

**Черкай А.Д., Власов Ю.А. Лингвистический анализ ритма сердца –  
Проблемы временной организации живых систем. Отделение  
физиологии Академии наук СССР. М., Наука, 1979, с. 62 - 70.**

Ритм сердечных сокращений является сигналом одного из естественных выходов биологической системы. Наблюдения за ним могут способствовать пониманию общих закономерностей временной организации биологических сигналов. Реальные биологические сигналы содержат элементы детерминированности и элементы случайности. Одна из задач их обработки – выявление и анализ детерминированных элементов таких сигналов. При этом используются различные методы обработки данных. Лингвистический метод – один из них. В последние годы активно развиваются прикладные вопросы его использования в задачах анализа и воспроизведения кривых временных сигналов и пространственных кривых временных сигналов и пространственных изображений [Th. Pavlidis, 1971; И.Б. Мучник, Р.Б. Мучник, 1973; и др.]. Лингвистические методы могут применяться и при анализе ритма сердца.

Суть лингвистического анализа последовательно измеренных интервалов RR ЭКГ состоит в том, что из их реализаций выделяются повторяемые с некоторой точностью куски – «слова» («шаблоны», «матрицы»), из которых составляется словарь. Формирование из «слов» конкретных реализаций – «языка» определяется правилами образования этого «языка» - «грамматикой». Устойчивость последовательных пар, триад и других групп интервалов RR ЭКГ [Е.Н. Мешалкин, Ю.А. Власов, А.Д. Черкай и др., 1973] обеспечила успешное применение [А.Д. Черкай, Ю.А. Власов, 1977] лингвистического подхода при анализе ритма сердца.

Нами описывается одна из использованных процедур лингвистического анализа интервалов RR ЭКГ. Она базируется на выделении повторяемых последовательностей RR интервалов, принадлежащих  $\varepsilon$ -трубке, с заданным  $\varepsilon$ . Рассматриваются вопросы формирования матричных последовательностей и их корней. Приводятся конкретные примеры анализа интервалов RR ЭКГ. Даются оценки статистической значимости сгущения повторяемых последовательностей. Рассматриваются вопросы моделирования ритма сердечных сокращений.

Приведем одну из использованных процедур лингвистического анализа интервалов RR ЭКГ.

Пусть  $X^{(1,N)} = \{X_1, \dots, X_N\}$  последовательность  $N$  измерений интервалов RR ЭКГ.

Обозначим  $X^{(i,m)} = \{X_i, X_{i+1}, \dots, X_{i+m-1}\}$  цепочку из  $m$  элементов анализируемой последовательности, расположенных в порядке их следования в  $X^{(1,N)}$ , начиная с  $i$ -ого элемента ( $1 \leq i \leq N - m + 1, 2 < m \leq N$ ). Различным цепочкам  $X^{(i_k, m_k)}$  номера  $k = 1, 2, \dots$  присвоим в порядке следования в  $X^{(1,N)}$  их первого элемента  $X_{i_k}$  и тем самым при всех  $k = 1, 2, \dots$  имеем  $i_k < i_{k+1}$ .

Подпоследовательности  $X^{(i_k, m_k)}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), для которых найдутся такие  $j_k$  ( $i_k \leq j_k \leq i_k + m_k - 1, k = 1, 2, \dots$ ), что при всех  $q = \overline{\underline{m}, \overline{m}}, \underline{m} = \min_k (i_k - j_k), \overline{m} = \max_k (m_k + i_k - j_k - 1)$  справедливо неравенство

$$\max_k (X_{j_k+q}) - \min_k (X_{j_k+q}) \leq \varepsilon, \quad (1)$$

будем называть цепочками, принадлежащими  $\varepsilon$ -трубке.

Для набора цепочек  $X^{(i_k, m_k)}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), принадлежащих  $\varepsilon$ -трубке с фиксированными  $j_k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), величины  $\max_k (X_{j_k+q})$  и  $\min_k (X_{j_k+q})$  назовем соответственно верхней и нижней границами  $q$ -ого сечения  $\varepsilon$ -трубки. Число различных сечений конкретной  $\varepsilon$ -трубки, в каждом из которых между верхней и нижней границами содержится не менее  $l$  ( $l \geq 2$ ) элементов из цепочек, образующих данную  $\varepsilon$ -трубку обозначим  $\Delta m_l$ .

