

Мультифрактальный спектр структуры вариационных рядов наблюдений для интерпретации зонирования территории урбоэкосистемы

© 2022. Ю. А. Тунакова¹, д. х. н., профессор, зав. кафедрой,
С. В. Новикова¹, д. т. н., профессор,
А. Р. Шагидуллин², к. ф.-м. н., с. н. с., В. С. Валиев², с. н. с.,

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева (КАИ),

420126, Россия, г. Казань, ул. Четаева, д. 18,

²Институт проблем экологии и недропользования АН РТ,
420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, д. 28,

e-mail: juliaprof@mail.ru

Использование традиционных методов анализа массива данных наблюдений за изменчивостью содержания загрязняющих веществ (ЗВ) в компонентах урбоэкосистемы не позволяет определить её степень устойчивости. Оценка состояния урбоэкосистемы, как сложной неравновесной системы, возможна с использованием мультифрактальных спектров системы. Предложен подход для экспертной оценки результатов зонирования территорий по уровню загрязнения атмосферного воздуха с использованием мультифрактального анализа, который позволяет выявлять структурные различия с интегральной визуализацией состояний кластеров. Отдалённость мультифрактальных спектров, построенных для разных уровней загрязнения атмосферного воздуха, от критических значений свидетельствует о достаточно устойчивом состоянии урбоэкосистемы, и наоборот. Исследования проводились на территории крупного промышленного центра г. Нижнекамска и предварялись кластерным анализом массивов данных наблюдений за содержанием приоритетных для контроля ЗВ в атмосферном воздухе. Реализована нейросетевая кластеризация с определением степени разбиения данных на кластеры по авторской методике нейросетевой фильтрации. Оценивалось превышение концентраций ЗВ над их пороговыми содержаниями – медианами ранжированного ряда значений. Расчёт мультифрактальных спектров наборов данных и их сопоставление по кластерам показывает, что в кластере 0 сильнее выражена изменчивость содержаний ЗВ. Структуры спектров кластеров 1 и 2 свидетельствует о большем влиянии дестабилизирующих систему факторов и фиксируют начало перехода системы на новый структурный уровень. Таким образом, баланс исследуемой системы находится в динамическом равновесии между состояниями зафиксированными кластерами 1 и 2, при этом вектор развития системы в целом может изменяться и быть направлен как в сторону структурных характеристик кластера 1, так и в сторону изменчивости, охваченной кластером 2. Расчёт и анализ мультифрактальных спектров компонента урбоэкосистемы позволяют оценить структурную устойчивость и степень динамической сбалансированности урбоэкосистемы в целом.

Ключевые слова: атмосферный воздух, загрязняющие вещества, зонирование территории, кластерный анализ, мультифрактальный анализ.

Multifractal spectrum structure of variation series of observations to interpret the zoning of the territory of urban ecosystems

© 2022. Y. A. Tunakova¹ ORCID: 0000-0002-8826-8639, S. V. Novikova¹ ORCID: 0000-0001-8207-1010,
A. R. Shagidullin² ORCID: 0000-0003-3837-6110, V. S. Valiev² ORCID: 0000-0002-8848-5326,

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,
18, Chetaeva St., Kazan, Russia, 420126,

²Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use
of Tatarstan Academy of Sciences,

28, Dauruskaya St., Kazan, Russia, 420087,
e-mail: juliaprof@mail.ru

The use of traditional methods of analysis of the array of observation data on the variability of pollutant content in the components of the urban ecosystem does not allow us to determine its degree of stability. Broad assessments of the state of urban ecosystem as a complex nonequilibrium system are possible with the assessment of multifractal spectra of the system. The approach for expert estimation of the results of zoning of territories on the level of atmospheric air

