

5. *Freeman J.V.* Autonomic nervous system interaction with the cardiovascular system during exercise [Text] / J.V. Freeman, F.E. Dewey, D.M. Hadley et al. // *Progr Cardiovasc Dis.* – 2006. – Vol. 48. – P. 342-362.
6. *Jouven X.* Heart rate profile during exercise as a predictor of sudden death [Text] / X. Jouven, J. Empana, P.J. Schwartz et al. // *N Engl J Med.* – 2005. – Vol. 352. – P. 1951-1958.

**Калакутский Лев Иванович**

Самарский государственный аэрокосмический университет.

E-mail: bme@ssau.ru.

443086, г. Самара, Московское шоссе, 34а.

Тел.: 88462674549.

**Комарова Марина Валериевна**

E-mail: marinakom@yandex.ru.

Тел.: 88462674547.

**Поваляева Раиса Александровна**

Самарский государственный медицинский университет.

E-mail: raisa.poval@rambler.ru.

443099, г. Самара, ул. Чапаевская, 89.

Тел.: 88462321634.

**Kalakutski Lev Ivanovich**

Samara State Aerospace University.

E-mail: bme@ssau.ru.

34a, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia.

Phone: +78462674549.

**Komarova Marina Valerievna**

E-mail: marinakom@yandex.ru.

Phone: 88462674547.

**Povaliajeva Raisa Alexndrovna**

Samara State Medical University.

E-mail: raisa.poval@rambler.ru.

89, Chapaevskaja street, Samara, 443099, Russia.

Phone: 88462321634.

УДК 616.12-07

**Л.И. Калакутский, А.А. Федотов**

**ФЛУКТУАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ДЛЯ ОЦЕНКИ  
СОСТОЯНИЯ СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ**

*Рассмотрен сравнительный анализ фрактальной структуры сердечного ритма на основе регистрации и комплексной обработки сигналов периферического пульса и ЭКГ-сигнала. Установлена зависимость между показателем флуктуации сердечного ритма, определяемого по методу DFA, и состоянием сосудистой регуляции, что позволило сформировать диагностический показатель состояния сердечно-сосудистой системы человека.*

*Вариабельность сердечного ритма; фрактальная структура; показатель флуктуации.*

**L.I. Kalakutsky, A.A. Fedotov**

**FLUCTUATION ANALYSIS OF HEART RATE FOR ASSESMENT OF HUMAN  
VASCULAR SYSTEM**

*Comparative analysis of the fractal structure of heart rate based on registration and processing distal arterial pulse and ECG signal was considered. Relationship between fluctuation*

*exponent of heart rate, determined by detrended fluctuation analysis (DFA), and the state of vascular regulation has been developed. This is allowed to obtain a diagnostic index of the human cardiovascular system.*

*Heart rate variability; fractal structure; fluctuation exponent.*

Сердечный ритм является важным физиологическим показателем, отражающим процессы вегетативной, нейрогуморальной и центральной регуляции в сердечно-сосудистой системе и организме в целом [1,2]. Это определяет неослабевающий интерес к исследованию изменчивости сердечного ритма в норме и патологии для создания диагностических методик в авиакосмической и спортивной медицине, кардиологии, анестезиологии, реаниматологии, неврологии [3].

Исследование параметров сердечного ритма на основе регистрации сигналов периферических артериальных пульсаций дает дополнительную информацию о сердечно-сосудистой системе по сравнению с распространенными методиками анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР) путем обработки ряда длительностей интервалов между двумя соседними R-зубцами ЭКГ. Вариабельность периферического пульсового ритма (ВПП) по сравнению с ВСР находится под влиянием дополнительных “сосудистых” составляющих, зависящих от состояния сосудов и активности регуляции. Так, медленные изменения эластических свойств сосудов модулируют время распространения пульсовых волн от центра к периферии и тем самым вносят изменения в показатели ВПП.

Комплексное взаимодействие многообразных и многочисленных факторов, оказывающих влияние на сердечный ритм, обуславливают нелинейный характер изменений его показателей. Для их описания применяются методы нелинейной динамики, в частности фрактальный анализ временных рядов, дающий меру сложности представленных данных. Установлено, что определенную долю во временной структуре сердечного ритма составляют непериодические хаотические компоненты, имеющие фрактальную природу. Показано, в частности, что изменение степени выраженности шумовых компонентов в структуре ритма сердца связано с повышенным риском внезапной сердечной смерти [4,5].

Для исследования “сосудистых” факторов, влияющих на показатели периферического пульсового ритма, используем метод DFA (detrended fluctuation analysis) – один из методов нелинейной динамики [6].

DFA позволяет проводить изучение структуры различных процессов или сигналов, в том числе и нестационарных, с точки зрения статистического самоподобия.

