

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ**О. В. ЕСИКОВ<sup>1\*</sup>, Д. В. ТИТОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Центральное конструкторское бюро аппаратостроения, Тула, Россия  
\*eovmail@rambler.ru<sup>2</sup>Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

**Аннотация.** Предложен подход к повышению эффективности системы распознавания изображений объектов в комплексах мониторинга и зондирования и беспилотных средствах на основе применения дополнительного признака классификации. Определен перечень задач, решаемых в комплексах зондирования при построении системы распознавания объектов. Для формирования дополнительной характеристики объектов использовано значение фрактальной размерности (фрактальной сигнатуры) изображений их контуров. Представлены результаты фрактального анализа изображений объектов дорожного движения. Получены результаты фрактального анализа изображений территорий, пострадавших от стихийных бедствий. Для построения карты и гистограммы фрактальной размерности предложено использовать размерность Минковского. Представлены результаты экспериментальной проверки работоспособности предлагаемых методов и алгоритмов.

**Ключевые слова:** распознавание объектов, искусственные нейронные сети, фрактальный анализ, фрактальная размерность, стихийные бедствия

**Ссылка для цитирования:** Есиков О. В., Титов Д. В. Применение методов фрактального анализа изображений при решении задач оценки экологической обстановки и распознавания объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 630—639. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-630-639.

**APPLICATION OF METHODS  
OF FRACTAL IMAGES ANALYSIS IN SOLVING ENVIRONMENTAL ASSESSMENT  
AND OBJECT RECOGNITION PROBLEMS**O. V. Esikov<sup>1\*</sup>, D. V. Titov<sup>2</sup><sup>1</sup>Central Design Bureau of Instrument Engineering, Tula, Russia  
\*eovmail@rambler.ru<sup>2</sup>Southwest State University, Kursk, Russia

**Abstract.** An approach to improving the efficiency of the image pattern recognition system in monitoring and sensing complexes, and in unmanned vehicles based on the use of an additional classification feature is proposed. Tasks to be solved in sensing complexes when constructing an object recognition system are listed. To form an additional characteristic of the object, the value of the fractal dimension (fractal signature) of its contour image is used. Results of fractal analysis of traffic objects images are presented. Fractal analysis of images of territories affected by natural disasters is demonstrated. To construct a dimension map and a fractal dimension histogram, the application of the Minkowski dimension is proposed. The results of experimental verification of the proposed methods and algorithms operability are presented.

**Keywords:** object recognition, artificial neural networks, fractal analysis, fractal dimension, natural disasters

**For citation:** Esikov O. V., Titov D. V. Application of methods of fractal images analysis in solving environmental assessment and object recognition problems. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 630—639 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-630-639.

**Введение.** Развитие средств и комплексов дистанционного зондирования Земли, а также беспилотных систем и платформ привело к значительному расширению областей их практического применения и взрывному росту рынка соответствующих услуг [1—3].

К наиболее актуальным задачам, которые решаются комплексами дистанционного зондирования и беспилотными системами, относятся [3—7]:

— мониторинг и анализ экологической обстановки (на территориях, на отдельных природных и техногенных объектах);

— мониторинг, оценка и анализ развития стихийных бедствий (наводнения, пожары, техногенные катастрофы и др.);

— контроль состояния объектов мониторинга (системы передачи энергии и энергоносителей, лесные и водные массивы, ледовая обстановка, сельскохозяйственные угодья, объекты транспортной сети и транспортных потоков и др.);

— поиск потерпевших крушение объектов (воздушные, речные и морские суда и др.) и информационное обеспечение спасательных операций.

Основу решения указанных задач составляют обработка и анализ изображений (радиолокационных, оптического, ИК- и УФ-диапазонов).

Состав и порядок применения методов обработки изображения зависит от решаемой задачи. Наиболее часто используют пространственные, частотные и фрактальные методы [7—11]. Применение фрактальных методов [7] обработки совместно с традиционными [9] позволяет при решении перечисленных выше задач повысить качество получаемого результата при анализе изображений и распознавании объектов.

Фрактальные методы обработки и анализа базируются на расчете фрактальной размерности изображения или его участков, которая является мерой сложности изображения и позволяет описать уникальность наблюдаемого объекта, процесса или явления [8, 9, 12, 13]. Наиболее широко для оценки фрактальной размерности изображений контуров объектов применяется метод, основанный на использовании размерности Минковского [11].

Помимо перечисленных задач, по результатам обработки и анализа полученных изображений (видеопотоков), применительно к беспилотным системам, платформам и комплексам решаются задачи обеспечения автономности их функционирования в заданном пространстве (на заданной территории): определение оптимальных маршрутов движения и распознавание объектов, определяющих состояние транспортных потоков или составляющих цель поиска и др.