pollution using multifractal analysis, which allows to reveal structural differences with integral visualization of the cluster states, is offered. The distance of multifractal spectra constructed for different levels of atmospheric air pollution from critical values indicates a sufficiently stable state of urban ecosystem, and vice versa. The research was conducted on the territory of a large industrial center of Nizhnekamsk and was preceded by a cluster analysis of observational data arrays for the content of pollutants of priority for control in the atmospheric air. The neural network clustering with the determination of the degree of data partitioning into clusters by the author's technique of neural network filtering was implemented. The excess of pollutant concentrations over their threshold contents – medians of the ranked series of values was evaluated. Calculation of multifractal spectra of data sets and their comparison by clusters shows that in cluster 0 the variability of pollutant contents is more pronounced. The structures of the spectra of clusters 1 and 2 testify to a greater influence of the factors destabilizing the system and fix the beginning of the transition of the system to a new structural level. Thus, the balance of the system under study is in dynamic equilibrium between the states fixed by clusters 1 and 2, while the vector of development of the system as a whole can change and be directed both towards the structural characteristics of cluster 1 and towards the variability covered by cluster 2. Calculation and analysis of multifractal spectra of the urban ecosystem component allows us to assess the structural stability and the degree of dynamic balance of the urban ecosystem as a whole.

Keywords: atmospheric air, pollutants, area zoning, cluster analysis, multifractal analysis.

Поступление загрязняющих веществ (ЗВ) с масштабными, многокомпонентными, отличающимися по параметрам выбросами на территорию урбоэкосистемы является доминирующим, характеризующим интенсивность антропогенного воздействия фактором. Оценка уровня загрязнённости атмосферного воздуха проводится на основании ежедневных результатов наблюдений на участках пробоотбора с формированием массива данных. Соответственно, результаты оценки чувствительны к объёму взятой выборки данных, так как только на достаточно большом числе наблюдений можно получить репрезентативное представление структурных вариантов. С другой стороны, очевидно, что доля наблюдений, соответствующих тому или иному варианту, всегда взаимосвязана с долями наблюдений всех прочих вариантов, так как представлена относительно их общего числа, а сумма всех долей равна 1.

В связи с этим изменчивость структуры распределения долей разных вариантов сводится к выяснению зависимости числа таких вариантов от размера общей выборки данных и от величины расхождения значений долей различных вариантов друг от друга. Иначе говоря, увеличение общего числа наблюдений (особенно связанное с увеличением площади обследованной территории), способно увеличить число возможных вариантов содержания ЗВ как в сторону увеличения, так и в сторону снижения их концентраций. Совокупность вариантов формирует структуру изменчивости этого содержания, проявляющую в определённых диапазонах значений объёма выборки свойства фрактала. Изменчивость той или иной структуры может быть представлена в виде оценки отдельных фрактальных размерностей наблюдаемых распределений и в форме их мультифрактальных спектров [1–3].

Фрактальное представление структуры распределения данных представляет собой её образ, воспроизводящийся до тех пор, пока рассматриваемая система продолжает находиться в условиях, обеспечивающих формирование этой структуры. Системы, находящиеся в схожих условиях, представлены схожими фрактальными размерностями, и наоборот. Это обстоятельство позволяет использовать фрактальные размерности различных структур для определения их схожести. Следует отметить, что теоретические основы и алгоритмы расчёта мультифрактальных спектров известны достаточно давно и с успехом применяются во многих сферах, предоставляя мощный инструмент для понимания нелинейной динамики сложных процессов.

В частности методология практического применения фракталов и мультифрактальных спектров была подробно рассмотрена применительно к оценке структуры экологических сообществ [1, 2, 4, 5], при изучении климатических факторов [6], в медицине и физиологии [7–13], при оценке загрязнения объектов окружающей среды [14, 15] и во многих других областях [16, 17].

