

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.03.042>

УДК 528.88:551.435.36

М.В. Артюшенко, О.В. Томченко, Д.Л. Подгорняк

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли

Института геологических наук НАН Украины”, Киев

E-mail: artiushenko_mv84@i.ua

Мультифрактальный анализ морфологических изменений в структуре водных объектов по космическим снимкам

Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А. Д. Федоровским

Приведен статистический метод описания динамики геоморфологических структур водных объектов по космическим снимкам. Метод учитывает мультифрактальные свойства пространственных структур объектов геосистем и ориентирован на автоматизированную обработку изображений по информационным критериям варибельности фрактальных спектров. Выбор информационных критериев для оценки изменений пространственных структур объектов основан на свойствах статистической энтропии Реньи. По космическим снимкам проведен мультифрактальный анализ изменений, которые произошли в структуре береговой линии моря дельты Дуная за 30-летний период.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мультифрактальный анализ, геосистемы, пространственные структуры, энтропия Реньи, дельта Дуная.

Многие задачи космического геомониторинга сводятся к определению изменений, которые происходят за определенный период времени на больших площадях в пространственных структурах природных объектов. Объектами исследований являются части геосистем, элементы которых объединены общими потоками энергии и вещества. Для характеристики динамики структурных изменений объектов необходимо располагать различающими информационными критериями, которые на количественном уровне позволят автоматизировать процесс поиска по космическим снимкам таких изменений, оценить степень перемен и обосновать необходимость проведения детальных исследований с целью предотвращения негативного развития процессов.

Пространственные структуры природных объектов изучаются по взаимному расположению их компонентов в пространстве. Сложные геометрические формы исследуемых объектов, которыми могут быть эрозионные и речные ветвящиеся сети, береговые линии, устьевые области рек, обладают фрактальными свойствами [1, 2]. Формирование пространственных структур в открытых неравновесных системах определяется поступающими из окружающей среды потоками энергии и вещества, изменение баланса которых, наличие диссипативных процессов и самоорганизация приводят к структурным перестройкам, что

© М.В. Артюшенко, О.В. Томченко, Д.Л. Подгорняк, 2017

отражается в изменениях фрактальных свойств объектов [3]. Пространственное размещение элементов рассматриваемых структур сложно, часто хаотично и подвержено значительным сезонным колебаниям. Для проведения пространственного структурного анализа необходимо рассматривать все множество элементов структуры одновременно. Космические снимки содержат геометрические образы объектов геосистем, и, в соответствии с размерами элементов разрешения (пикселей), передают их пространственную структуру.

Морфологические особенности многих природных объектов характеризуются не только фрактальными свойствами, но и мультифрактальными структурами, параметры которых определяются путем статистического мультифрактального анализа по космическим снимкам. Техника проведения такого анализа достаточно универсальна и, при различных модификациях, может быть использована не только для характеристики изменений в геометрических формах объектов, но и для определений структурных изменений в экологических сообществах [4]. Основы теории мультифрактальных мер и мультифракталов как раздел фрактальной геометрии были развиты в работах многих ученых и обобщены в монографии [5]. Дальнейшее развитие этой теории и ее успешное применение в исследованиях различных структур физических, экологических, социальных, информационных систем связано с обобщением универсальных свойств статистической энтропии Реньи [6], которая заложена в основу мультифрактального анализа.

Целью настоящей работы является вывод и обоснование информационных критериев структурных гидроморфологических изменений в системах природных объектов по данным космического мониторинга. Методы вычислений критериев рассматриваются на примере мультифрактального анализа динамики береговой линии моря дельты Дуная.

