



СИМВОЛИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА В ПРИЛОЖЕНИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ РИТМА СЕРДЦА

Ю.В. Гуров

Проводится анализ ритма сердца с помощью символической динамики. Кодированию подвергаются временные интервалы, соответствующие преобладанию симпатического или парасимпатического тонуса нервной регуляции. Всего при кодировании используется 25 символов, что приводит к большому разнообразию слов в символических строках. Производится анализ ритма сердца для пациентов разного возраста, здоровых и при наличии сердечно-сосудистых заболеваний. Полученные результаты дают характеристику возрастным изменениям и различным патологиям.

Ключевые слова: Символическая динамика, ранговые словари, запрещенные слова, условная энтропия, ритм сердца, диагностика заболеваний сердца.

Введение

Символическая динамика как инструмент для исследования сердечного ритма применялась неоднократно. Первые успешные попытки были сделаны в работе [1], где ставилась задача определения степени риска инфаркта миокарда по характеру символической динамики, введенной через кодирование символов в зависимости от отклонения текущего показателя частоты сердечных сокращений (ЧСС) от среднего значения. Использованное в работе [1] кодирование было применено в [2], где с помощью символической динамики описывались особенности variability ритма сердца и кровяного давления. В работе [3] было введено другое кодирование по символам, основанное на определении интервалов роста или спада ЧСС. С помощью статистических показателей, полученных на основе такой символической динамики, проведено изучение сердечного ритма, отвечающего различным функциональным состояниям организма, таким как старение или патология. Авторы дальнейших работ [4–6] используют фактически то же кодирование, которое описано в работах [1,3], с небольшими вариациями. В них исследовались показатели энтропии, например, такие как приближенная энтропия (Approximate Entropy, ApEn), изучались

статистические распределения слов и рассматривались короткие записи ритмограмм сердца. Со списком более значимых показателей в применении к изучению сердечного ритма, полученных на основе символической динамики, можно ознакомиться в обзорной статье [7].

В данной работе предложен новый способ кодирования исходной записи сердечного ритма с целью продемонстрировать диагностические возможности символической динамики. В работе также представлены некоторые закономерности поведения сердечного ритма при возрастных изменениях и патологиях.

1. Данные и методы

1.1. Данные. В настоящей работе использовались 24-часовые записи ритмов сердца (RR -интервалов) из базы PhysioNet [8], а именно 56 записей здоровых людей с нормальным синусным ритмом (возраст 10 субъектов от 22 до 40 лет, остальные в возрасте от 40 до 73 лет), 44 записи людей с диагнозом застойной сердечной недостаточности (возраст от 34 до 79 лет), 84 записи длительной или пароксизмальной фибрилляции предсердий (данных о возрасте нет) и 19 записей с синдромом внезапной сердечной смерти. Обозначим для краткости группу здоровых людей в возрасте до 40 лет аббревиатурой NSRY (Normal Sinus Rhythm Young), группу здоровых людей старше 40 лет – NSRE (Normal Sinus Rhythm Elderly), группу с застойной сердечной недостаточностью – CHF (Congestive Heart Failure); группу с мерцательной аритмией – LAF (Long-term Atrial Fibrillation) и последнюю группу обозначим как SD (Sudden Death).

1.2. Кодирование и символическая динамика. Для анализа вышеуказанных записей с помощью методов символической динамики требуется задание процедуры кодирования или, другими словами, правило, которое определяет порядок сопоставления рассматриваемой записи ритма сердца определенной последовательности символов. Очевидно, что кодирование само по себе несколько «огрубляет» динамику исходного процесса, поскольку одним символом заменяется некоторый участок ритмограммы, имеющий свою внутреннюю структуру. С другой стороны, удачно выбранное кодирование может существенно упростить анализ исследуемой записи. В данной работе отдельными символами кодируются участки превалирующего действия *симпатической или парасимпатической нервной системы*. Как известно, тонусы этих систем играют решающую роль в формировании ритма сердца. Например, парасимпатическая нервная система оказывает тормозное влияние на сердце, уменьшая частоту и силу сердечных сокращений, а симпатическая система действует прямо противоположным образом. На рис. 1 приведен полуминутный фрагмент ритмограммы, на котором отображены несколько участков увеличения и уменьшения длительности RR -интервалов, определяющих ЧСС. На этом рисунке видны семь локальных экстремумов функции $RR(N)$, обозначенных буквами X_n , где N – порядковый номер RR -интервала, а n – номер экстремума (минимума или максимума).

Обозначим через tt временной интервал превалирующего действия симпатической или парасимпатической нервной системы, который представляет собой

