

УДК 519.246.8:616-072.7

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛЕЧЕНИЯ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ

Статья поступила в редакцию 10.07.2014, в окончательном варианте 03.09.2014.

Борисов Василий Ильич, аспирант, Уральский федеральный университет имени Первого президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, e-mail: vi.borisov.official@gmail.com

Кубланов Владимир Семенович, доктор технических наук, профессор, Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, e-mail: kublanov@mail.ru

Целью данной работы являлась оценка информативности и эффективности применения мультифрактального формализма и методов нечеткой логики при анализе временных рядов variability сердечного ритма. Эти ряды были получены в ходе коротких (пятиминутных) функциональных исследований, проведенных с целью идентификации пациентов, принадлежащих к группам разного нозологического статуса. В ходе исследований были использованы: метод мультифрактального флуктуационного анализа; теория нечетких множеств; пакет прикладных программ *MATLAB*.

Полученные результаты значений ширины мультифрактального спектра двух функциональных состояний (нозологических статусов) пациентов анализировались с помощью алгоритма нечеткой кластеризации. Изменения центров кластеров позволяют идентифицировать отличия нозологических статусов пациентов на основе данных для рядов variability сердечного ритма, полученных при выполнении пассивной ортостатической пробы. Эти нозологические статусы соответствуют характеристикам здоровых и больных пациентов II–III степени артериальной гипертензии, у которых наблюдается клинически доказанное улучшение состояния после прохождения курса лечения.

Ключевые слова: биомедицинские сигналы, анализ variability сердечного ритма, методы нелинейной динамики, методы нечеткой логики, временные ряды, мультифрактальный анализ, алгоритм нечеткой кластеризации, результаты функциональных исследований

USING MULTIFRACTAL ANALYSIS OF SHORT-TERM OBJECTIVES OF HEART RATE VARIABILITY IN THE TREATMENT OF HYPERTENSION

Borisov Vasily I., postgraduate student, Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 ul. Mira, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation, e-mail: vi.borisov.official@gmail.com

Kublanov Vladimir Semenovich, D.Sc. (Engineering), Professor, Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Russian Federation, Yekaterinburg, Mira St., 19, e-mail: kublanov@mail.ru

The object of this article is to study the informativeness and efficiency of the multifractal formalism and methods of fuzzy logic in the analysis of time series of heart rate variability. These series were obtained for during short-term (five-minute) functional studies to identify patients belonging to the groups of different nosological status. The studies were used: the method of multifractal analysis of the fluctuation; theory of fuzzy sets; software package *MATLAB*.

The obtained results are the widths of the multifractal spectrum's of two functional states (nosological status) of the patients. They were analyzed using the fuzzy clustering algorithm. Changes in the centers of clusters allow us to identify differences of patients nosological status on the basis of data for the series of heart rate variability, obtained by performing the passive orthostatic test. These nosological status correspond

to the characteristics of healthy and sick patients with II–III degree of hypertension for which there is a clinically proven improvement after treatment.

Keywords: biomedical signals, analysis of heart rate variability, methods of nonlinear dynamics, fuzzy logic methods, time series, multifractal analysis, fuzzy clustering algorithm, the results of functional studies

Введение. Исследование сигналов variability сердечного ритма (ВСР) является популярным средством функциональной диагностики человека. Накопленный опыт анализа сигналов ВСР с использованием наиболее распространенных методов обобщен в методических рекомендациях Европейского кардиологического и Северо-Американского электрофизиологического обществ [7], а также в работах российских экспертов [3]. Эти рекомендации распространяются на кратковременные записи сердечного ритма, а их результаты могут быть применены для повышения эффективности диагностики [4]. Такие данные могут быть получены не только в условиях стационарных медучреждений, но и амбулаторных, а также при удаленном мониторинге состояния пациентов.

Многообразные влияния на ВСР, включая нейрогуморальные механизмы высших вегетативных центров, обуславливают нелинейный характер изменений сердечного ритма. Для описания их перспективными являются методы нелинейной динамики, отражающие внутреннюю организацию динамического ряда кардиоинтервалов.

Поэтому применение мультифрактального анализа ВСР позволяет получить новую информацию о состоянии пациентов, результативности лечебного процесса. Для диагностических целей рассматриваемый метод может использоваться как автономно, так и в сочетании с более распространенными (традиционными) методами анализа данных.