Анализ структур по снимкам предусматривает предварительную кластеризацию элементов (пикселей) изображения, полученных с космических аппаратов. Для определения изменений, которые произошли за 30 лет в структуре береговой линии моря дельты, проводится мультифрактальный анализ соответствующих фрагментов* изображений (рис. 1), представленных на двух многоспектральных снимках с космических аппаратов Landsat-5 (08 июля 1985 г., сенсор ТМ — Thematic Mapper) и Landsat-8 (20 июля 2015 г., сенсор OLI — Operational Land Imager). Для снимков выполняется стандартная процедура геометрической коррекции. Размер проекции квадратного пикселя изображения на земную поверхность 30 м. Бинарная сегментация данных соответствующих фрагментов цифровых многоспектральных изображений, которая позволяет разбить фрагменты на два класса — водную поверхность и сушу, выполняется по значениям нормализованного водного индекса *NWI* (*Normalized Water Index*) — нормированная разность показаний зеленого (*Green*) и среднего инфракрасного (*Swir*) каналов сенсора

$$NWI = (Green - Swir) / (Green + Swir).$$

Интервалы диапазонов длины электромагнитных волн каналов сенсора ТМ:

$$Green - [0,525; 0,600] \text{ мкм}, Swir - [1,560; 1,660] \text{ мкм}.$$

Линия, разделяющая два класса на изображениях, соответствует береговой линии, построенной на решетке пикселей (рис. 2, а).

* Фрагменты являются образами одной и той же географической области.

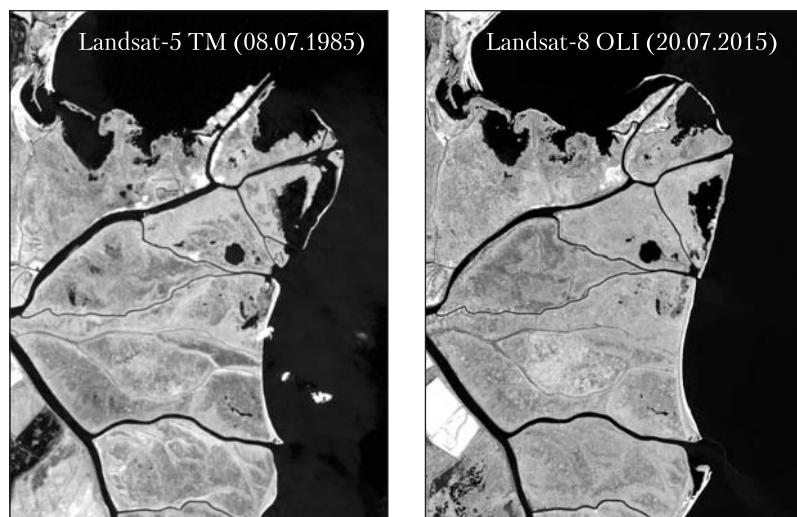
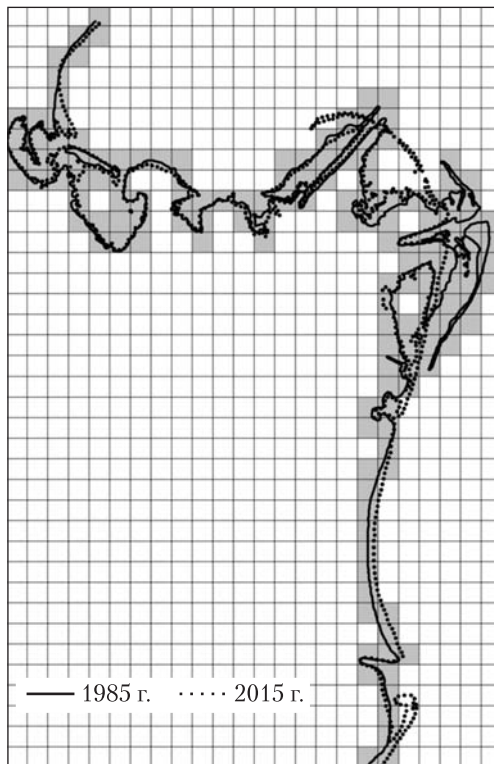
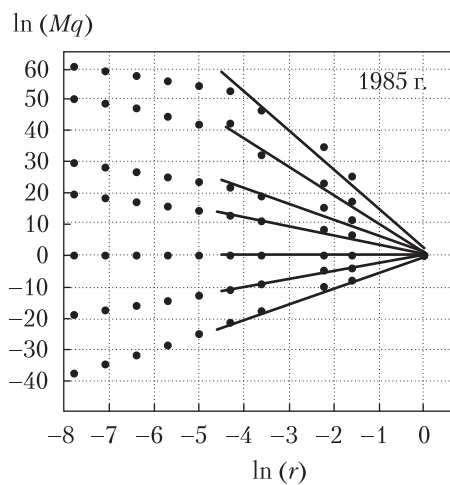