**Применение методов фрактального анализа в системах распознавания.** В настоящее время решение задачи распознавания объектов осуществляется преимущественно с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) [14—17]. Исходными данными служат предварительно обработанные изображения, содержащие распознаваемые объекты.

В значительной степени эффективность работы ИНС по распознаванию объектов зависит не только от выбора ее архитектуры для решаемой задачи, но и от качества обучающей выборки. Недостаточные полнота, репрезентативность или равномерность обучающей выборки могут существенно снизить качество распознавания объектов. Во многих случаях построение обучающей выборки требует больших трудозатрат, а объемы таких выборок значительные. Для случаев, когда классы распознаваемых объектов расположены в пространстве признаков достаточно близко друг к другу или пересекаются, качество распознавания, независимо от объема и состава обучающей выборки, может быть неудовлетворительным. Это характерно для близких по своему виду образцов воздушного, наземного и водного транспорта, объектов дорожного движения и др.

В этих случаях в роли дополнительной характеристики объекта предложено и экспериментально проверено применение фрактальной размерности изображения контура объекта [8]. При этом в качестве решающего правила в системе распознавания целесообразно применять ИНС типа автоэнкодер [12], на вход которого поступают результат распознавания объекта с использованием основной ИНС и значение фрактальной размерности исходного изображения контура распознаваемого объекта. Такой вариант построения системы позволит обеспечить

более надежное распознавание объектов, ИНС в том числе, независимо от условий, в которых получены изображения.

Порядок формирования элементов обучающей выборки для ИНС типа перцептрон и формирования изображений контуров объектов „Мотоциклист“ и „Велосипедист“ (участников дорожного движения) представлен на рис. 1, а, б. На практике для формирования изображения контура объекта применялись преобразования Собела, Кирша, Лапласа, оператор Кенни и т.п. [7].

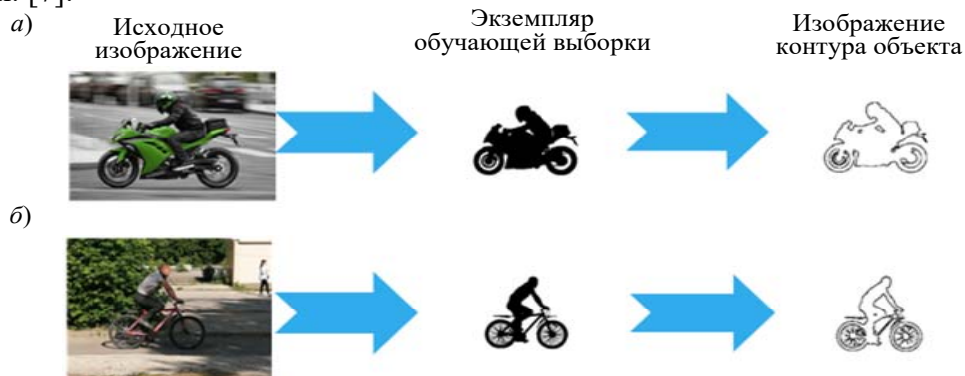


Рис. 1

На рис. 2 представлены отдельные результаты расчетов фрактальной размерности  $D$  изображений контуров (вид сверху) объектов воздушного транспорта. Как следует из полученных данных, изображения контуров гражданских воздушных судов имеют значение  $D$  в интервале 0,96—1,16, а вертолетов — в интервале 1,1—1,2.

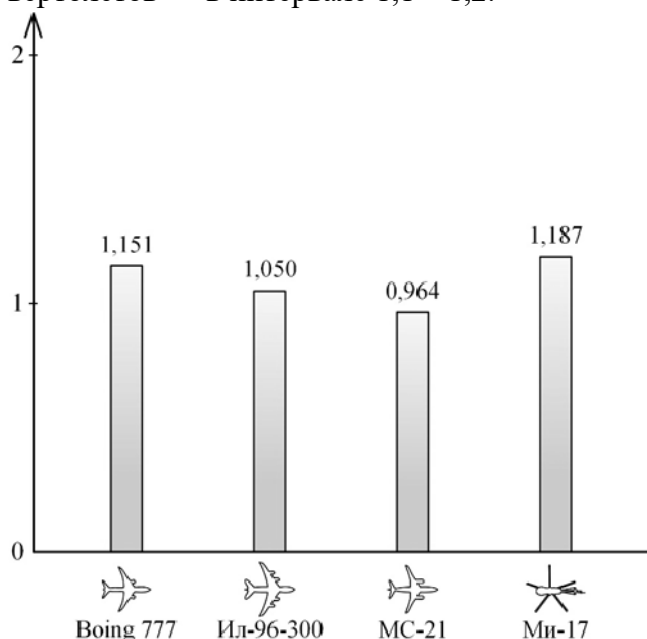


Рис. 2

Для отдельных объектов обучающей и тестовых выборок участников дорожного движения получены значения фрактальной размерности изображений их контуров; результаты обработки представлены в таблице.

