

Математичні моделі та методи

УДК 615.47:616-072.7

DOI: 10.30748/soi.2019.158.05

О.М. Величко¹, Ал-Халалмех Садам Еяд Хамед², Е.А. Міхайлова³, Т.А. Колеснікова²

¹ Національний юридичний університет ім. Я. Мудрого, Харків

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

³ Державна установа “Інститут охорони здоров’я дітей та підлітків Національної академії медичних наук України”, Харків

ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СКАТЕРОГРАМИ

Проведено аналіз скатерограм добових тестових сигналів для нормального синусового ритму і аритмії, встановлено наявність сильного кореляційного зв’язку між показником фрактальної розмірності і стандартними показниками ВСР у нормі і його відсутність при аритмії. Розраховано стандартні показники варіабельності ритму серця і показник фрактальної розмірності скатерограм для 1-хвилинних інтервалів. За результатами розрахунків проведено кластерний аналіз даних методом *k-means*, визначено середні групові значення показника фрактальної розмірності і геометричних параметрів скатерограми. За результатами факторного аналізу визначено набір показників для оцінювання скатерограми 1-хвилинного інтервалу.

Ключові слова: варіабельність серцевого ритму, фрактальний аналіз, скатерограма, коротка послідовність RR-інтервалів.

Вступ

Постановка проблеми. До складу пакетів програм сучасних кардіографічних і електрофізіологічних систем входять методи аналізу варіабельності серцевого ритму (ВСР). Ці методики були розроблені і активно застосовуються не одне десятиліття [1]. Однак, як і раніше, інтерес до них великий, що обумовлено появою нових методів обробки, збільшенням обчислювальних потужностей комп’ютерної техніки і появою нових вимірювальних пристроїв, орієнтованих на персональне використання з метою добового моніторингу стану здоров’я. До останніх відносяться портативні кардіографи, фітнес-трекери тощо. У медичних дослідженнях знайшли застосування два підходи: аналіз коротких фрагментів (5 хвилин) і тривалий моніторинг (24 години і більше) [1–2]. Для аналізу отриманих даних використовуються різні методи і набори показників. Так, при тривалому моніторингу, як правило, аналіз даних проводиться після закінчення процесу реєстрації. Очевидно, задача визначення оцінки поточного стану людини, тобто в ході моніторингу залишається актуальною і може мати не тільки діагностичне застосування, але і використовуватися для вивчення ефективності впливу лікувальних препаратів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори [3] запропонували використання фрактального аналізу для оцінки ВСР для виявлення порушень в фізіологічних системах у вагітних жінок. Об’єкт дослідження – добові тахограми. В роботі [4] розглянуті питання виявлення ознак раптової смерті, ризиків

розвитку онкологічних захворювань, рівня стомлення за результатами ВСР у людей, які займаються оздоровчою фізичною культурою. Інтервали досліджуваних сигналів обмежувались тривалістю спортивних занять. Одним із методів дослідження є фрактальний аналіз. Автори роботи [5] застосовували фрактальний аналіз в сукупності зі стандартними методами ВСР для оцінки роботи регуляторних систем спортсменів в умовах фізичних навантажень. Результати досліджень дозволяють ефективно оцінювати функціональні резерви організму і здійснювати адекватні фізичні навантаження в ході тренувань. Дані для аналізу обмежувались 300 RR-інтервалами. Автори [6] запропонували метод визначення ознак раптової смерті за результатами холтеровського моніторингу. Метод базується на обчисленні показника фрактальної розмірності послідовності RR-інтервалів.

В роботі [7] розглядається метод класифікації аритмій за результатами аналізу ЕКГ високого розрізнення. Вони застосовують апарат *higher order statistics*, вейвлетний аналіз і локальні бінарні патерни. Такий підхід є цікавим, але потребує великих обчислюваних затрат.

Автори [8] розробили метод класифікації аномалій серцевого ритму для коротких інтервалів, що базується на використанні п’яти класифікаторів: нейронної мережі, лінійного дискримінантного аналізу, *k-means*, генетичних алгоритмів і методу опорних векторів.

В роботі [9] запропоновано метод миттєвої оцінки порушень ритму серцевого ритму за показником фрактальної розмірності і фрактальної ентропії для холтеровських моніторингових систем.

В роботі [10] наведено результати досліджень BCP протягом сону з метою виявлення серцево-судинних порушень за короткими ознаками, що повторюються. Одним із методів дослідження є фрактальний аналіз довготривалих записів тахограм.

Мета статті – дослідження короткої послідовності (1-хвилинних) RR-інтервалів серцевих скорочень з метою визначення набору показників для оцінки поточного фізіологічного стану людини в режимі реального часу.

Виклад основного матеріалу

Вихідні дані

У якості вихідних даних нами було використано масиви RR-інтервалів, що були отримані протягом 24-х та 48-х годин з електрокардіографічних

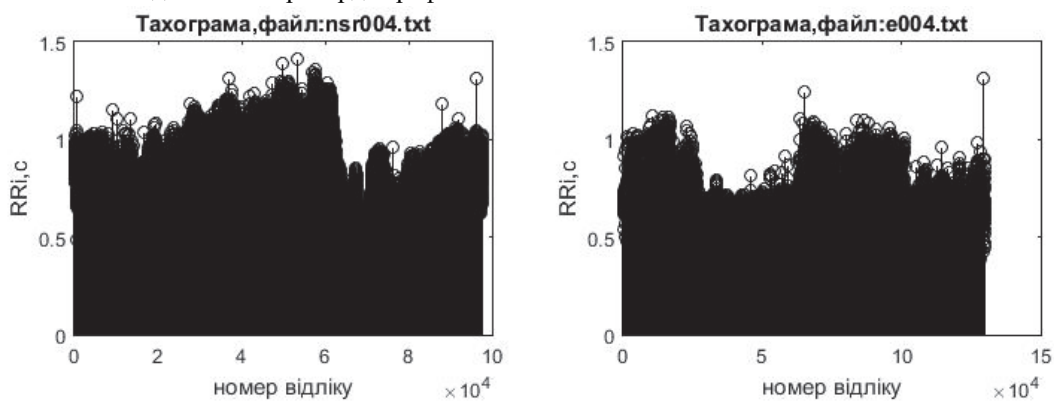


Рис. 1. Тахограми добових вихідних сигналів

Матеріали і методи дослідження

Аналіз добових сигналів. Основні методи аналізу тахограм об'єднуються в групи, відомі як методи дослідження часових показників (Time domain methods, що включають статистичні і геометричні методи), частотних характеристик (Frequency domain methods), форми тахограми (ритмограми) (Rhythm pattern analysis), нелінійні методи (Non-linear methods) [10].

Деякі з них (наприклад, спектральний аналіз) вимагають перетворення тахограми до ритмограми (відображення RR-інтервалів як функції часу) з її подальшою передискретизацією (resampling), тобто приведення до рівномірної часової шкали по осі X .

Безумовно, методи, згадані вище, успішно реалізовані в складі комп'ютерних електрофізіологічних систем, є підставою для медичного заключення. Завдання проведення експрес-оцінки вимагає пошуку деяких інтегральних критеріїв, які б дозволили здійснювати оцінку стану за результатами коротких інтервалів вимірювань (наприклад, у межах однієї хвилини).

З урахуванням того, що нормальні граничні значення стандартних показників BCP для коротких (1 хвилина) інтервалів відсутні, ми зробили спробу

сигналів. Кількість відліків у файлах відрізняється і складає, в середньому, від 84000 до 130000. Сигнали було отримано з європейської медичної бази даних PhysioNet і були ідентифіковані як RR-інтервали, що є характерними для нормального синусового ритму [14] і аритмією [15]. Сигнали були зареєстровані у клінічних умовах і не містять позначок про час доби, фізичної активності і медичного висновку.

