

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 615.471:616.12
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-58-71>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Методические особенности анализа фрактальной размерности сердечного ритма

М.О. Быкова[®],
В.А. Баландин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: margaritabyckova@yandex.ru

Резюме

Цель. Целью работы было определение параметра фрактальной размерности, рассчитанного для последовательности длительностей R-R интервалов, выявление границы его изменения для здоровых и больных пациентов, а также возможности его использования в качестве дополнительного фактора при выявлении патологии сердечной деятельности.

Методы. Для определения параметра фрактальной размерности используются методики Херста, Барроу, минимальной площади покрытия и Хигучи. При оценке стационарности ряда кардиоинтервалов применяется стандартный метод сравнения средних арифметических и дисперсий по выборкам общего массива данных кардиоинтервалов. Для выявления различий фрактальных размерностей здоровых и больных пациентов выполнено ранжирование данного параметра. С помощью использования двухвыборочного критерия Колмогорова – Смирнова показано различие законов распределения в выборках для здоровых и больных пациентов.

Результаты. Показано, что из рассмотренных методов расчета фрактальной размерности наименьший разброс данных между здоровыми пациентами демонстрирует метод Хигучи. Выполнено ранжирование рассчитанных значений фрактальной размерности, позволившее выявить различие данного параметра для здоровых и больных пациентов. Показано, что различие в распределении фрактальной размерности здоровых и больных пациентов является статистически значимым для методов покрытия и Хигучи. В то же время при использовании традиционного метода Херста нет основания отвергать нулевую гипотезу о принадлежности двух групп пациентов одной генеральной совокупности.

Выводы. На основании полученных данных было показано, что статистически значимое различие между показателями фрактальной размерности длительностей R-R интервалов здоровых и больных пациентов имеет место при применении метода Хигучи. Установлено, что ранжирование выборок позволяет эффективно различать фрактальные размерности здоровых и больных пациентов. Результаты работы показывают перспективность дальнейших исследований, направленных на использование фрактальных характеристик кардиоритма для выявления нарушений последнего, что может служить дополнительным фактором при определении патологии деятельности сердца.

Ключевые слова: фрактал, фрактальная размерность, ишемическая болезнь сердца, хроническая сердечная недостаточность, метод Хигучи, метод минимальной площади покрытия, метод Херста

• Поступила: 30.05.2022 • Доработана: 14.09.2022 • Принята к опубликованию: 25.01.2023

Для цитирования: Быкова М.О., Баландин В.А. Методические особенности анализа фрактальной размерности сердечного ритма. *Russ. Technol. J.* 2023; 11(2):58–71. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-58-71>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Methodological features of the analysis of the fractal dimension of the heart rate

Margarita O. Bykova[@],
Vyacheslav A. Balandin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: margaritabyckova@yandex.ru

Abstract

Objectives. The aim of the present work is to determine the fractal dimension parameter calculated for a sequence of R–R intervals in order to identify the boundaries of its change for healthy and sick patients, as well as the possibility of its use as an additional factor in the detection of cardiac pathology.

Methods. In order to determine the fractal dimension parameter, the Hurst-, Barrow-, minimum coverage area-, and Higuchi methods are used. For assessing the stationarity of a number of electrocardiography (ECG) intervals, a standard method is used to compare arithmetic averages and variances from samples of the total data array of ECG intervals. To identify differences in fractal dimensions of healthy and sick patients, this parameter was ranked. Using the Kolmogorov–Smirnov two-sample criterion, the difference between the distribution laws in the samples for healthy and sick patients is shown.

Results. Among the considered methods for calculating the fractal dimension, the Higuchi method demonstrates the smallest data spread between healthy patients. By ranking the calculated fractional dimension values, it was possible to identify the difference between this parameter for healthy and sick patients. The difference in the distribution of fractal dimension of healthy and sick patients is shown to be statistically significant for the coverage and Higuchi methods. At the same time, when using the traditional Hurst method, there is no reason to reject the null hypothesis that two groups of patients belong to the same general population.

Conclusions. Based on the obtained data, the difference between the fractal dimension indicators of the duration of R–R intervals of healthy and sick patients is shown to be statistically significant when using the Higuchi method. The fractal dimensions of healthy and sick patients can be effectively distinguished by ranking samples. The results of the research substantiate prospects for further studies aimed at using fractal characteristics of the heart rhythm to identify abnormalities of the latter, which can serve as an additional factor in determining heart pathologies.

Keywords: fractal, fractal dimension, coronary heart disease, chronic heart failure, Higuchi method, minimum coverage area method, Hurst method

• Submitted: 30.05.2022 • Revised: 14.09.2022 • Accepted: 25.01.2023

For citation: Bykova M.O., Balandin V.A. Methodological features of the analysis of the fractal dimension of the heart rate. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):58–71. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-58-71>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Вариабельность сердечного ритма (ВСР) стала одним из эффективных методов оценки нервной регуляции работы сердца, позволяющим анализировать взаимодействие между симпатическими и блуждающими флуктуациями, а также их влияние на частоту сердечных сокращений. Колебания частоты сердцебиения демонстрируют различные линейные, нелинейные, периодические и аperiodические колебательные паттерны.

На протяжении нескольких десятков лет интенсивное изучение вариабельности сердечного ритма позволило провести корреляцию между его изменениями и наличием патологий работы сердечно-сосудистой системы. В России фундаментальные исследования данного направления, выполненные в научной школе Р.М. Баевского¹, а также другими учеными [1–4], позволили дать физиологическую интерпретацию вариабельности сердечного ритма при анализе информации о состоянии и функционировании систем, регулирующих ритм сердца.

Проведенные исследования позволили прийти к выводу, что оценка общей вариабельности сердечного ритма помогает осуществлять раннюю диагностику нарушений работы сердечно-сосудистой системы. Существует целый ряд различных подходов к анализу процесса сердцебиения. В частности, успешно

используется анализ вариабельности на основе изучения статистических параметров ритмограмм. Также широкое распространение получил спектральный анализ ритмограмм, основанный на быстром преобразовании Фурье и последующем анализе распределения спектральной плотности по частотному диапазону. В результате выполненных исследований было установлено, например, что высокочастотная область (0.15–0.4 Гц) является маркером блуждающей модуляции, а низкочастотная область (0.04–0.15 Гц) преимущественно отражает симпатический тонус и барорефлексную активность. Частотная и временная методики, а также ряд других методик основаны на предположении, что сигналы ВСР линейны, а, следовательно, не могут отражать и количественно оценивать динамическую структуру сигнала. Для оценки нелинейных свойств был также предложен ряд методов, включая фрактальную размерность, показатели Ляпунова, корреляционную размерность, приближенную энтропию и анализ флуктуаций с понижением тренда [5–9]. Все эти методы определяют свойства ВСР как нелинейного процесса, реагирующего на внешние возмущения нелинейным образом. Последние 2–3 десятилетия предприняты попытки описания таких нелинейных систем с позиции детерминированного хаоса [10–12], который, в отличие от обиходного понимания беспорядка как абсолютно случайного процесса, относится к процессам ограниченной случайности. Именно таким процессом является сердечный ритм. Как отмечается в [13], для нормального функционирования организма необходима некоторая норма хаотичности. Существенное отклонение от нормы как в сторону большего порядка, так и в сторону большей хаотичности может указывать на заболевание организма.