Рис. 1. Космические снимки морской области дельты Дуная



a

Рис. 2. Анализ динамики береговой линии моря дельты Дуная: *a* – схема береговой линии моря устьевой области Дуная по снимкам 1985 г. (Landsat-5 TM), 2015 г. (Landsat-8 OLI); *б* – графики функции $M(q,r)$ в билогарифмических координатах для изображения 1985 г. при значениях $q = \{-5, -4, -2, -1, +1, +3, +5\}$ (отсчет значений q сверху вниз)



б

Оценка геометрической структуры береговой линии выполняется статистическими методами мультифрактального анализа. Изображение вкладывается в минимальную квадратную область, размер стороны которой принимается за единицу. Область разбивается на квадратные клетки размером r , выраженным в долях 1. Распределение пикселей береговой линии в каждой занятой i -й клетке $i = 1, 2, \dots, N(r)$ характеризуется набором чисел $k_i(r)$, который показывает, сколько пикселей находится в i -й клетке. Суммарное количество занятых клеток $N(r)$ зависит от размера клетки r . Мерой (вероятностной) содержимого i -й клетки есть часть $p_i(r)$ от общего числа L пикселей во всех клетках:

$$p_i(r) = \frac{k_i(r)}{L}, \quad \sum_{i=1}^{N(r)} p_i(r) = 1.$$

Полный набор $\{p_i(r)\}_{i=1}^{N(r)}$ при минимальном значении r дает описание распределения пикселей береговой линии по фрагменту изображения. Однако если статистическая сумма, которая вводится в рассмотрение, $M(q, r)$, $-\infty < q < \infty$, $q \in R$, связана с размером r степенной зависимостью (1) или линейной зависимостью (2) в билогарифмических координатах:

$$M(q, r) = \sum_{i=1}^{N(r)} p_i^q(r) = c(q) r^{-\tau(q)}, \quad (1)$$

$$\ln(M_q(r)) = \ln(c(q)) - \tau(q) \ln(r), \quad (2)$$

то о таком распределении можно узнать гораздо больше, проведя для этого мультифрактальный анализ его структуры. Из выражения (2) определяется функция масштабных инвариантов $\tau(q)$, зависящая только от степени q и независящая от размера клетки r , а также определяются размерности Реньи $D(q)$ мультифрактальной структуры:

$$\tau(q) = -\lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\ln(M(q, r))}{\ln(r)} \right], \quad D_q = \frac{\tau(q)}{1-q}. \quad (3)$$

Наличие мультифрактальной структуры предусматривает выполнение двух условий: 1) степенной зависимости статистической суммы (1) от размера клетки r для каждого значения показателя степени q ; 2) размерности Реньи есть невозрастающая функция степени q , $D_q \geq D_{q'}$ для $q' > q$.

На рис. 2, а приведена схема динамики исследуемой области береговой линии моря дельты Дуная, полученная в результате дешифрирования по методу *NWI* космических снимков 1985 и 2015 гг. На схему нанесена сетка с размером квадратной клетки на земной поверхности 640 м. На рис 2, б построены графики зависимости статистической суммы $M_q(r)$, вычисленной в билогарифмических координатах, для десяти размеров клеток $r = \{r_j\}_{j=1}^{10}$ при различных значениях степенного параметра q .

В области отрицательных показателей $q < 0$ графики в билогарифмических координатах демонстрируют кусочно-линейную зависимость, что не гарантирует выполнение условий 1, 2 мультифрактальной структуры во всем диапазоне изменения размеров клеток r . Эти два условия одновременно выполняются для размеров $\{r_6 = 1/37, r_7, \dots, r_{10} = 1\}$, и по координатам этих пяти точек проведена прямая линейной регрессии (см. рис. 2, б). С целью повышения точности вычислений как элементы структуры выбирались доли пикселей. Для