Фрактальность распределения концентраций ЗВ в массиве данных наблюдений отражает его структурную гетерогенность, при этом изменение условий, формирующих загрязнение, приведёт и к изменению структуры, что, в свою очередь, сопровождается изменением её мультифрактального спектра. Наличие фрактальности в распределении указывает на устойчивую динамику системы. Фрактальность разрушается при одинаковой представленности всех вариантов, наличии только одного варианта, а также при критическом снижении числа наблюдений.

Подобный подход широко используется в последнее время при оценке изменчивости

временных рядов данных, например, мультифрактальный анализ колебаний без тренда, вскрывающий временную динамику фрактальной размерности структуры [13–14]. Вместе с этим сопоставление мультифрактальных спектров оказывается полезным и при оценке отдельных частей системы, а также различных фиксированных её состояний [11, 17].

Целью работы являлось получение и анализ мультифрактальных спектров различных структур распределения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе крупного промышленного города для экспертной оценки результатов зонирования территории методами кластерного анализа и оценки устойчивости урбоэкосистемы.

Объекты и методы исследования

Выделение отдельных групп данных, осуществляющееся в результате их кластеризации, как правило, сопровождается экспертной оценкой, верифицирующей качество этого выделения. При этом возникают задачи сопоставления выделенных подмножеств друг с другом, выяснения степени их структурной неоднородности, при оценках уровня загрязнения территории, ранжировании полученных зон по степени воздействия совокупности разноразмерных факторов с различной степенью значимости.

По нашему мнению, использование мультифрактального анализа оптимально решает задачу оценки структурной неоднородности, позволяя оценить степень её сбалансированности, а в том случае, если оценивается уровень загрязнения компонента урбоэкосистемы – атмосферного воздуха, определить соотношение случая и закономерности при формировании загрязнения.

При оценке изменчивости структуры загрязнения природных сред или объектов матрица структурных вариантов в простейшем случае состоит из: 1) числа возможных вариантов S , равного числу определяемых показателей, для которых установлен порог, например, содержание в воздухе отдельных примесей; 2) числа показателей в каждом образце S_n , по которым отмечено превышение порога; 3) общего числа наблюдений с превышением по всем образцам N .

Разнообразие структурных вариантов, а значит, и чувствительность метода оценки обеспечивается размером фрактальной ячейки – сопоставлением кратности превышения с разными порядками пороговых концентраций –

1; 0,5; 0,1 и т. д. В нашем исследовании размер ячейки подбирали отдельно для каждого вещества, он был равен соответствующим медианам ранжированных рядов кратностей превышения этих веществ. Полученные по каждому веществу количества превышений заданного для них порога выстраивались в ряд, для которого и строился мультифрактальный спектр.

При равной частоте превышений по всем показателям спектр свёртывается в точку, стремящуюся к началу координат. Таким образом, фрактал возникает при появлении структуры, отражающей изменчивость уровня загрязнения, и исчезает, когда эта изменчивость сглаживается. При этом для построения мультифрактального спектра совершенно неважно число анализируемых факторов, типы данных, которыми они представлены, или их размерность. Необходимо только сопоставить значения каждого фактора с их пороговыми значениями.

Исследования проводили на территории г. Нижнекамска. Сформированная урбоэкосистема на территории данного города, вследствие высокой антропогенной нагрузки стационарных источников выбросов предприятий химической и нефтехимической промышленности, является типичной для целого ряда урбоэкосистем восточной части Российской Федерации (города Стерлитамак, Дзержинск, Сызрань, Новокуйбышевск, Соликамск и др.), что делает актуальным данное исследование. В г. Нижнекамске 98% выбросов осуществляют предприятия Нижнекамского промышленного узла, находящегося в южно-восточной части города.

Результаты и обсуждение

В рамках исследования был рассмотрен массив данных измерений в атмосферном воздухе г. Нижнекамска на участках наблюдений за содержанием восьми ЗВ: оксида и диоксида азота, аммиака, оксида углерода, диоксида серы, сероводорода, толуола и суммарной концентрации предельных углеводородов (C_1-C_{11}). Экспериментальные измерения концентраций перечисленных ЗВ в воздухе проводили на 17 участках пробоотбора, с 3 повторами в зимний период времени, в условиях относительно ровного фона температур (-16–-7 °C) и слабых ветров (1–2 м/с).