Таким образом, если рассматривать сердечный ритм как фрактальную структуру, то для ее количественного описания можно определить характеристику самоподобия – показатель флуктуации [6].

Последовательность расчета показателя флуктуации  $\alpha$  для анализа структуры временных рядов R-R интервалов ЭКГ и межпульсовых интервалов следующая:

1) на первом этапе из временной последовательности кардиоинтервалов (КИ)  $X_i$  составляют кумулятивную сумму  $X_t$  следующим образом:

$$X_t = \sum_{i=1}^t (X_i - \bar{X}),$$

где  $\bar{X}$  – среднее значение  $X_i$ ;

2) на следующем этапе кумулятивная сумма  $X_t$  разбивается на временные окна равной длины  $L$ ; для каждого временного окна составляется интерполяционный полином, в случае использования метода DFA первого порядка это линейный полином  $Z$ ;

3) затем для каждого временного окна вычисляется среднеквадратичное отклонение  $F$  по формуле:

$$F = \left[ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (X_i - Z_i)^2 \right]^{0,5}$$

4) этапы вычисления 2 и 3 повторяются при различных размерах временного окна  $L$ ;

5) определяют характеристический показатель (показатель флуктуации первого порядка) зависимости  $F(L)$  как отношение логарифмов изменения  $F$  в зависимости от изменения  $L$ .

В зависимости от внутренней структуры изучаемых процессов показатель флуктуации  $\alpha$  может принимать различные значения в диапазоне от 0 до 1,5; так для случая белого шума  $\alpha=0,5$ , при преобладании розового шума в изучаемом процессе  $\alpha$  возрастает до 1, в случае броуновского процесса – до 1,5.

Рассмотрим особенности фрактальной структуры двух вариационных рядов: первый составлен на основе регистрации и обработки ЭКГ-сигнала, а второй – сформирован на основе регистрации и обработки фотоплетизмографического (ФПГ) сигнала периферической артериальной пульсации. Проведено исследование сердечного ритма у группы добровольцев, состоящей из 25 практически здоровых людей в возрасте от 20 до 65 лет. Одновременно регистрировали равные по длительности участки электрокардиограммы и сигнала фотоплетизмограммы в течение 5 минут. ЭКГ сигнал регистрировали с помощью электродов в первом стандартном отведении, ФПГ датчик артериальной пульсации устанавливали на концевую фалангу указательного пальца руки.

Обработка сигналов позволила определить межпульсовые интервалы для ФПГ сигнала и R-R интервалы для ЭКГ-сигнала. На основе полученных данных были сформированы соответствующие вариационные ряды. Для каждого вариационного ряда находилась показатель флуктуации  $\alpha$  в соответствии с методом DFA.

В табл. 1 приведены значения показателя флуктуации  $\alpha$  для двух возрастных групп А и Б в положении стоя и лежа.

Таблица 1

**Значение показателя флуктуации  $\alpha$  для различных групп обследуемых на фоне постуральной пробы**

Группа (возраст, лет)	Стоя		Лежа	
	Ряд R-R интервалов	Ряд межпульсовых интервалов	Ряд R-R интервалов	Ряд межпульсовых интервалов
А (22,8±2,6)	1,13±0,12	1,05±0,1	1,1±0,11	1,01±0,09
Б (63,5±1,5)	1,38±0,08	1,36±0,09	1,29±0,07	1,28±0,06

Данные табл. 1 показывают, что с возрастом показатель флуктуации увеличивается, т.е. самоподобие структуры сердечного ритма возрастает, что сопровождается смещением спектральных составляющих сердечного ритма в область низких частот. Увеличение показателя флуктуации свидетельствует о переходе колебаний сердечного ритма от вида подобного розовому шуму к броуновскому процессу.

Постуральная проба приводит к изменению фрактальной структуры обоих временных рядов, причем в положении стоя показатель флуктуации достоверно увеличивается по сравнению с положением лежа.

Показатель флуктуации для временного ряда R-R интервалов оказался достоверно больше, чем показатель, рассчитанный для временного ряда межпульсовых интервалов. При этом можно заметить, что для группы обследуемых А (средний

возраст  $22,8 \pm 2,6$  года) относительная разница между двумя значениями коэффициента флуктуации выше, чем для группы Б (средний возраст  $63,5 \pm 1,5$  года).

Различие во временной структуре исследуемых временных рядов обусловлено влиянием на изменчивость временного ряда межпульсовых интервалов дополнительных контуров регуляции сосудистого тонуса.

Таким образом, влияние сосудистых факторов на структуру сердечного ритма можно оценить с помощью показателя, отражающего относительное различие показателей флуктуации двух исследуемых временных рядов.