В общем случае, динамический ряд кардиоинтервалов проявляет черты детерминированного хаоса. Это позволяет использовать для исследования ВСР методы, применяемые в теории хаотических систем [1]. Среди всего многообразия методов нелинейной динамики, уже используемых или потенциально применимых при анализе биомедицинских сигналов/данных, особый интерес представляют методы оценки их масштабной инвариантности, такие как фрактальный и мультифрактальный анализ [2].

Целью настоящей статьи был анализ возможностей и информативности применения указанных классов методов к исследованиям (оценкам параметров) кратковременных рядов ВСР для диагностики и оценки результатов лечения конкретного заболевания – артериальной гипертензии.

Материалы и методы исследований. Мультифрактальные оценки могут быть получены путем детрендрованного флуктуационного анализа, не требующего стационарности анализируемого временного ряда [9]. Пошаговая реализация алгоритма метода мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа (*MF DFA*) в среде *MATLAB* описана в [8] и в краткой форме воспроизводится ниже. Применение метода *MF DFA* в клинической практике для анализа кратковременных рядов ВСР в существующих публикациях практически не отражено. Поэтому практический опыт использования такого метода представляет интерес не только в научно-методическом отношении, но и практическом.

Для получения мультифрактальных характеристик временных рядов (ВР) ВСР все исследуемые ВР линейно интерполировались для фиксированной (равномерной) сетки с постоянным шагом по времени в 100 мс. Сначала сигнал избавлялся от тренда.

Затем значения ряда $y(i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ делились по непересекающимся сегментам длины s , число которых было выбрано равным целому значению $N_s = [N/s]$. Используя метод наименьших квадратов, тренд $y_s(i)$ представлялся полиномом, степень которого выби-

ралась таким образом, чтобы обеспечить интерполяцию с ошибкой, не превышающей

заданный предел $y_v(i) = \sum_{k=0}^m c_k i^{m-k}$, где m – степень полинома (обычно $m = 2$).

Затем определяется момент дисперсии:

$$F^2(v, s) = (1/s) \sum_{i=1}^s |y\{(v-1)s+i\} - y_v(i)|^2$$

и флуктуационная функция $F_q(s)$, зависящая от степенного параметра q :

$$F_q(s, q) = \left\{ (1/N_s) \sum_{v=1}^{N_s} |F^2(v, s)|^{(q/2)} \right\}^{(1/q)}$$

Путем изменения временной шкалы s при фиксированном показателе q в диапазоне $q = [-5, 5]$, находится зависимость $F_q(s)^{H_{qi}}$,

где H_{qi} – обобщенный показатель Херста (эта зависимость представляется в двойных логарифмических координатах).

В общем случае, мультифрактальное множество характеризуется скейлинговой экспонентой $\tau(q)$. Функция $\tau(q)$ показывает, насколько неоднородным является исследуемое множество точек. Обобщенный показатель Херста связан с функцией $\tau(q)$ соотношением:

$$\tau(q) = qH_{qi}(q) - 1.$$

Оценка ширины мультифрактального спектра определяется функцией распределения спектра D_q , характеризующей распределение вероятностей q :

$$D_q(hq) = qhq - \tau, \quad \text{где } hq = d\tau / dq.$$

Ширина мультифрактального спектра соответственно равна:

$$W = \Delta hq = \max hq - \min hq.$$

При проведении мультифрактального анализа методом *MFDFA* согласно методическим рекомендациям [3,7] использовались временные масштабы соответствующие следующим частотным диапазонам:

- HF –высокочастотный диапазон 0,4–0,15 Гц – (2,5–6,5 сек);
- LF–низкочастотный диапазон– 0,15–0,04 Гц –(6,5–25 сек);
- VLF–сверхнизкочастотный диапазон –0,04–0,003 Гц –(25–300 сек);

Также рассматривался масштаб всей длины сигнала T – (2,5–300) сек.

Исследования были проведены для трех групп пациентов: практически здоровые (32 пациента); больные, страдающие артериальной гипертензией II–III степени (50 пациентов) до лечения и после лечебного курса – в результате прохождения этого курса наблюдалось клинически доказанное улучшение. Данные были получены в Свердловском областном клиническом психоневрологическом госпитале для ветеранов войн (г. Екатеринбург). Для регистрации кардиоритмограмм использовался канал записи кардиоритмограммы электроэнцефалографа-анализатора «Энцефалан-131-03»; изменение пространственного положения пациентов осуществлялось с помощью поворотного стола *Loyer*.

