алгоритм на основе интегрального преобразования (сравнение средней яркости изображения в области лазерно-индуцированного разрушения с яркостью, не подвергшейся разрушению (фоновой) области) опережает по быстродействию два других исследованных в настоящей работе алгоритма. Однако стоит заметить, что у данного алгоритма наблюдаются затруднения в идентификации разрушения при засветках на изображении и повышенная чувствительность

к наличию царапин и пыли. Алгоритм на основе размерности Минковского оценивает фрактальность, или размерность Минковского, контуров на изображении, которые получаются после анализа изображения детектором Канни, поэтому его быстродействие ниже. Однако стоит заметить, что для данного алгоритма (в отличие от анализа только детектором Канни) не требуется вручную задавать критерий поиска разрушенных областей каждый раз при изменении размера анализируемого изображения. Кроме того, он может быть перспективен для определения морфологии разрушения, так как контуры трещиноватого разрушения и разрушения в виде оплавления имеют разную размерность Минковского.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Riede W., Allenspacher P. Laser damage test bench for space optics // Proc. ICSO. 2004. 2017. V. 10568. P. 486–491.
2. Ristau D., Balasa I., Jensen L. Standardization in optics characterization // Laser-Induced Damage in Optical Materials 2018: 50<sup>th</sup> Anniversary Conf. 2018. V. 10805. P. 30–43.
3. Neufeld O., Cohen O. Optical chirality in nonlinear optics: Application to high harmonic generation // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. № 1–3. P. 133206.
4. Divlansky I., Kompan F., Hale E., et al. Wavefront shaping optical elements recorded in photo-thermo-refractive glass // Appl. Opt. 2019. V. 58. № 13. P. D61–D67.
5. Divlansky I., Kompan F., Hale E., et al. High power laser mode conversion with volume phase elements recorded in PTR glass // Proc. SPIE. 2019. V. 10904.
6. Stratian A., Zorilaet A., Rusenal L., et al. Automated test station for laser-induced damage threshold measurements according to ISO 21254-1,2,3,4 standards // Proc. SPIE. 2012. V. 8530. P. 85301Y.
7. Aeronautes N. Laser-induced damage threshold and certification procedures for optical materials // NASA Reference Publication 1395. 1997. P. 1–7.
8. Митин А.О., Орешков В.И. Разработка и анализ методов исследования лучевой прочности оптических покрытий // Вестник РГРТУ. 2016. Т. 55. С. 172–177.
9. Ding L., Goshtasby A. On the Canny edge detector // Pattern Recognit. 2001. V. 34. № 5. P. 721–725.

10. Гагарский С.В., Ермолаев В.С., Сергеев А.Н. и др. Исследование лучевой прочности диэлектрических покрытий, нанесенных на оптическую поверхность // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 7. С. 80–85.
11. Goncalves P., Budde P. Цифровая обработка изображений М.: Техносфера, 2005. 1081 с.
12. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // CVPR. 2001. V. 1. № 2. P. 1–9.
13. Viola P., Jones M. Robust real-time face detection // Int. J. Comput. Vis. 2004. V. 57. № 2. P. 137–154.
14. Жизняков А.Л., Привезенцев Д.Г. Анализ возможностей применения фрактальных методов в промышленных системах обработки изображений // Тр. Междунар. симп. «Надежность и качество». 2012. Т. 2. С. 385–386.
15. Овсянников В.Е., Терещенко В.Ю. Анализ фрактальной размерности профиля шероховатости выглаженной поверхности // Докл. ТУСУРа. 2015. Т. 1. № 35. С. 142–147.
16. Grizzi F., Castello A., Qehajaj D., et al. The complexity and fractal geometry of nuclear medicine images // Molecular Imaging and Biology. 2018. V. 21. № 6. P. 401–409.
17. Тренухин В.А., Коберниченко В.Г. Повышение информативности радиолокационных изображений в системах дистанционного зондирования Земли на основе методов фрактальной обработки // Ural Radio Eng. J. 2019. V. 3. № 2. P. 111–131.
18. Усманова Ф.С., Прокопенко В.Т., Матвеев Н.В. и др. Метод оценивания визуальной сложности динамических изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 5. С. 433–441.
19. Feng J., Lin W., Chen C. Fractional box-counting approach to fractal dimension estimation // Proc. 13<sup>th</sup> Intern. Conf. Pattern Recognition. 1996. V. 2. P. 854–858.
20. Александров П.С., Пасыгков Б.А. Введение в теорию размерности. Введение в теорию топологических пространств и общую теорию размерности. М.: Наука, 1973. 577 с.
21. Dewra S., Grover V., Grover A. Fabrication and applications of fiber Bragg grating — a review // Adv. Eng. Tec. Appl. 2015. V. 4. № 2. P. 15–25.
22. Glebova L., Lumeau J., Glebov L. B. Photo-thermo-refractive glass co-doped with Nd<sup>3+</sup> as a new laser medium // Opt. Mater. (Amst). 2011. V. 33. № 12. P. 1970–1974.
23. Glebov L. High-performance solid-state and fiber lasers controlled by volume Bragg gratings // Rev. Laser Eng. 2013. V. 41. № 1. P. 684–690.
24. Nikonorov N.V., Ivanov S.A., Kozlova D.A., et al. Effect of rare-earth-dopants on Bragg gratings recording in PTR glasses // Proc. SPIE — Int. Soc. Opt. Eng. 2017. V. 10233. № 5. P. 102330P1–102330P8.
25. Kompan F., Divliansky I., Smirnov V., et al. Complex holographic elements in photo-thermo-refractive glass for the visible spectral region // Proc. SPIE — Int. Soc. Opt. Eng. 2017. V. 10085. P. 1–11.