

УДК 577.3

Применение локального индекса фрактальности для анализа коротких рядов R-R интервалов при исследовании variability сердечного ритма

©О. Ю. Майоров¹⁻³, В. Н. Фенченко^{1,2,4}¹Харьковская медицинская академия последипломного образования МЗ Украины, Харьков²Институт Медицинской информатики и Телемедицины, Харьков³Институт охраны здоровья детей и подростков АМН Украины, Харьков⁴Физико-технический институт низких температур НАН Украины им. Б. И. Веркина, Харьков

Резюме

Предложен новый подход к анализу variability сердечного ритма с позиций нелинейной динамики на основе вычисления локального индекса фрактальности, который может быть вычислен по относительно короткому ряду R-R интервалов. Это дает перспективный инструмент для исследования variability сердечного ритма методами нелинейного анализа. Локальный индекс фрактальности может быть использован для выявления моментов качественного изменения характера функционирования системы регулирования ритма, связанного с перераспределением ролей β -симпатического контроля и парасимпатического управления.

Ключевые слова: ЭКГ, variability сердечного ритма, нелинейный анализ, локальный индекс фрактальности.

Клин. информат. и Телемед.

2010. Т.6. Вып.7. с.6–12

Введение

Не смотря на достижения в области создания аппаратуры для регистрации деятельности сердца и оценки этой активности, остается необходимость совершенствования методов диагностики с целью увеличения их чувствительности и специфичности, что требует развития новых алгоритмов анализа ЭКГ, variability сердечного ритма (ВСР) и применения более точных диагностических критериев.

В качестве параметров, позволяющих характеризовать ЭКГ кардиологи традиционно используют амплитуду и длительность зубцов P, T, QRS-комплекса, длительность межцикловых сегментов (RR-интервалов) и изменение их величины вдоль записи – variability сердечного ритма (ВСР).

Как известно, состояние вегетативной нервной системы и механизмов регуляции на основе анализа variability сердечного ритма оценивается при помощи ряда статистических и спектральных показателей [1, 2].

Важным является представление о ВСР как о показателе адапционных реакций организма, индикаторе стресса [3–18], что во многом обусловлено исследованиями в области космической медицины [11, 23]. Показана высокая информативность изучения ВСР для

оценки реакций сердечно-сосудистой системы при физических и ментальных нагрузках [24].

Исследование ВСР признано одним из наиболее информативных неинвазивных методов оценки регуляции сердечного ритма. Принципиально важно, что анализ ВСР не является узкоспециализированным методом для решения конкретных диагностических задач. Он может с успехом применяться как для оценки функционального состояния организма и его адапционного ответа на стресс [25], так и для оценки состояния вегетативной регуляции кровообращения [26], для разработки прогностических заключений и т.п. [27].

Первоначально, исследования ВСР ограничивались определением относительно простых показателей, таких как разница между минимальным и максимальным R-R интервалами, стандартное отклонение интервала R-R и др. Со временем были разработаны разнообразные способы анализа временных рядов R-R интервалов во временной и частотной областях [1–3, 5–9, 11, 24, 28–40].

Развитие вычислительной техники стимулировало разработку новых методов анализа ВСР, которые требуют значительных вычислительных мощностей.

Относительно недавно появившийся и интенсивно развивающийся нелинейно-динамический подход

к анализу ЭКГ привел к появлению новых методов анализа. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция и все больший интерес к изучению ВСР именно с позиций нелинейного анализа ВСР [41–62].

Заметим, что особое значение этого подхода заключается в том, что он дает не только тонкий диагностический инструмент, но и позволяет провести содержательную интерпретацию различных аномальных явлений в сердечно-сосудистой системе.

Объект и методы исследования

В настоящее время нелинейно-динамический подход представляет преимущественно исследовательский интерес и его практическое применение до конца не ясно и, как следствие, ограничено. Это связано с огромной сложностью сердечно-сосудистой системы и тем обстоятельством, что временные масштабы ее ритмов находятся в диапазоне от долей секунды (для пейсмекаров, барорецепторов, хеморецепторов, респираторной активности) до минут (для ренин-ангиотензивной системы) и часов (для почечной регуляции, влияния температуры).

Известно, что неустойчивость траекторий хаотических систем делает их весьма чувствительными к управлению, и требуемый результат может быть получен в течение некоторого времени путем одного или нескольких малозаметных, незначительных возмущений параметров системы. Каждое из них лишь слегка изменит траекторию, но через некоторое время накопление и экспоненциальное усиление малых возмущений приведут к существенной коррекции движения. Подобной пластичностью и управляемостью обладает и сердечно-сосудистая система. Например, хаотический характер ритма сердца позволяет ему гибко реагировать на изменение физических и эмоциональных нагрузок, а регулярность нередко свидетельствует об уменьшении устойчивости к случайным воздействиям внешней среды.