Для вычисления ширины мультифрактального спектра W методом мультифрактального флуктуационного анализа использовались результаты исследований сигнала ВСП, которые проводились при выполнении пассивной ортостатической пробы для состояния функционального покоя (состояние F) и в состоянии пассивной ортостатической нагрузки (состояние O) в течение 5 минут.

Полученные результаты и их графические представления. Для каждого пациента был получен набор ширин мультифрактального спектра W двух функциональных состояний

в вышеуказанных диапазонах. Оказалось, что в диапазоне HF значения данного параметра не являются информативными из-за сильной зашумленности сигнала ВСР во всех наблюдаемых группах (обобщенный показатель Херста – $H_{qHF} > 1,5$), поэтому в дальнейшем анализе этот диапазон не рассматривается.

На основе алгоритма нечеткой кластеризации *Fuzzy C-Means (FCM)* [6] был проведен совокупный анализ полученных данных по двум состояниям (состояния F и O). Применение этого метода возможно даже в том случае, когда строгая кластеризация невозможна [10].

Проведенные расчеты при помощи алгоритма *FCM* показали, что полученные значения W в обоих функциональных состояниях принадлежат к одному из двух кластеров. Значения распределения ширины мультифрактального спектра W для полученных кластеров диапазонов LF, VLF и T представлены на скатерограммах рис. 1–3. Цвет и радиус маркера каждой точки отображают степень принадлежности к одному из кластеров - в зависимости от веса первого или второго кластера увеличивается радиус маркера соответственно красного или зеленого цвета (что позволяет удобно оценивать разбиение полученных результатов по кластерам).

На рис. 4 представлены данные изменения центров кластеров диапазонов LF, VLF и T для соответствующих групп. Используются следующие обозначения значений W для соответствующих групп: □ – практически здоровые пациенты; ◇ – больные до лечения; ○ – больные после лечения.

Центры полученных кластеров каждой группы пациентов выделены маркером в виде символа «х».

Значения центров кластеров и веса каждого из кластеров W представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения центров кластеров W для состояний F и O диапазонов LF, VLF, T

Диапазон	Группа практически здоровых пациентов			Группа больных до лечения			Группа больных после лечения		
	Центр кластера		Вес кластера, %	Центр кластера		Вес кластера, %	Центр кластера		Вес кластера, %
	F	O		F	O		F	O	
LF	0,434	0,599	50	0,387	0,423	43	0,436	0,488	70
	0,786	1,418	50	0,625	1,071	57	0,748	1,197	30
VLF	0,187	0,301	60	0,452	0,312	53	0,368	0,365	50
	0,574	0,652	40	0,408	1,131	47	0,809	0,416	50
T	0,659	1,091	65	0,559	0,838	40	0,418	0,257	40
	0,398	0,515	35	0,391	0,379	60	0,723	0,956	60

