

АНТИПОВ О. И., КИСЛЯЕВ А. С.

**РАСЧЕТ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ СКАТТЕРОГРАММ
КОРОТКИХ ЗАПИСЕЙ R-R ИНТЕРВАЛОВ У ПАЦИЕНТОВ
С ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СЕРДЦА**

Аннотация. Расчет поклеточной фрактальной размерности скаттерограмм, построенных на основе пульсограмм, позволяет уйти из временной области анализа и пренебречь незвидестантностью. В работе рассмотрено применение данной методики на примере анализа двух групп больных с ишемической болезнью сердца. Показаны статистические различия в результатах нелинейного математического анализа данных пациентов.

Ключевые слова: временной ряд, скаттерограмма, фрактальный анализ, фрактальная размерность, искусственные нейронные сети, вариабельность сердечного ритма, ишемическая болезнь сердца.

ANTIPOV O. I., KISLIAEV A. S.

**CALCULATION OF FRACTAL DIMENSION FOR SCATTERGRAM R-R INTERVALS
SHORT RECORDINGS IN PATIENTS WITH ISCHEMIC HEART DISEASE**

Abstract. Calculation of whole-cell fractal dimension of scattergrams based on pulsograms allows to leave the time-domain analysis and to neglect the non-equidistance factor. The study presents an analysis of the method application in two groups of patients with ischemic heart disease. The study shows statistical differences in the results of non-linear mathematical analysis of the patient data.

Keywords: time series, scattergram, fractal analysis, fractal dimension, artificial neural networks, heart rate variability, ischemic heart disease.

Введение. Вариабельность сердечного ритма (BCP) представляет собой изменение частоты сердечных сокращений (длительности интервалов $R-R$) во времени или их колебания относительно среднего значения при наличии синусового ритма и отражает степень выраженности синусовой аритмии [10]. Анализируя BCP, мы можем оценить общее состояние человека, следить за его динамикой, вплоть до развития патологических состояний [2]. Несмотря на множество практических исследований BCP, возникшие на протяжении 50-ти лет дискуссии были сняты лишь в отношении того, что снижение BCP может использоваться в качестве предиктора риска после острого инфаркта миокарда [12] и как ранний признак развития диабетической нейропатии [11]. Снижение BCP при сердечной недостаточности имеет важное прогностическое значение [3].

В основе исследования ВСР лежит измерение длительности временных интервалов между *R*-зубцами (*R-R* интервалов, кардиоинтервалов) электрокардиограммы (ЭКГ) и построение на их основе ритмограммы с последующим ее анализом.

Ритмограмма – это числовая последовательность промежутков времени между двумя соседними сокращениям. На ритмограмме каждая вертикальная линия показывает продолжительность соответствующего кардиоинтервала, которая от цикла к циклу изменяется. Колебания ритмограммы отражают изменения сердечного ритма, происходящие под воздействием регуляторных систем организма [2]. Существующие противоречия в интерпретации ритмограмм ВСР приводят к поискам альтернативных методов анализа вариантов ее записей, как коротких (до 5 мин.), так и длинных (24 часа). При вариационной пульсометрии (П) учитывается до 100-1200 кардиоциклов ЭКГ записей *R-R* интервалов во П стандартном отведении. По ритмограмме строится скаттерограмма.

Скаттерограмма (СКТГ) – это график, на котором каждая точка соответствует одному *R-R* интервалу. При этом по оси абсцисс откладывается длительность текущего интервала, а по оси ординат – длительность предыдущего. График и область точек, полученных таким образом, называются корреляционной ритмограммой, или СКТГ и, по своей сути, топографически эквивалентны пятнам Пуанкаре или Лоренца.