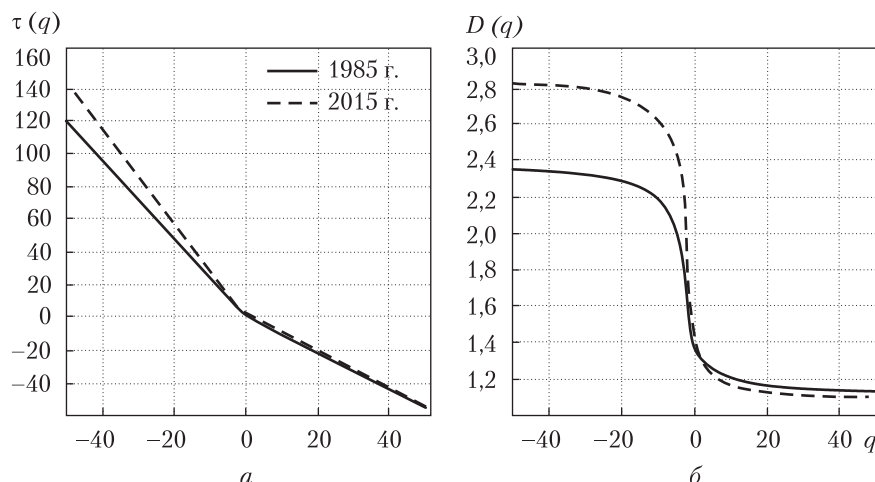


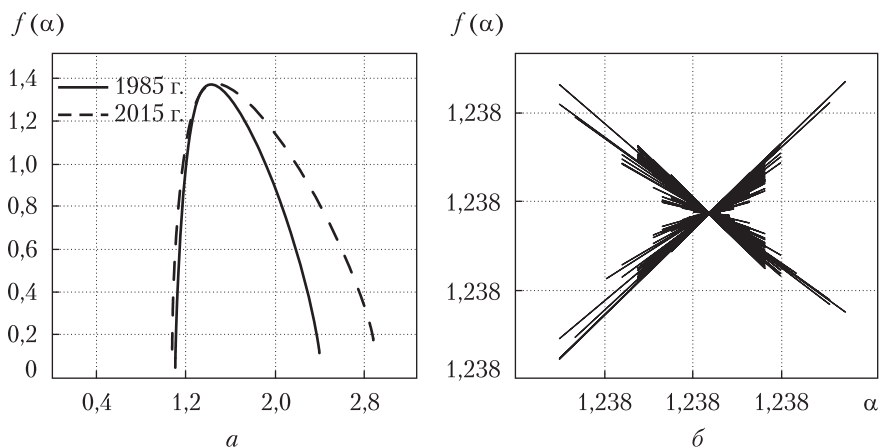
Рис. 3. Графическое представление результатов мультифрактального анализа изображений 1985 и 2015 гг. береговой линии моря дельты Дуная: а – графики функций $\tau(q)$; б – спектры размерностей Реньи структуры береговой линии 1985 и 2015 гг.

этого пиксель размером 30 м разбивался на шесть частей размером 5 м каждая и подсчитывалось количество пятиметровых частей пикселей в каждой клетке. Следует отметить следующее свойство статистической суммы $M(q, r)$, определяемой выражением (1): выбор больших значений $q \gg 1$ способствует повышению вклада ячеек с большими значениями p_i в статистическую сумму, а выбор значений $q \ll 1$ повышает вклад ячеек с относительно малыми значениями p_i . В зависимости от значения степени q логарифм статистической суммы $\ln(M(q, r))$ принимает значения разных знаков.

На рис. 3 в графическом виде приведены результаты последующего мультифрактального анализа изображений береговой линии. На рис. 3, а построены графики функций $\tau(q)$, вычисленные согласно соотношению (3) для значений $-50 \leq q \leq 50$ с шагом $h_q = 0,1$ как угловые коэффициенты прямых линейной регрессии (см. рис. 2, б). Степенной параметр $\tau(q)$ выражения (1) является функциональным инвариантом масштабных изменений размера r клеток. На рис. 3, б изображены графики функций размерностей Реньи D_q (обобщенных фрактальных размерностей) мультифрактальной структуры. Графики построены на основании выполненных вычислений по формулам (3) для снимков 1985 г. и 2015 г. Сложная структура береговой линии описывается спектром значений размерностей Реньи. Размерность D_0 соответствует хаусдорфовой дробной размерности береговой линии. Из соотношений (1), (3) для $q = 0$ выводится равенство $M(0, r) = N(r) \propto r^{-\tau(0)} = r^{-D_0}$, которое определяет фрактальную размерность береговой линии. Вычисленная по космическим снимкам фрактальная размерность береговой линии моря дельты в 1985 г. составила $D_0 = 1,37$ и не изменилась в 2015 г. Эта размерность Реньи соответствует хаусдорфовой размерности, однако она является наиболее грубой характеристикой, которая определяет размерность носителя (support) мультифрактального множества, но не определяет его структуру. Для оценки структурных изменений, произошедших за исследуемый период времени, следует сравнить спектры размерностей D_q (см. рис. 3, б) и, в случае наличия существенных различий выполнить детальный анализ гидрологических изменений области.