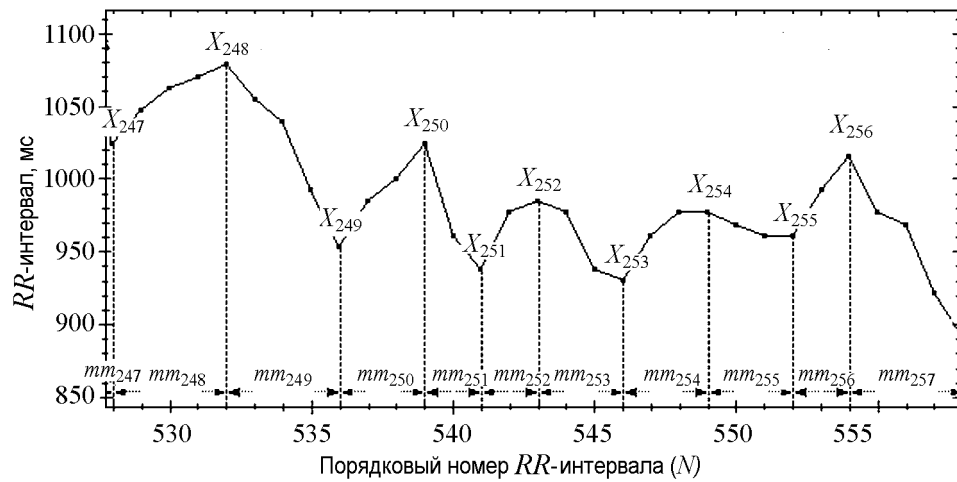


Рис. 1. Фрагмент ритмограммы, на котором видно увеличение и уменьшение длительности RR -интервалов (уменьшение и увеличение ЧСС, соответственно). Экстремумы на графике обозначены буквой X с индексом

сумму RR -интервалов между соседними экстремумами

$$mm_n = \sum_{j=N(X_{n-1})}^{N(X_n)} RR(j),$$

где $N(X_n)$ – порядковый номер RR -интервала, отвечающего n -му экстремуму. Следует отметить, что каждый mm -интервал характеризует помимо времени превалирующего действия парасимпатической или симпатической нервной системы еще и число сокращений сердца за это время. Другими словами, предыдущая формула может быть записана в виде

$$mm_n = b_n \cdot \tilde{r}_n, \quad (1)$$

где b_n и \tilde{r}_n – число сокращений сердца и средний RR -интервал за n -й mm -интервал, соответственно.

В работе [3] последовательность mm -интервалов была закодирована следующим образом: mm -интервалам, отвечающим преобладанию парасимпатического или симпатического тонуса, приписывались символы 1 и 0, соответственно. В настоящей работе используется другой способ кодирования, идея которого описана ниже.

При изучении variability сердечного ритма по записям RR -интервалов широко применяется диаграмма, которая в отечественной медико-биологической литературе (например, [9, 10]) получила название *скаттерограммы*, а в зарубежных работах (например, [11, 12]) она называется *графиком Пуанкаре* (Poincaré plot). Эта диаграмма представляет собой точечный рисунок, где по осям откладываются *соседние* RR -интервалы. Если ритм сердца стационарен и в записи нет артефактов, то скаттерограмма выглядит как эллипсоидное «облако» с наибольшей плотностью точек в центре, причем, чем меньше площадь этого «облака», тем меньше variability кардиоритмов.

Скаттерограмма mm -интервалов, в отличие от скаттерограммы RR -интервалов, имеет более сложную структуру: вместо одного «облака» на ней присутствуют

несколько облаков локализации точек, и их формы отличаются друг от друга. Идея введения символической динамики заключается в следующем: каждому «облаку» на скаттерограмме mm -интервалов приписывается определенный символ, затем эти символы записываются в строку в том порядке, в котором точки попадают в то или иное облако. Пример скаттерограммы с облаками и с соответствующими им символами приведен на рис. 2.

Основную сложность при таком способе кодирования представляет определение принадлежности точки на скаттерограмме тому или иному облаку. Эта задача существенно упрощается с помощью следующего приема. Заменив в (1) среднее значение RR -интервалов на n -м mm -интервале \tilde{r}_n на среднюю величину RR -интервалов за все время записи \overline{RR} , получим следующее выражение для «эффективного» значения n -го mm -интервала:

$$mm_n^{\text{ef}} = b_n \cdot \overline{RR}. \quad (2)$$

Совершенно очевидно, что скаттерограмма mm^{ef} -интервалов, полученных с помощью (2), будет представлять собой множество точек, расположенных в узлах двумерной сетки с квадратными ячейками размером $\overline{RR} \times \overline{RR}$. Положение этих точек указывает на примерное расположение «центров» облаков на скаттерограмме исходных mm -интервалов. Форма и размер облаков на исходной скаттерограмме задается вариабельностью mm -интервалов, а положение этих облаков – количеством сокращений сердца в соседних mm -интервалах. Другими словами, принадлежность точки на скаттерограмме тому или иному облаку задается двумя величинами b_{i+1} и b_i . Например, для того чтобы отыскать все точки, образующие облако, к которому приписан символ A на рис. 2, в последовательности mm -интервалов следует искать соседние mm -интервалы, соответствующие одному сокращению сердца каждый ($b_i = b_{i+1} = 1$). Облако F на рис. 2 состоит из точек, для которых $b_{i+1} = b_i = 2$. Таким образом, с каждым символом ассоциируется пара чисел (b_i, b_{i+1}) , которую в дальнейшем будем называть b -парой. Перечень символов и их b -пар представлен в табл. 1 (в заголовках столбцов указано число сокращений сердца, приходящееся на интервал mm_{i+1} , в заголовках строк указано число RR -интервалов для mm_i интервала). Все облака, образованные из точек, для которых b_i и/или b_{i+1} больше четырех, закодированы общими для них символами из тех соображений, что доля таких облаков во всей скаттерограмме не превышает в среднем 2%.