В современной клинической практике для анализа скаттерограмм чаще применяют визуальный анализ. Для этого на ритмограмме выделяют «облако» – эллипс, который соответствует стандартному отклонению всех *R-R* интервалов. Считается, что благодаря данному методу можно оценить динамику включения вегетативной (симпатической и парасимпатической) и центральной нервной системы. У здорового человека на СКТГ эллипс будет вытянут вдоль биссектрисы. В данной работе для СКТГ предлагается рассчитывать размерность Минковского как для обычных сечений Пуанкаре, поскольку сама СКТГ по смыслу напоминает сечение Пуанкаре (проекция некоторой площадки в фазовом пространстве на себя (или на другую площадку) вдоль траекторий (фазовых кривых) системы [8]. Это позволит нам применить фрактальные методы для расчета фрактальной размерности поклеточным методом [9]. Что, в свою очередь, позволит шире, или в комплексе с другими методами применить его в диагностических целях [5-7]. В этом случае оценка ВСР будет относиться к методам нелинейного анализа, которые с успехом применялись при решении различных клинических задач [1; 4].

Цель работы: определить диагностическую значимость скаттерограмм пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС).

Задачи исследования: 1) построить скаттерограммы пациентов по пятиминутной записи представленной ЭКГ; 2) применить предложенный метод расчета поклеточной

фрактальной размерности построенных скаттерограмм; 3) провести оценку диагностической значимости метода расчета поклеточной фрактальной размерности с помощью комплекса методов математической статистики и нейросетевого анализа.

Материалы и методы. Все пациенты с ИБС были добровольцами. Исследования проводились в строгом соответствии с Международными требованиями, Законодательством РФ и Российскими этическими принципами и нормами. Первая группа включала 46 человек в возрасте от 26 до 60 лет с ИБС без повторного инфаркта миокарда (ПИМ). Вторая группа – 20 пациентов в возрасте от 53 до 67 лет с ПИМ.

Для оценки клинического состояния больных врачом в стационаре ОКБ тщательно анализировались жалобы, анамнез, исследование пульса и артериального давления. Инструментальные методы включали ЭКГ с выборочным суточным мониторингом. Суточное мониторирование ЭКГ проводилось в условиях естественного двигательного режима с помощью комплекса оборудования фирмы «SCHILLER». Регистрация ЭКГ проводилась после 5-ти дневной адаптации пациентов в стационаре, через 2-3 дня после отмены пролонгированных антиангиальных препаратов. Проводился анализ 5-минутных записей R-R интервалов во II стандартном отведении ЭКГ двух групп пациентов. Диагностическую значимость расчета фрактальной размерности скаттерограмм между двумя группами пациентов оценивали с помощью нейросетевого анализа [5; 6], включавшего входные переменные: значения показателей LF, HF, LF/HF, фрактальная размерность скаттерограммы больного. В качестве выходной переменной использовался диагноз пациента. Конструировались MLP-сети, обучение проводили методом обратного распространения ошибки.

Результаты. По полученным данным пациентов построили скаттерограммы. На рисунке 1а представлена скаттерограмма пятиминутной записи пациента без ПИМ. По осям отложены длительности между ударами сердца (R-R-интервалов) в секундах. На рисунке 1б представлена СКТГ, нормированная таким образом, чтобы она вписалась в единичный квадрат.

На рисунке 2 представлены клетки покрытия СКТГ, в которое попали точки СКТГ: чем темнее клетка, тем больше внутри нее попаданий точек скаттерограммы. На разных временных масштабах строилась зависимость количества клеток, содержащих точки СКТГ, от количества клеток по каждой из осей в двойном логарифмическом масштабе.

