

Фрактальный анализ информационного содержания многоспектральных изображений в задачах экологического мониторинга

© 2019. О. Р. Никитин¹, д. т. н., зав. кафедрой,
А. Н. Кисляков², к. т. н., доцент,

¹Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых,
600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,

²Российская академия народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации, Владимирский филиал,
600017, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 59а,
e-mail: olnikitin@mail.ru, ankislyakov@mail.ru

Представлен метод оценки информативности цифровых многоспектральных изображений на основе вычисления их фрактальной размерности, а также рассмотрена возможность его применения в задачах экологического мониторинга земной поверхности. При использовании многоканальной системы дистанционного зондирования возникает необходимость оценки информативности многоспектральных изображений. Для реализации метода оценки информативности использовали энтропийный подход, а также теорию фракталов, которые позволяют анализировать изображения не только по яркости пикселей, но и по форме объектов на них. Предложена упрощённая методика оценки фрактальной размерности полутонового изображения с помощью алгоритма box-counting, в основе которого лежит имитация вычисления фрактальной размерности объектов на изображении при изменении размера ячеек квадратной формы путём вычисления угла наклона аппроксимирующей прямой. Представлены результаты оценки фрактальной размерности, а также стандартного отклонения числового значения фрактальной размерности для изображений различных спектральных каналов. По величине стандартного отклонения фрактальной размерности можно судить о сложности границ объектов и аномалий на изображении. Предложенный метод позволяет адекватно оценить информативность цифровых многоспектральных изображений в системах дистанционного зондирования, что даёт возможность более эффективно использовать данные при их дальнейшей обработке и анализе. Рассмотрена возможность развития предложенной методики для вычисления фрактальной размерности для различных морфологических классов изображения, что позволит оценить характерные особенности структуры объектов интереса на изображении.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, многоспектральная съёмка, фрактальный анализ.

Fractal analysis of information content of multispectral images in problems of ecological monitoring

© 2019. O. R. Nikitin¹ ORCID: 0000-0003-2796-7011, A. N. Kislyakov² ORCID: 0000-0001-8790-6961,
¹Vladimir State University,

87, Gorkogo St., Vladimir, Russia, 600000,

²Russian Academy of National Economy and Public Administration
under the President of the Russian Federation (Vladimir Branch of RANEP),
59a, Gorkogo St., Vladimir, Russia, 600017,
e-mail: olnikitin@mail.ru, ankislyakov@mail.ru

Method of estimating the information content of digital multispectral images based on computing their fractal dimension and the possibility of its application in problems of ecological monitoring of the earth surface is presented. When using a multichannel system of remote sensing there is a need to assess the information content of multispectral images. To implement the method of estimation of information content the entropy approach and the theory of fractals are used, which allow to analyze not only the brightness of the pixels, but the shape of objects in images. It is proposed a simplified method of estimating the fractal dimension of a grayscale image using the algorithm of box-counting, which is based on simulation evaluation of the fractal dimension of the objects in the image when you change the size of the cells of square shape by calculating the slope angle of the approximating straight line. The results of evaluation of the fractal dimen-

sion and the standard deviation of the numeric values of the fractal dimension for images of different spectral channels allow to judge the complexity of the boundaries of objects and anomalies in the image. The proposed method allows to adequately estimate the information content of digital multispectral images in remote sensing systems, which enables more effective use of data for further processing and analysis. The possibility of the proposed development methods to calculate fractal dimensions for different morphological classes of images will allow us to evaluate the characteristic features of the structure of objects of interest in the image.

Keywords: remote sensing, multispectral imagery, fractal analysis.

Аэрокосмические методы дистанционного зондирования земной поверхности без сомнения играют важнейшую роль в анализе экологической обстановки. При этом одним из наиболее перспективных направлений является изучение характеристик объектов экологического мониторинга путём оценки их параметров одновременно в различных диапазонах электромагнитного излучения. В этой связи широкое распространение получили системы многоспектральной (многозональной) съёмки [1, 2]. Результатом работы такой системы дистанционного зондирования является набор растровых изображений исследуемого участка земной поверхности в различных спектральных зонах электромагнитного излучения. Эти данные подлежат дальнейшему детальному анализу, определению количественных характеристик исследуемого объекта, необходимых для прогнозирования развития явления или процесса. Количество спектральных каналов варьирует в зависимости от аппаратуры и назначения системы зондирования. Сейчас активно используются космические аппараты и группировки спутников Landsat, SPOT, Канопус-В, Ресурс и др.