На рис. 3 приведены три примера скаттерограмм для последовательностей mm -интервалов из групп LAF, CHF и NSR. Различия между скаттерограммами здо-

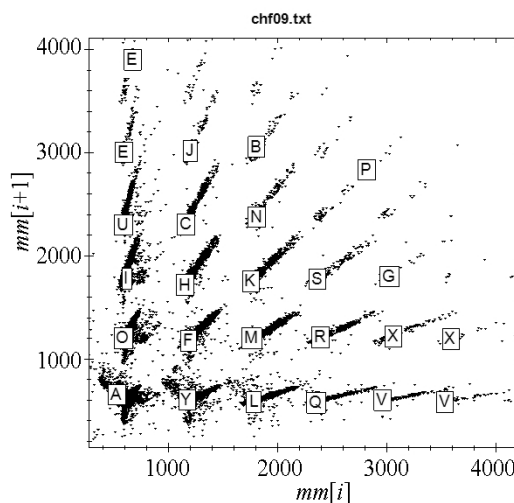


Рис. 2. «Облака» локализации точек на скаттерограмме для mm -интервалов и символы, соответствующие им. Скаттерограмма построена для больного человека из группы CHF

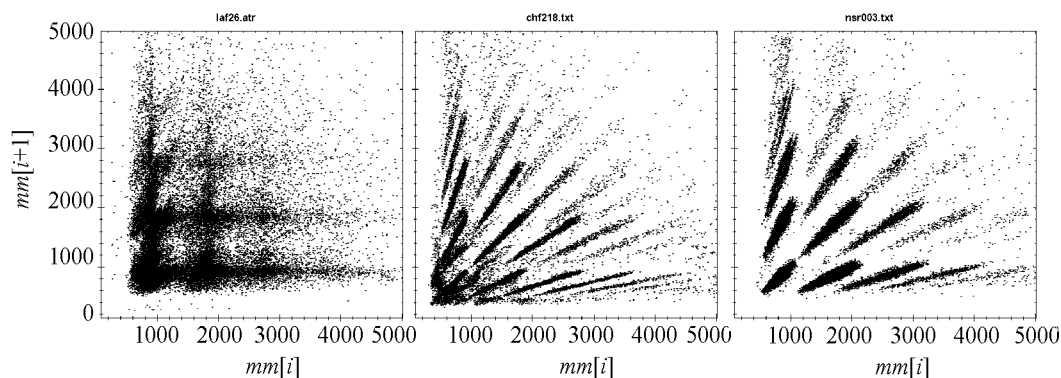


Рис. 3. Три примера скаттерограмм для mm -интервалов двух больных и одного здорового человека. Слева показана характерная скаттерограмма для LAF, в центре – CHF, справа – для здоровых людей

рового и больных людей хорошо видны без дополнительного анализа – для больных людей «облака» либо чересчур расплывлены, либо имеют искаженную форму и сильно вытянуты в длину.

Всего при кодировании было использовано 25 символов латинского алфавита. Однако за любым символом в символьной строке может стоять *только* лишь один из пяти определенных символов. Рассмотрим, например, b -пару ($b_i=2, b_{i+1}=3$), которой в табл. 1 соответствует символ H , стоящий на пересечении второй строки и третьего столбца. Следующая за ней b -пара, очевидно, имеет вид ($b_{i+1}=3, b_{i+2} = \beta$), где в силу вышеописанной кодировки β может принимать значения 1, 2, 3, 4 или являться числом, большим 4. Этим случаям в табл. 1 соответствуют символы, указанные в третьей строке: L, M, K, N, B . Таким образом, за любым символом в строке действительно может находиться только один из пяти символов, указанных в строке с номером, совпадающим с номером столбца, в котором стоит данный символ.

Следуя общепринятой терминологии, будем называть *словом* последовательность из определенного количества символов, которая содержится в рассматриваемой строке. Множество всех слов, которые могут быть обнаружены в символь-

ной строке, назовем *словарем*. *Запрещенными* для исследуемой строки называются слова, которые, в принципе, могут существовать в некоторой последовательности символов, но не появляются в данной. Учитывая вышесказанное, в частности, можно определить максимальный объем словаря V_l^{\max} для слов из l символов:

$$V_l^{\max} = 5^{(l+1)}. \quad (3)$$

Рассмотрим некоторые методы анализа символьных последовательностей, которые использовались в настоящей работе.

Таблица 1
Символическое кодирование соседних mm -интервалов по соотношению числа сокращений сердца в них

b_i	b_{i+1}				
	1	2	3	4	>4
1	A	O	I	U	E
2	Y	F	H	C	J
3	L	M	K	N	B
4	Q	R	S	P	T
> 4	V	X	G	Z	D

1.3. Подматрицы весовой матрицы. Описанные выше особенности символической динамики позволяют ввести для ее описания матрицу переходов, которая часто используется в теории графов. В такой матрице строкам и столбцам соответствуют символы (узлы графа), а каждый элемент матрицы определяется формулой

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если переход от } i\text{-го символа к } j\text{-му разрешен,} \\ 0, & \text{если переход от } i\text{-го символа к } j\text{-му запрещен.} \end{cases}$$

Помимо матрицы переходов, в теории графов используются также *весовые матрицы*, в которых вместо единицы, разрешающей переход от одного символа к другому, ставится вероятность такого перехода. Заметим, что, если упорядочить символы, отвечающие строкам такой матрицы по первому элементу b -пары в порядке возрастания, а символы столбцов – по второму элементу b -пары, то весовая матрица приобретает блочно-диагональный вид. Использование блочно-диагонального представления весовой матрицы позволяет от одной большой матрицы 25×25 символов перейти к рассмотрению ее пяти подматриц размером 5×5 , что оказывается особенно удобным при изучении динамики двухсимвольных слов. На рис. 4 приведен пример пяти подматриц весовой матрицы для здорового и больного человека. Вследствие такой упорядоченности строк и столбцов в каждой подматрице оказываются переходы, соответствующие вполне определенному диапазону длительностей mt -интервалов. Например, в первых подматрицах на рис. 4, как легко заметить, значение количества сокращений сердца на два символа лежит в интервале $[4, 2 + 2 \cdot \beta]$, в то время как для второй подматрицы этот интервал составляет $[8, 4 + 2 \cdot \beta]$, здесь β означает число больше четырех. Другими словами, в первой подматрице оказываются самые «короткие» символические переходы, а в последней, пятой – самые «длинные».