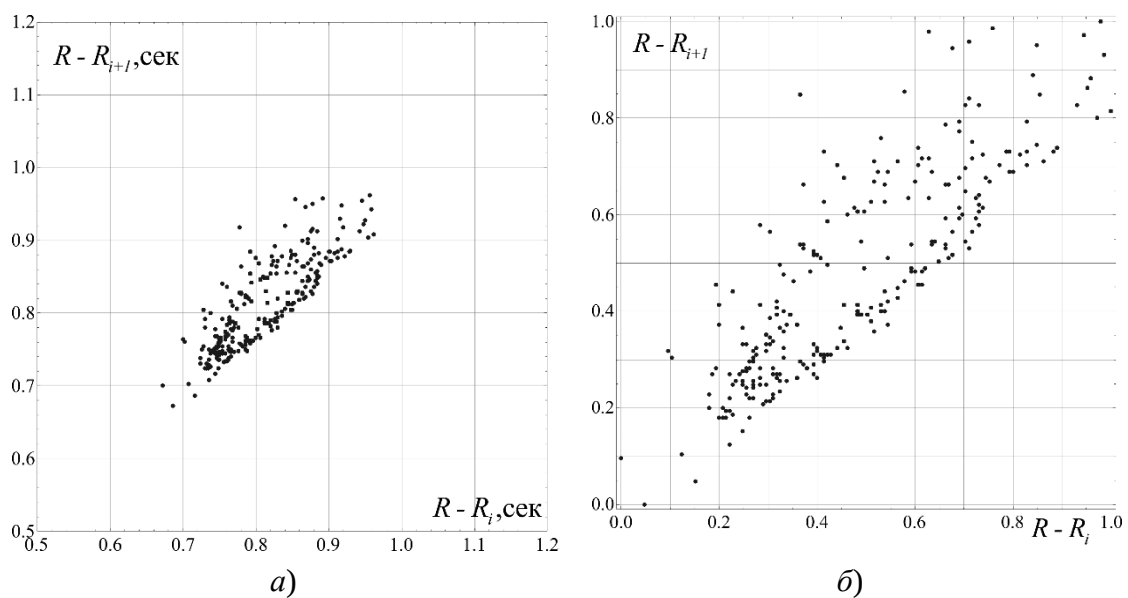


Рис. 1. Скаттерограмма пятиминутной записи пациента без ПИМ, восстановленная по пятиминутной пульсограмме (а) и ее вид после нормировки (б).