Таким чином, ми сформуваємо групу тестових сигналів двох типів: 10 записів з нормальним синусовим ритмом і 9 записів з аритмією. Точність реєстрації: 10^{-4} с. RR-інтервали надані у секундах. На рис. 1 для порівняння надані тахограми двох тестових сигналів: зліва – з нормальним синусовим ритмом (nsr), справа – з аритмією (e). По осі у відкладені тривалості RR-інтервалів, по осі x – номери відліків.

пошуку таких показників для оцінки скатерограми. Поряд зі статистичними показниками величезний інтерес представляє аналіз скатерограми, при оцінці якої звертають увагу на форму хмари і обчислюють її геометричні параметри: площу, ширину і довжину, а потім знаходять їх співвідношення [1]. Для 5-хвилинних інтервалів ці показники строго нормовані. З розвитком технологій персонального моніторингу фізіологічних показників (фітнес-браслети, мобільні гаджети та ін.) виникло завдання онлайн-оцінювання результатів через вимірювання. Тому нами пропонується підхід, в основі якого лежить щохвилинний аналіз скатерограми.

В якості опорних параметрів будемо використовувати також стандартні показники BCP [1].

1. Середнє значення, *Mean*, як величина зворотна частоті пульсу, характеризує поточний рівень функціонування серцево-судинної системи і залежить як від умов, що впливають на даний момент на організм, так і від індивідуальних типологічних особливостей.

2. *SDNN* – стандартне відхилення – інтегральний показник, що залежить від впливу як симпатичного, так і парасимпатичного відділів вегетативної нервової системи. *SDNN* залежить від тривалості аналізованого сегмента ЕКГ.

3. $SDSD$ – стандартне відхилення різниці між сусідніми RR -інтервалами.

4. $RMSSD$ – показник активності парасимпатичної ланки вегетативної регуляції. Цей показник обчислюється по динамічному ряду різниць значень послідовних пар кардіоінтервалів. Він відображає активність автономного контуру регуляції, яка характеризується високочастотними коливаннями. Чим вище значення $RMSSD$, тим активніше ланка парасимпатичної регуляції:

$$RMSSD = \sqrt{\frac{\sum \Delta RR_i^2}{n}}.$$

5. $RMSSL$ показує стандартне відхилення різниць RR -інтервалів:

$$RMSSL = \sqrt{\frac{\sum (\Delta RR_i^2 - \Delta RR)^2}{n-1}}.$$

6. $pNN50$ відображає у відсотках кількість різницевих значень більше 50 мс.

7. Коефіцієнт варіації V являє собою нормовану оцінку дисперсії і може порівнюватися у людей з різними значеннями частоти пульсу:

$$V = \frac{SDNN}{M} 100\%.$$

8. Мода Mo у фізіологічному сенсі – найбільш ймовірний рівень функціонування серцево-судинної системи.

9. Амплітуда моди $Amo, \%$ відображає стабілізуючий ефект централізації управління ритмом, в основному, ступенем активації симпатичного відсправи.

10. Варіаційний розмах R відображає ступень варіативності RR -інтервалів.

11. Триангулярний індекс TI – визначається з гістограми розподілу як відношення її ширини (NN) до висоти ($height$). Крок гістограми дорівнює 7,8125мс:

$$TI = \frac{NN}{height}.$$

12. Триангулярна інтерполяція гістограми ($TINN$) вимірюється в мс, розраховується як ширина трикутника в мс до його висоти Mo :

$$TINN = \frac{2A}{Mo}.$$

Три інших показники обчислюються за результатами спектрального аналізу. Крок передискретизації ритмограми обраний $\Omega_0 = 1/170$ Гц [11].

13. Повільні хвилі LW, cm^2 – потужність спектра в діапазоні 0,04 – 0,015 Гц (6,7 – 25 с).

14. Швидкі хвилі HW, cm^2 – потужність спектра в діапазоні 0,15 – 0,4 Гц (2,5 – 6,7 с).

15. Співвідношення LW / HF .

16. Індекс вегетативної рівноваги IVB визначає співвідношення симпатичної та парасимпатичної регуляції серцевої діяльності:

$$IVB = \frac{AMo}{VR}.$$

17. Вегетативний показник ритму VI дозволяє судити про вегетативному балансі: чим менше величина VI , тим більше вегетативний баланс зміщений в бік переважання парасимпатичної регуляції:

$$VI = \frac{VR}{Mo}.$$

18. Показник адекватності процесів регуляції $ARPI$ відображає відповідність між рівнем функція синусового вузла і симпатичної активністю:

$$ARPI = \frac{AMo}{Mo}.$$

19. Індекс напруги регуляторних систем SI відображає ступінь централізації управління серцевим ритмом, тобто активність механізмів симпатичної регуляції, стан центрального контуру регуляції.

$$SI = \frac{AMo}{2 \cdot VR \cdot Mo}.$$

Показники 16–19 були запропоновані Р.М. Бавським для оцінки 5-хвилинних записів ритму [2].

Скатерограма – геометричне представлення тахограми в двовимірному просторі ознак, де по осях відкладають попереднє і поточне значення RR -інтервалів. На рис. 2 представлені скатерограми, побудовані для тахограм, зображених на рис. 1.

Скатерограму називають також діаграмою розсіювання. Точки на графіку групуються уздовж бісектриси. Оцінка скатерограми здійснюється по ряду показників. Її форма представляється у вигляді еліпса, що має велику $SD2$ і малу $SD1$ піввісь. Згідно [1], $SD1$ називають стандартним відхиленнями 1, а $SD2$ – стандартним відхиленням 2. $SD1$ характеризує короткі відхилення і представляють собою проекцію відхилення на перпендикулярну вісь $SD2$ (довга вісь еліпса). Розраховується за формулою:

$$SD1 = \sqrt{\text{var}(x1)}, \quad (1)$$

$$\text{де } x1 = \frac{RR_i - RR_{i+1}}{\sqrt{2}}.$$

$SD2$ – стандартне відхилення довгих коливань RR -інтервалів і розраховується за формулою:

$$SD2 = \sqrt{\text{var}(x2)}, \quad (2)$$

$$\text{де } x2 = \frac{RR_i + RR_{i+1}}{\sqrt{2}}.$$

Фактично, вектори $x1, x2$ є результатом обертання RR_i і RR_{i+1} на кут $\pi/4$.

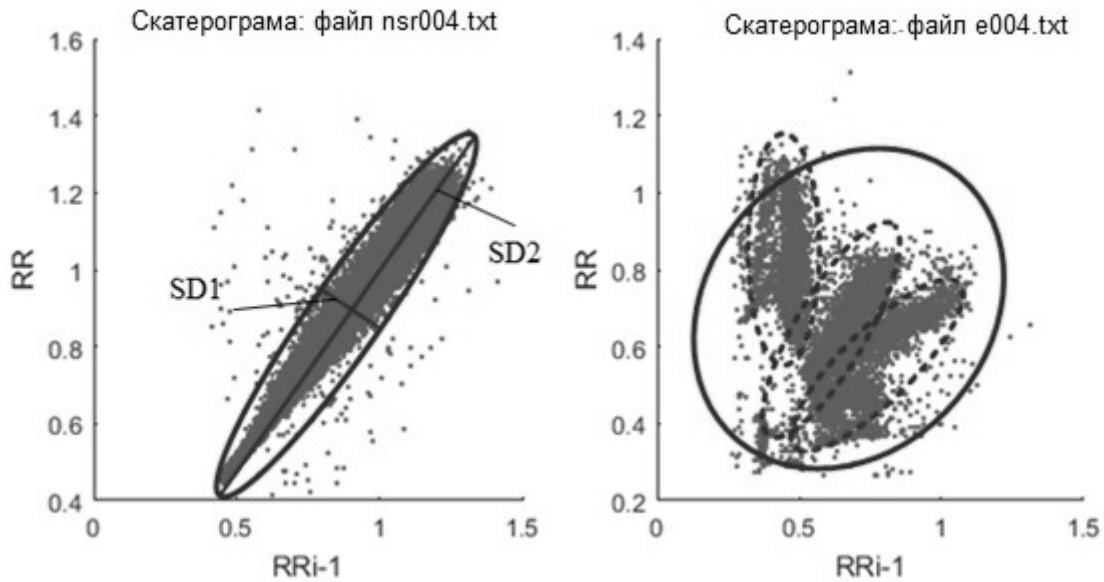


Рис. 2. Показники скатерограми для добових сигналів у нормі (зліва) та з аритмією (справа)

$$\begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \pi / 4 & -\sin \pi / 4 \\ \sin \pi / 4 & \cos \pi / 4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} RR_i \\ RR_{i+1} \end{bmatrix}.$$