1.4. Условная энтропия. Количество символов, использованное при кодировании, приводит к большому разнообразию слов, которые могут встретиться в символьной строке. Это обстоятельство делает целесообразным при анализе слов определенной длины использование *условной энтропии* (например [13]). Она опре-

Name: nsr008.txt Age: 64 Sex: F Type: nsr008.txt Length: 107739 beats

-	A	O	I	U	E	-	Y	F	H	C	J	-	L	M	K	N	B	-	Q	R	S	P	T	-	V	X	G	Z	D
A	14,95	4,54	3,08	1,20	0,74	O	5,90	3,84	1,82	0,89	0,41	I	2,80	1,93	0,89	0,34	0,24	U	1,06	0,72	0,32	0,13	0,12	E	0,39	0,27	0,21	0,12	0,13
Y	4,55	3,54	1,79	0,63	0,36	F	3,93	2,86	1,37	0,46	0,29	H	1,87	1,37	0,56	0,23	0,16	C	0,65	0,48	0,22	0,10	0,08	J	0,39	0,33	0,16	0,04	0,03
L	3,08	1,57	0,81	0,31	0,20	M	1,84	1,44	0,67	0,21	0,13	X	0,84	0,58	0,24	0,12	0,10	N	0,33	0,22	0,12	0,05	0,06	B	0,22	0,14	0,08	0,06	0,03
Q	1,11	0,65	0,31	0,16	0,07	R	0,72	0,50	0,23	0,09	0,04	S	0,32	0,27	0,09	0,03	0,03	P	0,15	0,12	0,05	0,02	0,02	T	0,10	0,09	0,05	0,02	0,03
V	0,81	0,34	0,16	0,07	0,05	X	0,44	0,26	0,10	0,06	0,04	G	0,26	0,14	0,10	0,04	0,03	Z	0,12	0,09	0,05	0,03	0,02	D	0,12	0,07	0,06	0,03	0,03

Name: chf13.txt Age: 63 Sex: M Type: chf13.txt NYHA CLASS: III Length: 115649 beats

-	A	O	I	U	E	-	Y	F	H	C	J	-	L	M	K	N	B	-	Q	R	S	P	T	-	V	X	G	Z	D
A	22,30	8,66	2,65	0,46	0,13	O	9,95	5,76	1,44	0,21	0,09	I	3,59	1,52	0,29	0,06	0,03	U	0,61	0,19	0,03	0,01	0,00	E	0,17	0,07	0,01	0,00	
Y	8,64	4,65	2,65	0,28	0,09	F	5,38	4,78	0,90	0,13	0,05	H	1,77	0,60	0,12	0,02	0,01	C	0,26	0,09	0,02	0,01	0,00	J	0,10	0,05	0,01	0,00	
L	2,56	2,31	0,69	0,09	0,03	M	1,33	0,77	0,13	0,02	0,01	K	0,28	0,13	0,03	0,01	N	0,06	0,02	0,01	0,00	B	0,02	0,01	0,00	0,00			
Q	0,32	0,30	0,11	0,01	0,00	R	0,17	0,11	0,02	0,01	0,00	S	0,03	0,02	0,01	P	0,01	0,01	T	0,01									
V	0,12	0,13	0,04	0,00	0,00	X	0,08	0,03	0,01	0,00	0,00	G	0,02	0,01	Z	0,01	0,00	D											

Рис. 4. Подматрицы весовой матрицы графа для здорового (верхняя строка) и больного (нижняя строка) человека. Белым цветом окрашены ячейки с весом перехода более 1%, светло-серым – с весом больше нуля, но меньше 1% и черным цветом обозначены запрещенные переходы

деляет количество остающейся неопределенности появления символа в слове при условии, что остальные символы в нем и их распределения известны. Условная энтропия определяет информационную «ценность» слова в символьной строке. Расчет условной энтропии производился по формуле

$$H_l = - \sum_{i_1=A}^D p_{i_1} \sum_{i_2=A}^D p_{i_1, i_2} \cdots \sum_{i_{n-1}=A}^D p_{i_1, i_2, \dots, i_{n-1}} \sum_{i_n=A}^D (p_{i_1, i_2, \dots, i_l} \cdot \log p_{i_1, i_2, \dots, i_l});$$

здесь суммирование ведется по всем 25 символам (от A до D), l – длина слова, а p_{i_1, \dots, i_l} – вероятность появления последнего (i_l -го) символа в слове при условии, что предыдущие символы встречались с вероятностями $p_{i_1}, p_{i_1, i_2}, \dots, p_{i_1, i_2, \dots, i_{l-1}}$.