| $D$              | Пешеход | Велосипедист | Мотоциклист | Легковой автомобиль | Грузовой транспорт | Пассажирский транспорт | Спецтехника |
|------------------|---------|--------------|-------------|---------------------|--------------------|------------------------|-------------|
| Среднее значение | 1,195   | 1,322        | 1,240       | 1,111               | 1,092              | 1,178                  | 1,191       |
| СКО              | 0,040   | 0,074        | 0,050       | 0,032               | 0,058              | 0,030                  | 0,063       |

Как видно из таблицы, особенности каждого из объектов дорожного движения могут быть описаны с помощью фрактальных характеристик изображений их контуров.

Для объектов дорожного движения характерным является вариативность ракурса представления изображения объекта, что, в отличие от объектов авиационной техники, приводит к изменению в некоторых пределах фрактальной размерности изображения контура объекта в зависимости от ракурса.

На рис. 3 приведены полученные диаграммы фрактальной размерности изображений контуров объектов колесной (кривая 1) и гусеничной (кривая 2) техники, представленных под различными ракурсами. Анализ рисунка показывает, что диаграммы фрактальной размерности этих объектов имеют свои характерные особенности. При этом для объектов колесной техники значение  $D$  лежит в интервале 1,04—1,12, гусеничной техники — в интервале 1,11—1,22 [13].

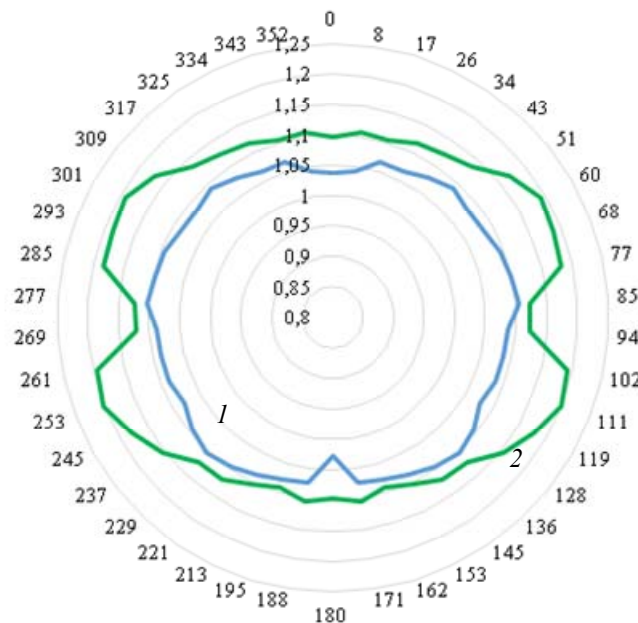


Рис. 3

На рис. 4 представлен скриншот, отображающий результаты распознавания изображений объектов дорожного движения, не входящих в обучающую выборку. Для изображений контуров объектов „Пешеход“ и „Легковой автомобиль“ показатель  $D$  принимает значения 1,196 и 1,084 соответственно, значения выходов нейронов, идентичных объекту классификации, составляют: для основной ИНС 0,77 и 0,87, для автоэнкодера 0,86 и 0,92 соответственно.

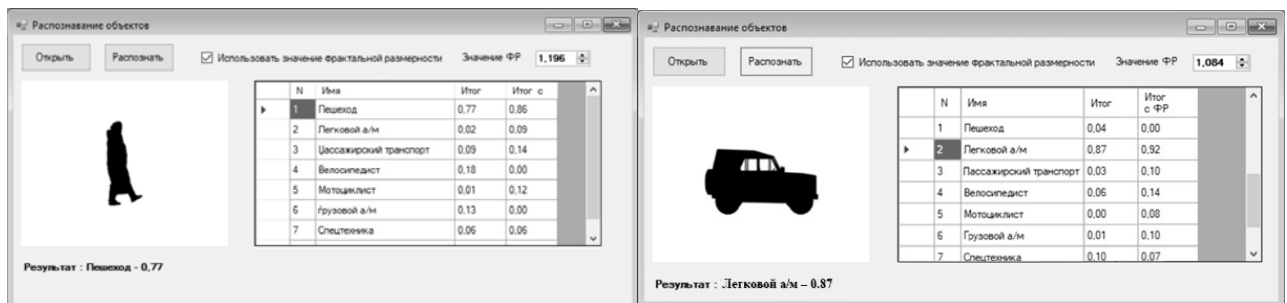


Рис. 4

Результаты распознавания экземпляров тестовой выборки с помощью ИНС типа персептрон показали [13], что использование значений фрактальной размерности изображений контуров объектов в качестве дополнительного признака классификации обеспечивает в 86 % случаев повышение качества распознавания на 15 %.