Для получения отдельного шаблона в виде матричной цепочки, положив  $\varepsilon = K_\varepsilon \overline{X} \left( \overline{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, K_\varepsilon = 0,02 \div 0,05 \right)$ , из  $X^{(1,N)}$  выделяются триады  $X^{(j_k, 3)}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), принадлежащие одной  $\varepsilon$ - трубки, с элементами в каждой триаде, отличающимися друг от

друга более чем на  $\varepsilon_1 (\varepsilon_1 \geq \varepsilon)$ , т. е. выделяется набор имеющихся в  $X^{(1,N)}$  триад  $X^{(j_k,3)}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), удовлетворяющих неравенству (1) при всех  $q = \overline{0, 2}$  и одновременно следующему неравенству

$$|X_{j_k+q} - X_{j_k+\eta}| > \varepsilon_1, \text{ при всех } q, \eta = \overline{0, 2}, q \neq \eta, k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Пусть из  $X^{(1,N)}$  выделено  $n$  таких триад. Расширяя эти триады вправо и влево добавлением элементов из анализируемой последовательности в порядке их следования  $X^{(1,N)}$ , формируется принадлежащее  $\varepsilon$ -трубкам (удовлетворяющее неравенству (1)) цепочки  $X^{(i_k, m_k)} \supseteq X^{(j_k, 3)}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), в которых каждый отдельный элемент из  $X^{(1,N)}$  с фиксированным его номером, в  $X^{(1,N)}$  может встретиться не более, чем один раз, т. е. цепочки с  $i_k + m_k < i_{k+1}$  ( $k = \overline{1, n-1}$ ).

Из наборов этих, принадлежащих отдельным  $\varepsilon$ -трубкам, цепочек выбираются такие, у которых максимальная величина  $\Delta m_n$ ; далее из полученных наборов цепочек с  $\Delta m_n = \max$  выбираются такие, у которых максимальная величина  $\Delta m_{n-1}$  и т.д. до наборов с  $\Delta m_2 = \max$ .

Полученные таким образом наборы цепочек, принадлежащих трубкам, будем называть наборами  $\varepsilon$ -цепочек, наибольшей длины с максимальной концентрацией их элементов.

К выделенным наборам  $\varepsilon$ -цепочек наибольшей длины с максимальной концентрацией их элементов подключаются все дополнительные с тремя и более элементами цепочки, которые могут войти в формируемые  $\varepsilon$ -трубки. Увеличенные наборы цепочек расширяются вправо и влево, как триады, при этом формируются расширенные наборы цепочек наибольшей длины с максимальной концентрацией их элементов, а из этих наборов из  $n'$  цепочек  $X^{(i'_k, m'_k)}$  ( $k = \overline{1, n'}$ ) при  $n' > n$  выбираются такие, которые содержат максимальное число неповторяющихся элементов из  $X^{(1,N)}$ . Перенумеровав цепочки  $X^{(i'_k, m'_k)}$  в порядке их появления в  $X^{(1,N)}$ , имеем наборы цепочек с  $i'_k + m'_k < i'_{k+1}$  ( $k = \overline{1, n-1}$ ) и  $\sum_{k=1}^{n'} m'_k = \max$ .

Далее к этим новым наборам сформированных  $\varepsilon$ -цепочек подключаются новые дополнительные цепочки из  $X^{(1,N)}$ , входящие в  $\varepsilon$ -трубки с уже выделенными на участках в три и более элемента, и все используемые при этом цепочки снова расширяются вправо и влево и т.д. до тех пор, пока среди триад из  $X^{(1,N)}$ , еще не использованных в построении шаблона, не отыскивается ни одной триады, входящей в трубку какого-либо уже выделенного набора цепочек.

Для отдельных наборов таких цепочек для каждого  $q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots (\underline{m} \leq q \leq \overline{m})$  пересчитывается число элементов  $X_{j_k+q}$  в них с различными  $k(n_q)$  и вычисляются оценки средних  $\overline{X}_q$ .

Отдельная получаемая описанным выше образом цепочка оценок средних  $\overline{X}_m, \overline{X}_{m+1}, \dots, \overline{X}_m$  нами и используется в качестве «слова» («шаблона, матрицы»).

В общем случае другие наборы шаблонов могут выделяться аналогично как в порядке частоты встречаемости  $X^{(1,N)}$  триад, на базе которых они строятся, с исключением из дальнейшего анализа элементов из  $X^{(1,N)}$  уже использованных для построения шаблонов, так и в порядке частоты встречаемости в  $X^{(1,N)}$  более длинных, чем эти триады цепочек, принадлежащих  $\varepsilon$ -трубкам и содержащих триады, удовлетворяющие условию (2), причем как с подключением, так и без подключения дополнительных цепочек для расширения их набора.