Після побудови еліпса обчислюють його площу за формулою:

$$S = \pi SD1 SD2. \quad (3)$$

Форма хмари скатерограми має витягнуту еліптичну форму в нормі (рис. 3). Для сигналів з порушеннями ритму її форма змінюється, і з'являється

декілька областей розсіювання з різними центрами (рис. 4). Ведучий дихальний ритм впливає на форму, витягуючи хмару уздовж діагоналі і звужуючи в перпендикулярному напрямку. У стані релаксації з неглибоким диханням форма хмари близька до окружності, а при фізичному навантаженні з високою частотою і глибиною дихання хмара витягується і стискається зі зміщенням до області коротких кардіоімпульсів.

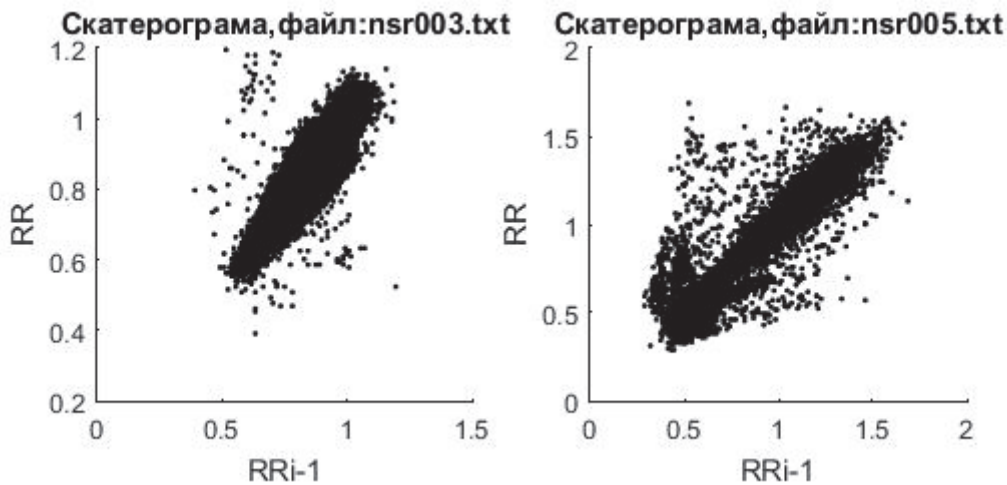


Рис. 3. Скатерограми добових сигналів у нормі

При розрахунку показників (1–3) і побудові еліпса частина кардіоінтервалів залишається за його межами, що неминуче впливає на результат (рис. 2). Тому ми зробили спробу оцінити форму скатерограми за допомогою коефіцієнта фрактальної розмірності, який широко використовується для аналізу ступеня порізаності кривої. Фрактальна розмірність Хаусдорфа довільної множини G в N -вимірному просторі визначається наступним чином [12]:

$$D_f = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(M(\varepsilon))}{\ln(1/\varepsilon)}, \quad (4)$$

де $M(\varepsilon)$ – мінімальна кількість N -мірних клітин зі стороною ε , що необхідно для покриття всіх елементів множини G . Застосувавши це визначення для обчислення розмірності точки, лінії або поверхні, отримаємо 0, 1, 2 відповідно. Для нетривіальних множин розмірність D_f є дробовою.

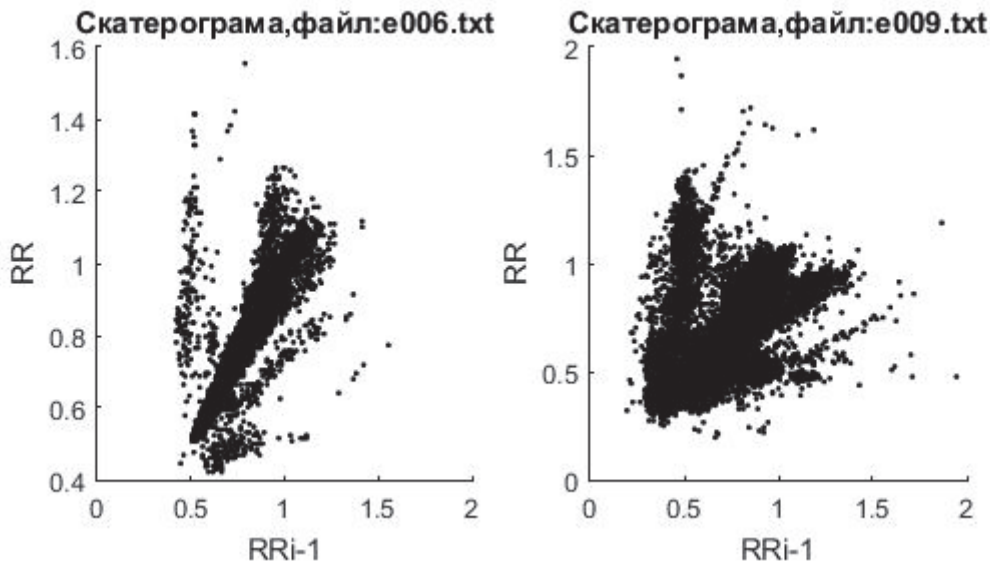


Рис. 4. Скатерограми добових сигналів з аритмією

З метою пошуку зв'язку між коефіцієнтом фрактальної розмірності та її площею (3) зі стандартними показниками ВСР 1–15, ми провели розрахунки для тестових сигналів. В табл. 1 приведені результати розрахунків площі скатерограм S та коефіцієнту фрактальної розмірності D_f для тестових сигналів.

Тест Ст'юдента для середніх значень виявив першу гіпотезу (значущість $\alpha = 0.279$ для S та $\alpha = 0.232$ для D_f). Файл e002 не враховувався через його явний аномальний характер (рис. 5).