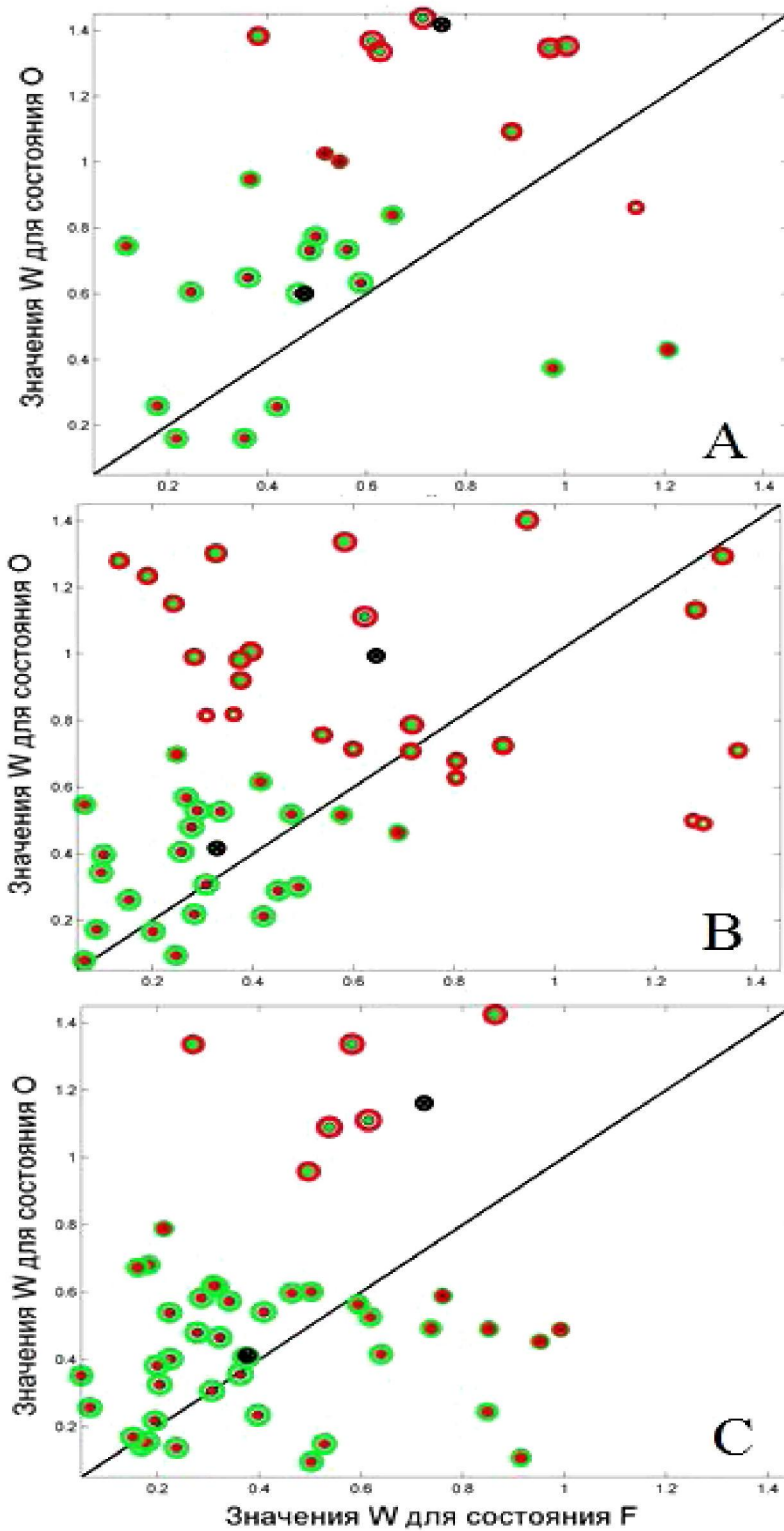


Рис. 1. Скатерограммы значений W состояний F и Одиапазона LF для групп: практически здоровых пациентов (1a), пациентов до (1b) и после лечения (1c)