1.5. Диаграмма рангов. В работе [3] был предложен эффективный метод сравнения двух различных записей RR -интервалов, основанный на ранговой статистике символьных сочетаний. Этот метод заключается в том, что для исследуемой записи составляется словарь из слов определенной длины, причем слова упорядочиваются по частоте их появления в символьной строке. Порядковый номер слова в таком словаре называется его *рангом*. Возьмем два словаря, отвечающие разным символическим строкам, и построим диаграмму, на которой каждому слову, присутствующему в обоих словарях, отвечает точка с координатами (p_1, p_2) , где p_1 и p_2 – ранг этого слова в первом и втором словаре соответственно. Совершенно очевидно, что, если ранг слова в двух словарях сохраняется, то точка, отвечающая этому слову, будет располагаться на диагонали диаграммы, а чем сильнее ранги одного и того же слова различаются, то тем дальше будет находиться точка от диагонали. В работе [3] подобные диаграммы рангов были построены для случаев словарей разных участков одной и той же последовательности символов и словарей символьных строк людей с разными функциональными состояниями организма. Было показано, что для случая двух участков одной символической записи на диаграмме рангов точки располагаются значительно ближе к диагонали, чем в случае двух символьных строк субъектов с одинаковым функциональным состоянием. Это обстоятельство позволило определить степень близости точек к диагонали как оценку подобия двух рассматриваемых символических записей.

Использование вышеописанного метода в рамках 25-символьной динамики приводит к более сложно устроенной диаграмме рангов. На рис. 5 приведены три таких диаграммы рангов для сравнения различных символьных строк. В частности, на рис. 5, *а* показана диаграмма для строк, принадлежащих одному и тому же субъекту из группы NSRY, а на рис. 5, *б* строки отвечают двум разным записям из группы NSRY. На этих двух рисунках видно присутствие линий, вдоль которых преимущественно выстраиваются ранги сравниваемых слов. В то же время, сравнение строк больного и здорового человека на рис. 5, *в* приводит к смещению графика относительно его диагонали и исчезновению линий на нем.

Отличительной особенностью рассматриваемой символической динамики является то, что большое разнообразие возможных слов приводит к тому, что в словарях присутствуют редко встречающиеся слова с одинаковыми частотами. Это обстоятельство требует введения дополнительного правила для упорядочивания таких слов в ранговых словарях. Так, например, на рис. 5 слова с одинаковыми частотами расположены в алфавитном порядке. Можно ввести такое правило сортировки

слов с одинаковыми частотами, которое будет иметь некоторый физиологический смысл. В качестве такого правила, например, может выступать упорядочивание слов по количеству ударов сердца, приходящееся на них. Применение этого правила к случаям, приведенным на рис. 5, позволяет получить диаграммы, изображенные на рис. 6. Видно, что структура диаграмм изменилась – точки на графиках преимущественно выстроены в линии, что говорит о том, что ранговый словарь стал менее «зашумленным». Кроме того, для случая на рис. 6, в стало заметным присутствие линий.

Для численной оценки подобия двух символьных строк с использованием диаграммы рангов предлагается использовать следующий показатель. Пусть имеются два ранговых словаря разных символических строк, а w_1, w_2 – два одинаковых слова в этих словарях с рангами (p_1, p_2) и (p'_1, p'_2) , соответственно. Рассчитаем количество пар слов N_r такое, что

$$\frac{|R(p_1, p'_1) - R(p_2, p'_2)|}{R(p_1, p'_1) + R(p_2, p'_2)} \leq r, \quad \forall w_1, w_2, r \geq 0,$$

где $R(a, b) = |a - b|$. Величина N_r характеризует количество пар слов, ранговые расстояния между которыми при переходе от одного словаря к другому изменяются не

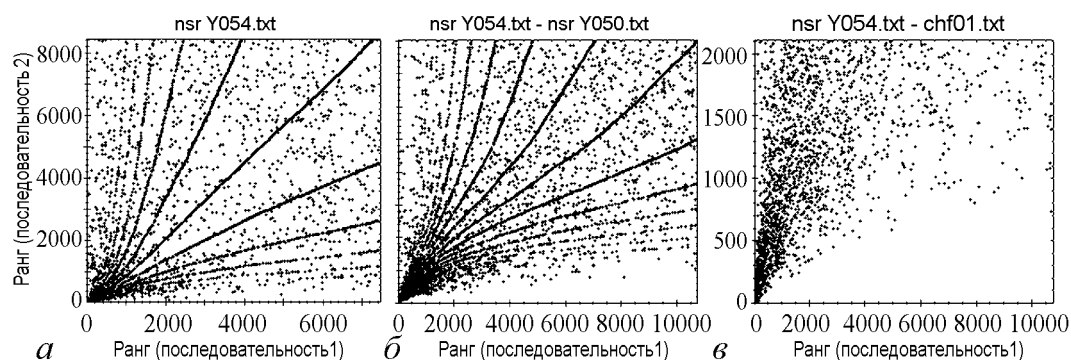


Рис. 5. Диаграммы рангов пятисимвольных слов. Слова, имеющие одинаковую частоту, упорядочены по латинскому алфавитному порядку: *a* – сравнение двух разных участков одной и той же последовательности символов для субъекта из группы NSRY; *b* – сравнение двух символьных строк из группы NSRY; *в* – сравнение символьных строк из групп NSRY и CHF