В настоящей работе рассмотрена одна из методик нелинейного исследования ритма сердца – анализ фрактальной размерности – коэффициента, описывающего фрактальные структуры или множества на основе количественной оценки их сложности². Данный параметр определяется для последовательности длительностей R-R интервалов здоровых пациентов

¹ Роман Маркович Баевский – д.м.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, академик Международной академии астронавтики, академик Международной академии информатизации; один из основоположников авиакосмической кардиологии, космической телеметрии, концепции донозологической диагностики. Лично выполнял разработку системы медицинского контроля для космического полета Ю.А. Гагарина. В научной школе Р.М. Баевского можно выделить три основополагающих направления: баллистокardiографию и кардиографию; вариабельность сердечного ритма; космическую медицину и донозологическую диагностику. [Roman Markovich Baevsky, Dr. Sci. (Med.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Academician at the International Academy of Astronautics, Academician at the International Academy of Informatization. He is one of the founders of aerospace cardiology, space telemetry, and the concept of prenosological diagnostics, having personally carried out the development of a medical control system for Yu.A. Gagarin. In Baevsky's scientific school, three fundamental directions can be distinguished: ballistocardiography and cardiography; heart rate variability; space medicine and prenosological diagnostics.]

² Фрактальная размерность. https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Фрактальная_размерность&stable=1. Дата обращения 23.04.2022. [Fractal dimension. https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Фрактальная_размерность&stable=1. Accessed April 23, 2022 (in Russ.).]

и больных хронической сердечной недостаточностью (ХСН) и ишемической болезнью сердца (ИБС).

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ D

Б. Мандельброт [14] дает следующее определение фракталам: «Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому». Основной характеристикой самоподобных структур, определяющей степень изрезанности пространства, является фрактальная размерность D . Есть ряд различных способов ее определения. Один из самых популярных – это метод Херста [15, 16], основанный на отношении размаха накопленного отклонения к стандартному отклонению. Иное название данной методики – R/S -анализ.

Его суть выражается следующей формулой:

$$\frac{R}{S} = (aN)^H,$$

где a – некоторая постоянная для конкретного процесса; N – объем данных; H – показатель Херста; S – среднее квадратичное отклонение ряда; R – размах накопленного отклонения, т.е. разность между максимальными и минимальными значениями накопленного отклонения от среднего арифметического ряда Z на участке $[1; u]$. В свою очередь u принадлежит участку от 1 до N . На рис. 1 показаны изменения некоторой величины X , ее накопленного отклонения Z и среднее значение $X_{\text{ср}u}$ на участке $[1; u]$:

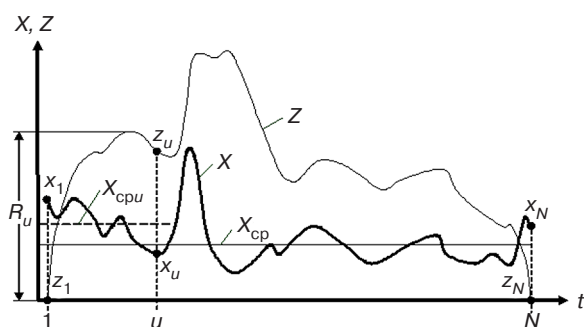


Рис. 1. Изменения величины X (жирная линия), ее накопленное отклонение Z (тонкая линия) и среднее значение $X_{\text{ср}}$ (R_u – размах накопленного отклонения; $X_{\text{ср}u}$ – среднее значение X на участке; x_1 – начальное значение величины X ; z_1 – начальное значение накопленного отклонения Z ; z_u – значение накопленного отклонения Z , взятое в точке u ; x_u – значение величины X , взятое в точке u ; x_N – конечное значение величины X ; z_N – конечное значение накопленного отклонения Z)³

³ Кобенко В.Ю. Фракталы в науке и технике. Методические указания по выполнению лабораторных работ в приложении Microsoft Excel. Омск: ОмГТУ; 2005. С. 6. [Kobenko V.Yu. Fractals in science and technology. Guidelines for performing laboratory work in the Microsoft Excel application. Omsk: OmGTU; 2005. P. 6 (in Russ.).]

Фрактальная размерность связана с показателем Херста соотношением:

$$D = 2 - H.$$

Еще одним способом определения фрактальной размерности является метод Барроу⁴. Он заключается в нахождении средней дисперсии приращений W , которая вычисляется по следующей формуле:

$$W(\Delta N) = \frac{1}{N - \Delta N} \sum_{i=1}^{N-\Delta N} (x_{i+\Delta N} - x_i)^2,$$

где $1 \leq \Delta N \leq N - 1$.

Зависимость $W = f(\Delta N)$ описывается теоретической моделью:

$$W = (a\Delta N)^B,$$

где a – некоторая постоянная для данного ряда данных, B – показатель Барроу.

Фрактальная размерность определяется как:

$$D = 2 - B.$$

Также распространение получил метод минимальной площади покрытия. Он применяется, в частности, в экономической сфере, также используется для анализа метеорологических рядов [17]. В данном случае для определения фрактальной размерности объем данных N разбивается на δ частей, после чего вычисляется сумма амплитудных вариаций для каждой из полученных частей. Затем δ меняется, после нескольких повторений алгоритма строится график в логарифмическом масштабе зависимости V от δ . Полученный набор точек аппроксимируется прямой, после чего методом наименьших квадратов вычисляется угловой коэффициент k . На рис. 2 визуальным образом представлен процесс вычисления площади покрытия при различных значениях δ .

Фрактальная размерность в данном случае находится по формуле:

$$D = k + 1.$$

В некоторых исследованиях, связанных с фрактальным анализом биологических процессов, для оценки фрактальной размерности применялся алгоритм Хигучи [15, 18]. В данной работе также будет использована эта методика.

Для получения фрактальной размерности D Хигучи исследовал конечный набор наблюдений, полученных с регулярным интервалом:

$$X(1), X(2), X(3), \dots, X(N).$$

⁴ Там же. С. 13–15. [Ibid. P. 13–15.]