Группирование (зонирование) участков отбора производили методом кластерного анализа на основе SOM-карт с применением авторской методики нейросетевой фильтрации, которая подробно описана в работе

Ю. А. Тунакова, С. В. Новикова, А. Р. Шагидуллин, В. С. Валиев
«Мультифрактальный спектр структуры вариационных рядов
наблюдений для интерпретации зонирования территории
урбоэкосистемы». С. 60

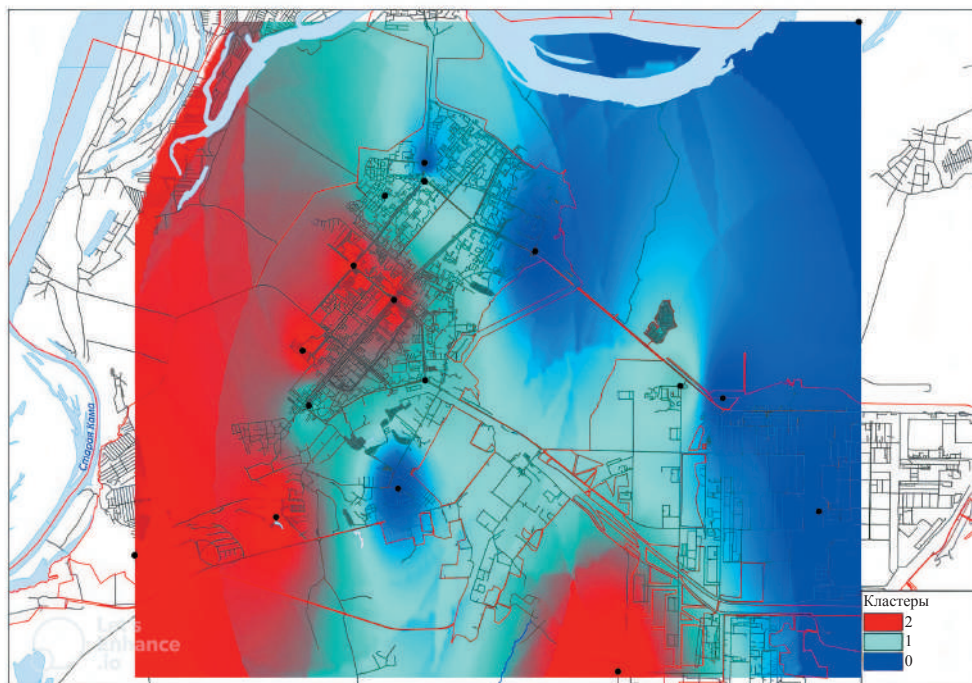


Рис. 1. Расположение участков отбора проб воздуха и группирующих их кластеров
Fig. 1. Location of air sampling plots and their grouping clusters