За исключением размерности Реньи D_0 остальные размерности D_q , в терминах которых построена мультифрактальная модель, не являются хаусдорфовыми. В силу этого для них используются термины “обобщенные фрактальные размерности”, “размерности Реньи”.

Рис. 4. Мультифрактальные спектры морфологической структуры береговой линии моря дельты Дуная: *а* — спектры построены по снимкам 1985 и 2015 гг.; *б* — стянутый в точку модельный мультифрактальный спектр структуры однородного распределения



Для того чтобы привести размерности Реньи к фрактальным размерностям мультифрактала, сопоставимым с размерностями Хаусдорфа, используется функция мультифрактального спектра $f(\alpha)$. Значения этой функции равны фрактальным (хаусдорфовым) размерностям отдельных фрагментов мультифрактала. Функция мультифрактального спектра $f(\alpha)$ определяется с помощью преобразования Лежандра по найденным из соотношений (3) значениям функции $\tau(q)$. Пара уравнений задает преобразование Лежандра

$$\alpha(q) = -\frac{d}{dq}\tau(q), \quad f(\alpha(q)) = q\alpha(q) + \tau(q) \quad (4)$$

от независимых переменных τ и q к независимым переменным f и α . На рис. 4 приведены графики мультифрактальных спектров морфологической структуры береговой линии моря дельты Дуная, которые получены применением преобразований (4) к численным значениям функции $\tau(q)$. Функция мультифрактального спектра $f(\alpha)$ является спектром сингулярностей мультифрактальной морфологической структуры береговой линии моря. Следовательно, морфологическая структура представлена объединением различных фрагментов, каждый из которых имеет свое единственное значение фрактальной размерности $f(\alpha)$ с показателем Липшица—Гёльдера α .

В силу преобразований Лежандра графики функций размерностей Реньи D_q (см. рис. 3, б) и мультифрактальный спектр $f(\alpha)$ (см. рис. 4, а) береговой линии сопоставимы между собой. Неотрицательная функция спектра сингулярностей $f(\alpha)$ имеет максимальное значение в точке $\alpha = 0 = \alpha_0$ и в этой точке перегиба графика $f(\alpha_0) = D_0$ совпадает с размерностью носителя мультифрактального множества. Правая ветвь мультифрактального спектра (см. рис. 4, а) соответствует отрицательным значениям q . Именно в этой области графиков размерностей Реньи и мультифрактальных спектров береговой линии 1985 г. и 2015 г. фиксируется значительное информационное различие. Вид правой части мультифрактального спектра определяется тем, что при больших отрицательных значениях q подавляющий вклад в статистическую сумму $M(q, r)$ вносят ячейки с малой относительной численностью пикселей p_i . Применительно к рассматриваемому примеру это означает, что структура береговой линии 2015 г. стала менее изломанной.

Связь мультифрактального анализа с современными методами статистической термодинамики открытых систем устанавливается через формулу энтропии Реньи, которая обобщается на отрицательные значения степени q :

$$H_q^{(R)} = \frac{1}{1-q} \ln \sum_{i=1}^N p_i^q, \quad \sum_{i=1}^N p_i = 1, \quad -\infty < q < \infty. \quad (5)$$

Размерности Реньи (3) мультифрактальной структуры выражаются через обобщенную энтропию Реньи

$$D_q = - \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{H_q^{(R)}}{\ln(r)} \right].$$