Из отдельного шаблона нами выделялась  $l$  ( $l \leq m \leq \overline{m} - \underline{m}$ ) последовательных элементов с  $q$ -ого ( $q = 0, \pm 1, \dots$ ) места -  $\overline{X}^{(q,l)}$  нами строились две трубки с радиусами, равными  $\varepsilon/2$  и  $3\varepsilon/2$ . Затем подсчитывалось число ( $n$ ) подпоследовательностей из  $X^{(1,N)}$  длины  $l$ , вошедших в меньшую трубку  $n = n_1$  и большую  $n = n_2$ .

Оценка значимости сгущения (концентрации) около  $\overline{X^{(q,l)}}$  сводится к использованию биномиального распределения. Вероятность случайного попадания в меньшую трубку не менее  $n_1$  подпоследовательностей при числе подпоследовательностей, попавших в большую трубку, равном  $n_2$ , определяется соотношением  $P_i = \sum_{i=n_1}^{n_2} C_{n_2}^i P^i (1-P)^{n_2-i}$  с  $P = (1/3)^l$ .

Для  $P_i$  имеются статистические таблицы. Нами выделялись неслучайные (с  $P_i < 0.05$ ) участки шаблонов. Те части из них, которые с  $\varepsilon$ -точностью повторяются в других шаблонах, можно назвать корнями. Корни появляются при выделении наиболее часто встречаемых  $\varepsilon$ -цепочек длиной более трех элементов. При этом несколько  $\varepsilon$ -трубок могут иметь общие участки длиной в три и более последовательных элемента.

Описанная выше процедура была применена для выделения шаблонов (матричных последовательностей) из последовательностей интервалов RR Общим объемом 6070 элементов, принадлежащих семи различным обследуемым.

Таблица №1 Участки интервалов RR обследуемой А., соответствующие отдельной матричной последовательности

Номера элементов повторяемых последовательностей	Повторяемые последовательности элементов RR					
	1	2	3	4	5	6
89-93	0,67	0,70	0,98	0,89	0,70	–
221-225	0,67	0,70	0,97	0,88	–	–
250-254	0,68	0,69	0,98	0,88	0,71	0,71
284-289	0,70	0,70	0,98	0,89	0,70	0,72
336-369	-	0,70	0,99	0,89	0,68	–
Матричная последовательность	<b>0,68</b>	<b>0,70</b>	<b>0,98</b>	<b>0,89</b>	<b>0,70</b>	0,71

Таблица №2 Набор матричных последовательностей обследуемой А.

Число выделенных повторяемых последовательностей	Матричные и корневые последовательности интервалов RR									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,68	<b>0,71</b>	<b>0,99</b>	<b>0,89</b>	<b>0,71</b>	0,78	0,93	0,92		
5	0,71	0,78	0,96	0,85	0,70	0,80	0,91	0,75	0,76	
7	0,90	0,77	0,95	0,90	0,71	0,79	1,01	0,96	0,85	
7	0,94	0,86	<b>0,69</b>	<b>0,73</b>	<b>0,98</b>	<b>0,90</b>	<b>0,71</b>	0,75	0,99	
5	<b>0,68</b>	<b>0,70</b>	<b>0,98</b>	<b>0,89</b>	<b>0,70</b>	0,71				
5	0,68	0,64	<b>0,68</b>	<b>1,02</b>	<b>0,92</b>	<b>0,71</b>	0,74			
10	0,93	0,87	0,68	<b>0,72</b>	<b>1,02</b>	<b>0,98</b>	<b>0,71</b>	0,74	1,00	0,92

В таблице №1 приведен пример выделения из последовательности длиной в 750 интервалов RR ЭКГ обследуемой А. повторяемых участков и соответствующей им матричной последовательности. В таблице №2 дан набор матричных последовательностей этой обследуемой с указанием числа повторяемых в  $X^{(1,N)}$  участков использованных для их образования. При этом выделены наиболее часто неслучайно повторившиеся в  $X^{(1,N)}$  участки (корни) матричных последовательностей.

Из трех последовательностей интервалов RR ЭКГ обследуемого Б., задав  $\varepsilon = 0.05\overline{X}$ , удалось выделить 16 матричных последовательностей (шаблонов) длиной от 3 до 21 элемента с привлечением для их построения (смотрите таблицу №3) почти всех интервалов, содержащихся в исходных рядах длиной соответственно в 540, 514 и 514 интервалов RR.