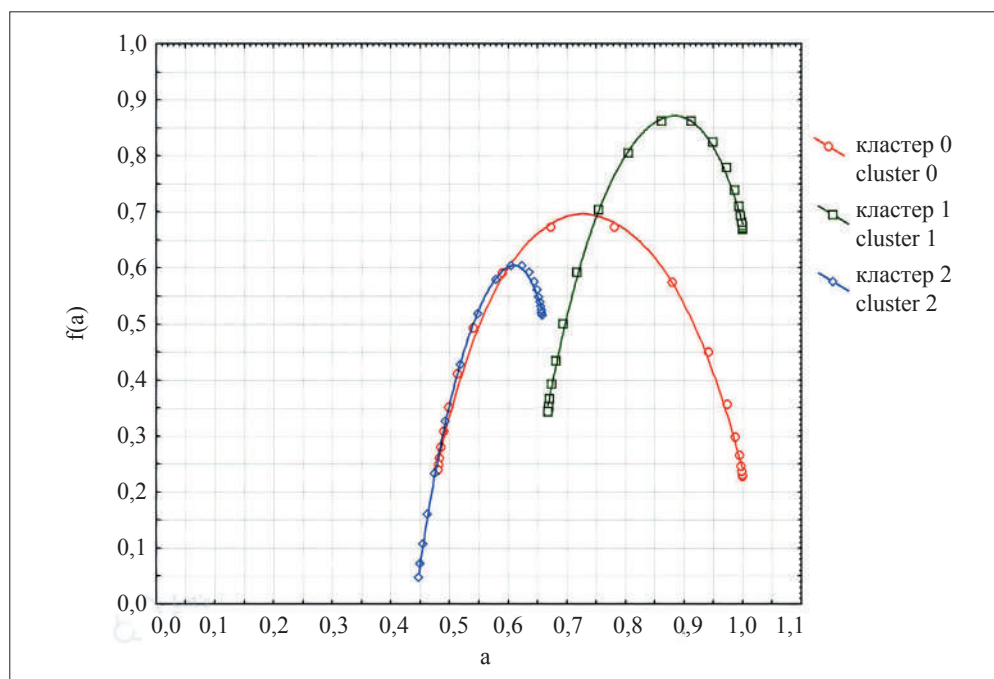


Рис. 2. Мультифрактальные спектры, отражающие структуру распределения данных
в выделенных кластерах
Fig. 2. Multifractal spectra reflecting the structure of data distribution
in selected clusters

[18]. Расчёты и визуализацию выполняли в аналитическом математическом пакете Deductor Studio версии 4.3. В качестве пороговых концентраций при оценке содержания ЗВ использовали среднесуточные значения ПДК_{с.с.}. В результате анализа было сформировано три кластера данных (0, 1 и 2). Визуализация группировки участков пробоотбора по трём территориальным зонам урбоэкосистемы на территории г. Нижнекамска показана на рисунке 1 (см. цв. вкладку I). Сопоставление концентраций ЗВ, относящихся к отдельным выделенным кластерам, с ПДК_{с.с.} показало, что зонирование с помощью нейросетевого каскадного SOM-фильтра на основе карт Кохонена позволяет классифицировать участки территории урбоэкосистемы по уровню загрязнения атмосферного воздуха.

Зона 1 (Кластер 0) включает 5 контрольных участков и характеризуется относительно средним содержанием всех исследуемых ЗВ. Повышенные содержания относительно ПДК в данной зоне отмечены для оксида углерода и оксида азота (в 5 раз).

Зона 2 (Кластер 1) включает 6 участков измерения. В целом содержание ЗВ в данной зоне ниже аналогичных значений в остальных двух зонах. Содержание ЗВ или находится на том же уровне, или повышено (не более чем в 2 раза относительно ПДК_{с.с.} диоксида азота и аммиака).

Зона 3 (Кластер 2) содержит 6 контрольных участков. Повышения содержания ЗВ относительно порогов варьируют от умеренных до ярко выраженных. Значительные превышения ПДК_{с.с.} отмечены по содержанию диоксида серы (в 6 раз) и на некоторых участках – углеводородов (в 4 раза). Характерной чертой кластера можно назвать его неоднородность, присутствуют как участки с самыми высокими, так и самым низкими значениями содержания ЗВ.

В результате сопоставления экспериментальных данных было отмечено, что наиболее благоприятная ситуация складывается на участках наблюдений, объединённых кластером 1, в которых доля высоких концентраций примесей в атмосферном воздухе ниже, чем в кластере 0 и особенно в кластере 2.

Для проверки эффективности мультифрактального анализа для увеличения информативности зонирования территории методом кластерного анализа были получены и исследованы мультифрактальные спектры трёх наборов данных о содержании ЗВ в приземном слое атмосферного воздуха.