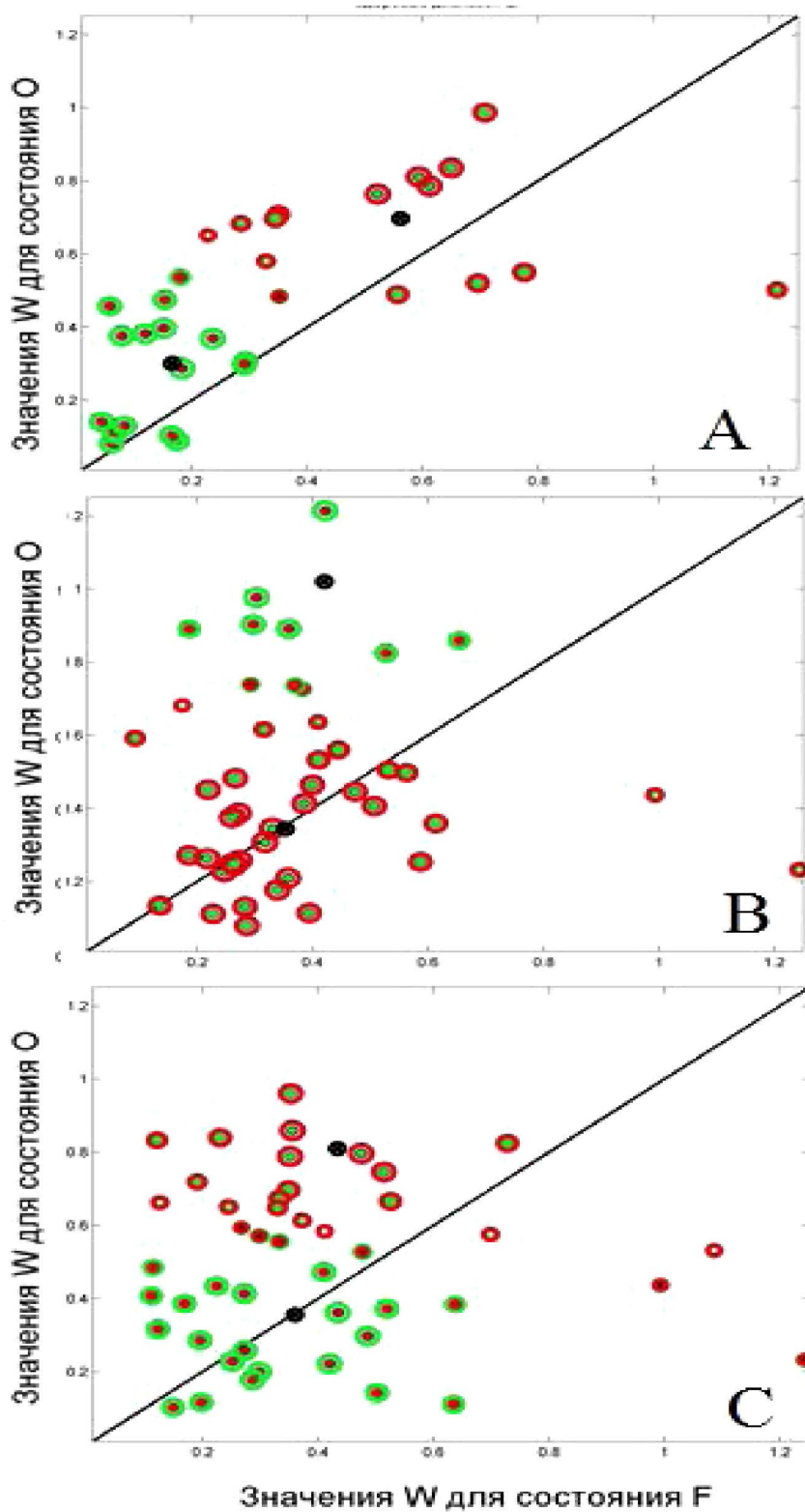


Рис. 2. Скатерограммы значений W состояний F и Диапазона VLF для групп: практически здоровых пациентов (2a), пациентов до (2b) и после лечения (2c)