Этот факт к настоящему времени достоверно установлен многочисленными исследованиями как и то, что степень хаотичности ритма сердца меняется при патологии и измененных состояниях организма. В частности, изменение степени детерминированного хаоса

в структуре ритма сердца связано с повышенным риском внезапной сердечной смерти. Уменьшение хаотичности ряда R-R интервалов наблюдается во время критических состояний у больных с сердечной недостаточностью, причем снижение сложности процесса изменения сердечного ритма коррелирует с нарастанием декомпенсации. У больных с сахарным диабетом также отмечено достоверное снижение хаотичности сердечного ритма по сравнению со здоровыми людьми и положительная корреляция снижения хаотичности и степени вегетативной дисфункции. Известно также, что нелинейная компонента снижается при гипертонической болезни [47, 53, 57, 62–64].

Все эти и другие данные дают основание полагать, что «параметры хаоса» могут служить устойчивой и показательной оценкой функционального состояния соответствующих систем организма.

Однако, корректное применение методов детерминистского хаоса для анализа ВСР осложняется необходимостью использования слишком длинного ряда R-R интервалов, получить который не удастся, так как за время измерений он может изменить характер своего поведения [61, 68].

Результаты собственных исследований

Ряд R-R интервалов порожден сложной нелинейной системой, которую весьма трудно записать в виде дифференциальных уравнений или дискретных отображений. Но этот ряд является фракталом, т.е., несмотря на нерегулярность, характер его поведения остается неизменным на всех масштабах — и, с точностью до масштабного фактора, он на разных масштабах выглядит примерно одинаково. Основной характеристикой таких самоподобных структур, как известно, является размерность D , введенная Ф. Хаусдорф [65].

Для определения размерности плоскость, на которой определен график функции продолжительности ряда R-R интервалов, разобьем на клетки размером δ и определим число клеток $N(\delta)$, где находится хотя бы одна точка этого графика. Тогда размерность D определяется из соотношения

$$N(\delta) \sim \delta^{-2D} \text{ при } \delta \rightarrow 0 \quad (1)$$

Между тем, на практике, при попытке вычислить D непосредственно из формулы (1), возникает серьезная проблема. Она связана с тем, что с одной стороны ряд R-R интервалов имеет минимальный масштаб структуры, с другой — приближение к асимптотическому режиму (1) является слишком медленным. Заметим, что такой недостаток присущ и иным способам определения фрактальной размерности (например, через корреляционный интеграл с помощью алгоритма Grassberger-Procaccia [66], или с использованием дисперсионного метода, предложенного Bassingthwaighte J. B., Raymond G. M. [67]).

По этой причине, для определения D обычно вычисляют показатель Херста H , который для гауссовых процессов связан с D соотношением $H = 2 - D$. Однако, для надежного вычисления H требуется слишком длинный ряд R-R интервалов [68], получить который не удастся, так как за время измерений он может изменить характер своего поведения.

Чтобы связать локальную динамику процесса с фрактальной размерностью ряда необходимо определить размерность D локально (т.е. на масштабах, порядка характерного масштаба основных динамических состояний).

Следуя [70–72], введем равномерное разбиение отрезка на котором задан ряд R-R интервалов

$$\omega_m = [a = t_0 < t_1 < \dots < t_m = b], \quad (2)$$

где $t_i - t_{i-1} = \delta = (b - a) / m$ ($i = 1, 2, \dots, m$).

Покроем график функции продолжительности R-R интервалов прямоугольниками таким образом, чтобы это покрытие было минимальным по площади в классе покрытий прямоугольниками с основанием δ , т.е. высота прямоугольника на отрезке $[t_{i-1}, t_i]$ равна амплитуде $A_i(\delta)$, которая является разностью между максимальным и минимальным значением R-R интервала на этом отрезке.

Введем величину:

$$V_j(\delta) \equiv \sum_{i=1}^m A_i(\delta) \quad (3)$$

Тогда из (1) следует

$$V_j(\delta) \sim \delta^{-\mu} \text{ при } \delta \rightarrow 0 \quad (4)$$

$$\text{где } \mu = D - 1 \quad (5)$$

индекс фрактальности. Как показано в [71], приближение к асимптотическому режиму в формуле (4) является на порядок более

быстрым, чем в формуле (1). Это дает возможность вычислить индекс фрактальности локально и использовать его в качестве фактора, определяющего динамику исходного процесса, поскольку необходимый репрезентативный масштаб можно считать имеющим тот же порядок, что и характерный масштаб основных состояний процесса.

Используя индекс фрактальности можно существенно продвинуться в решении важнейших задач идентификации и прогноза.

Задача идентификации заключается в корректном определении макросостояния системы на основе наблюдаемой реализации ряда R-R интервалов – такой ряд демонстрирует сложное непериодическое поведение, при котором периоды относительно длительного увеличения или уменьшения R-R интервалов и периоды относительной стабильности хаотическим образом сменяют броуновское движение.

Зная локальное значение размерности, можно оценить какой тип поведения преобладает в каждой точке ряда. Для вычисления этого параметра, очевидно, нужно взять такое значение размерности, которое еще может быть вычислено с приемлемой точностью на минимальном, предшествующем данному моменту времени интервале τ_μ .

Для винеровского случайного процесса (модель броуновского движения, случайного блуждания) фрактальная размерность графика $\mu=0.5$. Поэтому случай $\mu > 0.5$ естественно интерпретировать как период относительной устойчивости, а случай $\mu < 0.5$ как период неустойчивости, т.е. локальная размерность является показателем стабильности ряда R-R интервалов.