Исследования в этой области ведутся уже многие годы и за это время различные спектральные каналы стали широко использоваться для решения задач экологического мониторинга и идентификации типов земной поверхности [3]. Подробно изучено, какие соотношения яркости в различных зонах спектра соответствуют растительности, обнажённой почве, водным поверхностям и другим типам ландшафта. На основании этого разработаны различные критерии оценки, например, интенсивности растительного покрова, такие как вегетационный индекс, индекс листовой поверхности и др. [4].

Однако особенностью подобных систем является большой объём информации, подлежащей обработке, которая зачастую является избыточной, что усложняет работу системы в оперативном режиме. В этой связи важным этапом обработки полученных снимков является комплексирование – процедура оптимизации набора полученных изображений для

более качественного дешифрирования всех типов объектов, отобразившихся на многозональном наборе, их адекватной идентификации и оценки исследуемых параметров.

Объекты и методы

Комплексирование не ограничивается простым аддитивным синтезированием снимков для одновременной визуализации изображений в нескольких спектральных каналах. Например, достаточно часто применяется синергизм панхроматического изображения высокого разрешения с цветным синтезированным (многозональным) изображением более низкого разрешения, а также преобразование нескольких изображений в одно по методу главных компонент и другие приёмы, алгоритмы комплексирования [5–7].

При этом актуальным является вопрос качественной подготовки исходной информации для анализа, который сводится к автоматизации выбора наиболее информативных каналов с точки зрения их содержания. Информативность изображения определяется наличием аномальных объектов на сцене, которые характеризуются яркостными и структурными (морфологическими) характеристиками.

Цель работы – исследование методов анализа информационного содержания цифровых полутоновых изображений. Для этого необходимо решить задачу оценки информативности изображений с учётом яркостных и структурных свойств объектов на снимке.

Одним из основных показателей, который наиболее часто применяется для оценки информативности цифровых изображений, является яркостная энтропия Шеннона [8]. Выражение для оценки информативности полутонового изображения A_i выглядит следующим образом:

$$E(A_i) = - \sum_{i=1}^L p(a_i(x, y)) \cdot \log [p(a_i(x, y))], \quad (1)$$

где a_i – значение яркости каналов, $p(a_i(x, y)^i)$ – функция (гистограмма) распределения яркости, $L \in [0, 255]$.

Однако значение энтропии достигает максимума, когда сигнал постоянен, что противоречит интуитивному пониманию меры информативности [9, 10]. Кроме того, если сигнал имеет большое количество искажений, вызванных шумовыми воздействиями, то он формально обладает большим количеством информации. Наконец, эта мера не учитывает сложности структуры объектов, представленных на снимке [5, 11].

Таким образом, яркостная энтропия в ряде случаев не позволяет адекватно оценить информативность изображений в условиях шумового воздействия, а также при работе со слабоконтрастными снимками [12, 13]. Одним из способов решения данной проблемы является исследование структуры объектов на изображении с применением теории фракталов.

Использование свойств фрактальной геометрии позволяет применять для обработки изображений фрактальную размерность, характеризующую степень заполнения пространства, в котором существует фрактальная система. В этом случае появляется возможность оценить как наличие различных областей яркости на изображении, так и структурные характеристики выявленных объектов.

Размерность Минковского – это один из способов задания фрактальной размерности ограниченного множества в метрическом пространстве, определяется следующим образом [1, 4]:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\log(1/r)} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{-\log r}, \quad (2)$$

где $N(r)$ – минимальное число подмножеств размера r , которыми можно покрыть исходное множество.

Если представить полное покрытие множества X определённой формы шарами радиуса не более чем r , обозначив количество этих шаров за $N(r)$, то значение $N(r)$ будет расти при уменьшении r (для полного покрытия будет требоваться всё больше шаров, при этом описание границы множества X будет точнее).

Размерностью Минковского некоторого множества будет являться такое уникальное число D , что $N(r)$ будет расти как $(1/r)^D$ при стремлении r к нулю. Это справедливо не только для двумерного, но и для n -мерного случая [14].