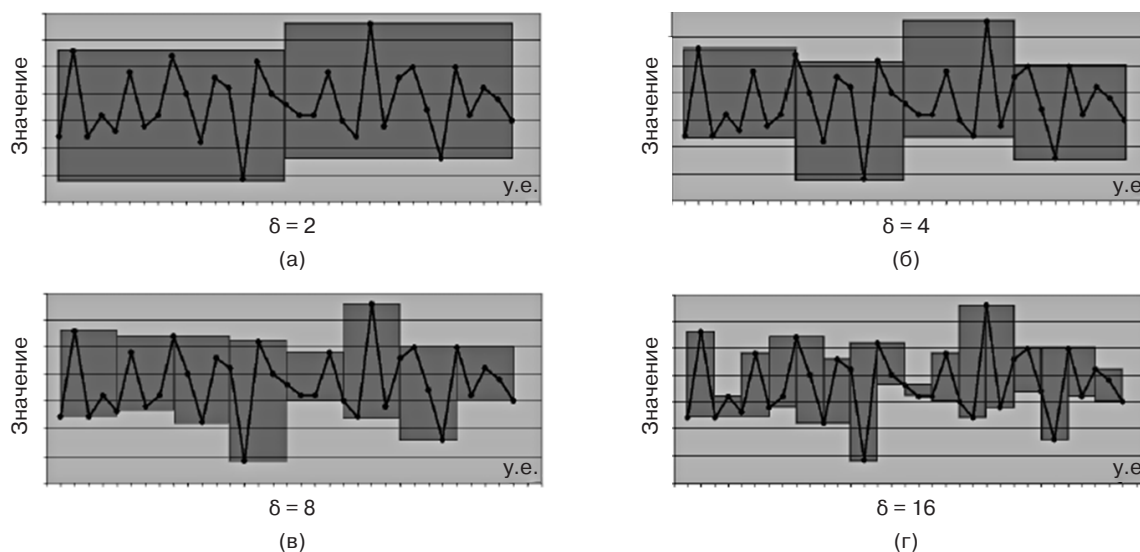


Рис. 2. Вычисление площади покрытия при различных значениях δ [17]

Из этих временных рядов образуется новый ряд X_k^m , который составляется следующим образом:

$$X_k^m : X(m), X(m+k), X(m+2k), \dots, X\left(m + \left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor k\right),$$

где $m = 1, 2, \dots, k$; k и m – целые числа; m и k – порядковый номер отсчета и размер интервала, соответственно.

В рамках данного метода определяется длина кривой, связанной с каждым временным рядом X_k^m следующим образом:

$$L_m(k) = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor} (X(m+ik) - X(m+(i-1)k)) \right) \left(\frac{N-1}{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor k} \right),$$

где $\frac{N-1}{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor k}$ – коэффициент нормализации. Для определения фрактальной размерности D берется среднее значение $\langle L(k) \rangle$ длин, связанных с временными рядами, при этом имеет место соотношение:

$$\langle L(k) \rangle \propto k^{-D}.$$

ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ЗДОРОВЫХ И БОЛЬНЫХ ПАЦИЕНТОВ

Для расчета фрактальной размерности ВСР здоровых пациентов использовались записи длительностей R–R интервалов из базы данных «RR interval

time series from healthy subjects», для больных – из баз «Congestive Heart Failure RR Interval Database» и «St. Petersburg INCART 12-lead Arrhythmia Database». Базы представлены в открытом ресурсе медицинских сигналов Physionet⁵. Длительности R–R интервалов были получены с помощью инструмента Show RR intervals as text, предусмотренного этой базой, который автоматически определяет данный параметр на заданном временном промежутке. В начале исследования рассматривался временной промежуток из 450 значений R–R интервалов, что соответствовало примерно 5-минутной записи. Все дальнейшие вычисления проводились в программе Microsoft Excel. Алгоритмы определения фрактальной размерности методами Херста, Барроу и покрытия подробно описаны в работах [15–18]. Порядок построения фрактальной плоскости методом Хигучи состоял из следующих шагов:

1. Составление временных рядов, $k \in [2; 10]$.
2. Вычисление длины кривой $L_m(k)$ каждого ряда.
3. Определение среднего значения $\langle L(k) \rangle$ длин, связанных с временными рядами, для каждого набора наблюдений.
4. Построение графика зависимости $\langle L(k) \rangle$ от k в логарифмическом масштабе и определение методом наименьших квадратов значения фрактальной размерности D .

На рис. 3 показаны фрактальные плоскости, определенные четырьмя используемыми методами, для одного из здоровых пациентов.

Синим, красным, зеленым и фиолетовым цветами выделены координаты точек для фрактальных плоскостей R/S метода, метода Барроу, метода площади наименьшего покрытия и метода Хигучи, соответственно. Черным пунктиром обозначена аппроксимирующая

⁵ <https://physionet.org/>. Дата обращения 14.02.2022. / Accessed February 14, 2022.