Индекс фрактальности с успехом использовался для анализа финансовых временных рядов [72, 73], прогноза землетрясений [74] и др.

Нами установлено, что индекс фрактальности весьма эффективен при исследовании variability сердечного ритма, т.е. временного ряда R-R интервалов. Наиболее важным преимуществом является возможность применения индекса фрактальности для исследования не только ряда R-R интервалов на стационарных участках, но и анализ переходных (нестационарных) участков.

В была предложена [75], а в последствии усовершенствована достаточно простая модель взаимодействия сердечно-сосудистой и респираторной систем [76–79]. Эта модель основана на теории аортальной компрессионной камеры [80], в соответствии с которой диастолическое давление каждого сокращения сердца выражается через

параметры, характеризующие предыдущий кардиоинтервал и время артериального затухания, а сократительная способность миокарда учтена через воздействие продолжительности предыдущего кардиоинтервала в соответствии с гипотезой Франка-Старлинга [80, 81].

Иными словами, регулирование частоты сокращений сердца осуществляется за счет комбинации трех механизмов – постоянного ритма, генерируемого пейсмекером, парасимпатического управления и относительно слабого β -симпатического контроля [77] с характерными временами задержки для парасимпатического и β -симпатического контроля $\tau_\nu=0\div 1$, $\tau_\beta=4$. Кроме того, на частоту сокращений влияет также время артериального затухания, т.е. работа α -адренэргического механизма [77] с характерным временем задержки $\tau_\alpha=4$.

Таким образом, как и следовало ожидать, для устойчивости ритма сердца функционируют системы регулирования с разными постоянными времени. Именно это обстоятельство приводит к масштабной инвариантности (отсутствию выделенного масштаба) и с ним связана фрактальность ряда R-R интервалов.

С помощью индекса фрактальности μ был исследован ряд R-R интервалов здоровых испытуемых, находящихся в начале исследования в состоянии спокойного бодрствования (первые 100 R-R интервалов), а затем во время ментальной нагрузки – обратный счет в уме (следующие 100 R-R интервалов).

Из графика на рис. 1 видно, что амплитуда колебаний длительности R-R интервалов уменьшается при переходе от состояния спокойного бодрствования к состоянию ментальной нагрузки. Как указывалось ранее крупномасштабные флуктуации R-R интервалов соответствуют β -симпатическому контролю (большее время задержки), а мелкомасштабные – парасимпатическому управлению (меньшее время задержки). Из этого следует, что в состоянии спокойного бодрствования у исследуемого индивида преобладает роль β -симпатического контроля, а в состоянии ментальной нагрузки усиливается роль парасимпатического управления. Заметим, что такой вывод соответствует данным [80].

На рис. 2 показан результат исследования поведения функции $V_f(\delta)$ в двойном логарифмическом масштабе. Видно, что данные ложатся близко к прямой линии (кроме относительно больших δ , которые нужно отбросить). Для определения значения индекса фрактальности μ следует найти линию регрессии $y=ax+b$ с помощью метода наименьших квадратов, тогда $\mu=-a$. При обработке всего массива данных для состояния спокойного бодрствования получено $\mu=0.54\pm 0.06$, а для ментальной нагрузки $\mu=0.46\pm 0.07$.

Это можно интерпретировать как относительную стабильность поведения ряда R-R интервалов в состоянии спокойного бодрствования, в то время как при переходе к ментальной нагрузке происходит качественное изменение характера поведения ряда R-R интервалов – его устойчивость снижается,

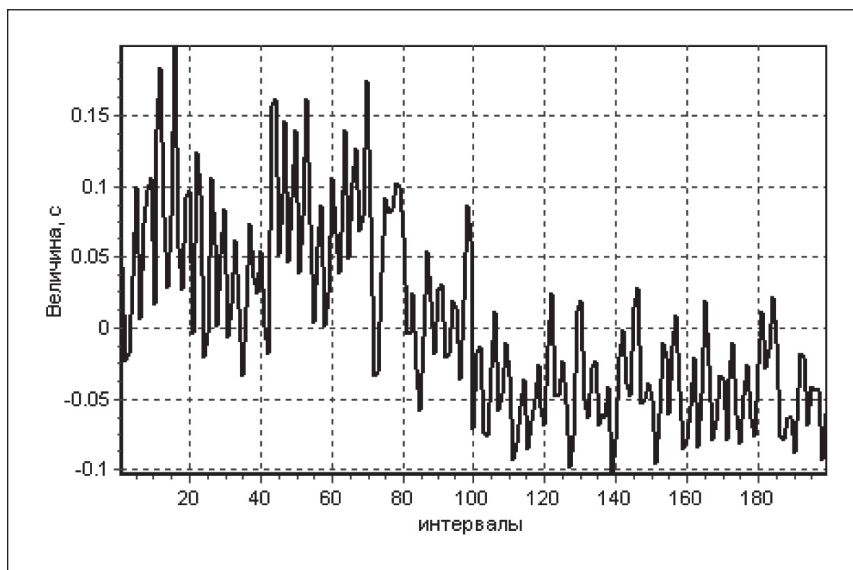


Рис. 1. Ряд R-R интервалов (спокойное бодрствование–ментальная нагрузка).