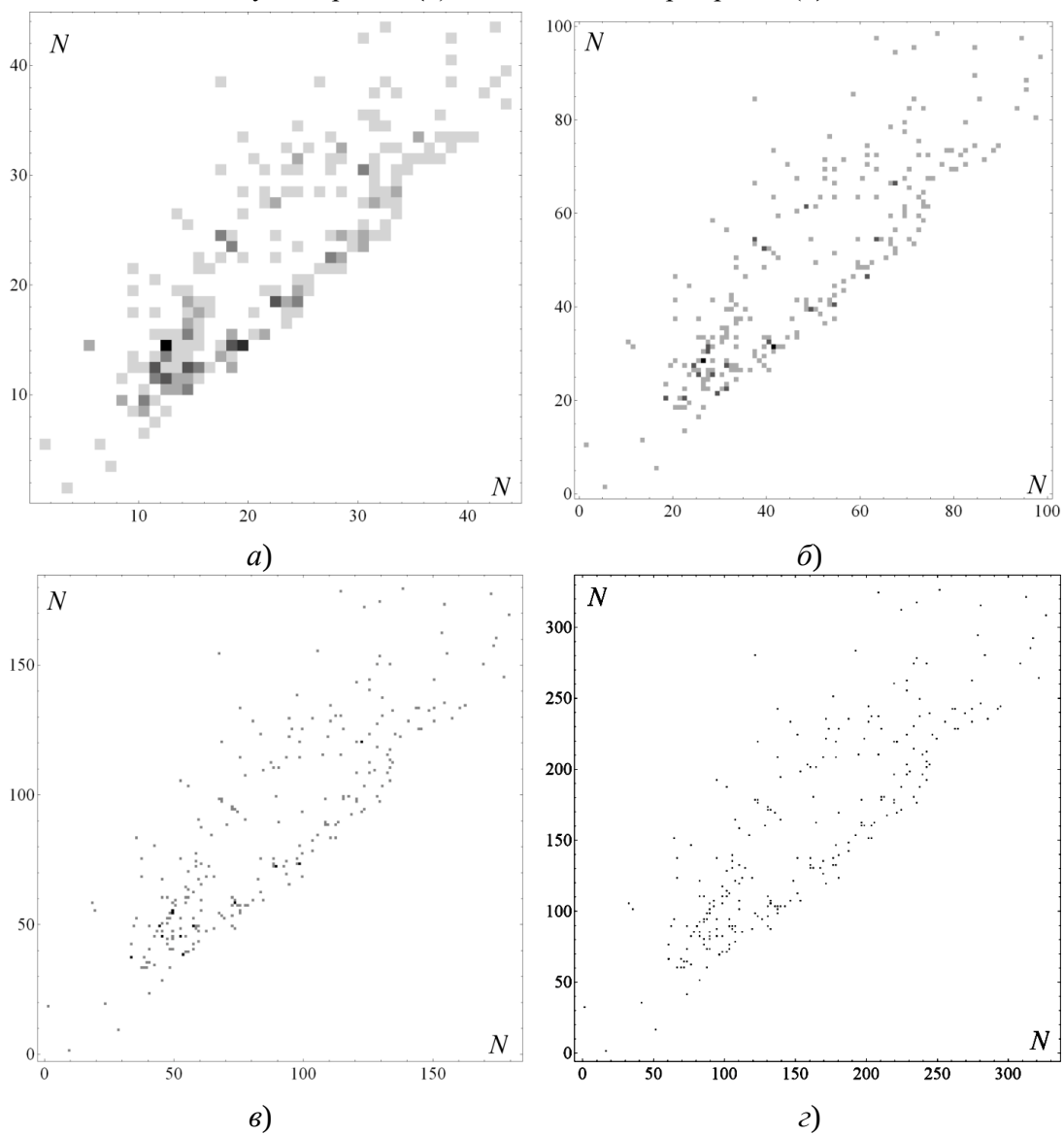


Рис. 2. Изображения клеточных покрытий скаттерограммы из рис. 1б для следующих значений N : а) 44, б) 99, в) 181, г) 330.

После анализа всех скаттерграмм стало понятно, что с увеличением числа клеток по осям имеется насыщение величины количества клеток покрытия. Поэтому точки после насыщения далее в расчетах не участвовали. Появление насыщения объясняется наличием разрешения клеточного покрытия, при котором в каждый квадрат покрытия попадает только одна точка СКТГ. По оставшимся точкам строится аппроксимирующая прямая по методу метода наименьших квадратов. Наклон этой кривой соответствует фрактальной поклеточной размерности. На рисунке 3 представлен результат, где имеется зависимость в двойном логарифмическом масштабе относительно основания e , малыми точками отмечены зависимости, которые отличаются от предыдущих значений менее, чем на 0,01%. По основным значениям, отмеченным крупными точками, построена прямая аппроксимацией методом наименьших квадратов. Коэффициент наклона этой прямой – значение искомой поклеточной размерности.

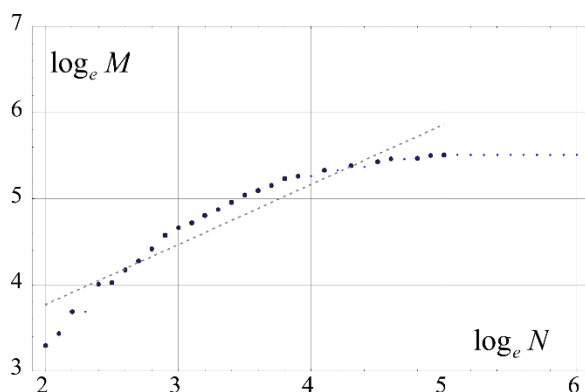


Рис. 3. Зависимость M от N в двойном логарифмическом по основанию e .

Применение метода расчета поклеточной фрактальной размерности показало, что имеются различия в скаттерграммах, позволяющие дифференцировать обследуемые группы пациентов с вероятностью 65%.