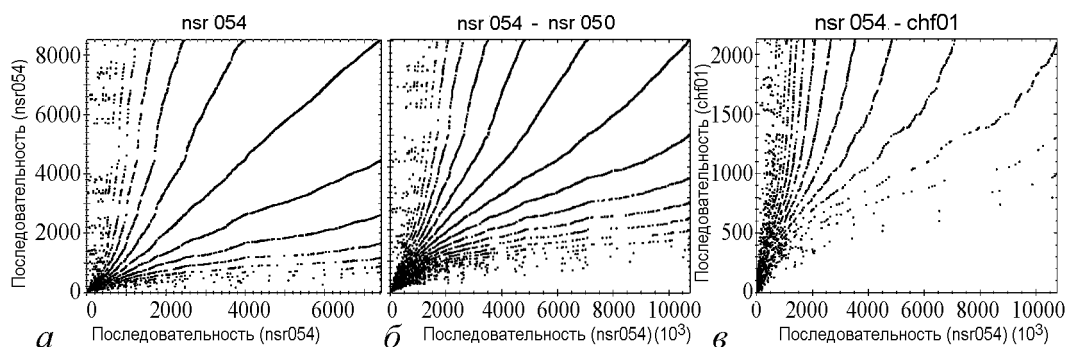


Рис. 6. Диаграммы рангов пятисимвольных слов, построенные с помощью упорядочивающего правила: *a* – сравнение двух разных участков одной и той же последовательности символов для субъекта из группы NSRY; *b* – сравнение двух символьных строк из группы NSRY; *в* – сравнение символьных строк из групп NSRY и CHF

более чем в r раз. Так, например, при $r = 0$ значение N_r будет соответствовать числу пар слов, расстояние между которыми в ранговых словарях остается неизменным. Целесообразно ввести величину

$$K_l(s_1, s_2) = -\log \frac{N_{r_1}}{N_{r_2}}, \quad (4)$$

которая позволяет оценить сложность в распределении рангов слов двух строк s_1 и s_2 . Значения параметров r_1 и r_2 далее в этой работе выбраны следующими: $r_1 = 10^{-2}$, $r_2 = 5 \cdot 10^{-2}$.

2. Результаты и обсуждения

В табл. 2 приведены полученные значения показателей для групп здоровых молодых и пожилых людей в виде среднего значения \pm стандартное отклонение. Уровень значимости α представленных данных по t -тесту Стьюдента: $\alpha \leq 10^{-4}$. В первой строке указано среднее число сокращений сердца на один mm -интервал (\bar{b}_i), а во второй – доля mm -интервалов (γ), состоящих из более чем одного сокращения сердца, определяемая по формуле

$$\gamma = \frac{N - \eta(1)}{N}.$$

Здесь N – общее число mm -интервалов, а $\eta(k)$ – количество mm -интервалов, для которых количество сокращений сердца равно k . Эти две величины \bar{b}_i и γ позволяют сделать вывод, что с возрастом в ритме сердца преобладают более короткие mm -интервалы, что соответствует росту в символьной строке доли символов, отвечающих таким mm -интервалам.

Поведение условной энтропии для двухсимвольных (H_2) и для восьмисимвольных (H_8) слов, указанных в табл. 2, говорит о том, что для молодых людей наибольшую информационную ценность несут более короткие слова, то есть динамика ритма сердца определяется преимущественно короткими последовательностями символов. В последней строке табл. 2 приведен показатель K_3^{self} . Этот показатель был рассчитан следующим образом: каждая символьная строка в группе разбивалась на две равные части, затем для двух полученных участков одной и той же строки

производилось вычисление показателя $K_3(s_1, s_2)$ для трехсимвольных слов. Среднее значение всех $K_3(s_1, s_2)$ в группе составило значение K_3^{self} , где индекс self обозначает тот факт, что сравнивались участки последовательности символов одного и того же субъекта. Такое сравнение характеризует различие динамики ритма сердца в разное время суток. То обстоятельство, что для молодых людей K_3^{self} оказывается почти в два раза выше, чем для пожилых, говорит о том, что с возрастом динамика

Таблица 2

Результаты сравнения динамики ритма сердца для групп NSRY и NSRE

	NSRY	NSRE
\bar{b}_i	2.153 ± 0.116	1.801 ± 0.160
γ	0.604 ± 0.043	0.497 ± 0.062
H_2	1.361 ± 0.051	1.165 ± 0.102
H_7	0.279 ± 0.08	0.519 ± 0.117
K_3^{self}	0.402 ± 0.021	0.218 ± 0.107

сокращений сердца менее подвержена влиянию суточного ритма, что является подтверждением хорошо известного факта [14]. Следовательно, две разные части одной и той же последовательности символов для пожилых людей будут слабее отличаться друг от друга.

В табл. 3 представлены показатели динамики ритма сердца, вычисленные для субъектов пяти групп: NSRE, NSRY, CHF, LAF и SD также в виде среднего значения \pm стандартное отклонение. Жирным шрифтом выделены значения, уровень значимости α между которыми по t -тесту Стьюдента: $\alpha \leq 3 \cdot 10^{-3}$. В первых четырех строках этой таблицы представлены средние объемы словарей $\bar{V}_2, \bar{V}_3, \bar{V}_9$ и \bar{V}_{11} . Видно, что эти объемы располагаются в следующем порядке убывания: NSRY, NSRE, CHF, LAF и SD. У молодых и здоровых людей динамика ритма сердца наиболее чувствительна к изменениям функционального состояния организма, что и проявляется в большем разнообразии слов по сравнению с больными или пожилыми людьми. Следует отметить, что для любой символьной строки для субъектов из рассматриваемых групп размер словаря одиннадцатисимвольных слов не превышает 2% от максимально разрешенного. Прирост количества слов в словаре с увеличением их длины уменьшается. Например, разность объемов словарей для любого субъекта любой из пяти групп $V_{12} - V_{11} \approx 4 \cdot 10^3$, а $V_{20} - V_{19} \approx 200$.