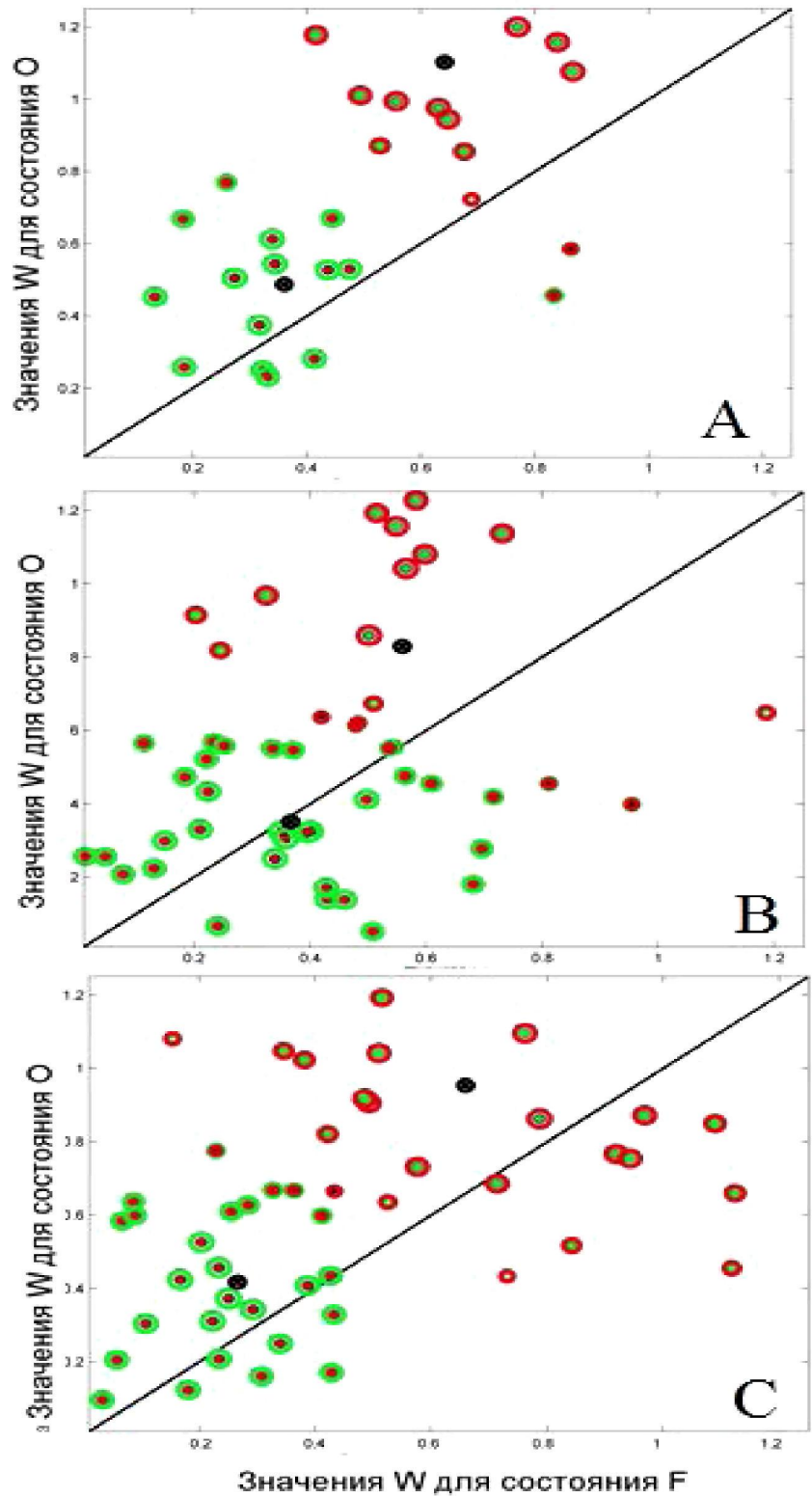


Рис. 3. Скатерограммы значений $W_{\text{состояний F}}$ и $W_{\text{состояний O}}$ для групп: практически здоровых пациентов (3a), пациентов до (3b) и после лечения (3c)