Для разных сцен фрактальная размерность D принимает различные значения,

лежащие в пределах от 0 до 2. Прямая линия имеет размерность, равную 1. Фрактальная размерность кривой равна 2, если эта кривая заполняет всю плоскость. Следовательно, изломанная линия на плоскости, которая представлена в виде границ объектов различной яркости на изображении с геометрической точки зрения уже не одномерный объект, но ещё не двумерный, поэтому её размерность лежит в пределах от 1 до 2. Если же изображение представляет собой множество мелких объектов (сравнимых с минимальным размером r) с однородной яркостью, то при выполнении расчётов объекты приближённо могут рассматриваться как точки, и их размерность лежит в пределах от 0 до 1. Поэтому, анализируя числовое значение фрактальной размерности, можно сделать вывод не только о сложности структуры объектов наблюдаемой сцены, но и о наличии шумов и других артефактов на изображении [1, 15].

В работе для определения приближённого значения фрактальной размерности Минковского D_{bc} используется итеративный алгоритм box-counting, в основе которого лежит имитация вычисления фрактальной размерности объектов (или определённой области) на изображении при изменении размера ячеек квадратной формы [14].

Возьмём некоторое ограниченное множество в метрическом пространстве, например, чёрно-белую картинку, нарисуем на ней равномерную сетку с шагом r , и закрасим те ячейки сетки, которые содержат хотя бы один элемент искомого множества чёрного цвета (рис. 1). Далее начнём уменьшать размер ячеек, т. е. r , тогда размерность Минковского будет вычисляться по формуле (2).

Предлагаемую методику оценки фрактальной размерности полутонового изображения можно представить в виде последовательности шагов:

1. Исходное полутоновое изображение предварительно обрабатывается и нормализуется с применением методов цифровой обработки изображений [5, 16, 17].

2. Осуществляется разбиение изображения на слои (срезы), которые представляют собой набор бинарных изображений. Бинаризация осуществляется для различных пороговых значений.

3. Для каждого полученного бинарного изображения, условно разбитого на ячейки квадратной формы, вычисляется фрактальная размерность. Цикл повторяется для различных размеров ячеек.

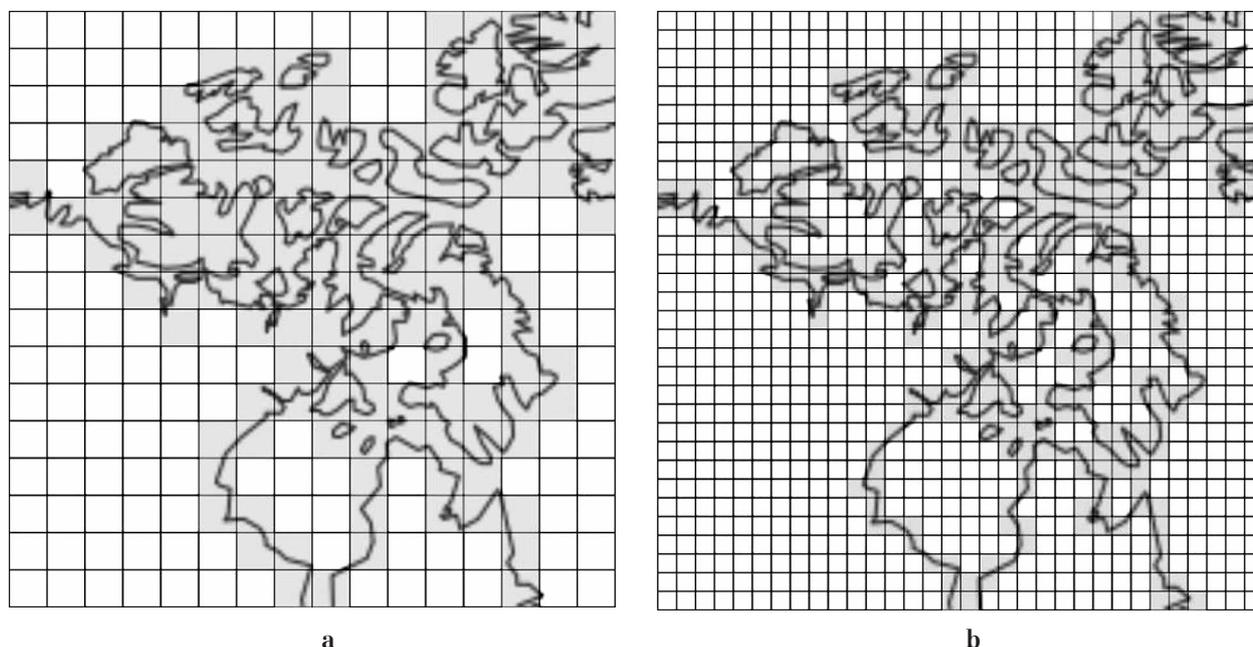


Рис. 1. Покрытие исходного множества подмножествами большего (а) и меньшего (б) размера r
Fig. 1. Coverage of the original set with subsets of larger (a) and smaller (b) size of r

$$D_{bc} = \frac{\log N(r)}{\log(1/r)} \Rightarrow D_{bc} \cdot \log(1/r) = \log N(r) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow D_{bc} \cdot \log(1/r) - \log N(r) = 0, (3)$$