При $q = 1$ в силу условия нормировки вероятностей p_i логарифм статистической суммы в числителе формулы (5) энтропии Реньи равен 0. В этом случае в записи (5) возникает неопределенность, раскрытие которой приводит к формуле информационной энтропии Шеннона (Гиббса—Шеннона с точностью до постоянного множителя)

$$H^{(Sh)} = - \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i.$$

Максимальное значение энтропии Шеннона обеспечивается однородным распределением элементов (пикселей) по клеткам, на которые разбито анализируемое изображение береговой линии. В этом случае все вероятности p_i также равны между собой, мультифрактальный спектр стягивается в одну точку (см. рис. 4, б), а функция размерностей Реньи D_q (3) не зависит от q и ее график (см. рис. 3, б) вырождается в прямую линию, параллельную оси абсцисс.

Рассмотренные свойства спектров позволяют ввести две меры неоднородности мультифрактальной структуры, которые определяются как вариабельность (размах изменчивости) спектров: вариабельность спектра размерностей Реньи $\delta^{(R)} = D_{-\infty} - D_{\infty}$, вариабельность мультифрактального спектра $\delta = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$. На практике вычисление спектров проводится в интервале достаточно малых и больших значений q . На основе введенных мер ($\delta^{(R)}$ и δ), которые следует рассматривать как индексы вариабельности мультифрактальных структур геосистем, строятся два информационных критерия динамики вариабельности ($\Delta^{(R)}(\zeta)$, $\Delta(\zeta)$) структурных гидроморфологических изменений объекта за время $\zeta = t_2 - t_1$:

$$\Delta^{(R)}(\zeta) = \delta^{(R)}(t_2) - \delta^{(R)}(t_1), \quad \Delta(\zeta) = \delta(t_2) - \delta(t_1).$$

Для рассматриваемого примера динамики структурных изменений береговой линии (моря) дельты Дуная определяются следующие значения информационных критериев вариабельности за 30 лет. По критерию $\Delta^{(R)}(\zeta)$:

$$\delta^{(R)}(2015) = D_{-50} - D_{50} = 2,828 - 1,099 = 1,729; \quad \delta^{(R)}(1985) = 2,354 - 1,129 = 1,225;$$

$$\Delta^{(R)}(30) = \delta^{(R)}(2015) - \delta^{(R)}(1985) = 1,729 - 1,225 = 0,504.$$

Аналогично выполняется расчет по критерию динамики вариабельности $\Delta(\zeta)$:

$$\delta(2015) = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} = 2,881 - 1,079 = 1,802; \quad \delta(1985) = 2,398 - 1,107 = 1,291;$$

$$\Delta(30) = \delta(2015) - \delta(1985) = 1,802 - 1,291 = 0,511.$$

В процентном отношении за 30 лет вариабельность структуры изменилась по критерию $\Delta^{(R)}(\zeta)$: $0,5041 \cdot 100 / 1,225 \approx 41\%$, более чем на 41 %, по критерию $\Delta(\zeta)$: $0,511 \cdot 100 / 1,291 \approx 40\%$.

Таким образом, введенные информационные критерии динамики вариабельности гидроморфологических структур в автоматизированном режиме по космическим изображениям фиксируют значительные структурные изменения морского края дельты Дуная. Для верификации критериев обратимся к результатам детального гидрологического исследования динамики дельты Дуная [7]. Приведенные в этой работе результаты подтверждают значительные гидрологические и морфологические изменения морского края дельты. Делается вывод о том, что водные объекты устьевой области гидравлически и морфологически связаны друг с другом. Поэтому естественные и антропогенные изменения в какой-либо одной устьевой части области передаются на всю систему. Среди природных факторов отмечается глобальное потепление климата, увеличение стока воды Дуная, неуклонное повышение уровня Черного моря. Дальнейшие исследования показывают, что наиболее существенной причиной наблюдаемых изменений являются проводимые в последнее время разнообразные гидротехнические мероприятия, в частности, в Сулинском и Георгиевском каналах, в результате чего произошло искусственное перераспределение водного баланса в пользу румынских рукавов реки. Уменьшение стока Килийского рукава приводит к деградации украинской части дельты Дуная, падению уровня воды в придунайских озерах. Наблюдается негативное воздействие на все составляющие литосферы, гидросферы и биосферы прилегающих территорий, меняются геодинамические условия и рельеф, режим подземных вод, климат, почвы, растительный и животный мир.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Л.Н., Тюфлин А.С. Фрактальность пространственных структур геосистем. *Исследования Земли из космоса*. 1991. № 1. С. 44–52.
2. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: Freeman, 1982. 468 p.
3. Bak P. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Copernicus, 1996. 207 p.
4. Артюшенко М.В., Зуб Л.Н., Подгородецкая Л.В., Федоровский А.Д. Мультифрактальный анализ био-разнообразия и ценотической структуры сообщества растений по данным дистанционного зондирования. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2011. № 9. С. 132–141.
5. Федер Е. Фракталы. Москва: Мир, 1991. 254 с.
6. Башкиров А.Г., Витязев А.В. Энтропия Реньи и степенные распределения в естественных и гуманитарных науках. *Докл. АН.* 2007. **412**, № 4. С. 476–479.
7. Гидрология дельты Дуная. В.Н. Михайлов (ред.). Москва: ГЕОС, 2004. 448 с.