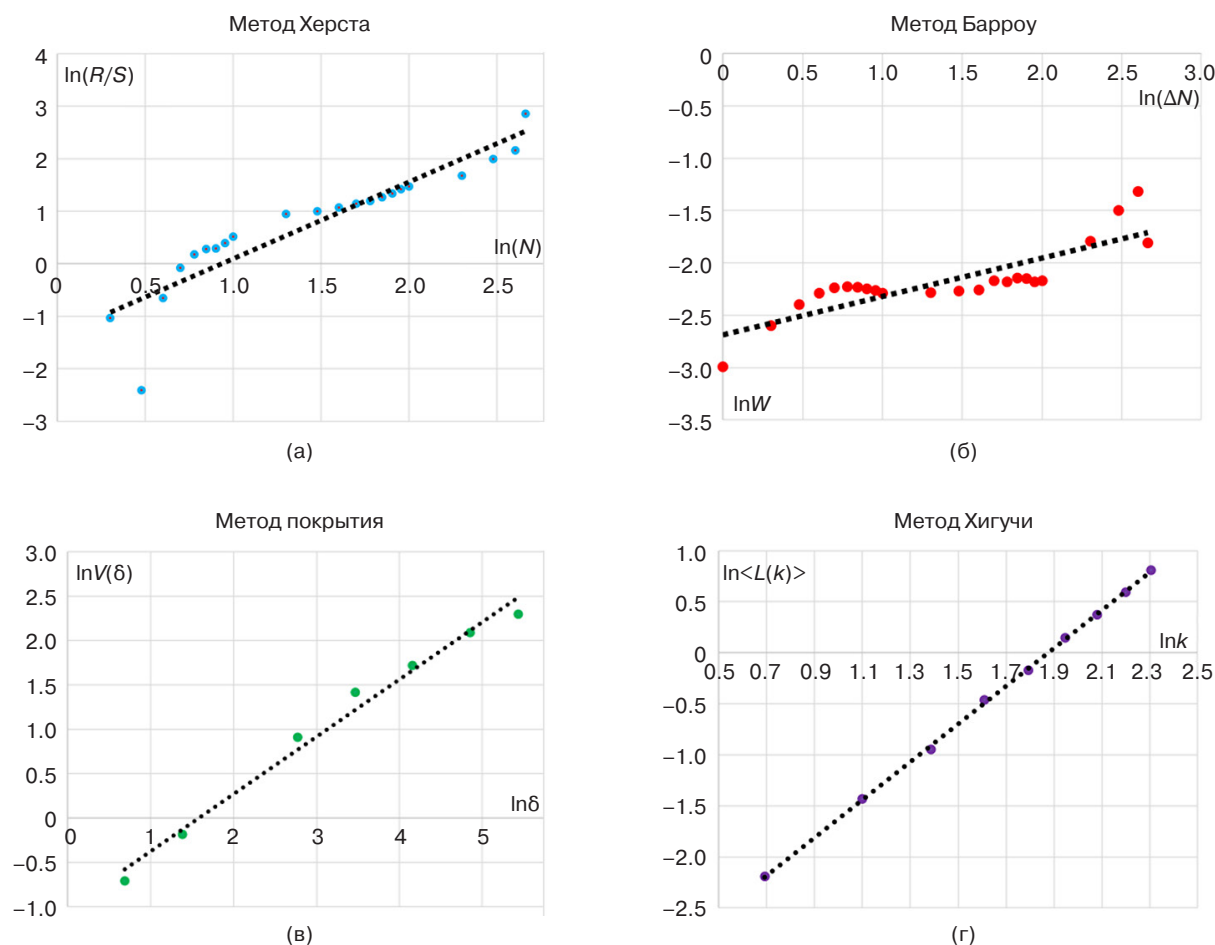


Рис. 3. Фрактальная плоскость здорового пациента:
(а) метод Херста, (б) метод Барроу, (в) метод площади наименьшего покрытия, (г) метод Хигучи

линия тренда, по угловому коэффициенту которой рассчитывается значение фрактальной размерности. Как следует из приведенных графиков, значения фрактальной размерности, определенные двумя последними методами, имеют существенно меньшую погрешность определения вследствие меньшего разброса данных, подлежащих аппроксимации. Описанными выше методами были найдены фрактальные размерности для десяти здоровых пациентов, а также пациентов с диагнозами «Хроническая сердечная недостаточность» (ХСН) и «Ишемическая болезнь сердца» (ИБС). Полученные значения представлены в табл. 1.

Отметим, что методика, предложенная Барроу, не слишком отличается от традиционного метода Херста, поскольку использует аналогичный подход, и поэтому в дальнейшем не будет рассматриваться. Фрактальная размерность D , полученная методом Хигучи, демонстрирует меньший разброс данных между здоровыми пациентами. В связи с этим более подробно будут рассмотрены результаты, полученные данной методикой.

Попадание большинства значений фрактальной размерности в интервал от 1.5 до 2 является показателем антиперсистентности ряда. Данное понятие свидетельствует о частой смене направления вектора развития

системы, более частой, чем это происходило бы при случайной последовательности. Приближение параметра фрактальной размерности к $D = 2$ говорит об усилении изменчивости ряда и характерно для ситуации, когда исследуемая последовательность имеет тенденцию к полному заполнению фрактальной плоскости. Значения, приближающиеся к 1.5, свидетельствуют о стремлении процесса к полной хаотичности – белому шуму. Попадание значений фрактальной размерности в интервал (1.5–2.0) указывает на эргодичность процесса – особое свойство определенных динамических систем, состоящее в том, что во время развития любое состояние, за редким исключением, с определенной вероятностью проходит вблизи каждого другого состояния системы⁶. При этом в определенных временных интервалах статистические характеристики совпадают. Чередование таких интервалов обусловлено наличием скрытой периодичности процесса, что является характерным, в частности, для сердечного ритма.

⁶ Эргодичность. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Эргодичность>. Дата обращения 17.04.2022. [Ergodicity. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Эргодичность>. Accessed April 17, 2022 (in Russ.).]

Таблица 1. Фрактальные размерности D десяти здоровых пациентов и больных ХСН и ИБС, вычисленные различными методами

№ пациента	Фрактальная размерность здоровых пациентов	Фрактальная размерность больных пациентов (ИБС)	Фрактальная размерность больных пациентов (ХСН)	Метод
1	1.896	1.499	1.754	Метод Херста
	1.791	1.502	1.753	Метод Барроу
	1.612	1.601	1.572	Метод покрытия
	1.638	1.695	1.685	Метод Хигучи
2	1.937	1.933	1.787	Метод Херста
	1.794	1.886	1.943	Метод Барроу
	1.722	1.595	1.606	Метод покрытия
	1.757	1.822	1.981	Метод Хигучи
3	1.944	1.815	1.432	Метод Херста
	1.845	1.767	1.871	Метод Барроу
	1.665	1.746	1.619	Метод покрытия
	1.702	1.910	1.805	Метод Хигучи
4	1.944	1.449	1.518	Метод Херста
	1.845	1.790	1.944	Метод Барроу
	1.665	1.494	1.627	Метод покрытия
	1.702	1.654	1.797	Метод Хигучи
5	1.529	1.783	1.770	Метод Херста
	1.463	1.275	1.994	Метод Барроу
	1.608	1.598	1.821	Метод покрытия
	1.630	1.665	1.982	Метод Хигучи
6	1.536	1.685	1.709	Метод Херста
	1.633	1.579	1.994	Метод Барроу
	1.646	1.528	1.683	Метод покрытия
	1.767	1.538	2.000	Метод Хигучи
7	1.459	1.979	1.964	Метод Херста
	1.615	1.722	1.863	Метод Барроу
	1.627	1.814	1.766	Метод покрытия
	1.751	2.000	1.928	Метод Хигучи
8	1.627	1.895	1.909	Метод Херста
	1.721	1.912	1.776	Метод Барроу
	1.663	1.738	1.703	Метод покрытия
	1.708	1.956	1.803	Метод Хигучи
9	1.665	1.739	1.735	Метод Херста
	1.988	1.747	1.699	Метод Барроу
	1.698	1.573	1.591	Метод покрытия
	1.772	1.608	1.560	Метод Хигучи
10	1.559	1.598	1.702	Метод Херста
	1.787	1.665	1.949	Метод Барроу
	1.605	1.648	1.600	Метод покрытия
	1.675	1.692	1.989	Метод Хигучи

Таблица 2. Сравнение фрактальных размерностей для здорового пациента, полученных методом Хигучи, для выборок объемом 200, 450, 900, 1200 и 1500 значений R-R интервала

Фрактальная размерность Хигучи при различном объеме входных данных						
Объем выборки	200	450	900	1000	1200	1500
Здоровый пациент	1.673	1.702	1.710	1.709	1.707	1.714

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ВЫБОРКИ

Размер выборки – важная особенность любого эмпирического исследования, цель которого – сделать выводы о параметрах генеральной совокупности на основе выборочных наблюдений. Шанс выявления статистически значимых различий зависит от размера выборки и величины истинного различия сравниваемых показателей [19].