Обученная MLP-сеть включала 3 скрытых нейрона, ошибка обучения – 0,26. Точность предсказания диагноза группы у больного с ПИМ – 78%. Оценка чувствительности и специфичности работы MLP-сети нами не проводилась в связи с малым количеством пациентов в тестируемой выборке пациентов.

Заключение. В результате работы предложен алгоритм применения метода расчета размерности Минковского применительно к скаттерграммам. В результате экспериментальной проверки было установлено, что с помощью предлагаемого алгоритма можно с вероятностью 65% предположить риск возникновения ПИМ у больных с ИБС путем анализа пятиминутного участка ритмограммы сердечной деятельности. При этом производится построение скаттерграммы с ее последующей нормировкой. Сами ритмограммы могут быть получены путем обработки как ЭКГ, так и пульсограмм.

Предложенная методика предлагается к использованию в функциональной диагностике сердечно-сосудистых заболеваний. Увеличение количества данных как холтеровского мониторирования у пациентов, так и локальных участков ЭКГ (интервалов $R-R$), расчет значения фрактальной размерности, в том числе и скаттерограммы, позволит увеличить обучающие, контрольные и тестовые выборки для искусственных нейронных сетей с целью повышения качества прогноза возникновения повторного инфаркта миокарда у больных с ишемической болезнью сердца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов О. И., Захаров А. В., Неганов В. А. Сравнение скорости и точности фрактальных методов детерминированного хаоса применительно к распознаванию стадий сна // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН. – 2013. – № 2-1. – С. 9-14.
2. Баевский Р. М., Иванов Г. Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения // Ультразвуковая и функциональная диагностика. – 2001. – № 3. – С. 108-127.
3. Задонченко В. С., Мартынова Л. Н., Тимофеева Н. Ю. и др. Вариабельность сердечного ритма в оценке прогрессирования сердечной недостаточности и эффективности терапии ингибиторами ангиотензинпревращающего фермента // Сердечная недостаточность. – 2001. – Т. 2. – № 5. – С. 12-15.
4. Захаров А. В., Власов Я. В., Повереннова И. Е. и др. Особенности постуральных нарушений у больных рассеянным склерозом // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. – 2014. – Т. 114. – № 2-2. – С. 55-58.
5. Кожевников С. Б., Кисляев А. С. Суворова Г. Н. и др. Комплексное применение методов мягких вычислений в решении задач в диагностике фибрилляции предсердий // Актуальные проблемы медицинских наук: материалы III межрегионального студенческого научного форума с участием молодых исследователей. – Саранск: ООО «Референт», 2014. – С. 44-46.
6. Козлова А. А., Кисляев А. С. Прогнозирование эпизодов атриальных фибрилляций с помощью MLP- и RBF- сетей // Нейроинформатика-2014: труды XVI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – М.: МИФИ, 2014. – Ч. 3. – С. 162-165.
7. Кожевников С. Б., Кисляев А. С. Фрактальный анализ фибрилляции предсердий // Вестник Российского государственного медицинского университета. – 2015. – № 2. – С. 360.

8. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. – М.: ПОСТМАРКЕТ, 1999. – 350 с.
9. Матюшкина А. А., Антипов О. И. Применимость методов нелинейной динамики вычисления по клеточным фрактальным размерностям к анализу скаттерограмм // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: материалы XV Международной научно-технической конференции. – Т. 3. – Казань, 2014. – С. 389.
10. Явелов И. С., Грацианский Н. А., Зуйков Ю. А. Вариабельность ритма сердца при острых коронарных синдромах: значение для оценки прогноза заболевания (Часть 1) // Кардиология. – 1997. – № 2. – С. 61-67.
11. Bellavere F., Balzani J., De Masi G. et al. Power spectral analysis of heart rate variation improves assessment of diabetic cardiac autonomic neuropathy // Diabetes. – 1992. – № 41 – P. 633-640.
12. Huuskari H. V., Makikallio T. H., Airaksinen K. E. et al. Measurement of heart rate variability: a clinical tool or a research toy? // Journal of the American College of Cardiology. – 1999. – № 34. – P. 1878-1883.