что связано с изменением роли парасимпатического управления.

Задача прогноза состоит в определении каких-либо характеристик будущего поведения ряда R-R интервалов на базе имеющихся данных. Наличие степенной зависимости для функции $V_f(\delta)$ в достаточно широком диапазоне масштабов позволяет предложить новый подход к прогнозированию фазовых переходов в системе управления ритмом сердца [20–22].

Так, если произошел фазовый переход, в результате которого амплитуда колебаний длительностей R-R интервалов с течением времени на больших масштабах увеличилась, то такой переход в новое состояние вызовет одновременное уменьшение амплитуды колебаний на малых масштабах. Иными словами, увеличение крупномасштабных флуктуаций ведет к подавлению мелкомасштабных флуктуаций и наоборот [22].

Фазовые переходы в ряду R-R интервалов, очевидно, связаны с преобладанием роли той или иной системы регулирования в данный момент времени. Следовательно, при увеличении роли β -симпатического контроля влияние парасимпатического управления падает и наоборот, при преобладающей роли парасимпатического управления, роль β -симпатического контроля уменьшается. Это проиллюстрировано на рис. 3, где показано, как изменяется локальное значение индекса фрактальности для ряда R-R интервалов. Отчетливо виден момент изменения поведения R-R интервалов при переходе от состояния спокойного бодрствования к состоянию ментальной нагрузки.

Выводы

Как известно, нелинейные методы, к сожалению, не привели пока к сколь либо значительным достижениям при анализе variability сердечного ритма. Возможно это обусловлено необходимостью использования длительных периодов наблюдений для анализа, что не позволяло адекватно описать функционирование системы регулирования сердечного ритма. В этом плане индекс фрактальности, который может быть вычислен по отношению короткому ряду R-R интервалов, дает перспективный инструмент для исследования variability сердечного ритма методами нелинейного анализа.

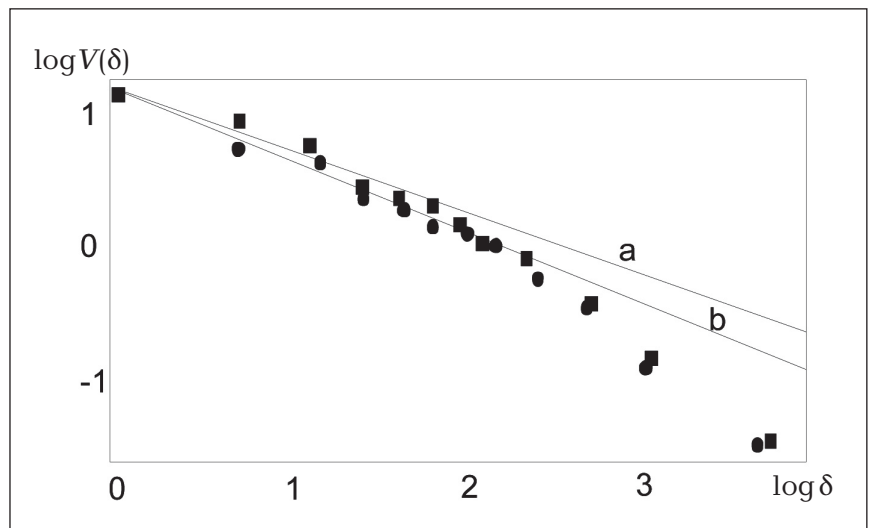


Рис. 2. Определение индекса фрактальности для ряда R-R интервалов («a» — спокойное бодрствование; «b» — ментальная нагрузка).

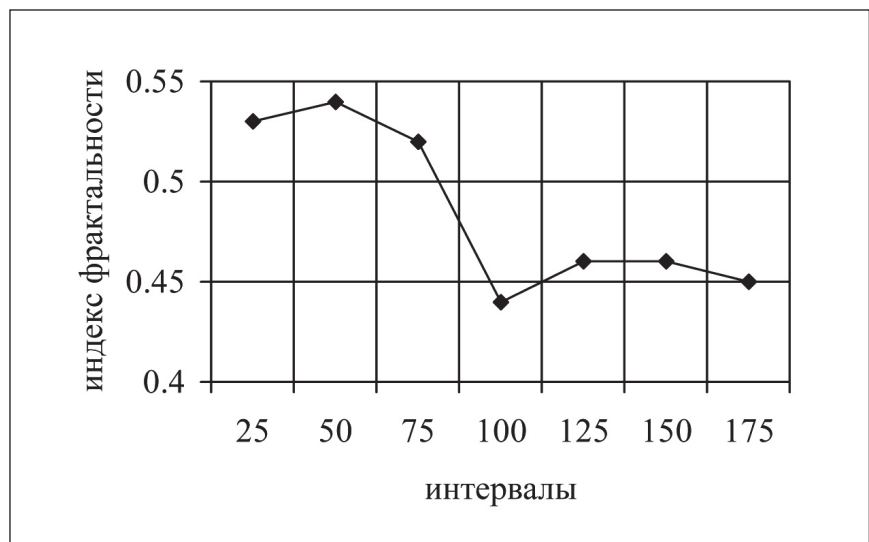


Рис. 3. Локальное изменение индекса фрактальности для ряда R-R интервалов (0–100 инт. — спокойное бодрствование; 100–175 инт. — ментальная нагрузка).