Если зафиксировать размеры ячеек r и рассматривать D_{bc} как неизвестное, то легко заметить, что приведенное выражение (3) является уравнением прямой. Соответственно, если вычислять фрактальную размерность для различных значений размеров ячеек r и построить регрессионную модель (рис. 2b, см. цв. вкладку) для полученного массива данных (например, для бинарного изображения размером 512 x 512 пикселей), то угол наклона аппроксимирующей прямой будет являться значением фрактальной размерности Минковского [14, 18, 19].

Фрактальные размерности вычисляются для каждого бинарного «среза» полутоновых изображений всех каналов.

4. Фрактальная размерность \bar{D}_{bc} [18, 19] полутонового изображения каждого канала в нашем случае упрощенно находится как среднее значение фрактальных размерностей каждого из его «срезов»:

$$\bar{D}_{bc} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n D_{bc_i}, (4)$$

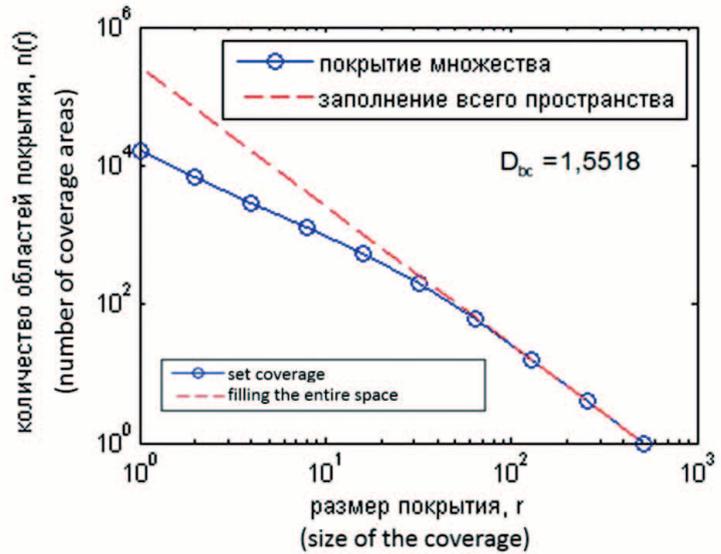
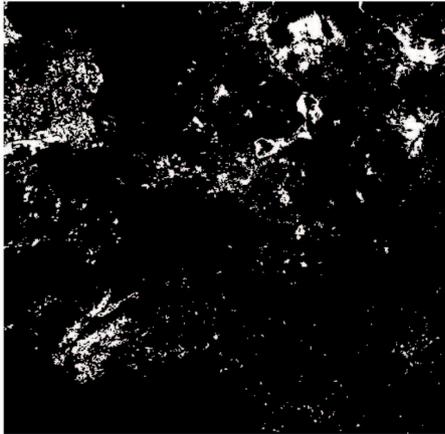
где n – количество спектральных каналов, D_{bc_i} – фрактальная размерность i -го бинарного «среза» полутонового изображения.

Существуют методы [14, 17, 20], основанные на построении над полутоновым изображением графика поверхности функции градации серого, после чего для неё строится специальная функция, называемая «покрытием», на основании которой затем вычисляется фрактальная размерность поверхности. Однако в нашем случае наибольший интерес представляет наличие областей интереса на всем диапазоне яркостей изображения, поэтому выбрав определённое количество «срезов», можно оценить наличие аномальных объектов во всём диапазоне яркостей. При этом количество срезов не должно быть слишком большим, чтобы чрезмерно не сузить диапазон рассматриваемых значений яркости, так как в этом случае объекты на изображении будут рассматриваться как точки. Для полутонового изображения с диапазоном яркостей пикселей от 0 до 255 достаточно от 5 до 10 «срезов».

Таким образом, вычисляется числовая характеристика полутонового изображения, которая позволяет оценить структурные особенности наблюдаемой сцены: наличие аномальных объектов с резкими границами и перепадами яркости в различных диапазонах.