В табл. 2 приведены значения фрактальной размерности Хигучи, полученные для здорового пациента, при увеличении объема выборки от 200 до 1500 кардиоинтервалов.

На основании приведенных в табл. 2 данных, фрактальные размерности D , рассчитанные методом Хигучи, определялись на объеме выборки равном 1000 значениям R–R интервала.

Следует отметить, что фрактальная размерность, рассчитанная методом покрытий, не обнаруживает зависимости от длительности записи как для больных, так и здоровых пациентов. В табл. 3 представлены значения D , вычисленные этим методом для выборок из 450 и 1000 значений.

Исходя из полученных данных следует, что фрактальная размерность D , рассчитанная методом

Таблица 3. Сравнение фрактальных размерностей 3 пациентов, полученных методом покрытия, для выборок из 450 и 1000 значений R–R интервалов

Фрактальная размерность методом покрытия при значении интервала		Пациент
450	1000	
1.72	1.75	Здоровый
1.74	1.72	ИБС
1.57	1.59	ХСН

Таблица 4. Значения средних арифметических и дисперсий по выборкам из 100 интервалов, взятым из массива объемом 1000 кардиоинтервалов

Параметр	1–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700	700–800	800–900	900–1000	Пациент
Ср. знач., с	0.754	0.785	0.779	0.754	0.725	0.639	0.610	0.638	0.660	0.734	ХСН
Дисперсия, $c^2 \cdot 10^3$	1.568	3.241	9.201	3.334	1.221	2.159	3.101	7.528	1.116	5.211	
Ср. знач., с	0.799	0.807	0.801	0.755	0.722	0.750	0.742	0.748	0.783	0.753	Здоровый
Дисперсия, $c^2 \cdot 10^3$	1.857	1.744	2.400	2.006	2.465	2.608	1.868	3.088	2.253	2.180	

покрытия, практически не зависит от объема выборки. Поэтому для данного метода объем выборки в рассматриваемом интервале значений не критичен. Учитывая полученные в табл. 2 результаты, в дальнейшем будем использовать выборку с входным объемом данных 1000 значений R–R интервалов.

ОЦЕНКА СТАЦИОНАРНОСТИ

Фракталы тесно связаны с понятием динамического хаоса, иногда используется также понятие детерминированного хаоса. Одним из условий существования такого хаоса является нелинейность. Подробно эти понятия описаны в работе [20]. В данном разделе рассмотрены вопросы стационарности выборки из 1000 R–R интервалов.

Как известно, стационарность – это неизменяемость характеристик случайного процесса со временем: среднее значение и дисперсия стационарного процесса остаются постоянными вне зависимости от времени, а автокорреляционная функция зависит только от разности между моментами времени, в которых она определяется. В табл. 4 представлены значения средних арифметических, определенных для последовательных выборок, состоящих из 100 длительностей кардиоинтервалов. Как видно из приведенных данных, средние значения изменяются на 11–25%, при этом величина дисперсии также не остается постоянной, изменяясь от ~50% для здоровых пациентов до 300% для больных ХСН. Таким образом ряд значений длительностей R–R интервалов не является стационарным ни при наличии патологий, ни при их отсутствии.

Данный факт является дополнительным подтверждением целесообразности использования представлений о детерминированном хаосе для описания массива длительностей кардиоинтервалов.

Используя все ранее указанные алгоритмы и выводы, авторы составили таблицу, содержащую фрактальные размерности D для данных объемом 1000 R-R интервалов. Фрактальные размерности были рассчитаны с использованием методов Херста, минимальной площади покрытия, Хигучи.

Стоит отметить, что используемая база данных пациентов с ХСН содержит информацию о кардиоинтервалах более чем 20 пациентов. Поэтому объем выборки для данной патологии был увеличен до 20 пациентов. Полученные результаты представлены в табл. 5.

Можно заметить, что средние значения фрактальной размерности для всех трех методов не позволяют надежно идентифицировать наличие патологии. Отметим, что средние значения фрактальной размерности D здоровых пациентов, определенные методами покрытия и Хигучи, соответствуют

данным работы [21], тогда как результаты по методу Херста дают завышенные значения. Табличное представление данных является достаточно трудным для восприятия и анализа, поэтому в настоящей работе данные табл. 5 подвергались дополнительной обработке.

РАНЖИРОВАНИЕ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Был использован метод ранжирования, заключающийся в расположении предметов или явлений в порядке убывания или возрастания определенного, присущего каждому из них признака. В данном случае ранжирование выполнено в порядке возрастания фрактальной размерности D . При этом необходимо определить количество рангов и диапазон значений D , которому каждый ранг будет соответствовать.

Таблица 5. Фрактальные размерности, рассчитанные тремя разными методиками, для объема входных данных, равного 1000 кардиоинтервалам

№ пациента	Фрактальная размерность по методу Хигучи			Фрактальная размерность по методу покрытия			Фрактальная размерность по методу Херста		
	ХСН	Здоровый	ИБС	ХСН	Здоровый	ИБС	ХСН	Здоровый	ИБС
1	1.621	1.720	1.755	1.587	1.650	1.645	1.728	1.863	1.629
2	1.966	1.783	1.674	1.650	1.746	1.576	2.000	1.979	1.902
3	1.834	1.709	1.897	1.651	1.717	1.719	1.679	1.948	2.000
4	1.832	1.717	1.650	1.665	1.717	1.577	1.519	1.948	1.722
5	1.983	1.703	1.659	1.816	1.648	1.598	2.000	1.718	1.713
6	2.028	1.714	1.573	1.693	1.646	1.547	2.000	1.824	1.674
7	1.848	1.752	2.008	1.704	1.676	1.873	1.946	1.704	2.000
8	1.756	1.746	1.903	1.733	1.711	1.720	2.000	1.707	1.816
9	1.488	1.758	1.659	1.641	1.676	1.588	1.884	1.704	1.709
10	1.965	1.679	1.747	1.637	1.630	1.709	1.865	1.691	1.705
11	1.811	–	–	1.710	–	–	1.939	–	–
12	1.783	–	–	1.619	–	–	1.430	–	–
13	1.949	–	–	1.677	–	–	1.786	–	–
14	1.818	–	–	1.668	–	–	1.969	–	–
15	1.879	–	–	1.542	–	–	2.000	–	–
16	1.739	–	–	1.687	–	–	1.669	–	–
17	1.579	–	–	1.632	–	–	1.703	–	–
18	1.739	–	–	1.414	–	–	1.883	–	–
19	1.510	–	–	1.552	–	–	1.507	–	–
20	1.513	–	–	1.616	–	–	1.801	–	–
Среднее значение ± доверительный интервал	1.782 ±0.077	1.728 ±0.022	1.752 ±0.100	1.645 ±0.039	1.682 ±0.028	1.655 ±0.072	1.866 ±0.121	1.808 ±0.084	1.827 ±0.151