Прежде всего индекс фрактальности может быть использован для выявления моментов качественного изменения характера функционирования системы регулирования ритма, связанного с перераспределением ролей β -симпатического контроля и парасимпатического управления.

Литература

1. Р. М. Баевский, Г. Г. Иванов, Л. В. Чирейкин, А. П. Гаврилушкин с соавт. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем. Метод. рекомендации. Вестник аритмологии. 2001. № 24, с. 1–23.

дечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем. Метод. рекомендации. Вестник аритмологии. 2001. № 24, с. 1–23.

2. Malik M., Bigger J. T., Camm A. J., Kleiger R. E. and oth. Guidelines for Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. European Heart Journal. 1996. V. 17. No 3. p. 354–381.
3. Баевский Р. М., Кириллов О. И., Клецкин С. З. Математический ана-

- лиз изменений сердечного ритма при стрессе. М.Наука. 1984. 220 с.
4. Skinner J. E. Psychosocial stress and sudden cardiac death: brain mechanisms. In: Beamish R. E., P. K. Singal, N. S. Dhalla (Eds.) *Stress and Heart Disease*. Boston: Martinus Nijhoff Publishing. 1985. p. 44–59.
 5. Майоров О. Ю., Факторная модель ЭКГ показателей сердечной деятельности в условиях экспериментального эмоционального стресса: влияние «раннего опыта» на характер стрессорных повреждений миокарда. Матер. VI Всесоюзной конф. по физиол. вегетативной нервной системы. Ереван, из-во АН Арм.ССР. 1986. с. 102–104.
 6. Майоров О. Ю. Нейродинамическая структура системных механизмов устойчивости к эмоциональному стрессу. Диссерт. доктора мед. наук. Москва, 1988. 486 с.
 7. Майоров О. Ю. Некоторые методические и методологические подходы к математическому анализу сердечного ритма в условиях эмоционально-напряженной деятельности и эмоционального стресса. Матер. Пленума пробл. комиссии АМН СССР «Механизмы системной организации физиол. функций». Курск. 1990. с. 81–88.
 8. Mayorov O. Yu., Sulima T. N., Glukhov A. B., Romanchenko Yu. N. Factor infrastructure of visceral and behavioral components of resistance to emotional stress. Third IBRO World Congress of Neuroscience. Montreal. 1991. p. 212.
 9. Майоров О. Ю., Дмитриев С. Г. Применение кардиоинтервалографии для оценки состояния аппарата регуляции кровообращения и степени напряжения регуляторных систем у здоровых подростков и с ПАГ. Метод. Рекомендации. Харьков. 1993. 15 с.
 10. Laude D., Girard A., Consoli S., Mounier-Vehier C., Elghozi J. L. Anger expression and cardiovascular reactivity to mental stress: a spectral analysis approach. *Clin. Exp. Hypertens.* 1997. V. 19. No 5–6. p. 901–911.
 11. Mayorov O. Yu., Baevsky R. M. Application of space technologies for valuation of a stress level. In Series: *Studies in Health Technology and Informatics*. IOS Press. 1999. V.68. p. 352–356.
 12. Delaney J. P., Brodie D. A. Effects of short-term psychological stress on the time and frequency domains of heart-rate variability. *Percept. Mot. Skills.*, 2000, V. 91, No 2. p. 515–524.
 13. Hughes J. W., Stoney C. M. Depressed mood is related to high-frequency heart rate variability during stressors. *Psychosom. Med.* 2000. V. 62, No 6. p. 796–803.
 14. Houtveen J. H., Rietveld S., de Geus E. J. Contribution of tonic vagal modulation of heart rate, central respiratory drive, respiratory depth, and respiratory frequency to respiratory sinus arrhythmia during mental stress and physical exercise. *Psychophysiology.* 2002. V. 39. No 4. p. 427–436.
 15. Papousek I., Schuster G., Premeberger E. Dissociated autonomic regulation during stress and physical complaints. *J. Psychosom. Res.* 2002. V. 52. No 4. p. 257–266.
 16. Hall M., Vasko R., Buysse D., Ombao H. et al. Acute stress affects heart rate variability during sleep. *Psychosom. Med.* 2004. V. 66. No 1. p. 56–62.
 17. Hjortskov N., Rissen D., Blangsted A. K., Fallentin N. et al. The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2004. V. 92. No 1–2. p. 84–89.
 18. Kang M. G., Koh S. B., Cha B. S., Park J. K. et al. Association between job stress on heart rate variability and metabolic syndrome in shipyard male workers. *Yonsei. Med. J.* 2004. V. 45. No 5. p. 838–834.