Результаты и обсуждение

В качестве примера рассмотрим набор цифровых многоспектральных полутоновых изображений окрестности Онежского озера (Россия), выполненных с помощью аппара-



a

b

Рис. 2. Пример регрессионной модели (b) фрактальной размерности снимка (a)
 Fig. 2. An example of a regression model (b) of fractal dimension of the image (a)

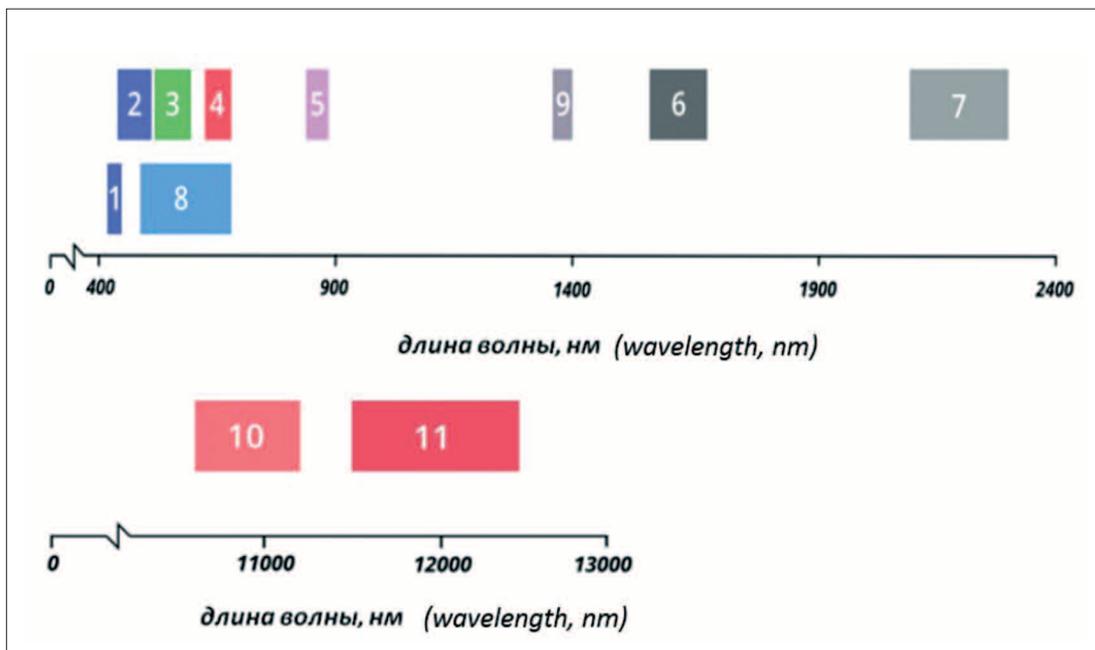


Рис. 3. Спектральные диапазоны каналов спутника Landsat 8
 Fig. 3. Spectral bands of Landsat 8 satellite channels