Таблиця 1

S і D_f для добових тестових сигналів

файл	S	D_f	файл	S	D_f
nsr001	0,7358	2,0337	e001	1,2570	2,2095
nsr002	0,5237	1,8941	e002	281,7764	2,0868
nsr003	0,3698	1,8353	e003	2,4036	2,0596
nsr004	0,5952	2,0201	e004	0,6652	2,0629
nsr005	1,2679	1,9632	e005	4,9771	2,1986
nsr006	0,7869	2,0097	e006	0,7520	1,8551
nsr007	0,3256	1,7149	e007	8,3104	2,5588
nsr008	0,5766	1,8150	e008	1,7029	2,0731
nsr009	0,7036	2,1822	e009	1,4486	2,0731
nsr010	1,1678	1,9798			

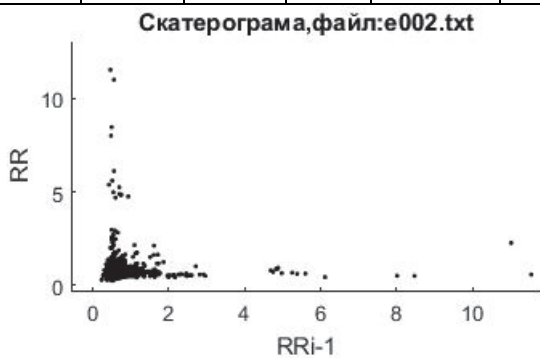


Рис. 5. Скатерограма (файл e002)

Графічне представлення табличних даних демонструє просторове положення об'єктів дослідження в системі ознак " $S - D_f$ " (рис. 6). В цій системі ознак об'єкти локалізовані за групами, крім e004 (рис. 2) та e006 (рис. 4), тобто для характеристики добової послідовності RR -інтервалів застосування S , D_f не є доцільним.

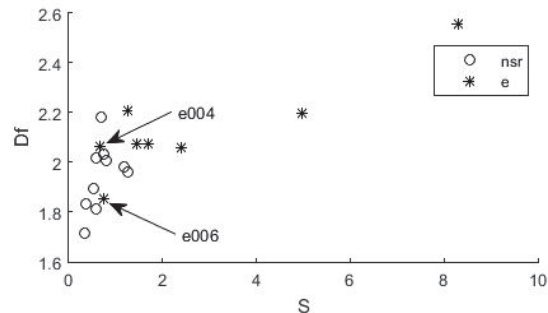


Рис. 6. Представлення добових сигналів в системі ознак " $S - D_f$ "

Ми розрахували кореляційну матрицю показників ВСР, до якої включили S і D_f (табл. 2).

Площа скатерограми при аритмії має сильний кореляційний зв'язок з коефіцієнтом варіації V , варіаційним розмахом R , стандартним відхиленням різниці RR -інтервалів $RMSSL$, показником активності парасимпатичної ланки $RMSSD$, стандартним відхиленням різниці між сусідніми інтервалами $SDSD$, триангулярної інтерполяції гістограми $TINN$ та спектральним показником LF/HF зі значущістю $\alpha \leq 0,05$. Показник фрактальної розмірності корелює тільки з показником $TINN$ з $\alpha \leq 0,05$.

Для нормального синусового ритму отримана зовсім інша картина. Показник S має значимий кореляційний зв'язок зі стандартним відхиленням RR -

інтервалів SDNN, коефіцієнтом варіації V , варіаційним розмахом R , стандартним відхиленням різниць RR-інтервалів $RMSSL$, показником активності парасимпатичної ланки $RMSSD$, триангулярним індексом TI , триангулярної інтерполяції гістограми $TINN$ зі значущістю $\alpha \leq 0,05$. Кількість показників BCP, з якими корелює показник фрактальної розмірності, дорівнює 6: стандартне відхилення RR -інтервалів SDNN, коефіцієнт варіації V , варіаційний розмах R , показник активності парасимпатичної ланки $RMSSD$, стандартне відхилення різниці між сусідніми інтервалами $SDSD$ і площа скатерограми S зі значущістю $\alpha \leq 0,05$.

Таблиця 2

Кореляційні коефіцієнти Пірсона

	Естрасистоія		Нормальний ритм	
	S	D_f	S	D_f
SDNN	0,5170	0,0574	0,8421	-0,7626
Mean	-0,3816	-0,4262	-0,2088	0,1351
Mo	-0,3313	-0,3810	-0,1683	0,3380
AMo	0,5213	0,2786	-0,5906	0,4316
V	0,8750	0,4147	0,8980	-0,8330
R	0,9991	0,6650	0,9447	-0,7516
PNN50	0,3987	-0,0078	0,2439	-0,6481
RMSSL	0,9997	0,6541	0,7270	-0,4371
RMSSD	0,8212	0,3620	0,7550	-0,8103
SDSD	0,7357	0,2860	0,7501	-0,7243
TI	-0,3996	-0,0002	0,7209	-0,4388
TINN	0,9713	0,6693	0,7778	-0,4921
LF/HF	0,7688	0,2205	-0,5547	0,4804
S	1,0000	0,6651	1,0000	-0,7991

Таким чином, показник фрактальної розмірності має сильний кореляційний зв'язок зі стандартними показниками у нормі і показує відсутність кореляції з ними при аритмії. Наведені результати демонструють, що площа скатерограми і показник її фрактальної розмірності можуть бути використані у якості інтегральних параметрів.

Аналіз 1-хвилинних послідовностей RR-інтервалів. З метою оцінювання BCP для коротких інтервалів ми розділили кожен тестовий сигнал на 1-хвилинні фрагменти. Скатерограми, що побудовані для виділених інтервалів, значно відрізняються одна від одної (рис. 7). Для порівняння ми розмістили три скатерограми для трьох послідовних 1-хвилинних інтервалів тестових сигналів з нормальним синусовим ритмом та аритмією.

Для кількісної оцінки скатерограм ми розрахували їх параметри за формулами (1–3) та знайшли фрактальну розмірність за (4). Обчислення були проведені для 25971 1-хвилинних інтервалів. Спектральні показники були вилучені із розрахунків з причини недостатньої кількості відкликів. Кількість інтервалів для нормального синусового ритму складає 13867, з аритмією – 12104. Рис. 8 відображає гістограми розподілу показників фрактальної розмірності і геометричних параметрів скатерограм, що побудовані за результатами розрахунків. Функції розподілу показників відхиляються від нормального закону, крім показника фрактальної розмірності. Максимуми і ширина гістограм мають різні значення. Для порівняння рядів даних двох груп ми застосували критерій Ст'юдента. В табл. 3 наведені результати перевірки нульової гіпотези з рівнем значущості $\alpha \leq 0,05$.

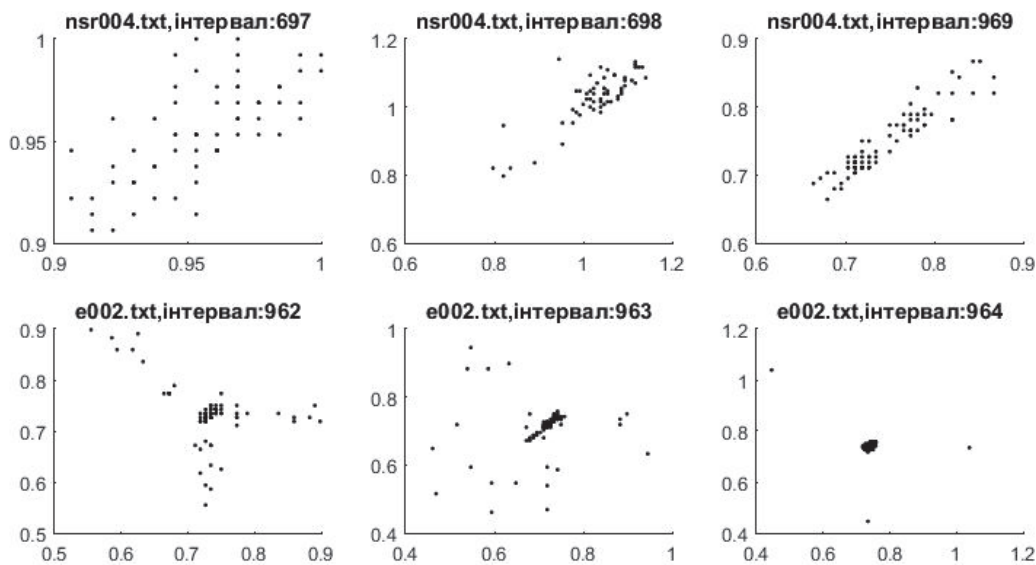


Рис. 7. Скатерограми, побудовані для послідовних 1-хвилинних інтервалів для нормального синусового ритму та аритмії