 19. Wilhelm F. H., Grossman P., Roth W. T. Assessment of heart rate variability during alterations in stress: complex demodulation vs. spectral analysis. *Biomed. Sci. Instrum.* 2005. No 41. p. 346–351.
 20. Майоров О. Ю., Вязовская О. В. Оценка напряжения систем регуляции работы сердца в условиях моделирования эмоционального стресса у крыс. *Ж. Эксперим. и клин. медицина.* №1. 2007. с. 53–58.
 21. Майоров О. Ю., Вязовская О. В. Оценка вариабельности ритма сердца крыс в условиях острого и хронического иммобилизационного стресса. В сб. «Инновационные направления в физиол. двигательной системы и мышечной деятельности». Москва. 2007. с. 37–39.
 22. Vuksanović V., Gal V. Heart rate variability in mental stress aloud. *Med. Eng. Phys.* 2007. V. 29. No 3. p. 344–349.
 23. Aubert A. E., Verheyden B., Ydewalle C., Beckers F. and Van den Bergh O. Effects of mental stress on autonomic cardiac modulation during weightlessness. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2010. V.298. p. H202–H209.
 24. Nickel P., Nachreiner F. Sensitivity and diagnosticity of the 0.1-Hz component of heart rate variability as an indicator of mental workload. *Hum. Factors.* 2003. V. 45. No 4. p. 575–590.
 25. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М., Медицина. 1997. 265 с.
 26. Riganello F., Candelieri A., Quintieri M., Conforti D., Dolce G. Heart rate variability: An index of brain processing in vegetative state? An artificial intelligence, data mining study. *Clin. Neurophysiol.* 2010. V. 121, Iss. 12. p. 2024–2034.
 27. Баевский Р. М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии. М., Медицина. 1979. 205 с.
 28. Нидеккер И. Г. Выявление скрытых периодичностей методом спектрального анализа. Дисс. канд. физ.-мат. наук. М. ВЦ АН СССР. 1968. 131 с.
 29. Sayers B. McA. Analysis of Heart Rate Variability. *Ergonomics*, 1973. V.16. No1. p.17–32.
 30. Stinton P., Tinker J., Vickery J. C., Vahl S. P. The scattergram. A new method for continuous electrocardiographic monitoring. *Cardiovasc. Res.* 1972. V.6. No 5. p. 598–604.
 31. Майоров О. Ю., Модификация некоторых математико-статистических показателей сердечного ритма для компьютерной обработки ЭКГ при исследовании регуляторных систем. Матер. Всесоюзного симпозиума «Проблемы и методы исследования в возрастной физиологии». Баку. 1987. с. 59–60.
 32. Yamamoto Y., Hughson R. L. Coarse-graining spectral analysis: new method for studying heart rate variability. *J. Appl. Physiol.* 1991. V. 71. No 3. p. 1143–1150.
 33. Akselrod S. Components of heart rate variability: basic studies. In: M. Malik, A.J. Camm (Eds.) *Heart Rate Variability*. Armonk, NY: Futura, 1995. p. 147–163.
 34. Майоров О. Ю., Многомерный подход к оценке паттерна математико-статистических показателей вариабельности сердечного ритма. Междунар. Симпоз. «Компьютерная электрокардиография на повороте столетия, Москва. 1999. с. 5.
 35. Goldberger J. J. Sympathovagal balance: how should we measure it? *Am. J. Physiol.* 1999. V. 276. No 4 (Pt 2). p. H1273–1280.
 36. Хаютин В. М., Лукошкова Е. В. Спектральный анализ колебаний частоты сердечбиений: физиологические основы и осложняющие его явления. Российский физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 1999. Т. 85. № 7. с. 893–909.
 37. Федоров В. Ф., Смирнов А. В. О некоторых неиспользованных возможностях статистических методов в кардиологии. Клинические и физиологические аспекты ортостатических расстройств. М., 2000. с.138–148.
 38. Houtveen J. H., Molenaar P. C. Comparison between the Fourier and Wavelet methods of spectral analysis applied to stationary and nonstationary heart period data. *Psychophysiology.* 2001. V. 38. No 5. p. 729–735.
 39. Баевский Р. М. Анализ вариабельности сердечного ритма: история и философия, теория и практика. *Клин. информ. и телемед.* 2004. Т. 1. № 1. с. 54–64.
 40. Allen J. J., Chambers A. S., Towers D. N. The many metrics of cardiac chronotropy: A pragmatic primer and a brief comparison of metrics.