В настоящей работе использовано 10 рангов. Несмотря на то, что фрактальная размерность определяется на участке значений от 1 до 2, подавляющее большинство значений D сконцентрировано в интервале от 1.5 до 2. Эта область и разбивается на 10 рангов через 0.05 с границами каждого ранга ± 0.025 .

После анализа данных, представленных в табл. 5, было отмечено, что большинство значений фрактальных размерностей D здоровых пациентов попало в диапазон значений от 1.675 до 1.825, соответствующих рангам 4 и 5. В табл. 6 представлено распределение по рангам фрактальной размерности здоровых и больных пациентов.

Как видно из таблицы, значения размерности для здоровых пациентов, рассчитанные по методу Хигучи, в 9 случаях из 10 имеют ранг 4–5. Для больных ХСН только 3 человека из 20 имеют такой ранг (15%), для больных ИБС эта величина составляет 30% (3 человека из 10). Для размерностей,

определенных методами покрытия и Херста, картина распределения рангов между здоровыми и больными пациентами размывается.

Для оценки статистической значимости разделения по рангам здоровых и больных пациентов был использован критерий Колмогорова – Смирнова для проверки однородности распределения двух выборок [22]. В основе данного критерия лежит сопоставление эмпирических функций распределения, которые определены для двух выборок. В табл. 7 представлены рассчитанные значения критерия, которые сравниваются с табличными значениями при уровне значимости 0.01.

В первой строке представлено табличное значение критерия Колмогорова – Смирнова для 10 здоровых и 20 пациентов с ХСН, во второй строке – для 10 здоровых пациентов и 10 с ИБС.

Данные табл. 7 свидетельствуют о том, что различие в распределении фрактальной размерности

Таблица 6. Ранжирование результатов табл. 5

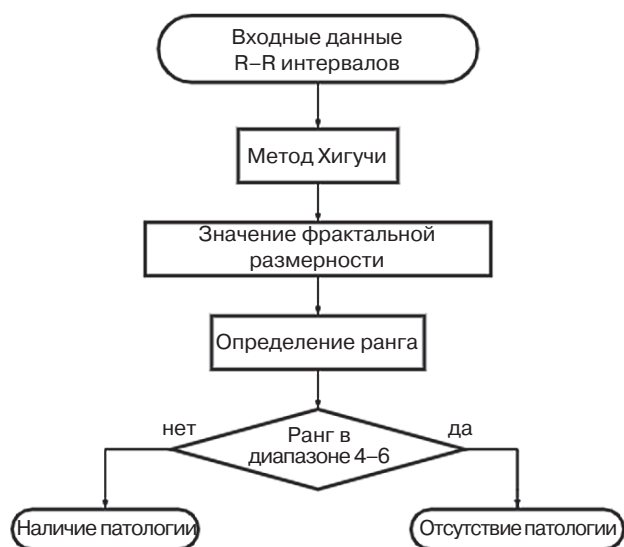
№ пациента	Ранжирование результатов для метода Хигучи			Ранжирование результатов для метода покрытия			Ранжирование результатов для метода Херста		
	ХСН	Здоровый	ИБС	ХСН	Здоровый	ИБС	ХСН	Здоровый	ИБС
1	2	4	5	2	4	3	4	7	2
2	9	6	4	3	5	2	10	10	8
3	7	4	8	3	4	4	4	9	10
4	7	4	3	3	4	2	0	8	4
5	10	4	3	6	3	2	10	4	4
6	10	4	2	4	3	1	10	6	3
7	7	5	10	4	4	7	9	4	10
8	5	5	8	5	4	4	10	4	6
9	0	5	3	3	4	2	8	4	4
10	9	4	5	3	3	4	6	4	4
11	6			4			9		
12	6			2			0		
13	9			4			6		
14	6			3			9		
15	7			1			10		
16	5			4			3		
17	2			3			4		
18	5			0			8		
19	0			1			0		
20	0			2			6		

Таблица 7. Сравнение рассчитанных и табличных значений двухвыборочного критерия D_{\max} Колмогорова – Смирнова для здоровых и больных пациентов

Табличное значение критерия D_{\max} (для 30 значений)	0.290
Табличное значение критерия D_{\max} (для 20 значений)	0.352
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования Хигучи (ХСН и здоровый)	0.500
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования Хигучи (ИБС и здоровый)	0.400
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования покрытия (ХСН и здоровый)	0.350
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования покрытия (ИБС и здоровый)	0.500
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования Херста (ХСН и здоровый)	0.200
Рассчитанное значение D_{\max} ранжирования Херста (ИБС и здоровый)	0.200

здоровых и больных пациентов статистически значимо ($D_{\max \text{ расч}} > D_{\max \text{ табл}}$) для метода Хигучи. В то же время при использовании методов Херста и покрытия нет основания отвергать нулевую гипотезу об отсутствии различий в распределении результатов для двух групп пациентов, т.е. две выборки могут принадлежать одной генеральной совокупности. Отметим также, что подтверждается ранее сделанный вывод о том, что фрактальная размерность, рассчитанная методом Хигучи, является, по-видимому, наиболее предпочтительной при выявлении патологии работы сердца.

На рис. 4 представлена схема процесса реализации метода разделения пациентов на группы по наличию и отсутствию патологии на основе значения фрактальной размерности кардиоритма.