**Применение методов фрактального анализа изображений для оценки экологической обстановки.** В качестве наиболее эффективного средства наблюдения и источника данных о положении в зонах стихийных бедствий и техногенных катастроф, как правило, выступают авиационные средства наблюдения, и в первую очередь беспилотные [3—5]. Изображения, полученные с помощью указанных средств, отличаются потенциально высокой разрешающей способностью, а алгоритмы и методы фрактального анализа являются одним из перспективных способов обработки изображений, поступающих от этих средств наблюдения [8, 9].

Оценка последствий бедствий, катастроф и тенденций их развития с использованием методов фрактального анализа выполняется на основе формирования карты и гистограммы фрактальных размерностей [10—12, 14, 18, 19] черно-белого (полутонового) варианта исходного изображения (группы изображений), получаемого в результате применения методов его предварительной обработки [7, 10].

Для формирования карты фрактальной размерности (КФР) на изображение накладывается сетка с фиксированным размером ячейки. Посредством применения метода квадратов на основе использования размерности Минковского рассчитывается фрактальная размерность (ФР) фрагмента исходного изображения в каждой из ячеек [8, 9, 12, 18]. Размер ячейки зависит от масштаба изображения и величины оцениваемых объектов.

С использованием данных из открытых источников [20, 21] и разработанной программы [22] была произведена экспериментальная оценка применимости методов фрактального анализа для определения последствий стихийных бедствий и техногенных катастроф. Результаты эксперимента представлены на рис. 5—7.

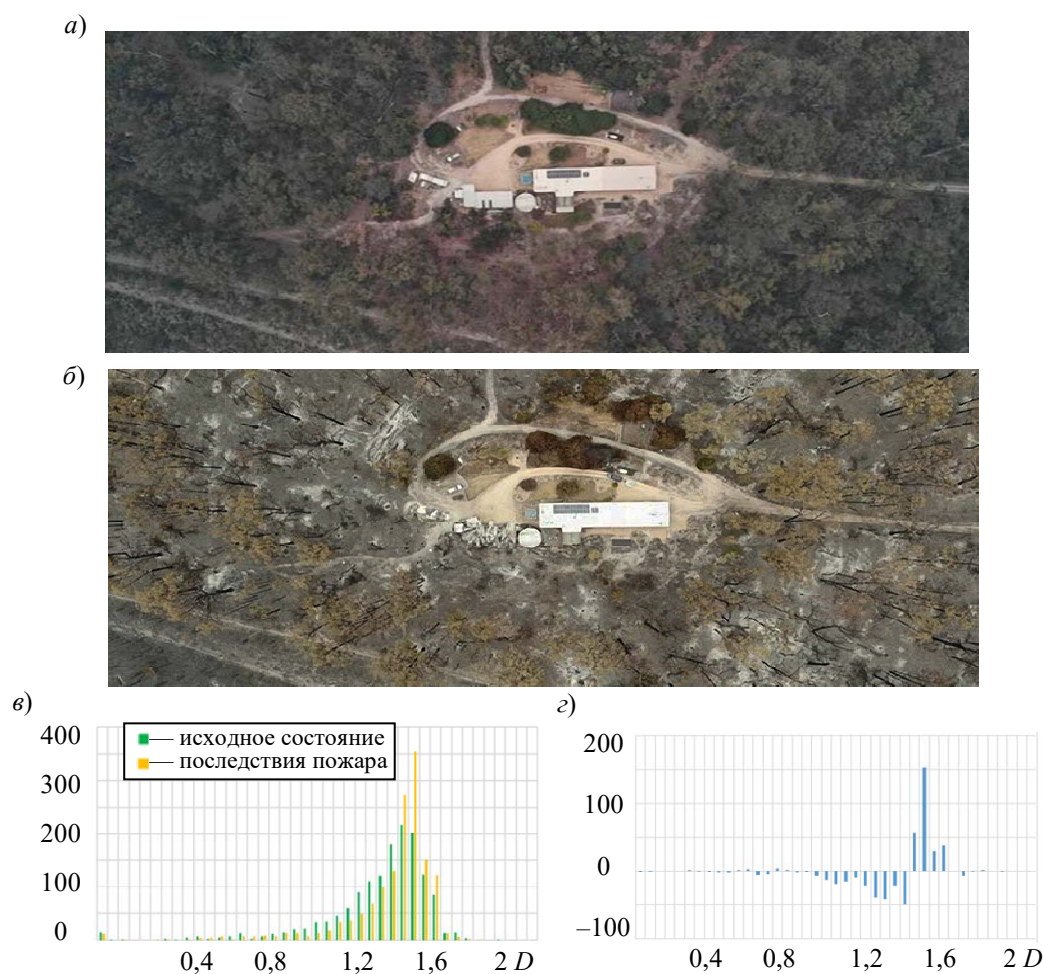


Рис. 5



На рис. 5, *а, б* представлены изображения участка лесного массива до и после пожара соответственно, на рис. 5, *в, г* — гистограммы фрактальной размерности данных изображений и их разность соответственно.