Максимальный объем словаря двухсимвольных слов, согласно (3), составляет 125 слов и, как видно из табл. 3, у всех здоровых молодых людей объем словаря V_2 достигает максимального значения, в то время как при старении или патологии наблюдается появление некоторого количества запрещенных двухсимвольных слов (эти запрещенные слова образованы символами, которые отвечают длинным mm -интервалам). В связи с обсуждением динамики двухсимвольных слов следует отметить, что при рассмотрении распределения этих слов удобно использовать подматрицы весовой матрицы (рис. 4), в которых запрещенным переходам соответствуют нулевые значения элементов (на рисунке эти элементы закрашены черным цветом). Для здоровых пожилых людей нулевые элементы расположены преимущественно в

Таблица 3

Показатели динамики ритма сердца
для групп NSRY, NSRE, CHF, LAF и SD

	NSRY	NSRE	CHF	LAF	SD
\bar{V}_2	125 \pm 0	123 \pm 2	116 \pm 9	114 \pm 9	108 \pm 12
\bar{V}_3	624 \pm 1	558 \pm 55	462 \pm 85	440 \pm 89	397 \pm 98
\bar{V}_9	44442 \pm 3429	35479 \pm 6405	31130 \pm 8689	25758 \pm 8069	19482 \pm 10305
\bar{V}_{11}	50413 \pm 4775	48027 \pm 5558	46983 \pm 10002	40206 \pm 9652	29206 \pm 15056
H_2	1.361 \pm 0.051	1.165 \pm 0.102	1.062 \pm 0.119	1.019 \pm 0.123	0.967 \pm 0.212
H_6	1.034 \pm 0.02	1.000 \pm 0.041	0.962 \pm 0.084	0.921 \pm 0.069	0.824 \pm 0.185
L	8.5 \pm 0.5	9.783 \pm 0.778	10.409 \pm 0.834	10.711 \pm 0.976	9.368 \pm 2.299
\bar{l}	5.55 \pm 1.37	7.53 \pm 1.32	8.83 \pm 1.19	9.02 \pm 1.07	9.15 \pm 1.29
K_3^{self}	0.402 \pm 0.021	0.218 \pm 0.107	0.113 \pm 0.108	0.089 \pm 0.109	0.058 \pm 0.083
K_3^{group}	0.419 \pm 0.032	0.286 \pm 0.081	0.156 \pm 0.1	0.11 \pm 0.086	0.097 \pm 0.078

четвертой и пятой подматрице (только у четырех субъектов в возрасте старше 70 лет есть запрещенные переходы в третьей подматрице). С другой стороны, для символьных строк субъектов из групп с патологиями характерно появление запрещенных переходов и в первых двух подматрицах, причем количество запрещенных переходов возрастает.

Из сравнения значений условной энтропии H_2 и H_6 в табл. 3 видно, что для двухсимвольных слов групп NSRY и NSRE она принимает наибольшее значение, но с ростом длины слов у этих групп энтропия убывает быстрее. Указанная в седьмой строке табл. 3 величина L характеризует минимальную длину слов в словаре, при которой условная энтропия становится меньше 0.1. Таким образом, слова длиннее L обладают незначительной информационной ценностью в символьной строке. Быстрее всего с ростом длины слова уменьшается условная энтропия для субъектов групп NSRY, SD и NSRE. Для NSRY и NSRE это объясняется тем, что при функционировании здорового организма регуляция происходит за счет коротких переходных процессов, что проявляется в большем значении условной энтропии для коротких слов. Чтобы проиллюстрировать вышесказанное, был проведен следующий эксперимент: для каждой группы составлялись словари из слов длиной от двух до десяти символов, которые присутствовали в каждой символьной строке данной группы, но при этом отсутствовали в последовательностях символов других групп. Как видно из табл. 3, средняя длина слова \bar{l} в таком словаре принимает наименьшее значение для группы NSRY. Для синдрома внезапной сердечной смерти (группа SD) характерно присутствие в строке очень длинных слов, состоящих из 500–1000 повторений одного символа A или 40–60 повторений двухсимвольного слова OY . Это обстоятельство объясняет сравнительно малые значения H и L для группы SD.

Показатель K_3^{self} в табл. 3 позволяет оценить подобие двух участков одной и той же записи, а K_3^{group} служит для оценки подобия двух записей, принадлежащих одной группе. Как видно из анализа значений этих показателей, степень подобия двух участков одной записи выше, чем сходство записей в одной и той же группе. С другой стороны, для групп NSRY и NSRE значения K_3^{self} и K_3^{group} выше, чем для CHF, LAF и SD, что говорит о большем разнообразии слов в регуляции сердечного ритма у здоровых людей.

Подводя итог всему вышесказанному, подчеркнем, что для символьных строк из группы молодых и здоровых людей (NSRY) характерно большее разнообразие слов по сравнению с остальными группами, причем основную роль в формировании динамики ритма сердца людей из этой группы играют более короткие слова. При старении у здоровых людей (NSRE) разнообразие слов в последовательностях символов снижается, хотя по-прежнему остается выше, чем в группах с патологическими состояниями. Для субъектов с застойной сердечной недостаточностью (CHF) объемы словарей, как правило, больше, чем в остальных группах больных людей, но при этом наблюдается заметное отличие от групп здоровых людей. Группы людей с пароксизмальной фибрилляцией предсердий (LAF) и синдромом внезапной сердечной смерти (SD) довольно сильно похожи друг на друга по ряду показателей, но при этом можно однозначно определить, к какой группе относится субъект по объему словаря и по наличию аномально длинных периодических слов из одного или двух символов.