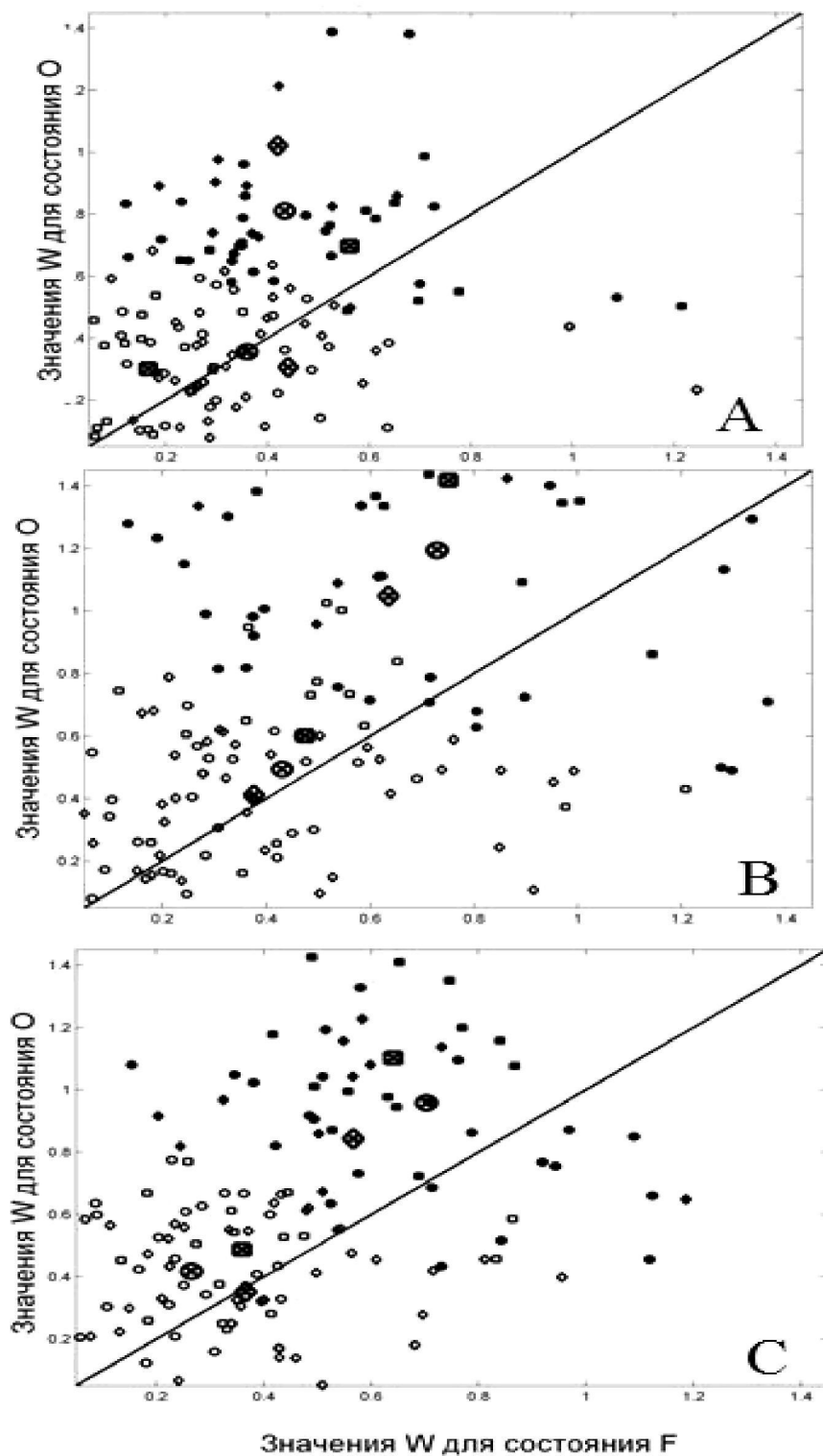


Рис. 4. Скатерограммы изменения центров кластеров состояний F и Om для m диапазонов: LF (4a), VLF (4b) и T (4c)

Обсуждение полученных результатов и выводы. Из данных, представленных на рис. 1–4 и в табл. 1, следует, что для диапазонов LF, VLF и T значения 1-го кластера группы больных пациентов после лечения имеют тенденцию к восстановлению значений центров кластеров, соответствующих группе практически здоровых пациентов, что может являться показателем эффективности лечебного процесса больных. С другой стороны, значения 2-го кластера не отражают подобную динамику. Что можно рассматривать как индикатор состояния пациентов, относящихся к данному кластеру и «указание» для специалиста-медика о необходимости корректировки курса лечения.

Полученные результаты кластерного анализа отражают динамику изменений для всех рассмотренных диапазонов группы пациентов, страдающих артериальной гипертензией II–III стадий с различными клиническими симптомами дисфункций вегетативной нервной системы. Имеют направление изменений после лечебного курса в сторону значений показателей, соответствующих практически здоровым пациентам. Это свидетельствует о возможности применения метода *MF DFA* для определения нозологического статуса пациентов при анализе ВР ВСР.

Наличие в электрокардиографическом сигнале высокой степени зашумленности (при исключении оценок воздействия погрешностей и ошибок измерения и учета того факта, что организм состоит из ограниченного количества действующих подсистем), говорит о том, что ни одна из этих подсистем не оказывает решающего воздействия на формирование исходного процесса [1, 5]. В таком случае можно предположить, что важные для задачи идентификации свойства сигнала существуют только в том определенном диапазоне масштабов, в котором наиболее отчетливо выявляются свойства инвариантности и периодичности, характерные для мультифрактальной структуры. Следовательно, применение мультифрактального анализа в этих диапазонах дает эффективный инструмент изучения и идентификации групп пациентов разного нозологического статуса на основе кратковременных ВР, используемых для оценки ВСР.