Как следует из полученных результатов обработки и фрактального анализа изображений, ФР участков изображения, соответствующих лесному массиву, имеет значения  $D$  в интервале от 1,10 до 1,65 с максимумом числа ячеек карты фрактальной размерности в 1,45. При этом доля площади лесного массива на исходном изображении (рис. 5, *а*) составляет 84 %.

Анализ представленных на рис. 5, *а, б* КФР изображений, а также рис. 5, *в* показывает, что фрактальная размерность ячеек карты, соответствующих участкам леса, попавшим под воздействие пожара, находится в том же диапазоне от 1,10 до 1,65. На КФР (рис. 5, *б*) этому диапазону соответствуют 88 % ячеек. Прирост на 4 % относительно исходного изображения объясняется тем, что под воздействие пожара попала часть построек, находящихся в центре изображения. Однако гистограмма ФР изображения на рис. 5, *б* имеет более сжатый вид с более выраженным пиком в точке 1,50. Это связано с тем, что в исходном изображении больше разнообразных текстурированных участков, соответствующих лесу, чем в изображении на рис. 5, *б*. Из рис. 5, *г* видно, что на карте фрактальной размерности изображения с последствиями пожара имеется прирост числа ячеек со значениями  $D$  от 1,45 до 1,60 в сумме на 19,6 %. Данные ячейки КФР соответствуют на рис. 5, *б* изображениям обгоревших деревьев (деревьев с обгоревшей кроной), т.е. участкам полностью уничтоженного леса.

На рис. 6, *а, б* представлены изображения городской застройки до и во время наводнения соответственно.

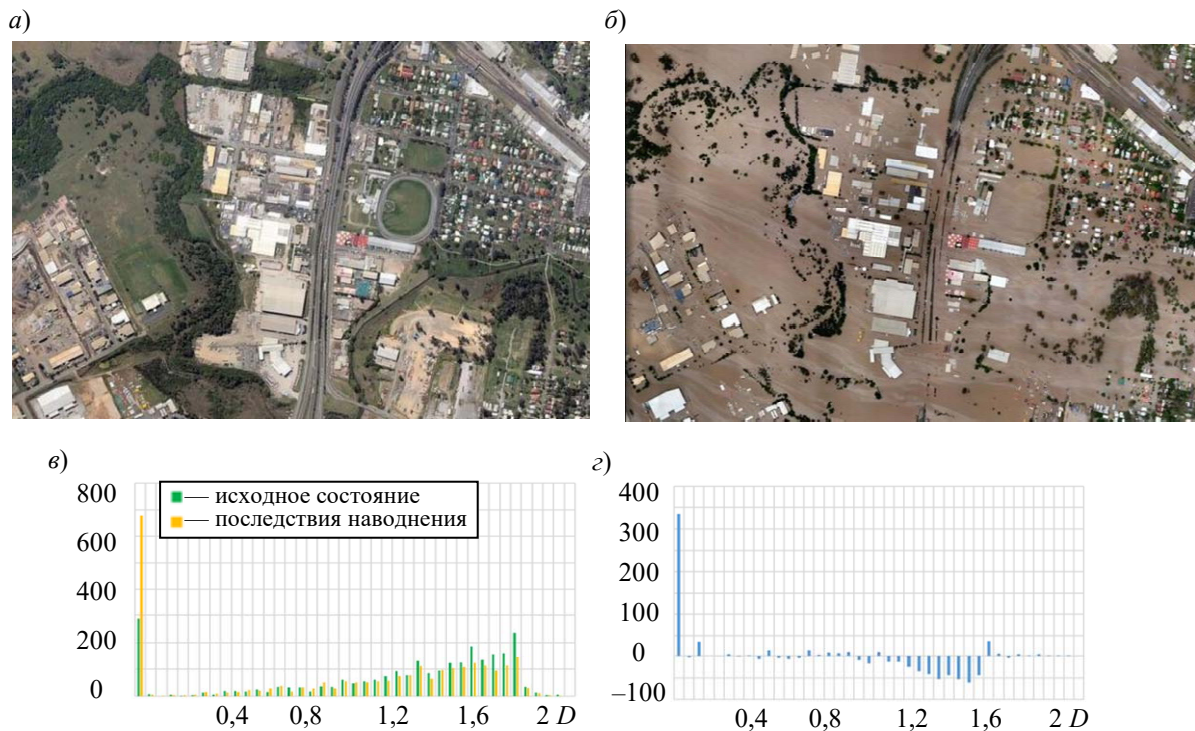


Рис. 6

Согласно результатам обработки и фрактального анализа изображений, ФР участков изображения, не имеющих ярко выраженной текстуры (ровные поверхности, крыши домов, поверхности водоемов и т.п.), близка к нулю, а участков, соответствующих водной поверхности при затоплении населенных пунктов, не превышает 0,4.