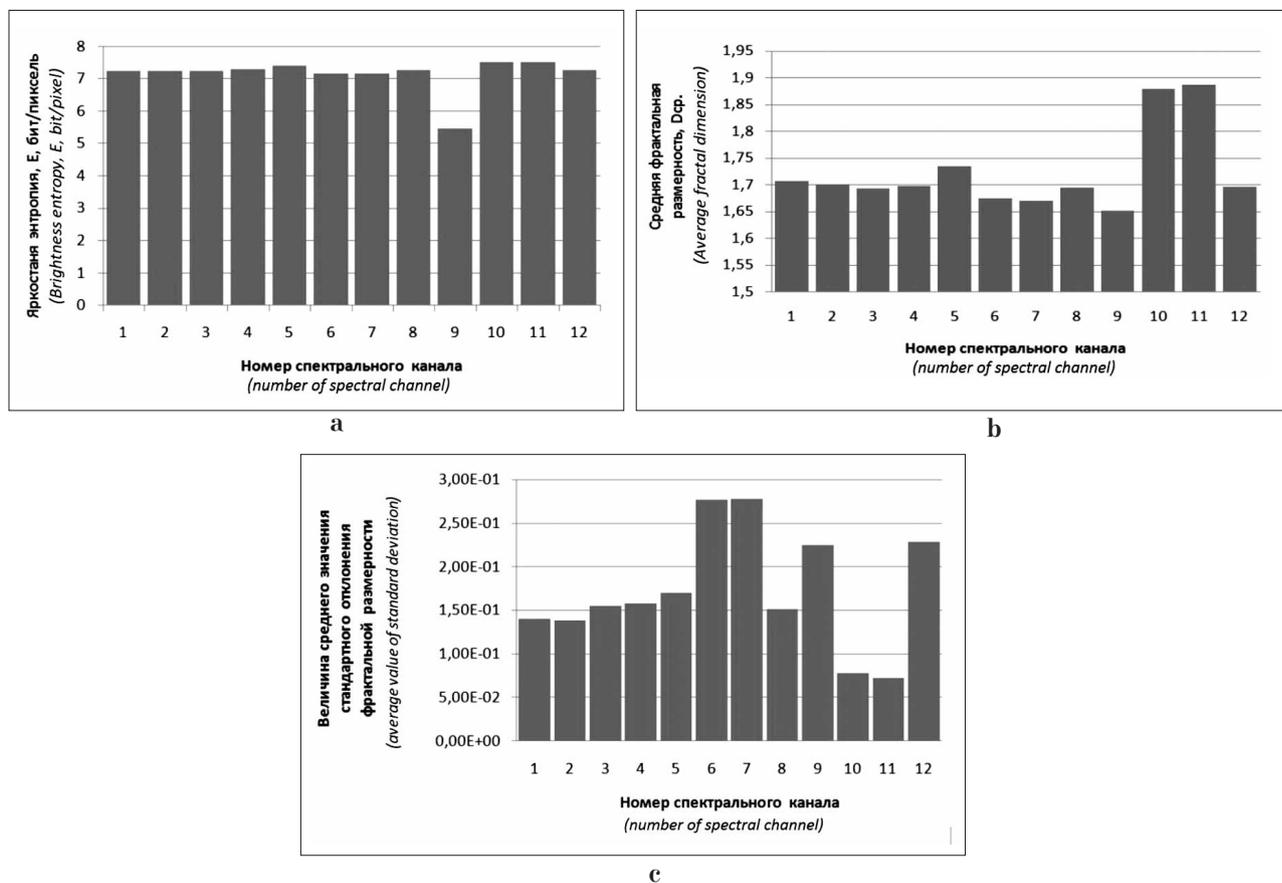


Рис. 4. Яркостная энтропия (а), усреднённая фрактальная размерность полутонового изображения (b) и усреднённое значение стандартного отклонения фрактальной размерности (с) изображений различных каналов
Fig. 4. Brightness entropy (a), the average fractal dimension of the half-tone image (b) and the average value of the standard deviation of the fractal dimension (c) of the images in different channels

туры спутника Landsat 8. Съёмка проведена 13 ноября 2013 г. в видимом, ближнем инфракрасном, тепловом инфракрасном диапазонах (всего 12 каналов). Диапазоны длин волн, в которых выполнялась съёмка, представлены на рисунке 3 (см. цв. вкладку). Цифрами указаны порядковые номера спектральных каналов. 12-й канал предоставляет информацию о содержании влаги, облаках и снежном покрове. Обработка снимков проводилась средствами пакета прикладных программ MATLAB.

Для каждого изображения была вычислена яркостная энтропия и фрактальная размерность по представленной методике. Фрактальная размерность полутонового изображения вычислялась как усреднённое значение фрактальных размерностей по девяти «срезам». Результаты приведены на рисунке 4.

Графики показывают, что в приведённом примере с точки зрения яркостной энтропии и фрактальной размерности, для представленного набора полутоновых снимков наименее информативными являются изображения 9-го

канала, а наиболее интересными изображения 5-го, 10-го и 11-го каналов, причём, по показателю яркостной энтропии это неочевидно.

Также важной характеристикой является показатель стандартного отклонения фрактальной размерности, который позволяет оценить величину вариации фрактальной размерности в зависимости от размера области покрытия и характеризует сложность границ объектов на изображении. Поэтому изображения 10-го и 11-го каналов обладают менее сложной границей аномального объекта на изображении, а изображения 6-го, 7-го, 9-го и 12-го каналов содержат больше мелких объектов со сложной структурой.

Дело в том, что для большинства задач, в том числе и для задач экологического мониторинга, особый интерес представляет возможность оценки «однородности» объектов на сцене. Поэтому, чем меньше показатель стандартного отклонения фрактальной размерности, тем точнее можно определить границы объектов и аномалий на изображении.