Таблица №3 Характеристика повторяемых участков последовательностей RR интервалов ЭКГ обследуемого Б.

Номер исходной последовательности	Номер выделенного шаблона	Границы участка исходной последовательности	Число элементов, из которых осуществлялось выделение шаблонов, N	Число элементов, формирующих шаблоны, n	n/N·100%
I	(1)	1-521	521	90	17,3
	(2)	4-546	543	146	26,9
	(3)	31-543	513	96	18,7
	(4)	39-535	497	54	10,9
	(5)	99-383	65	35	53,8
	(6)	58-122	285	12	4,2
	(7)	134-541	408	81	19,9
	(8)	226-463	238	9	3,8
	(9)	340-499	160	17	10,6
Сумма				540	
II	(10)	1-496	496	49	9,9
	(11)	12-514	503	141	28
	(12)	20-510	491	265	53,9
	(13)	96-409	314	59	18,8
Сумма				514	
III	(14)	1-518	518	319	61,6
	(15)	8-507	500	139	27,8
	(16)	120-420	301	56	18,6
Сумма				514	
Среднее					24,68

Анализ полученных материалов показывает, что доля элементов  $X^{(1,N)}$ , использованных для формирования отдельного шаблона, составляет до 60% и в среднем более 23% от объема того участка исходной последовательности, из которого происходило выделение шаблона. Матричные последовательности остальных обследуемых также имеют высокую повторяемость элементов в их исходных последовательностях RR интервалов. Особую повторяемость имеют корни, они с  $\varepsilon$ -точностью повторяются в анализируемых выборках десятки раз. Это говорит о наличии существенного элемента детерминированности в последовательности интервалов RR ЭКГ. При этом небольшое (в пределах  $\varepsilon$ ) влияние «случайных» факторов может иметь место на каждом шагу; значительное же влияние этих факторов также возможно, но уже не обязательно при формировании каждого интервала RR ЭКГ. Тем самым ритм сердца как бы задан заранее, т. е. он как бы задан с некоторой точностью наперед на несколько последующих шагов. Это позволяет в простейшем случае представить последовательность интервалов RR ЭКГ, состоящей в виде повторяемых кусков последовательности с внешним влиянием (детерминированным или случайным), осуществляемым при переходе с одного куска в другой и определяющим последовательность смены этих повторяемых частей. Это – простейший вид иерархически организованных сигналов.

Представляет интерес получить подтверждение полученных результатов более простым способом. С этой целью были обработаны 342 последовательности по 2000 измерений интервалов RR ЭКГ, снятые в покое у 309 обследуемых в разное время суток и года. Для каждой такой последовательности  $X^{(1,N)}$  ( $N = 2000$ ) на плоскость с координатами (x,y) последовательно наносились точки  $(X_1, X_2), (X_2, X_3), \dots, (X_{N-1}, X_N)$ , и тем самым строились распределения смежных интервалов. На этих распределениях выделяются отдельные области, имеющие положения, конфигурации и плотности заполнения.

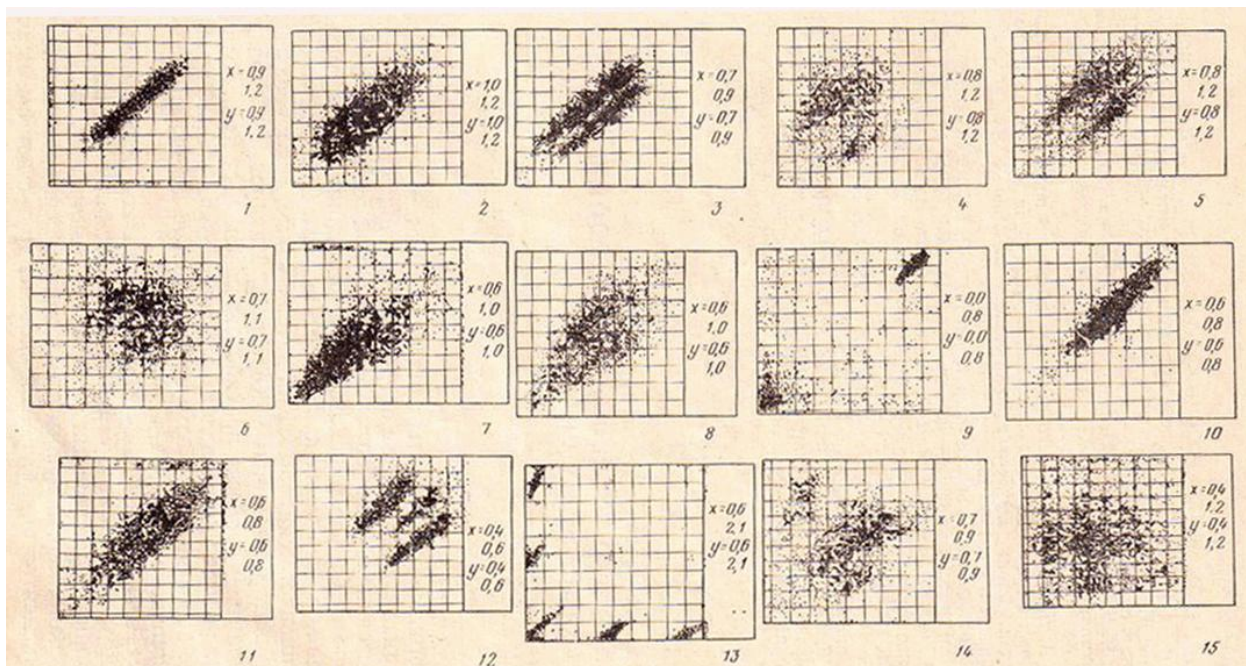
По числу, положению и виду областей полученные распределения были разделены на 15 типов, повторяемых у отдельного индивидуума и различных людей.