- Biol. Psychol. 2007. V. 74. No 2. p. 243–262.
41. Mayer-Kress G., Yates F. E., Benton L., Keidel M. et al. Dimensional analysis of nonlinear oscillations in brain, heart and muscle. *Math. Biosci.* 1988, No 90, p. 155–182.
 42. Denton T. A., Diamond G. A., Helfant R. H., Khan S. et al. Fascinating rhythm: a primer on chaos theory and its application to cardiology. *Am. Heart J.* 1990. V. 120. No 6 (Pt 1). p. 1419–1440.
 43. Goldberger A. L. Is the normal heart-beat chaotic or homeostatic? *News Physiol. Sci.* 1991. No 6. p. 87–91.
 44. Osaka M., Saitoh H., Atarashi H., Hayakawa H. Correlation dimension of heart rate variability: a new index of human autonomic function. *Front. Med. Biol. Eng.* 1993. V. 5. No 4. p. 289–300.
 45. Yeragani V. K., Srinivasan K., Vempati S., Pohl R., Balon R. Fractal dimension of heart rate time series: an effective measure of autonomic function. *J. Appl. Physiol.* 1993. V. 75. No 6. p. 2429–2438.
 46. Yamamoto Y., Hughson R.L. On the fractal nature of heart rate variability in humans: effects of data length and beta-adrenergic blockade. *Am. J. Physiol.* 1994. V. 266, No 1 (Pt 2). p. R40–49.
 47. Kamen P. W., Tonkin A. M. Application of the Poincaré plot to heart rate variability: a new measure of functional status in heart failure. *Aust N Z J Med.* 1995. V. 25. No 1. p. 18–26.
 48. Kurths J., Voss A., Sapsarin P., Witt A., Kleiner H. J., Wessel N. Quantitative analysis of heart rate variability. *Chaos.* 1995. V. 5. No 1. p. 88–94.
 49. Schmidt G., Monfill G. E. Nonlinear methods for heart rate variability assessment. In: Malik M., Camm A. J. (Eds.) *Heart rate variability*. Armonk: Futura. 1995. p. 87–98.
 50. Sugihara G., Allan W., Sobel D., Allan K. D. Nonlinear control of heart rate variability in human infants. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1996. V. 93. No 6. p. 2608–2613.
 51. Zwiener U., Hoyer D., Luthke B., Schmidt K., Bauer R. Relations between parameters of spectral power densities and deterministic chaos of heart-rate variability. *J. Auton. Nerv. Syst.* 1996. V. 57. No 3. p. 132–135.
 52. Braun C., Kowallik P., Freking A., Haderl D. et al. Demonstration of nonlinear components in heart rate variability of healthy persons. *Am. J. Physiol.* 1998. V. 275. No 5 (Pt 2). p. H1577–1584.
 53. Cugini P., Curione M., Cammarota C., Bernardini F. et al. Evidence that the information entropy estimating the nonlinear variability of human sinus R-R intervals shows a circadian rhythm. *J. Clin. Basic Cardiol.* 1999. V. 2. No 2. p. 275–278.
 54. Pikkujamsa S. M., Makikallio T. H., Sourander L. B., Goldberger A. L. et al. Cardiac interbeat interval dynamics from childhood to senescence: comparison of conventional and new measures based on fractals and chaos theory. *Circulation.* 1999. V. 100. No 4. p. 393–399.
 55. Van Leeuwen P., Bettermann H. The status of nonlinear dynamics in the analysis of heart rate variability. *Herzschr Elektrophys.* 2000. No 11. p. 127–130.
 56. Флейшман А. Н. Медленные колебания кардиоритма и феномены нелинейной динамики: классификация фазовых портретов, показателей энергетике, спектрального и детрентного анализа. Матер. 3-го Всерос. Симп. «Теоретические и прикладные аспекты нелинейной динамики, хаоса и фракталов в физиологии и медицине». Новокузнецк. 2001. с. 49–61.
 57. Rao R. K. A., Yeragani V. K. Decreased chaos and increased nonlinearity of heart rate time series in patients with panic disorder. *Auton. Neurosc. Basic and Clin.* 2001. V. 88. No 1–2. p. 99–108.
 58. Brennan M., Palaniswami M., Kamen P. Poincaré plot interpretation using a physiological model of HRV based on a network of oscillators. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2002. V. 283. No 5. p. H1873–1886.
 59. Машин В. А. Связь тангенса угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма с периодической и нелинейной динамикой ритма сердца на коротких стационарных отрезках. *Биофизика.* 2006. Т. 51. № 3. с. 534–538.
 60. Майоров О. Ю., Фенченко В. Н.. Глобальная реконструкция динамической системы variability сердечного ритма. *Международный симпозиум по variability сердечного ритма.* Ижевск. 2008. с. 35.
 61. Майоров О. Ю., Фенченко В. Н. Повышение надежности исследований биоэлектрической активности (ЭЭГ, ЭКГ) и variability сердечного ритма методами нелинейного анализа. *Клин. информ. и Телемед.* 2009. Т.5. Вып.6. с.10–17.
 62. Aubert A. E., Verheyden B., Beckers F., Tack J., Vandenberghe J. Cardiac Autonomic Regulation under Hypnosis Assesse by Heart Rate Variability: Spectral Analysis and Fractal Complexity. *Neuropsychobiology.* 2009. V.60. p.104–112.
 63. Goldberger A. L., Rigney D. R. Sudden death is not chaos. In: S. Krasner (ed.) *The Ubiquity of Chaos.* American Assoc. for the Advance of Science, Washington. D.C. 1990. p. 23–34.
 64. Poon C. S., Merrill C. K. Decrease of cardiac chaos in congestive heart failure. *Nature.* 1997. V. 389. No 6650. p. 492–495.
 65. Hausdorff F. Dimesion und Ausseres Mass. *Matematishe Annalen,* 1919. № 79. p. 157–179.
 66. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of Strange Attractors. *Phys. Rev. Lett.* 1983. V.50. p. 346–349.
 67. Bassingthwaihgte J. B., Raymond G. M. Evaluation of the dispersional analysis methods for fractal time series. *Ann. Biomrd. Eng.* 1995. V.23. No 4. p. 491–505.
 68. Feder J. *Fractals.* Plenum Press. New York. 1988.
 69. Dubovikov M. M., Starchenko N. S., Dubovikov M. S. Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series. *Physica A.* 2004. V. 339. p. 591–608.
 70. Старченко Н. В. Локальный анализ хаотических временных рядов с помощью индекса фрактальности. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. Москва. 2005.
 71. Dubovikov M. M., Starchenko N. S. Variation index and its applications to analysis of fractal structures. *Sci. Almanac Gordon.* 2003. № 1. p. 1–30.
 72. Dacorogna M. M., R. Gencay, U. A. MGuller, R. B. Olsen, O. V. Pictet. *An Introduction to High-Frequency Finance.* San Diego. Academic Press. 2001.
 73. Peters E. E. *Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics.* New York. Wiley. 1994.
 74. Yulmetyev R., F. Gafarov, P. Hanggi, R. Nigmatullin and S. Kayumov. Possibility between earthquake and explosion seismogram differentiation by discrete stochastic non-Markov processes and local Hurst exponent analysis. *Phys. Rev. E64.* 2001. 066132.p.1–13.
 75. DeBoer R. W., Karemaker J. M., Strakee J. Hemodynamic fluctuations and baroreflex sensitivity in humans: A beat-to-beat model. *Amer. J. Physiol.* – 1987. Iss. 253. p. h680–689.
 76. Гринченко В. Т., А. Г. Рудницкий. Модель взаимодействия сердечно-сосудистой и респираторной систем. *Акустичний вісник.* 2006. Т.9. №3. с.16–26.
 77. Eyal S., Akselrod S. Bifurcation in a Simple Model of the Cardiovascular System. *Method Inform. Med.* 2000. Iss. 39. p. 118–121.
 78. McSharry P. E., McGuinness M. J., Fowler A. C. Confronting a Cardiovascular System Model with Heart Rate and Blood Pressure Data. *Computers in Cardiology.* 2005. Iss.32. p. 587–590.
 79. Proklov M. D., Ponomarenko V. I. Recovery of Time-Delay System with Two Delays from Time Series. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems.* 2004. V.7: No 4. p. 400–404.
 80. Frank O. Die Grundform des arteriellen Pulses. *Zeitung fur Biologie.* 1999. Iss. 37. s.483–586.
 81. Patterson S. W., Piper H., Starling E. H. The regulation of the heart beat. *J. Physiol.* 1914. V. 48. p. 465–513.