Снижение точности оценки фрактальной размерности обусловлено наличием на изображении мелких (сравнимых с размером области покрытия) объектов, возможно вызванных и шумовым воздействием.

Исследование этих особенностей невозможно при использовании лишь яркостной энтропии в качестве показателя информативности, тогда как фрактальная размерность, являясь удачным дополнением к показателю яркостной энтропии, может быть использована в качестве меры информативности при анализе цифровых многоспектральных изображений земной поверхности, позволяющей оценить структурное разнообразие объектов на наблюдаемой сцене, а также идентифицировать наличие аномальных объектов на изображении с однородной яркостью.

Заключение

Одним из направлений применения приведенной методики видится определение фрактальной размерности на основе разбиения изображения на морфологические классы, вычисления фрактальной размерности для каждого из классов, построения гистограммы фрактальных размерностей и оценки на её основании информативности изображения. Это даст возможность оценить характерные особенности структуры объектов интереса на изображении.

Предложенная методика анализа многоспектральных изображений на основе вычисления их фрактальных характеристик позволит эффективнее решать задачи автоматизации обнаружения аномальных объектов и их границ на многоспектральных изображениях, выполнять оперативный контроль и классификацию загрязнений почвы и водной поверхности, обнаруживать выбросы промышленных предприятий, выполнять мониторинг и прогноз сезонных паводков и разливов рек, контролировать динамику снежных покровов путём эффективного отбора наиболее информативных изображений и их комплексирования.

Литература

1. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Анализ информационного содержания цифровых многоспектральных изображений земной поверхности // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 2 (22). С. 64–69.
2. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Морфологическое комплексирование многоспектральных изображений

земной поверхности // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 2. С. 36–39.

3. Лысенко Н.В., Игнатъева Н.В. Спектрально-аналитическая обработка изображений в задачах экологического мониторинга // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2016. № 6. С. 32–37.

4. Бухтояров О.И., Несговорова Н.П., Савельев В.Г., Иванцова Г.В., Богданова Е.П. Методы экологического мониторинга качества сред жизни и оценки их экологической безопасности: учебное пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. 239 с.

5. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Комплексирование многоспектральных изображений с использованием методов морфологического анализа и цветового кодирования // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 4. С. 52–57.

6. Khaleghi B. Multisensor data fusion: A review of the state of the art // Information Fusion. 2013. No. 14. P. 28–44.

7. Mitchell H.B. Data fusion: concepts and ideas. New York: Springer-Verlag, LLC, 2012. 244 p.

8. Чумак О.В. Энтропии и фракталы в анализе данных. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. 164 с.

9. Корчинский В.М. Информативность многоспектральных проекционных изображений // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. 2005. № 1 (15). С. 52–54.

10. Sotoca J.M., Pla F., Klaren A.C. Unsupervised band selection for multispectral images using information theory // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). 2004. No. 3. P. 510–513.

11. Wang W., Chang F. A multi-focus image fusion method based on Laplacian pyramid // Journ. of Computers. 2011. V. 6. No. 12. P. 2559–2566.

12. Tourassi G.D., Frederick E.D., Markey M.K., Floyd C.E. Application of the mutual information criterion for feature selection in computer-aided diagnosis // Medical Physics. 2001. No. 28 (12). P. 2394–2402.

13. Zheng Y. An exploration of color fusion with multispectral images for night vision enhancement, image fusion and its applications. Image Fusion, 2011 [Электронный ресурс] <http://www.intechopen.com/books/image-fusion-and-its-applications/an-exploration-of-color-fusion-with-multispectral-images-for-night-vision-enhancement> (Дата обращения: 05.03.2019).

14. Шуплецов Ю.В., Ампилова Н.Б. Алгоритм вычисления размерности Минковского для полутоновых изображений // Известия Российского государственного педагогического университета им. Герцена. 2014. № 165. С. 99–106.

15. Wang Z., Deller J.R., Fleet B.D. Pixel-level multisensor image fusion based on matrix completion and robust principal component analysis // Journ. Electron. Imaging. 2015. V. 25. No. 1. [Электронный ресурс] <http://electronicimaging.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=2482741> (Дата обращения: 05.03.2019).

16. Image Fusion / Ed. O. Ukimura. Rijeka: InTech, 2011. 428 p. [Электронный ресурс] <https://ru.b-ok.org/ireader/1192474> (Дата обращения: 05.03.2019).