Список литературы

1. Антипов О. И. Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети / О. И. Антипов, В. А. Неганов. – Москва : Радиотехника, 2011. – 350 с.
2. Ардашев А. В. Практические аспекты современных методов анализа variability сердечного ритма / А. В. Ардашев, А. Ю. Лоскутов. – Москва : ИД «МЕДПРАКТИКА-М», 2011. – 126 с.
3. Баевский Р. М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) / Р. М. Баевский // Вестник аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65–87.
4. Мальвина А. С. Автоматизация, диспетчеризация и информатизация высокотехнологичных учреждений как средство повышения эффективности их работы / А. С. Мальвина, Ю. М. Брумштейн, Е. В. Скляренко, А. Б. Кузьмина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 1 (25). – С. 122–138.
5. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Рангайян. – Москва : Физматлит, 2010. – 440 с.
6. Chiu S. Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation / S. Chiu // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 1994. – Vol. 2, № 3. – P. 61–70.
7. Heart rate variability. Standards of Measurement, Physiological interpretation and clinical use // Circulation. – 1996. – Vol. 93. – P. 1043–1065.
8. Ihlen A. F. Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in Matlab / A. F. Ihlen // Frontiers in physiology. – 2012. – Vol. 3. – P. 141–150.
9. Kantelhardt J. W. et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of non-stationary time series // Physica A. – 2002. – № 316. – P. 87–114.

10. Zhang H. A note on fuzzy clustering. Paper review report / H. Zhang. – Department of Computer Science and Engineering University of Connecticut, 2005, April. – 18 p.

References

1. Antipov O. I., Neganov V. A. *Analiz i prognozirovanie povedeniya vremennykh ryadov: bifurkatsii, katastrofy, sinergetika, fraktalye i neyronnyeseti* [Analysis and forecasting of the behavior of time series: bifurcation, catastrophe, synergetics, fractals, and neural networks]. Moscow, Radiotekhnika, 2011. 350 p.
2. Ardashev A. V., Loskutov A. Y. *Prakticheskie aspekty sovremennykh metodov analiza variabelnosti serdechnogo ritma* [Practical aspects of modern methods of analysis of heart rate variability]. Moscow, ID «MEDPRAKTIKA-M», 2011. 126 p.
3. Baevskiy R. M. *Analiz variabelnosti serdechnogo ritma pri ispolzovanii razlichnykh ehlektrokardiograficheskikh sistem (metodicheskie rekomendatsii)* [Analysis of heart rate variability using different electrocardiographic systems (guidelines)]. *Vestnik aritmologii* [Herald Arhythmology], 2001, no. 24, pp. 65–87.
4. Malvina A. S., Brumshteyn Yu. M., Sklyarenko E. V., Kuzmina A. B. *Avtomatizatsiya, dispetcherizatsiya i informatizatsiya vysokotekhnologichnykh meduchrezhdenij kak sredstvo povysheniya ehffektivnosti ikh raboty* [Automation and computerization of scheduling high-tech medical facilities as a means of improving their performance]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technology], 2014, no. 1 (25), pp. 122–138.
5. Rangayan. R. M. *Analiz biomeditsinskikh signalov. Prakticheskiy podkhod* [Analysis of biomedical signals. A Practical Approach]. Moscow, Fizmatlit, 2010. 440 p.
6. Chiu S. Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 1994, vol. 2, no. 3, pp. 61–70.
7. Heart rate variability. Standards of Measurement, Physiological interpretation and clinical use. *Circulation*, 1996, vol. 93, pp. 1043–1065.
8. Ihlen A. F. Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in Matlab. *Frontiers in physiology*, 2012, vol. 3, pp. 141–150.
9. Kantelhardt J. W. et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of non-stationary time series. *Physica A*, 2002, no. 316, pp. 87–114.
10. Zhang H. *a note on fuzzy clustering. Paper review report*. Department of Computer Science and Engineering University of Connecticut, 2005, April. 18 p.

УДК 330.43, 339.743.44, 519.246.85

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АППАРАТА НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВАЛЮТНОГО КУРСА

Пилюгина Анна Валерьевна, кандидат экономических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pilyuginaanna@mail.ru

Бойко Андрей Алексеевич, аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: boiko_andrew@mail.ru

Показана практическая значимость прогнозирования валютного курса для всех участников валютного рынка. Приведена классификация методов прогнозирования, особое внимание уделено формализованным методам. Подробно рассмотрена методология одного из структурных методов - прогнозирования с использованием аппарата нечетких множеств. Рассмотрены подходы к оценке точности прогнозирования. Выполнено прогнозирование 15 среднемесячных значений курса доллара США к российскому рублю (с октября 2011 г. по декабрь 2012 г.). При этом использована колоколообразная функция принадлежности, нечеткая импликация Мамдани и дефаззификация методом центра тяжести для одноточечных множеств. По итогам прогнозирования средняя ошибка аппроксима-