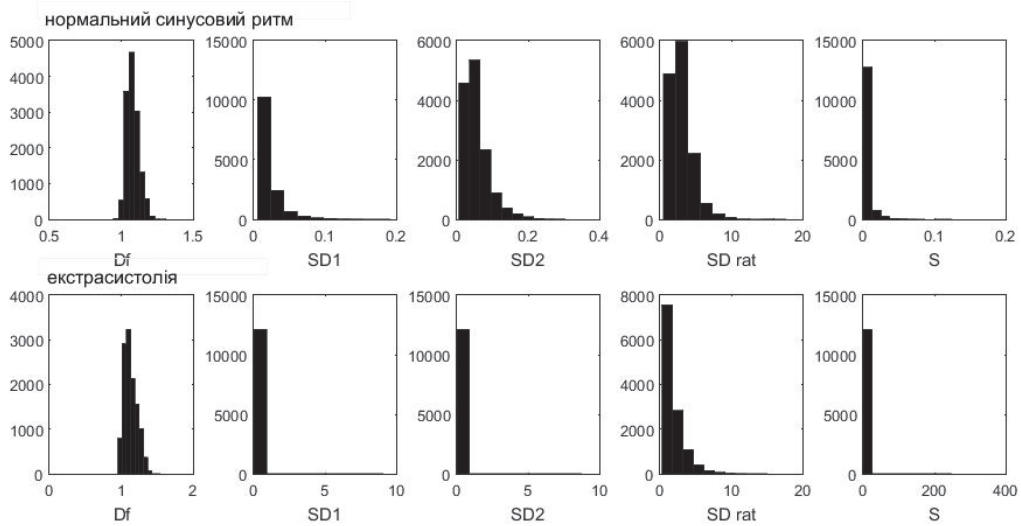


Рис. 8. Гістограми розподілу значень показника фрактальної розмірності та геометричних параметрів скатерограм для нормального синусового ритму та аритмії

Таблиця 3

Результати тесту Ст'юдента показників скатерограми

	D_f	$S1$	$S2$	$S2/S1$	S
Гіпотеза h	$h=1$	$h=1$	$h=1$	$h=1$	$h=0$

Таким чином, значення показників D_f , $S1$, $S2$, $S2/S1$ значно відрізняються один від одного для двох груп і можуть бути використані при оцінюванні скатерограм 1-хвилинних інтервалів.

Показник фрактальної розмірності показав дуже велику чутливість до форми скатерограми (рис. 9). Середнє значення для нормального синусового ритму дорівнює 1.0807 ± 0.000717 , а для аритмії 1.129 ± 0.0016 (довірчі інтервали розраховані з ймовірністю 95%).

В умовах відсутності будь-якої інформації про ранжування 1-хвилинних інтервалів даних використання тільки чотирьох параметрів неможливо. Тому ми розрахували стандартні показники 1–12, 16–19 і перевірили наявність нульової гіпотези за тестом Ст'юдента. Середні значення усіх показників відрізняються одне від одного зі значущістю $\alpha \leq 0,05$, що надає можливість провести кластеризацію даних.

Одним з найпоширеніших методів кластеризації є k-means. Кількість кластерів ми визначили виходячи з таких міркувань. При аналізі 5-хвилинних інтервалів Р.М. Баєвський запропонував 3 зони для оцінки функціонального стану: фізіологічної норми, донозологічна (перехідна) та зрив адаптаційних систем. Оскільки в своїх дослідженнях ми використовуємо систему показників, що включає у себе показники Баєвського, для попередніх розрахунків було обрано $k=6$ кластерів.

Матриця (25971×15) для кластерного аналізу сформована за показниками (стовпці), спостереження для кожного 1-хвилинного інтервалу розташовані у рядках.

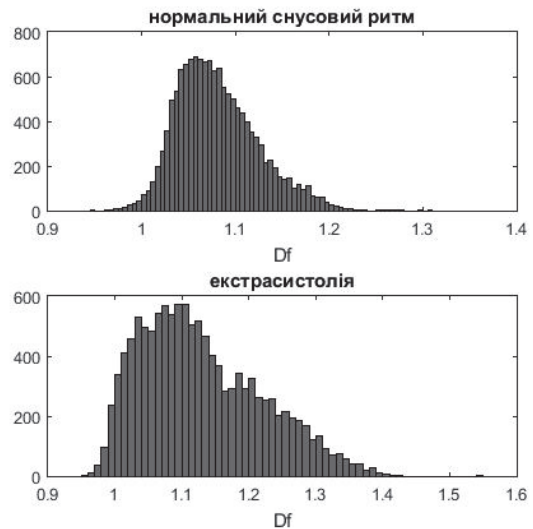


Рис. 9. Гістограма розподілу D_f

За результатами кластеризації ми розрахували середні значення показників (табл. 4), які суттєво відрізняються, що підтверджується тестом Ст'юдента. Показники, для яких отримано нульову гіпотезу, виділені у комірках таблиці: стандартне відхилення різниць RR -інтервалів $RMSSL$, мода M_0 , вегетативний показник ритму VI та показник адекватності процесів регуляції $ARPI$.

Рис. 10 наглядно демонструє результати кластеризації (скатерограми вибірково наведені для перших трьох кластерів). Скатерограми для першого та другого кластерів візуально не дуже відрізняються одна від одної. Інша картина спостерігається для третього кластеру. Це пояснюється тим, що 1-хвилинні фрагменти було кластеризовано лише за показниками, більшість з яких корелюють один з одним. Вони оцінюють динамічний ряд, але не враховують просторові геометричні показники скатерограми.

Таблиця 4

Середні значення показників за результатами k-means

	<i>k1</i>	<i>k2</i>	<i>k3</i>	<i>k4</i>	<i>k5</i>	<i>k6</i>
Mean	0,784	0,954	0,978	0,886	1,009	0,937
SDNN	0,030	0,180	0,096	0,053	0,120	0,072
SDSD	0,015	0,193	0,097	0,041	0,133	0,064
RMSSD	0,186	2,228	0,929	0,429	1,313	0,639
RMSSL	0,003	0,156	0,312	0,020	0,104	0,046
PNN50	1,146	66,283	30,882	8,608	45,407	18,549
V	0,039	0,188	0,098	0,063	0,120	0,079
Mo	0,782	0,916	0,967	0,882	0,995	0,930
R	0,153	0,809	0,537	0,319	0,644	0,420
IVB	0,243	0,110	0,133	0,170	0,116	0,154
VI	0,203	0,914	0,599	0,388	0,671	0,489

Закінчення табл. 4

ARPI	0,244	0,115	0,135	0,171	0,117	0,155
SI	1,206	0,100	0,191	0,393	0,146	0,273
TI	5,584	11,013	8,968	7,384	9,587	8,127
TINN	0,024	0,305	0,163	0,069	0,216	0,106

Ми включили до матриці показники, що враховують геометричні параметри скатерограми: фрактальну розмірність, довжину вісей та їх співвідношення і провели процедуру повторної кластеризації.

Розбіжність між розподілом об'єктів складає 30%. При візуальному оцінюванні скатерограм RR-інтервалів, які були віднесені до одного кластеру, показує подібність хмари за формою, геометричними розмірами та положенням у просторі (рис. 11).