Тип распределения	Его повторяемость	Тип распределения	Его повторяемость	Тип распределения	Его повторяемость
1	24	6	4	11	12
2	19	7	43	12	36
3	15	8	13	13	29
4	8	9	41	14	19
5	13	10	23	15	43

Соединением последовательных точек на плоскости отрезками прямых были получены траектории движения по ней этих точек, причем было замечено, что отдельные участки траекторий совпадали или были близки, и этим определялся тип наблюдаемых картин.

Тем самым удалось подтвердить существование в  $X^{(1,N)}$  повторяемых и близких последовательностей (шаблонов или матриц), определяющих характер закономерности, свойственной тому или иному их типу последовательностей, встречающемуся у различных людей.

Так как рассматриваемые типы распределений смежных интервалов повторяются у различных лиц, можно ожидать, что они могут быть получены и другими экспериментаторами. И действительно, распределения, похожие на типы 1, 12, 15, были известны и ранее [P.A. Goldstein, G.O. Barnett, 1967; W.K. Haisty et al., 1972], а близкие к типам 12 и 13 встречались даже при анализе активности нейронов [M. Biederman-Thorson, 1966; E. David et al., 1968]. Последний факт говорит о возможной общности формирования различных импульсных сигналов в организме.



### Выделенные 15 типов совместных распределений интервалов RR ЭКГ

При их построении на горизонтальной оси откладывается  $i$ -й интервал RR, на вертикальной – следующий  $(i+1)$ -й интервал RR ( $i=1, 2, \dots, 1999$ )

## ЛИТЕРАТУРА

- Мешалкин Е.Н., Власов Ю.А., Черкай А.Д., Глушков Н.Н., Мельникова Н.Н.* Об одном подходе к выделению элементов случайного и закономерного в стратегии управления ритмом сердца. – Кровообращение, 1973, **6**, №5, с. 12-16.
- Мучник И.Б., Мучник Р.Б.* Алгоритмы формирования языка для описания кривых – Автоматика и Телемеханика № 5 1973г.
- Черкай А.Д., Власов Ю.А.* Лингвистический анализ последовательностей временных интервалов между ударами ритма сердца – В кн. Теория и практика автоматизации электрокардиологических и клинических исследований. Каунас, 1977, с. 128-131.
- Biederman-Thorson M.* Source mechanisms for unit activity in isolated crayfish central nervous system. – J. Gen. Physiol., 1966, **49**, N 4, p. 597-612.
- David E., Finkenzeller P., Kallet S., Keidel W.D.,* Die Bedeutung der temporalen Hemmung im Bereich der akustischen informationsverarbeitung. – Pflügers Arch., 1968, **298**, N 4, p. 322-335.
- Goldstein P.A., Barnett G.O.* A statistical study of atrial fibrillation. – Comput. and Biomed. Res., 1967, **5**, N 3, p. 247-255.
- Haisty W.K., Batchlot C., Cornfield J., Pipberger H.V.* Discriminant function analysis of RR interval: an algorithm for on-line arrhythmia diagnosis. – Comput. and Biomed. Res., 1972, **5**, N 3, p. 247-255.
- Pavlidis T.* Linguistic analysis of curves. – Software Eng., 1971, 2, N 4, p. 203-225.