Заключение

Представленный в данной статье материал демонстрирует диагностические возможности символической динамики, введенной посредством кодирования временных интервалов превалирующего действия парасимпатического или симпатического тонусов нервной системы. С помощью ряда показателей (объемы словарей, условная энтропия и коэффициенты подобия K_3^{self} и K_3^{group}) были выявлены характерные особенности различных состояний организма, таких как старение или патологии. Основное преимущество использования двадцатипятисимвольной динамики состоит в том, что с ее помощью можно провести более детальное разбиение пациентов по характерным наборам физиологических признаков, что позволяет осуществить более четкую медицинскую диагностику. Например, с помощью методов двухсимвольной динамики из статьи [3] нам не удалось различить больных с мерцательной аритмией и с синдромом внезапной сердечной смерти. Выявление такого различия достаточно надежно осуществляется при использовании двадцатипятисимвольной динамики. Достоинством предлагаемого в настоящей работе подхода является также его самодостаточность, позволяющая с помощью предлагаемых в статье показателей символической динамики получить объективные данные о состоянии организма без привлечения какой-либо дополнительной информации. Следует отметить, что эффективность применения символической динамики, описанной в работах [1, 2, 4], обеспечивалась лишь при одновременном использовании ряда классических методов анализа ритма сердца.

Автор выражает благодарность заведующему лабораторией хронобиологии НИИ физики Южного федерального университета, доктору биологических наук С.Л. Загускину и доценту кафедры теоретической и вычислительной физики Южного федерального университета Г.М. Чечину за консультации в ходе подготовки статьи к изданию.

Библиографический список

1. Kurths J., Voss A., Witt A., Saparin P., Kleiner H. J., Wessel N. Quantitative analysis of heart rate variability // *Chaos*. 1995. Mar 5(1). P. 88.
2. Voss A., Wessel N., Baier V., Osterziel K.J., Kurths J., Dietz R., Schirdewan A. Symbolic dynamics – a powerful tool in non-invasive biomedical signal processing // Report – Online symposium for electronics engineers. 2000.
3. Yang A.C.-C., Hseu Shu-Shya, Yien Huey-Wen, Goldberger A.L., Peng C.-K. Linguistic analysis of the human heartbeat using frequency and rank order statistics // *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. 90, № 10. 108103. P. 1.
4. Guzzetti S., Borroni E., Garbelli P.E., Ceriani E., Della Bella P., Montano N., Cogliati C., Somers V.K., Malliani A., Porta A. Symbolic dynamics of heart rate variability: a probe to investigate cardiac autonomic modulation // *Circulation*. 2005. Vol. 112, № 4. P. 465.
5. Maestri R., La Rovere M.T., Porta A., Pinna G.D. Sympathetic neurohormonal correlates of linear and symbolic dynamics heart rate variability indexes in chronic heart failure // *Computers in Cardiology*. 2008. Bologna, Italy. P. 49.
6. Cysarz D., Lange S., Matthiessen P. F., Van Leeuwen P. Regular heartbeat dynamics are associated with cardiac health // *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2006. 292. P. 368.

7. *Voss A., Schulz S., Schroeder R., Baumert M., Caminal P.* Methods derived from nonlinear dynamics for analysing heart rate variability // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2009. 28(367). P. 277.
8. Базы доступны по адресу <http://physionet.org/>
9. *Дабровски А. Дабровски Б. Пиотрович Р.* Суточное мониторирование ЭКГ. М.: Медпрактика. 1998. 208 с.
10. *Березный Е.А.* Корреляционная ритмография при исследовании и лечении больных с мерцательной аритмией // *Кардиология.* 1981. 5. С. 94.
11. *Kamen P.W., Krum H., Tonkin A.M.* Poincaré plot of heart rate variability allows quantitative display of parasympathetic nervous activity in humans // *Clin. Sci. (Lond).* 1996. 91(2). P. 201.
12. *Huikuri H.V., Makikallio T.H., Peng C.-K., Goldberger A.L., Hintze U., Muller M.* Fractal correlation properties of R-R interval dynamics and mortality in patients with depressed left ventricular function after an acute myocardial infarction // *Circulation.* 2000. Vol. 101. P. 47.
13. *Стратонович Р.Л.* Теория информации. М.: Советское радио, 1975.
14. *Губин Г.Д.* Циркадианная организация биологических процессов в филогенезе позвоночных // *Хронобиология и хрономедицина.* М.: Медицина, 1989. С. 70.

*Южный федеральный университет,
НИИ физики, Ростов-на-Дону*

*Поступила в редакцию 19.04.2010
После доработки 16.06.2010*

SYMBOLIC DYNAMICS IN APPLICATION TO CARDIAC RATE STUDY

Yu. V. Gurov

The analysis of heart rhythms using symbolic dynamics is performed. Time intervals corresponding to the predominance of sympathetic or parasympathetic tone of the nervous regulation are encoded. During encoding 25 symbols are used, what leads to a wide variety of words in the symbolic strings. The analysis of heart rhythms for patients of all ages, including healthy ones and patients with cardiovascular diseases are produced. These results give characteristic of age-related changes and different pathologies in cardiac rhythms.



Гуров Юрий Владимирович – родился в 1985 году. Окончил физический факультет Южного федерального университета (бывший Ростовский государственный университет) в 2007 году. В настоящее время является аспирантом НИИ физики Южного федерального университета. Область научных интересов – нелинейная динамика, хаос и хронобиология.

344090 Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194
Южный федеральный университет, НИИ физики
E-mail: noisegen@mail.ru