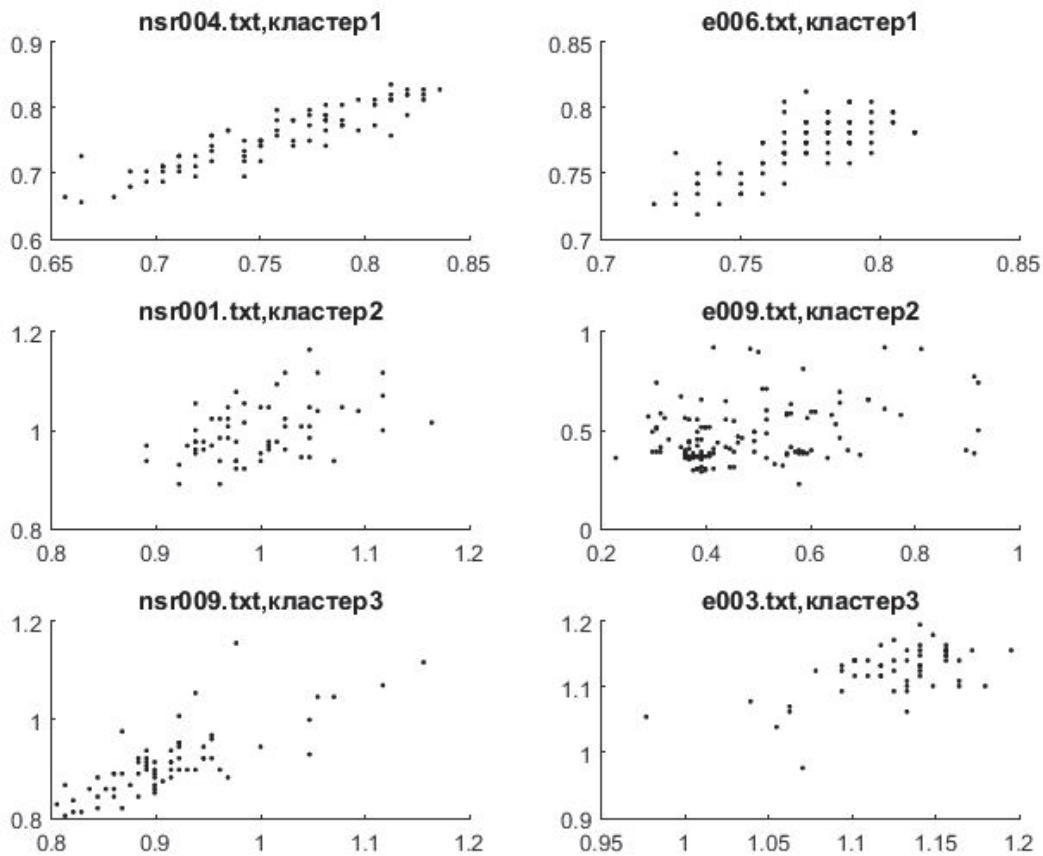


Рис. 10. Скатерограми 1-хвилинних фрагментів: результати кластеризації за k-means

Середні значення показника фрактальної розмірності та геометричних параметрів скатерограми наведені в табл. 5. Для усіх середніх отримано першу гіпотезу.

Отримані дані свідчать про розбіжність значень показників і підтверджують доцільність їх використання з метою оцінки скатерограми для 1-хвилинних інтервалів.

Таблиця 5

Середні значення показників скатерограми за результатами k-means

	<i>k1</i>	<i>k2</i>	<i>k3</i>	<i>k4</i>	<i>k5</i>	<i>k6</i>
<i>Df</i>	1,107	1,180	1,049	1,143	1,306	1,223
<i>SI</i>	0,094	0,038	0,171	0,015	9,083	0,059
<i>S2</i>	0,105	0,065	0,136	0,038	8,736	0,085
<i>S2/SI</i>	1,411	2,263	0,903	2,982	0,962	1,905

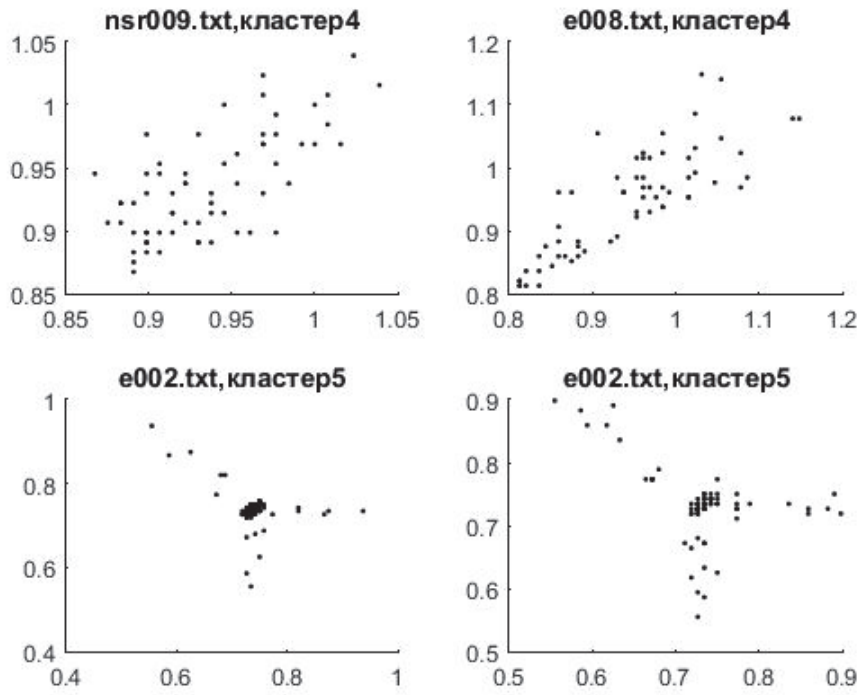


Рис. 11. Результати оцінки 1-хвилинних інтервалів за обраних запропонованим набором показників