17. Stathaki T. Image fusion: algorithms and applications. London: Academic Press, 2008. 520 p.

18. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Метод идентификации личности по цифровым изображениям отпечатков пальцев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 4. С. 52–57.

19. Кисляков А.Н. Фрактальный метод идентификации личности по цифровым изображениям отпечатков пальцев // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы XII Международной научно-технической конференции. Владимир, 2017. С. 200–204.

20. Image fusion and its applications / Ed. Y. Zheng. USA: InTech, 2011. 242 p.

References

1. Nikitin O.R., Kislyakov A.N. Analysis of the information content of the digital multispectral images of the earth surface // Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy. 2016. No. 2 (22). P. 64–69 (in Russian).

2. Nikitin O.R., Kislyakov A.N. Morphological integration of multispectral images of the earth's surface // Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy. 2012. No. 2. P. 36–39 (in Russian).

3. Lysenko N.V., Ignatieva N.V. Multispectral image processing in problems of ecological monitoring // Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika. 2016. No. 6. P. 32–37 (in Russian).

4. Bukhtoyarov O.I., Nesgovorova N.P., Savelyev V.G., Ivantsova G.V., Bogdanova E.P. Methods of environmental monitoring of quality of living environment and assessment of their environmental safety: uchebnoe posobie. Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta, 2015. 239 p. (in Russian).

5. Nikitin O.R., Kislyakov A.N. Data fusion for multispectral images using morphological analysis and color-coding // Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy. 2012. No. 4. P. 52–57 (in Russian).

6. Khaleghi B. Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art // Information Fusion. 2013. No. 14. P. 28–44. doi: 10.1016/j.inffus.2011.08.001

7. Mitchell H.B. Data fusion: concepts and ideas. New York: Springer-Verlag, LLC, 2012. 244 p.

8. Chumak O.V. Entropies and fractals in data analysis. Moskva-Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika", 2011. 164 p. (in Russian).

9. Korchinskiy V.M. Informativity of multispectral projection images // Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy. 2005. No. 1 (15). P. 52–54 (in Russian).

10. Sotoca J.M., Pla F., Klaren A.C. Unsupervised band selection for multispectral images using information theory // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). 2004. No. 3. P. 510–513.

11. Wang W., Chang F. A multi-focus image fusion method based on Laplacian pyramid // Journ. of Computers. 2011. V. 6. No. 12. P. 2559–2566. doi: 10.4304/jcp.6.12.2559-2566

12. Tourassi G.D., Frederick E.D., Markey M.K., Floyd C.E. Application of the mutual information criterion for feature selection in computer-aided diagnosis // Medical Physics. 2001. No. 28 (12). P. 2394–2402. doi: 10.1118/1.1418724

13. Zheng Y. An exploration of color fusion with multispectral images for night vision enhancement, image fusion and its applications. Image Fusion, 2011 [Internet resource] <http://www.intechopen.com/books/image-fusion-and-its-applications/an-exploration-of-color-fusion-with-multispectral-images-for-night-vision-enhancement> (Accessed: 05.03.2019). doi: 10.5772/17121

14. Shupletsov Yu.V., Ampilova N. The algorithm of calculating minkovsky dimension for gray-scale images // Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. Gertsena. No. 165. P. 99–106 (in Russian).

15. Wang Z., Deller J.R., Fleet B.D. Pixel-level multisensor image fusion based on matrix completion and robust principal component analysis // Journ. Electron. Imaging. 2015. V. 25. No. 1. [Internet resource] <http://electronicimaging.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=2482741> (Accessed: 05.03.2019). doi: 10.1117/1.JEI.25.1.013007

16. Image Fusion / Ed. O. Ukimura. Rijeka: InTech, 2011. 428 p. [Internet resource] <https://ru.b-ok.org/ireader/1192474> (Accessed: 05.03.2019). doi: 10.5772/602

17. Stathaki T. Image fusion: algorithms and applications. London: Academic Press, 2008. 520 p.

18. Nikitin O.R., Kislyakov A.N. The method of identification by digital fingerprint images // Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy. 2017. No. 4. P. 52–57 (in Russian).

19. Kislyakov A.N. Fractal method of identification of the person on digital images of fingerprints // Advanced technologies in the means of information transmission: Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Vladimir. 2017. P. 200–204 (in Russian).

20. Image fusion and its applications / Ed. Y. Zheng. USA: InTech, 2011. 242 p. doi: 10.5772/691