Так как кластеры отражают некоторые динамически равновесные состояния, то

мультифрактальные спектры, полученные по наборам экспериментальных данных, входящих в каждый из кластеров, представляют характеристику уравниваемости этих состояний. Расчёт мультифрактальных спектров и их сопоставление указывает на различную структурированность анализируемых рядов в разных кластерах (рис. 2, см. цв. вкладку I). Очевидно, что в кластере 0 ярче выражена изменчивость данных, так как кривая спектра у него самая широкая. В то же время данные в этом кластере имеют наиболее сбалансированную структуру, так как график его спектра симметричен.

В связи с тем, что мультифрактальный спектр кластера 1 выше остальных, структура его данных представлена самым низким разнообразием вариантов, при этом она имеет некоторую асимметрию, однако структурные доминанты отсутствуют, т. е. для данных характерно относительно постоянное, равномерно представленное и небольшое число вариантов.

Мультифрактальный спектр кластера 2 указывает на наличие доминирующих вариантов, так как имеет ярко выраженную левостороннюю асимметрию («хвост», сдвинутый влево). Фрактальная структура данных этого кластера наименее устойчива и характеризует наиболее нестабильное состояние описываемой системы.

Все три спектра указывают на выраженную фрактальность распределения данных в выделенных кластерах, т. е. все структуры данных, рассматриваемые в пределах того или иного кластера, представляют собой фракталы с разной степенью устойчивости. Более выраженные левые части спектров структуры кластеров 1 и 2 указывают на появление преобладающих (доминирующих) по величине вариантов, что свидетельствует о более ярком присутствии в этих кластерах дестабилизирующих систему факторов. Структурная гетерогенность набора содержаний ЗВ в разных кластерах отражает изменение условий, формирующих уровень загрязнения, а наличие фрактальности в распределении указывает на устойчивую динамику системы, при этом кластер 0 является сбалансированной структурной версией двух других состояний системы, а кластеры 1 и 2 фиксируют начало перехода системы на новые, но различные структурные уровни.

Заключение

Мультифрактальный анализ является объективным инструментом экспертной

оценки результатов кластерного анализа, с помощью которого можно рассчитать устойчивость структуры каждого кластера и указать на структурные различия между ними, что необходимо как при решении проблемы количества выделяемых кластеров, так и при составлении характеристики их состояния. Так как кластеры группируют данные, отражая разные состояния урбоэкосистемы, то мультифрактальные спектры можно использовать в виде интегральной визуализации этих состояний.

Расчёт и анализ мультифрактальных спектров позволяет оценить фрактальность и структурную устойчивость того или иного набора данных, а в тех случаях, когда эти данные представляют срез состояния компонента урбоэкосистемы – степень его динамической сбалансированности.

Так как для построения мультифрактальных спектров необходима лишь оценка структуры распределения оцениваемых факторов, а сам анализ не требует приведения данных к общей размерности, оперируя лишь частотными характеристиками представленных событий, то именно мультифрактальный спектр является визуализацией различных зональных совокупностей характеристик, фиксирующих различные пространственно-временные состояния динамического равновесия урбоэкосистемы, формирующейся на территории крупного промышленного центра.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению 075-03-2022-122 от 14 января 2022 г. (номер темы fzsu-2020-0021).