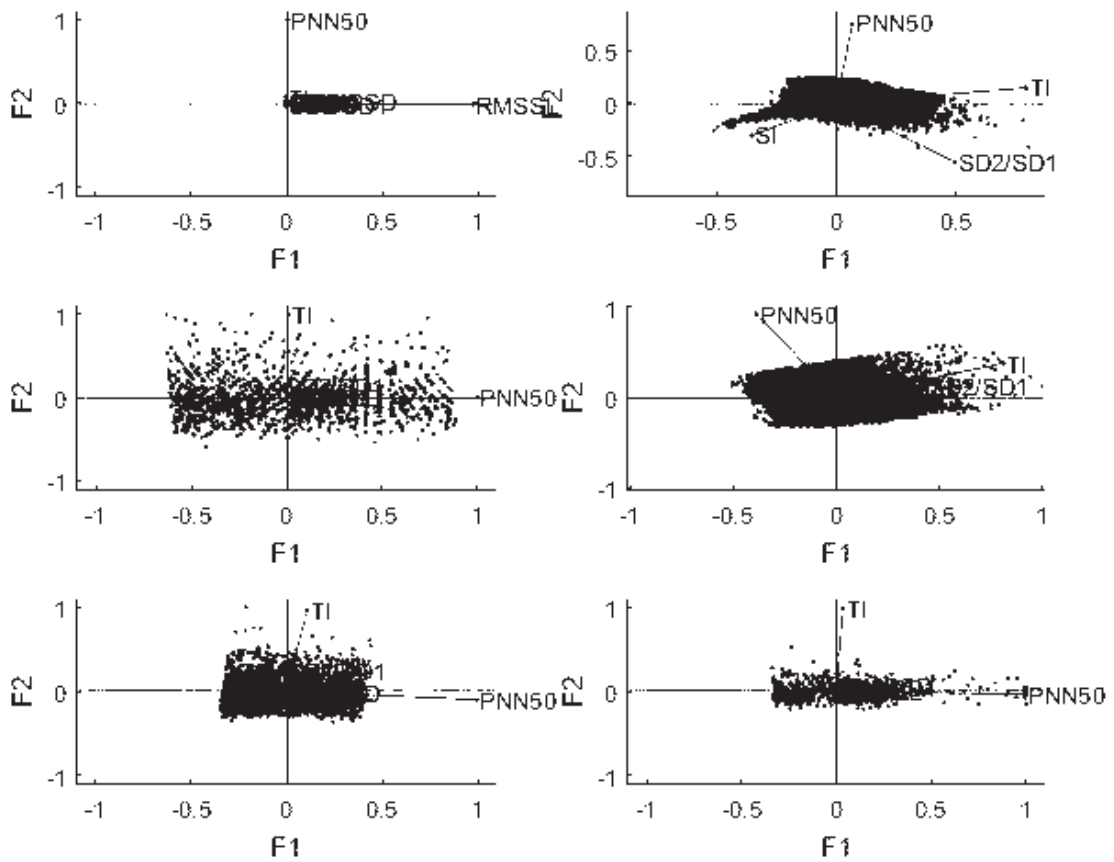


Рис. 12. Представлення об'єктів дослідження за результатами факторного аналізу

Обговорення результатів

Практичне застосування оцінки RR -інтервалів на коротких інтервалах (1 хвилина) орієнтовано на експрес-оцінку в режимі реального часу. Це може бути реалізовано, наприклад, у додатках для мобільних гаджетів. У зв'язку з цим, виникає питання мінімізації показників для здійснення розрахунків. За допомогою факторного аналізу для усієї вибірки даних з 1-хвилинними інтервалами ми визначили показники, які більш за всіх впливають на фактори $F1$, $F2$.

Як видно з рис. 12, показники кількості різницевого значень більш ніж 50 мс $PNN50$, співвідношення великої та малої осей еліпсу скатерограми $SD2/SD1$, триангулярний індекс гістограми TI дають внесок у формування значень факторів.

З огляду на те, що оцінювання ВСП неможливо без врахування середнього значення RR -інтервалів, яке визначає просторове положення скатерограми, його використання є обов'язковим.

Таким чином, перелік показників для оцінки 1-хвилинних інтервалів включає: показник кількості різницевого значень більш ніж 50 мс $PNN50$, велику $SD2$ та малу $SD1$ осі еліпсу скатерограми, їх співвідношення $SD2/SD1$, триангулярний індекс гістограми TI , середнє значення $Mean$ та показник фрактальної розмірності Df .

Висновки

Дослідження добових послідовностей RR -інтервалів встановило, що між показником фрактальної розмірності скатерограми і стандартними статистичними показниками при нормальному синусовому ритмі присутній кореляційний зв'язок з ймовірністю більш ніж 95%.

Проаналізовано 1-хвилинні інтервали послідовностей RR -інтервалів за стандартними показниками та проведено фрактальний аналіз скатерограм для нормального синусового ритму та при аритмії. Методом кластерного аналізу визначено шість кластерів, що дозволило з ймовірністю більше ніж 95% визначити середні групові значення показника фрактальної розмірності та її геометричних параметрів.

Запропоновано набір показників для аналізу 1-хвилинних інтервалів послідовностей RR -інтервалів, що містить показник кількості різницевого значень більш ніж 50 мс $PNN50$, співвідношення великої та малої осей еліпсу скатерограми $SD2/SD1$, триангулярний індекс гістограми TI , середнє значення $Mean$, показник фрактальної розмірності Df , велику ($SD2$) та малу осі ($SD1$) та їх співвідношення $SD2/SD1$.

Отримані результати можуть бути використані для проведення експрес-оцінки коротких послідовностей RR -інтервалів в пристроях для індивідуального моніторингу.

Список літератури

1. European Society of Cardiology. Task Force of the European Society of Cardiology and North America Society of Pacing Electrophysiology, Heart Rate Variability, Standard of Measurement, Physiological Interpretation and Clinical Use // European Heart Journal, 1996. – Vol. 17. – P. 354-381.
2. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) / Р.М. Баевский, Г.Г. Иванов, Л.В. Чирейкин и др. // Вестник аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65-86.
3. Фрактальная оценка и вариабельность сердечного ритма у беременных с тяжелой преэклампсией и эклампсией в третьем триместре / Н.Г. Рахимов, Н.Х. Олимзода, Г.К. Давлятова, А.М. Мурадов, А.А. Мурадов // Вестник последипломного образования в сфере здравоохранения. – Душанбе, 2017. – № 1. – С. 61-65.
4. Охремчук А.П. Контроль функционального состояния организма занимающихся в группе здоровья с использованием аппаратно-программного комплекса / А.П. Охремчук, О.Н. Шмонина // Ученые записки университета им. П.Ф.Лесгафта. – С.-Пб., 2017. – Вып. 2(144). – С. 168-173.
5. Фрактальный анализ вариабельности сердечного ритма у биатлонисток с разным уровнем тренированности / В.З. Язык, В.Д. Парамзин, А.Э. Болотин, М.С. Ворогова // Физиология. – 2018. – Вып. 4. – С. 95-102.
6. Sen Jonathan. Fractal analysis of heart rate variability as a predictor of mortality: A systematic review and meta-analysis / Jonathan Sen, Darry McGill // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 2018. – Volume 28, Issue 7. <https://doi.org/10.1063/1.5038818>.
7. Heartbeat classification fusing temporal and morphological information of ECGs via ensemble of classifiers / V. Mondéjar-Guerra, J. Novo, J. Roucoab, M.G. Penedo, M. Ortega // Biomedical Signal Processing and Control. – 2019. – Vol. 47. – P. 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.08.007>.
8. Multi-stage classification of congestive heart failure based on short-term heart rate variability / Yalcin Isler, Ali Narin, Mahmut Ozer, Matjaž Perc // Chaos, Solitons & Fractals. – 2019. – Vol. 118. – P. 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.11.020>.
9. Tsvetkov V.P. Fractal phase space and fractal entropy of instantaneous cardiac rhythm / V.P. Tsvetkov, S.A. Mikhayev, I.V. Tsvetkov // Chaos, Solitons & Fractals. – 2018. – Vol. 108. – P. 71-76. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.01.030>.
10. Visibility graph analysis of very short-term heart rate variability during sleep / F.Z. Hou, F.W. Li, J. Wang, F.R. Yan // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2016. – Vol. 458. – P. 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.03.086>.

11. Billman George E. Heart Rate Variability – A Historical Perspective / George E. Billman // *Front Physio.* – 2011. – Vol. 2. <https://doi.org/10.3389/fphys.2011.00086>.
12. Величко О.Н. Передискретизация тахограммы. Проблема выбора интервала передискретизации / О.Н. Величко, О.Е. Гапон // *Системи обробки інформації.* – 2014. – № 9(125). – С. 168-175.
13. Velichko O.N. Analysis of the heart rate variability dynamics during long-term monitoring / O.N. Velichko, O.M. Datsok // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2018. – Vol. 77, Issue 7. <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v77.i7.70>.
14. Офіційний сайт PhysioNet. Normal Sinus Rhythm RR Interval Database. – 2019. – Режим доступу: <https://physionet.org/content/nsr2db/1.0.0/>.
15. Офіційний сайт PhysioNet. CAST RR Interval Sub-Study Database. – 2019. – Режим доступу: <https://physionet.org/content/crisdb/1.0.0/>.