**Рис. 4.** Алгоритм процесса разделения пациентов на группы по наличию и отсутствию патологии на основе значения фрактальной размерности кардиоритма

Далее подробно рассмотрены некоторые этапы, представленные на рис. 4. Входные данные R–R интервалов были получены на основе уже проанализированных записей Холтера здоровых и

больных пациентов, представленных в открытом ресурсе Physionet. Данные холтеровского мониторинга регистрировались в течение 24 ч с помощью цифровых трехканальных регистраторов DMS300–7 и DMS300–3A (DM Systems Co., Китай), а также регистраторов Galix (Galix Biomedical Instrumentation, США) с использованием электродов 3М. Регистраторы Galix имели программируемую частоту дискретизации считывания 512 и 1024 Гц и частоты дискретизации записи 128 Гц. Регистраторы DMS имели частоту дискретизации 1024 Гц на канал для анализа кардиограммы с усредненным сигналом, частоты дискретизации считывания 512 Гц и частоту дискретизации записи 128 Гц в других случаях. Сигналы анализировались с помощью программного обеспечения Galix и программного обеспечения CardioScan 10.0, 11.0⁷ для регистраторов DMS. Ошибка при определении R–R интервала составляла примерно 8 мс (в 2 раза больше ошибки при определении зубца R). Сердечные события в записях были автоматически обнаружены и классифицированы программным обеспечением Holter⁸, а затем проверены и скорректированы двумя кардиологами. Затем записи анализировались такт за тактом, чтобы выявить и исправить как можно больше R-зубцов. Таким образом, было уменьшено количество и продолжительность артефактов в сигнале.

Входные данные R–R интервалов затем необходимо обработать с помощью метода Хигучи, который был представлен выше.

Для определения ранга полученного значения D необходимо воспользоваться табл. 8, в которой представлены номера рангов, диапазоны входящих в них значений и средние значения каждого.

⁷ <https://vdd-pro.ru/ru/usb-kardiograf/programmnoe-obespechenie/>. Дата обращения 14.02.2022. / Accessed February 14, 2022 (in Russ.).

⁸ <https://dms-at.ru/products/programs/programmnoe-obespechenie-kholter/>. Дата обращения 14.02.2022. / Accessed February 14, 2022 (in Russ.).

Таблица 8. Порядковые номера рангов, их диапазоны и средние значения

№ ранга	Диапазон значений D	Среднее значение D
0	1.500–1.525	1.5125
1	1.525–1.575	1.55
2	1.575–1.625	1.6
3	1.625–1.675	1.65
4	1.675–1.725	1.7
5	1.725–1.775	1.75
6	1.775–1.825	1.8
7	1.825–1.875	1.85
8	1.875–1.925	1.9
9	1.925–1.975	1.95
10	1.975–2.000	1.9875

Если значение ранга попадает в интервал 4–6, то можно заключить, что входные данные R–R интервалов принадлежат здоровому пациенту, в противном случае можно полагать, что у пациента есть патология.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из математических приемов, позволяющих в той или иной степени оценить нестационарность процесса или его изрезанность (в геометрическом смысле), является метод исследования его фрактальности. Графическая запись электрокардиограммы, если рассматривать ее с точки зрения амплитудных изменений величины электрического потенциала во времени, также представляет собой

кривую, имеющую сильно изрезанную форму. Если рассматривать ритмограмму во времени, то можно прийти к выводу, что она в некотором роде имеет свойства фрактала.

В работе рассмотрены несколько методик нахождения фрактальной размерности последовательности длительностей кардиоинтервалов, а именно, методы Херста, Барроу, минимальной площади покрытия и Хигучи.

На основании полученных данных было показано, что при уровне значимости 0.01 различие между показателями фрактальной размерности длительностей R–R интервалов здоровых и больных пациентов является статистически значимым при применении метода Хигучи. Установлено, что ранжирование выборок позволяет эффективно различать фрактальные размерности здоровых и больных пациентов. Результаты работы показывают перспективность дальнейших исследований, направленных на использование фрактальных характеристик кардиоритма для выявления нарушений последнего, что может служить дополнительным фактором при определении патологии деятельности сердца.

Вклад авторов

М.О. Быкова – сбор и анализ информации для статьи, расчеты и анализ фрактальной размерности, полученной различными методами.

В.А. Баландин – концептуальная идея, обсуждение и анализ полученных результатов.

Authors' contributions

M.O. Bykova – collection and analysis of information for the article, calculations and analysis of fractal dimension obtained by various methods.

V.A. Balandin – conceptual idea, discussion and analysis of the obtained results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баевский Р.М. Кибернетический анализ процессов управления сердечным ритмом. В сб.: *Актуальные проблемы физиологии и патологии кровообращения*. М.: Медицина; 1976. С. 161–175.
2. Баевский Р.М., Берсенева А.П. *Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний*. М.: Медицина; 1997. С. 265.
3. Баевский Р.М. *Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии*. М.: Медицина; 1979. 205 с.
4. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения. *Ультразвуковая и функциональная диагностика*. 2001;3:106–127.

REFERENCES

1. Baevskii P.M. Cybernetic analysis of heart rate control processes. In: *Aktual'nye problemy fiziologii i patologii krovoobrashcheniya* (Actual Problems of Physiology and Pathology of Blood Circulation). Moscow: Meditsina; 1976. P. 161–175 (in Russ.).
2. Baevskii P.M., Berseneva A.P. *Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostei organizma i risk razvitiya zabolevaniy* (Assessment of the Adaptive Capabilities of the Body and the Risk of Developing Diseases). Moscow: Meditsina; 1997. P. 265. (in Russ.).
3. Baevskii P.M. *Prognozirovanie sostoyanii na grani normy i patologii* (Prediction of Conditions on the Verge of Norm and Pathology). Moscow: Meditsina; 1979. 205 p. (in Russ.).