Поступило в редакцию 29.06.2016

REFERENCES

1. Vasilyev, L. N. & Tyufin, A. S. (1991). Fractal spatial structures of geosystems. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, No. 1, pp. 44-52 (in Russian).
2. Mandelbrot, B. B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. New York: Freeman.
3. Bak, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Copernicus.
4. Artiushenko, M. V., Zub, L. N., Pidgorodetska, L. V. & Fedorovsky, A. D. (2011). Multifractal analysis of the biodiversity and the cenotic structure of a community of plants by remote sensing data. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 9, pp. 132-141 (in Russian).
5. Feder, J. (1988). *Fractals*. New York: Plenum Press.

6. Bashkirov, A. G. & Vityasev, A. V. (2007). Renyi entropy and power-law distributions in natural and humanitarian sciences. Dokl. AN, 412, No. 4, pp. 476-479 (in Russian).
7. Mikhailov, V. N. (Ed.) (2004). Hydrology of the Danube Delta. Moscow: GEOS (in Russian).

Received 29.06.2016

М.В. Артюшенко, О.В. Томченко, Д.Л. Підгорняк

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України”, Київ
E-mail: artiusenko_mv84@i.ua

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОРФОЛОГІЧНИХ ЗМІН У СТРУКТУРІ ВОДНИХ ОБ’ЄКТІВ ЗА КОСМІЧНИМИ ЗНІМКАМИ

Наведено статистичний метод опису динаміки геоморфологічних структур водних об’єктів за космічними знімками. Метод враховує мультифрактальні властивості просторових структур об’єктів геосистем і орієнтований на автоматизовану обробку зображень за інформаційними критеріями варіабельності фрактальних спектрів. Обґрунтування вибору інформаційних критеріїв для оцінки змін просторових структур об’єктів базується на властивостях статистичної ентропії Реньї. За космічними знімками проведено мультифрактальний аналіз змін, які відбулися в структурі берегової лінії моря дельти Дунаю за 30-річний період.

Ключові слова: дистанційне зондування, мультифрактальний аналіз, геосистеми, просторові структури, ентропія Реньї, дельта Дунаю.

M.V. Artiushenko, O.V. Tomchenko, D.L. Pidgorniak

Scientific Center for Aerospace Research of the Earth
of the Institute of Geological Science of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: artiusenko_mv84@i.ua

MULTIFRACTAL ANALYSIS OF MORPHOLOGICAL CHANGES IN WATER BODIES' STRUCTURE BY MEANS OF THE SATELLITE IMAGERY PROCESSING

A statistical method of description of the dynamics of water bodies' geomorphic structures with the use of satellite images is proposed. The method involves the multifractal properties of geosystem objects' spatial structures and is focused on the automated imagery processing, by using the information criteria of fractal spectra variability. The selection of information criteria to assess changes in object's spatial structure is based on properties of the statistical Renyi entropy. By means of the remote sensing, the multifractal analysis of changes that occurred in the sea part of Danube's delta coastline structure for a 30-year period is made.

Keywords: remote sensing, multifractal analysis, geosystems, spatial structures, Renyi entropy, Danube delta.