References

1. The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology (1996), Heart Rate Variability, Standard of Measurement, Physiological Interpretation and Clinical Use, *European Heart Journal*, Vol. 17, pp. 354-381.
2. Baevskyi, R., Yvanov, H. and Chyreikyn, L. (2001), “Analiz variabelnosti serdechnogo ritma pri ispolzovanii razlichnykh elektrokardiograficheskikh sistem” [Analysis of heart rate variability during the using different electrocardiographic systems], *Journal of arrhythmology*, No. 24, pp. 65-86.
3. Rakhimov, N., Olimzoda, N., Davlyatova, G., Muradov, A.M. and Muradov, A.A. (2017), “Fraktalnaya otsenka i variablnost serdechnogo ritma u beremennykh s tyazhelyoy preeklampsiyey i eklampsiyey v tretyem trimester” [Fractal estimation and heart rate variability in pregnant women with severe preeclampsia and eclampsia in the third trimester], *Journal of Postgraduated Medical Education*, No. 1, pp. 61-65.
4. Okhremchuk, A. and Shmonina, O. (2017), “Kontrol funktsionalnogo sostoyaniya organizma zanimayushchikhsya v gruppe zdorovia s ispolzovaniyem apparatno-programmnogo kompleksa” [Monitoring the functional state of persons from the health physical training group using the hardware-software complex], *Journal of Scientific Notes of Lesgapt's University*, No. 2(144), pp. 168-173.
5. Yatsyk, V., Paramzin, V., Bolotin, A. and Vorotova, M. (2018), “Fraktalnyy analiz variabelnosti serdechnogo ritma u biatlonistok s raznym urovnem trenirovannosti” [Fractal analysis of heart rate variability in biathletes with different levels of fitness], *Journal of physiology*, No. 4, pp. 95-102.
6. Sen, J. and McGill, D. (2018), Fractal analysis of heart rate variability as a predictor of mortality: A systematic review and meta-analysis, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, Vol. 28, No. 7. <https://doi.org/10.1063/1.5038818>.
7. Mondéjar-Guerra, V., Novo, J., Rouco, J., Penedo, M. and Ortega, M. (2019), Heartbeat classification fusing temporal and morphological information of ECGs via ensemble of classifiers, *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 47, pp. 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.08.007>.
8. Isler, Y., Narin, A., Ozer, M. and Perc, M. (2019), Multi-stage classification of congestive heart failure based on short-term heart rate variability, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 118, pp. 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.11.020>.
9. Tsvetkov, V., Mikheyev, S. and Tsvetkov, I. (2018), Fractal phase space and fractal entropy of instantaneous cardiac rhythm, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 108, pp. 71-76. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.01.030>.
10. Hou, F., Li, F., Wang, J. and Yan, F. (2016), Visibility graph analysis of very short-term heart rate variability during sleep, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 458, pp. 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.03.086>.
11. Billman, G. (2011), Heart Rate Variability – A Historical Perspective, *Front Physio*, Vol. 2. <https://doi.org/10.3389/fphys.2011.00086>.
12. Velichko, O. and Gapon, O. (2014), “Perediskretizatsiya takhogrammy. Problema vybora intervala perediskretizatsii” [Resampling of tachogram. A problem of resampling interval definition], *Information Processing Systems*, No. 9(125), pp. 168-175.
13. Velichko, O. and Datsok, O. (2018), Analysis of the heart rate variability dynamics during long-term monitoring, *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 77, No. 7. <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v77.i7.70>.
14. The official site PhysioNet (2019), *Normal Sinus Rhythm RR Interval Database*, available at: <https://physionet.org/content/nsr2db/1.0.0/>.
15. The official site PhysioNet (2019), *CAST RR Interval Sub-Study Database*, available at: <https://physionet.org/content/crisdb/1.0.0/>.

Надійшла до редколегії 03.06.2019

Схвалена до друку 13.08.2019

Відомості про авторів:

Величко Ольга Миколаївна
кандидат технічних наук доцент
Національного юридичного університету
ім. Я. Мудрого,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9202-8411>

Information about the authors:

Olga Velychko
PhD Associate Professor
of Yaroslav Mudryi
National Law University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9202-8411>

Ал-Халалмех Садам Еяд Хамед
аспірант
Харківського національного університету
радіоелектроніки
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5911-1675>

Alhalalmeh Sadam Iyad Hamed
Doctoral Student
of Kharkiv National University
of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5911-1675>

Міхайлова Емілія Аурелівна
доктор медичних наук професор
завідуюча відділенням Державної установи
“Інститут охорони здоров’я дітей та підлітків
Національної академії медичних наук України”,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5508-1248>

Iemiliia Mykhailova
Doctor of Medical Sciences Professor
Chief of Department of State Institution
“Institute for Children and Adolescents Health Care
at the National Academy of Medical Sciences of Ukraine”,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5508-1248>

Колеснікова Тетяна Анатоліївна
кандидат технічних наук доцент
Харківського національного університету
радіоелектроніки
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5911-1675>

Tatyana Kolesnikova
PhD Associate Professor
of Kharkiv National University
of Radio Electronics,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0571-5895>

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СКАТЕРОГРАММЫ

О.Н. Величко, Ал-Халалмех Садам Эяд Хамед, Е.А. Михайлова, Т.А. Колесникова

Проведен анализ скатерограмм суточных тестовых сигналов с нормальным синусовым ритмом и аритмией, установлено наличие сильной корреляционной связи между показателем фрактальной размерности и стандартными показателями ВСП в норме и ее отсутствие при аритмии. Рассчитаны стандартные показатели variability ритма сердца и показатель фрактальной размерности для 1-минутных интервалов. На основании полученных результатов проведен кластерный анализ данных методом k-means, определены средние групповые значения показателя фрактальной размерности и геометрических параметров скатерограммы. По результатам факторного анализа определен набор показателей для оценки скатерограммы 1-минутного интервала.

Ключевые слова: *вариабельность сердечного ритма, фрактальный анализ, скатерограмма, короткая последовательность RR-интервалов.*

FRactal ANALYSIS OF SCATEROGRAM

O. Velychko, Alhalalmeh Sadam Iyad Hamed, I. Mykhailova, T. Kolesnikova

The subjects of investigation are long time series and short time series of RR-intervals and their special distribution named as scatterogram. The objective of work is the investigation of one-minute intervals of RR data series to definite the dataset of parameters for estimation of physiological state in real time mode. The methodology of investigation is based on the data processing of the standard indicators of heart rate variability (HRV), fractal analysis, machine learning methods (k-means) and factor analysis. Testing signals were been taken from the European data base of medical signals PhysioNet. Scatterogram analysis of the testing diurnal record with normal sinus rhythm and arrhythmia was performed. A strong correlation between the coefficient of fractal dimension and standard indications of HRV for normal sinus rhythm and null correlation for arrhythmia had been observed. Standard indicators of HRV and coefficient of fractal dimension for each one-minute interval were calculated and estimated with the Student's average test that had shown inexpediency of scatterogram surface using. Cluster analysis based on the k-means method to determine general probabilistic data series groups was performed. Initial data for cluster analysis is a matrix of standard HRV indicators, coefficient of fractal dimension and geometric parameters of scatterogram. Entire objects from the one-minute dataset were grouped into six clusters. The average value of scatterogram parameters (coefficient of fractal dimension, long and short axes and their ration) for selected clusters were found with probability more than 95 %. Data set of parameters to analyze the one-minute intervals of RR-dataset was defined with fractal analysis. Proposed dataset of indicators for estimation one-minute intervals includes: pNN50 (the proportion derived by dividing the number of interval differences of successive NN intervals greater than 50 ms by the total number of NN intervals), long SD2 and short SD1 ellipse axes, ratio SD2/SD1, triangular index TI, mean heart rate and coefficient of fractal dimension Df. Gotten results may be used to develop mobile software for personal monitoring devices.

Keywords: *heart rate variability, fractal analysis, scatterogram, short time intervals of RR-dataset.*