Анализ карт и гистограмм фрактальной размерности изображений, представленных на рис. 6, *в, г*, показал, что при затоплении населенного пункта (рис. 6, *б*) площадь участков изображения со значениями  $D$  от 0 до 0,4 увеличивается более чем в два раза, с 13 до 28 %. Это позволяет при известных параметрах рельефа местности, высоте отдельных объектов

ландшафта, застройки и т.п. судить о высоте подъема воды. Картину несколько смазывает наличие в населенном пункте зеленых насаждений и автомобилей в случае их частичного затопления.

ФР фрагментов изображений участков населенного пункта, не подвергшихся затоплению, или в случае, когда затопление не вносит существенного изменения в их изображение, например здания, зеленые насаждения и т.п., для двух изображений отличается незначительно (не более 0,12). Определение числа таких ячеек дает грубую оценку площади изображения, не подвергшейся затоплению (или затопленной частично) (рис. 6, б). Для полученных КФР доля таких ячеек составляет порядка 22 %.

Результаты оценки последствий техногенной катастрофы представлены на рис. 7.

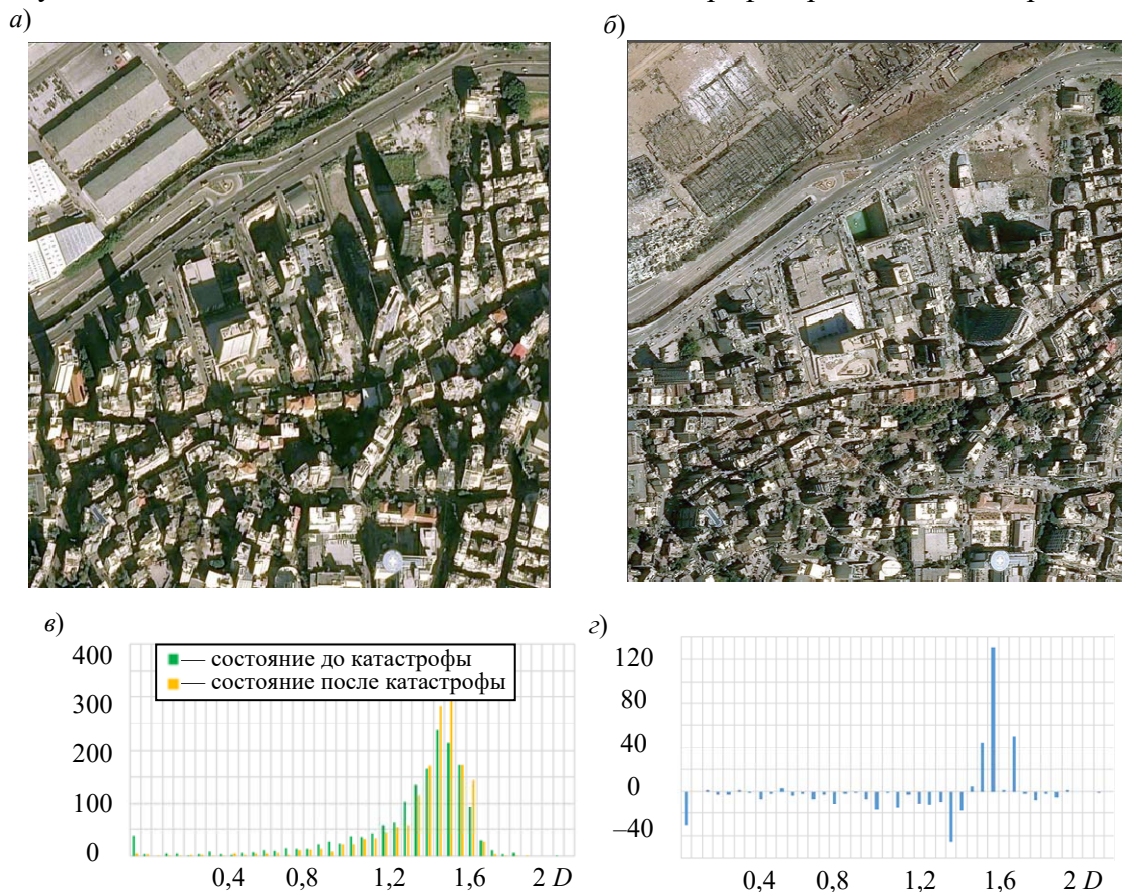


Рис. 7

В результате взрыва аммиачной селитры (2750 т) в порту Бейрута 4 августа 2020 г. полностью разрушены все здания и постройки, пострадала городская инфраструктура. Изображения участка городской инфраструктуры Бейрута до и после взрыва представлены на рис. 7, а, б соответственно.