5. Антонов В.И., Загайнов А.И., Ву ван Куанг. Динамический фрактальный анализ вариабельности сердечного ритма. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2012;1(140):88–94.
6. Федоров В.А., Мизирин А.В., Храмов П.И., Агафонова Н.А. Фрактальный анализ ритма сердца. *Вопросы современной педиатрии*. 2006;5(1):596.
7. Яцык В.З., Парамзин В.Б., Болотин А.Э., Воротова М.С. Фрактальный анализ вариабельности сердечного ритма у биатлонисток с разным уровнем тренированности. *Физическая культура, спорт – наука и практика*. 2018;4:95–102.
8. Sen J., McGill D. Fractal analysis of heart rate variability as a predictor of mortality: A systematic review and meta-analysis. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2018;28(7):072101. <https://doi.org/10.1063/1.5038818>
9. Рахимов Н.Г., Олимзода Н.Х., Мурадов А.М., Мурадов А.А., Хусаинова М.Б. Некоторые показатели фрактального анализа вариабельности сердечного ритма, как предикторы тяжелой преэклампсии и эклампсии. *Вестник последипломного образования в сфере здравоохранения*. 2018;1:70–75.
10. Голдбергер Э.Л., Ригни Д.Р., Уэст Б.Дж. Хаос и фракталы в физиологии человека. *В мире науки*. 1990;4:25–32.
11. Шустер Г. *Детерминированный хаос: Введение*. М.: Мир; 1988. 248 с.
12. Лоренц Э. Детерминированное неперiodическое движение. *Странные аттракторы: сборник статей*. М.: Физматлит; 1981. С. 88–116.
13. Климонтович Ю.Л. *Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем*. М.: URSS; 2021. 326 с. ISBN 978-5-9710-8442-6
14. Мандельброт Б. *Фрактальная геометрия природы*. М.: Институт компьютерных исследований; 2002. 656 с.
15. Cervantes-De la Torre F., González-Trejo J.I., Real-Ramírez C.A., Hoyos-Reyes L.F. Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013;475(1):012002. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/475/1/012002>
16. Антипов О.И., Нагорная М.Ю. Показатель Херста биоэнергетических сигналов. *Инфокоммуникационные технологии*. 2011;9(1):75–77.
17. Аптуков В.Н., Митин В.Ю. Фрактальный анализ метеорологических рядов с помощью метода минимального покрытия. *Географический вестник*. 2019;2(49):67–79. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-2-67-79>
18. Гладун К.В. Фрактальная размерность Хигучи как метод оценки реакции на звуковые стимулы у пациентов с диффузным аксональным повреждением головного мозга. *Современные технологии в медицине*. 2020;12(4):63–71. <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.4.08>
4. Baevskii P.M., Ivanov G.G. Cardiac rhythm variability: the theoretical aspects and the opportunities of clinical application (lecture). *Ul'trazvukovaya i funktsional'naya diagnostika = Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2001;3:106–127 (in Russ.).
5. Antonov V.I., Zagainov A.I., Vu van Quang. Dynamic fractal analysis of heart rate variability. *Nauchno-tekhnicheskie ведомости Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie = St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*. 2012;1(140):88–94 (in Russ.).
6. Fedorov V.A., Mizirin A.V., Khramtsov P.I., Agafonova N.A. Fractal analysis of heart rhythm. *Voprosy sovremennoi pediatrii = Current Pediatrics*. 2006;5(1):596 (in Russ.).
7. Yatsyk V.Z., Paramzin V.B., Bolotin A.E., Vorotova M.S. Fractal analysis of variability of heart rhythm among female biathletes with a different training level. *Fizicheskaya kul'tura, sport – nauka i praktika = Physical Education, Sports – Science and Practice*. 2018;4:95–102 (in Russ.).
8. Sen J., McGill D. Fractal analysis of heart rate variability as a predictor of mortality: A systematic review and meta-analysis. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2018;28(7):072101. <https://doi.org/10.1063/1.5038818>
9. Rakhimov N.G., Olimzoda N.Kh., Muradov A.M., Muradov A.A., Khusainova M.B. Some indicators of fractal analysis heart rate variability as predictors of the development of severe preeclampsia and eclampsia. *Vestnik poslediplomnogo obrazovaniya v sfere zdravookhraneniya = Herald of Postgraduate Education Health Sphere*. 2018;1:70–75 (in Russ.).
10. Goldberger E. L. Goldberger A.L., Rigney D.R., West B.J. Chaos and fractals in human physiology. *V mire nauki (Russian version) = Sci. American*. 1990;4:25–32 (in Russ.).
11. Shuster G. *Determinirovannyi khaos: Vvedenie (Deterministic chaos: An Introduction)*. Moscow: Mir; 1988. 248 p. (in Russ.).
12. Lorenz E. Deterministic non-periodic motion. In: *Strange attractors: collection of articles*. Moscow: Fizmatlit; 1981. P. 88–116 (in Russ.).
13. Klimontovich Yu.L. *Turbulentnoe dvizhenie i struktura khaosa: Novyi podkhod k statisticheskoi teorii otkrytykh sistem (Turbulent motion and the structure of chaos: A new approach to the statistical theory of open systems)*. Moscow: URSS; 2021. 326 p (in Russ.).
14. Mandelbrot B. *Fractal geometry of nature*. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy; 2002. 656 p. (in Russ.).
15. Cervantes-De la Torre F., González-Trejo J.I., Real-Ramírez C.A., Hoyos-Reyes L.F. Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013;475(1):012002. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/475/1/012002>
16. Antipov O.I., Nagornaya M.Yu. Bioenergetic signal Hearst index. *Infokommunikatsionnye tekhnologii = Infocommunication Technologies*. 2011;9(1):75–77 (in Russ.).

19. Койчубеков Б.К., Сорокина М.А., Мхитарян К.Э. Определение размера выборки при планировании научного исследования. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014;4:71–74.
20. Анищенко В.С. Детерминированный хаос. *Соросовский образовательный журнал*. 1997;6:70–76.
21. Meganur R., Zadidul K., Maksudul H., Jarin S. Successive RR interval analysis of PVC with sinus rhythm using fractal dimension, Poincaré plot and sample entropy method. *Int. J. Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*. 2013;5(2):17–24. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2013.02.03>
22. Орлов А.И. Система моделей и методов проверки однородности двух независимых выборок. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2020;157:145–169. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-157-012>
17. Aptukov V.N., Mitin V.Yu. Fractal analysis of meteorological series based on the minimum covering method. *Geograficheskii vestnik = Geographical Bulletin*. 2019;2(49):67–79 (in Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-2-67-79>
18. Gladun K.V. Higuchi fractal dimension as a method for assessing response to sound stimuli in patients with diffuse axonal brain injury. *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern Technologies in Medicine*. 2020;12(4):63–71 (in Russ.). <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.4.08>
19. Koichubekov B.K., Sorokina M.A., Mkhitarayan K.E. Sample size determination in planning of scientific research. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2014;4:71–74 (in Russ.).
20. Anishchenko V.S. Deterministic chaos. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros Educational Journal*. 1997;6:70–76 (in Russ.).
21. Meganur R., Zadidul K., Maksudul H., Jarin S. Successive RR interval analysis of PVC with sinus rhythm using fractal dimension, Poincaré plot and sample entropy method. *Int. J. Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*. 2013;5(2):17–24. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2013.02.03>
22. Orlov A.I. System of models and methods of testing the homogeneity of two independent samples. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic online Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2020;157:145–169 (in Russ.). <https://doi.org/10.21515/1990-4665-157-012>

Об авторах

Быкова Маргарита Олеговна, магистрант кафедры биокрибернетических систем и технологий Института искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: margaritabyckova@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5398-3184>

Баландин Вячеслав Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры биокрибернетических систем и технологий Института искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: admiral49@mail.ru. Scopus Author ID 7003691025, SPIN-код РИНЦ 1288-9918

About the authors

Margarita O. Bykova, Student, Department of Biocybernetic Systems and Technologies, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: margaritabyckova@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5398-3184>

Vyacheslav A. Balandin, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Assistant Professor, Department of Biocybernetic Systems and Technologies, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: admiral49@mail.ru. Scopus Author ID 7003691025, RSCI SPIN-code 1288-9918