Application of the local index of fractality for the analysis of the short R-R intervals series researching of heart rate variability

© *O.Yu. Mayorov*^{1,2,3},
V. N. Fenchenko^{1,2,4}

¹*Kharkiv Medical Academy of Postgraduate Education of the Ministry of Healthcare of Ukraine*

²*Institut of the Medical informatics and Telemedicine, LTD, Kharkiv, Ukraine*

³*Institut of Children and Adolescents Health Protection of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kharkiv*

⁴*B.Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv*

Abstract

The new approach to the analysis of heart rate variability from positions of the nonlinear dynamics is offered on the basis of evaluating of the local index of fractality that can be calculated on rather short R-R intervals series. It gives the perspective tool for researching of heart rate variability by methods of the nonlinear analysis. The local index of fractality can be used for detection of the qualitative modification moments of the character of the rhythm regulating system. That Index allows revealing redistribution of the roles of the β -sympathetic control and parasympathetic regulation.

Key words: ECG, heart rate variability, the nonlinear analysis, local index of fractality.

Застосування локального індексу фрактальності для аналізу коротких рядів R-R інтервалів при дослідженні варіабельності серцевого ритму

© *О. Ю. Майоров*^{1,2,3},
В. Н. Фенченко^{1,2,4}

¹*Харківська медична академія післядипломної освіти МОЗ України, Харків*

²*Інститут Медичної інформатики і Телемедицини, Харків, Україна*

³*Інститут охорони здоров'я дітей і підлітків АМН України, Харків*

⁴*Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України ім. Б. І. Веркна, Харків*

Резюме

Запропонований новий підхід до аналізу варіабельності серцевого ритму з позицій нелінійної динаміки на основі обчислення локального індексу фрактальності, який може бути обчислений по відносно короткому ряду R-R інтервалів. Це дає перспективний інструмент для дослідження варіабельності серцевого ритму методами нелінійного аналізу.

Локальний індекс фрактальності може бути використаний для виявлення моментів якісної зміни характеру функціонування системи регулювання ритму, пов'язаного з перерозподілом ролей β -симпатичеського контролю і парасимпатичного управління.

Ключові слова: ЕКГ, варіабельність серцевого ритму, нелінійний аналіз, локальний індекс фрактальності.

Переписка

д.мед.наук, професор **О. Ю. Майоров**

а.я. 7313, Харків, 61002

Україна

тел.: +380 (57) 711 80 32

ел. почта: institute-MIT@ukr.net