Наибольшие повреждения (полное разрушение строений) получили здания и постройки, расположенные в левой верхней части изображения; в меньшей степени (повреждения и частичные обрушения конструкций) пострадали соответствующие объекты в центральной его части.

В связи с тем, что яркость и цвет элементов конструкций зданий на соответствующих фрагментах изображений (рис. 7, а) меняются незначительно, ФР этих фрагментов находится в интервале 0—0,4. Эти же фрагменты, изображенные на рис. 7, б, содержат обломки и остатки конструкций зданий и имеют существенно большую по сравнению с исходными текстурированность. Это приводит к тому, что значения  $D$  участков изображения, соответствующих зоне, наиболее пострадавшей от техногенной катастрофы, лежат в интервале от 1,30 до 1,6. При этом наблюдается уменьшение числа ячеек КФР со значениями менее 0,4, рост их числа

в диапазоне от 1,30 до 1,6 и смещение гистограммы вправо с ярко выраженным максимумом в области фрактальной размерности 1,45.

Анализ результатов, представленных на рис. 7, в, г, показывает, что площадь наиболее пострадавшей части городской застройки составляет порядка 15 % от общей площади изображения.

**Заключение.** Применение методов фрактального анализа позволяет успешно решать задачи формирования дополнительных характеристик объектов в системах их распознавания, кластеризации объектов мониторинга обстановки в зонах стихийных бедствий и техногенных катастроф, оценивать их состояние, выявлять аномалии, имеющие последствия для экологической обстановки, а также оценивать развитие аномальных ситуаций.

Вычислительная сложность алгоритмов фрактального анализа позволяет, в случае реализации их на современной вычислительной технике, оперативно обрабатывать достаточно большие массивы информации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бакланов А. И.* Группировки микроспутников оптико-электронного наблюдения высокого разрешения // *Материалы XV науч.-техн. конф. „Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли“.* Алушта, 2018. С. 43—62.
2. *Бакланов А. И.* Новые тенденции развития космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения // *Материалы XIV науч.-техн. конф. „Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли“.* Сочи, 2017. С. 32—49.
3. *Данилов А. С.* Система экологического мониторинга окружающей среды с использованием малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // *Экология и промышленность России.* 2013. № 9. С. 4—7.
4. *Кориунов Н. А., Котельников Р. В.* Борьба с лесными пожарами: проблема информационного обеспечения авиасредствами и ее решение // *Пожарная безопасность.* 2008. № 1. С. 125—129.
5. *Шовенгердт Р. А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
6. *Федоров А. М.* Эффективность мониторинга техногенных объектов с применением беспилотных летательных аппаратов // *Докл. БГУИР.* 2015. № 7(93). С. 129—130.
7. *Есиков О. В., Сухарев Е. М., Алтухов А. В., Тарасов Е. А.* Оценка эффективности методов и алгоритмов обработки графической информации и распознавания объектов мониторинга // *Научные технологии.* 2011. № 4. С. 54—61.
8. *Потапов А. А.* Фракталы в дистанционном зондировании // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.* 2000. № 6. С. 3—65.
9. *Потапов А. А.* Новейшие методы обработки изображений. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
10. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
11. *Кронвер Р. М.* Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
12. *Akinshin N. S., Potapov A. A., Bystrov R. P., Esikov O. V., Chernyshkov A. I.* Building Systems for Object Recognition by Multichannel Sensing Systems Based on Neural Networks and Fractal Signatures // *J. of Communications Technology and Electronics.* 2020. Vol. 65, N 7. P. 835—842.
13. *Есиков О. В., Денисова Н. А., Романюта А. Е.* Результаты экспериментальной оценки эффективности архитектур искусственных нейронных сетей при решении задач распознавания объектов дорожного движения // *Изв. ТулГУ. Технические науки.* 2021. Вып. 2. С. 139—145.
14. *Аггарвал Ч.* Нейронные сети и глубокое обучение: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2020. 752 с.
15. *Simonyan K., Zisserman A.* Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // *arxiv preprint arxiv:1409.1556.* 2014. [Электронный ресурс]: <<https://arxiv.org/abs/1409.1556>>, 13.07.2020.



16. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 770—778.
17. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; Пер. с польск. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. 383 с.
18. Akinshin N. S., Esikov O. V., Potapov A. A., Akinshin R. N., Kuleshov A. V. Application of fractal analysis methods of Earth surface images for ecological setting assessment // EPJ Web Conf. 2019. Vol. 224, 04008 (MNPS-2019).
19. Акиншин Н. С., Есиков О. В., Чернышков А. И., Савчук К. В. Применение методов фрактального анализа изображений для решения задач мониторинга экологической обстановки // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2019. № 10. С. 44—52.
20. <https://trinixy.ru/52197-do-i-posle-navodneniya-40-foto.html>
21. <https://trinixy.ru/167549-fotografii-malibu-so-sputnika-do-i-posle-pozharov-9-foto.html>
22. Свид. о рег. прогн. № 2019665064. Программа фрактального анализа изображений для оценки экологической обстановки / О. В. Есиков, А. В. Петешов, А. В. Кулешов, К. В. Савчук, А. Н. Ивутин. 18.11.2019 г.

#### Сведения об авторах

- Олег Витальевич Есиков** — д-р техн. наук, профессор; Центральное конструкторское бюро аппаратаостроения, главный специалист; E-mail: eovmail@rambler.ru
- Дмитрий Витальевич Титов** — д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; E-mail: titov.swsu@gmail.com

Поступила в редакцию 07.06.2022; одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

#### REFERENCES

1. Baklanov A.I. *Sistemy nablyudeniya, monitoringa i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Systems of Observation, Monitoring and Remote Sensing of the Earth), Materials of the XV Scientific and Technical Conference, Alushta, 2018, pp. 43–62. (in Russ.)
2. Baklanov A.I. *Sistemy nablyudeniya, monitoringa i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Systems of Observation, Monitoring and Remote Sensing of the Earth), Materials of the XIV Scientific and Technical Conference, Sochi, 2017, pp. 32–49. (in Russ.)
3. Danilov A.S. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* (Ecology and Industry of Russia), 2013, no. 9, pp. 4–7. (in Russ.)
4. Korshunov N.A., Kotel'nikov R.V. *Pozharnaya bezopasnost'*, 2008, no. 1, pp. 125–129. (in Russ.)
5. Schowengerdt R.A. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, Elsevier, 2006, 560 p.
6. Fedorov A.M. *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, 2015, no. 7(93), pp. 129–130. (in Russ.)
7. Esikov O.V., Sukharev E.M., Altukhov A.V., Tarasov E.A. *Naukoyemkiye tekhnologii* (High Technologies), 2011, no. 4, pp. 54–61. (in Russ.)
8. Potapov A.A. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 2000, no. 6, pp. 3–65. (in Russ.)
9. Potapov A.A. *Noveyshiye metody obrabotki izobrazheniy* (The Latest Image Processing Techniques), Moscow, 2008, 496 p. (in Russ.)
10. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2008, 954 p.
11. Crownover R.M. *Introduction to Fractals and Chaos*, Jones and Bartlett Books in Mathematics, 1995, 350 p.
12. Akinshin N.S., Potapov A.A., Bystrov R.P., Esikov O.V., Chernyshkov A.I. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020, no. 7(65), pp. 835–842.
13. Esikov O.V., Denisova N.A., Romanyuta A.E. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 2, pp. 139–145. (in Russ.)
14. Charu C. Aggarwal, *Neural Networks and Deep Learning A Textbook*, Springer, 2018.
15. Simonyan K., Zisserman A. *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*, arxiv preprint arxiv:1409.1556, 2014, URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556>.
16. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770–778.
17. Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L. *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Warszawa, Łódź, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2004.
18. Akinshin N.S., Esikov O.V., Potapov A.A., Akinshin R.N., Kuleshov A.V. *EPJ Web of Conferences*, MNPS-2019, 2019, no. 224, pp. 04008.
19. Akinshin N.S., Esikov O.V., Chernyshkov A.I., Savchuk K.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2019, no. 10, pp. 44–52. (in Russ.)
20. <https://trinixy.ru/52197-do-i-posle-navodneniya-40-foto.html>. (in Russ.)

21. <https://trinixy.ru/167549-fotografii-malibu-so-sputnika-do-i-posle-pozharov-9-foto.html>. (in Russ.)
22. Certificate on the state registration of the computer programs 2019665064, *Programma fraktal'nogo analiza izobrazheniy dlya otsenki ekologicheskoy obstanovki* (Fractal Image Analysis Program for Environmental Assessment), Esikov O.V., Peteshov A.V., Kuleshov A.V., Savchuk K.V., Ivutin A.N., Priority 11.11.2019, Published 18.11.2019. (in Russ.)

**Data on authors**

- Oleg V. Esikov** — Dr. Sci., Professor; Central Design Bureau of Instrument Engineering, Chief Specialist; E-mail: eovmail@rambler.ru
- Dmitry V. Titov** — Dr. Sci., Associate Professor; Southwest State University, Department of Computer Engineering; E-mail: titov.swsu@gmail.com

Received 07.06.2022; approved after reviewing 20.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.