В качестве такого показателя предлагается использовать относительную величину  $\xi$ , определяемую по формуле:

$$\xi = \frac{\alpha_e - \alpha_p}{\alpha_e} \cdot 100\% ,$$

где  $\alpha_e$  – коэффициент флуктуации временного ряда R-R интервалов,

$\alpha_p$  – коэффициент флуктуации временного ряда межпульсовых интервалов.

Таблица 2

Зависимость показателя  $\xi$  от возраста обследуемых

Возраст, лет	$\xi$ , %	
	Лежа	Стоя
$20 \pm 2,1$	$8,1 \pm 0,4$	$8,9 \pm 0,6$
$25 \pm 1,4$	$7,4 \pm 0,6$	$8,1 \pm 0,5$
$30 \pm 1,1$	$6,6 \pm 0,7$	$7,2 \pm 0,4$
$60 \pm 1,3$	$1,1 \pm 0,25$	$1,2 \pm 0,2$
$65 \pm 1,6$	$0,9 \pm 0,2$	$0,9 \pm 0,1$

Показатель  $\xi$  достоверно падает с увеличением возраста обследуемых, при этом в положении стоя  $\xi$  превышает значение по сравнению с показателем, определяемым в положении лежа, что может быть объяснено ослаблением сосудистой регуляции с возрастом.

Таким образом, на основе комплексной обработки биосигналов можно предложить методику определения диагностического показателя состояния сосудистой системы, определяемого как мера относительного различия между показателями флуктуации вариационного ряда межпульсовых интервалов и вариационного ряда R-R интервалов.

Отличия во фрактальной структуре сердечного ритма и периферического пульса могут свидетельствовать о функциональном состоянии сосудистого тонуса, и служить основой для разработки методики неинвазивного контроля состояния артериальной системы человека с целью ранней диагностики таких опасных и распространенных сердечно-сосудистых патологий, как атеросклероз, гипертоническая болезнь.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения. – М.: Медицина, 2000. – 295 с.
2. Task Force of the European Society of Cardiology and North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // *Circulation*. – 1996. – Vol. 93 (5). – P. 1043-1065.
3. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. – М.: Медицина, 1997. – 265 с.

4. *Timo H.* Prediction of Sudden Cardiac Death by Fractal Analysis of Heart Rate Variability in Elderly Subjects // *Journal of the American College of Cardiology.* – 2001. – Vol. 37, №. 5. – P. 1395-1402.
5. *Timo H.* Fractal Analysis and Time- and Frequency-Domain Measures of Heart Rate Variability as Predictors of Mortality in Patients With Heart Failure // *Am J Cardiol.* – 2001. – Vol. 87. – P. 178-182.
6. *Peng C.K.* Mosaic organization of DNA nucleotides // *Phys Rev E.* 49. – 1994. – P. 1685-1689.

**Калакутский Лев Иванович**

Самарский аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева.

E-mail: bme@ssau.ru.

443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Тел.: 88462674549.

**Федотов Александр Александрович**

E-mail: fedoaleks@yandex.ru.

Тел.: 88462674548.

**Kalakutsky Lev Ivanovich**

Samara State Aerospace University.

E-mail: bme@ssau.ru.

34, Moscow highway, Samara, 443086, Russia.

Phone: +78462674549.

**Fedotov Alexander Alexandrovich**

E-mail: fedoaleks@yandex.ru.

Phone: +78462674548.

УДК: 615.225.2

**К.С. Караханян**

**ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЖИЗНЕУГРОЖАЮЩИХ НАРУШЕНИЙ  
РИТМА СЕРДЦА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ВАРИАбельНОСТИ РИТМА  
СЕРДЦА У БОЛЬНЫХ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ  
И НАРУШЕНИЕМ УГЛЕВОДНОГО ОБМЕНА**

*Изучение вариабельности сердечного ритма и электрической стабильности миокарда имеет высокую информативную значимость для оценки вероятности развития потенциально опасных аритмий.*

*Вариабельность сердечного ритма; аритмии; прогнозирование.*

**K.S. Karakhanyan**

**BASES OF FORECASTING OF INFRINGEMENTS OF THE RHYTHM  
OF HEART ON PARAMETERS OF VARIABILITY OF THE RHYTHM  
OF HEART AT SICK OF THE ARTERIAL HYPERTENSIA  
AND INFRINGEMENT CARBOHYDRATE EXCHANGE**

*Studying of variability of an intimate rhythm and electric stability of a myocardium has the high informative importance for an estimation of probability of development potentially dangerous arrhythmia.*

*Variability of an intimate rhythm; arrhythmia; forecasting.*

Влияние на сердце симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы и гуморальных факторов регуляции обеспечивает координа-