References

1. Rozenberg G.S. Fractal methods of analysis of structure of community // Principy ekologii. 2018. V. 7. No. 4. P. 4–43 (in Russian). doi: 10.15393/j1.art.2018.8406
2. Isaeva V.V., Karetin Yu.A., Chernyshev A.V., Shkuratov D.Yu. Fractals and chaos in biological morphogenesis. Vladivostok: Institute of Marine Biology FEB RAS, 2004. 128 p. (in Russian).
3. Damiani G. Evolutionary meaning, functions and morphogenesis of branching structures in biology // Fractals in Biology and Medicine. 1994. V. 4. P. 104–115.
4. Gelashvili D.B., Iudin D.I., Rozenberg G.S., Solntsev L.A., Yakimov V.N. Multifractal structures in bioecology // Nonlinear world. 2008. V. 6. No. 11–12. P. 697–703 (in Russian).
5. Levich A.P. The structure of ecological communities. Moskva: Publishing House of Moscow State University, 1980. 180 p. (in Russian).
6. Herrera-Grimaldi P., Garcia-Marin A.P., Estevez J. Multifractal analysis of diurnal temperature range over Southern Spain using validated datasets // Chaos. 2019. V. 29. No. 6. Article No. 063105. doi: 10.1063/1.5089810
7. Dutta S., Ghosh D., Chatterjee S. Multifractal detrended fluctuation analysis of human gait diseases // Frontiers in Physiology. 2013. V. 4. Article No. 274. doi: 10.3389/fphys.2013.00274
8. De Souza Santos D., Dos Santos L.C., De Albuquerque Tavares Carvalho A., Leao J.C., Delrieux C., Stosic T., Stosic B. Multifractal spectrum and lacunarity as measures of complexity of osseointegration // Clinical Oral Investigations. 2016. V. 20. No. 6. P. 1271–1278. doi: 10.1007/s00784-015-1606-1
9. Dey P. Multifractal spectrum of chorionic villi: a novel approach // Analytical and Quantitative Cytology and Histology. 2011. V. 33. No. 4. P. 211–214.
10. Fink P.W., Shultz S.P., D'Hondt E., Lenoir M., Hills A.P. Multifractal analysis differentiates postural sway in obese and nonobese children // Motor Control. 2019. V. 23. No. 2. P. 262–271. doi: 10.1123/mc.2016-0085
11. Reyes-Manzano C.F., Lerma C., Echeverria J.C., Martinez-Lavin M., Martinez-Martinez L.A., Infante O., Guzman-Vargas L. Multifractal analysis reveals decreased non-linearity and stronger anticorrelations in heart period fluctuations of fibromyalgia patients // Frontiers in Physiology. 2018. V. 9. Article No. 1118. doi: 10.3389/fphys.2018.01118
12. Makra P., Menyhart A., Bari F., Farkas E. Spectral and multifractal signature of cortical spreading depolarisation in aged rats // Frontiers in Physiology. 2018. V. 9. Article No. 1512. doi: 10.3389/fphys.2018.01512
13. Gadhomi K., Do D., Badilini F., Pelter M.M., Hu X. Wavelet leader multifractal analysis of heart rate variability in atrial fibrillation // Journal of Electrocardiology. 2018. V. 51. No. 6S. P. 83–87. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2018.08.030
14. Dong Q., Wang Y., Li P. Multifractal behavior of an air pollutant time series and the relevance to the predictability // Environmental Pollution. 2017. V. 222. P. 444–457. doi: 10.1016/j.envpol.2016.11.090
15. Xue Y., Pan W., Lu W.Z., He H.D. Multifractal nature of particulate matters (PMs) in Hong Kong urban air // The Science of the Total Environment. 2015. V. 532. P. 744–751. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.065
16. Ihlen E.A. Multifractal analyses of response time series: a comparative study // Behavior Research Methods. 2013. V. 45. No. 4. P. 928–945. doi: 10.3758/s13428-013-0317-2
17. Jaffard S., Seuret S., Wendt H., Leonarduzzi R., Abry P. Multifractal formalisms for multivariate analysis // Proceeding Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2019. V. 475. Article No. 2229. doi: 10.1098/rspa.2019.0150
18. Tunakova Y.A., Novikova S.V., Shagidullin A.R., Valiev V.S., Morais A.J. Approaches for evaluation and quality management of urban ecosystem components using neural network modeling methods // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 31–36 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-031-036