Н.Т. Абдуллаев, О.А. Дышин, А.С. Аббаскулиев

ОЦЕНКА НЕСТАБИЛЬНОСТИ RR-ИНТЕРВАЛОГРАММ

Аннотация

Последовательность кардиоинтервалов рассматривается как сложный динамический процесс с детерминированной хаотической составляющей. Переход от регулярных состояний данного процесса к хаосу через перемежаемость характеризуется проявлением феномена самоорганизованной критичности (слабого хаоса), приводящего к нестабильности системы и фликкер-шуму. Степенной характер спектра мощности RR-интервалограммы является диагностическим признаком, позволяющим различать такие синдромы сердечно-сосудистой системы, как фибрилляция желудочков, желудочковая тахикардия, мерцательная аритмия.

Каждый процесс (депрессия, стрессовое состояние, возбуждение и т. п.) влияет на общее состояние организма человека и, в частности, на его сердечно-сосудистую систему (ССС). Недостаточные достоверность и надежность постановки правильного прогноза приводят к появлению ошибок в назначенном врачом курсе лечения больного. В ситуациях, в которых сильно проявляется действие обратных связей, бывает трудно объяснить, какие переменные являются причиной, а какие – следствием. Поэтому для динамических процессов методы статистики не всегда эффективны [1], [2]. Следовательно, необходимы поиск новых признаков, основанных на наблюдении, по которым можно оценить состояние организма, и поиск показателей, основанных на предположении, что сердечная деятельность – это «детерминированный хаос». Под «детерминированным хаосом» подразумевается [3] нерегулярное, или хаотическое, движение, порожденное нелинейными системами, для которых динамические законы однозначно определяют эволюцию во времени состояния системы при известной предыстории.

При исследовании работы сердца по совокупности реальных процессов с явно выраженной системной нелинейностью любые причинно-следственные отношения подлежат сомнению даже в качестве оценочных. Логические построения алгоритмов возможны лишь как однопараметрические для малых системных интервалов времени, поскольку для оперативной диагностики выбирается время регистрации 1 мин (минутный диагноз). Очевидную ущербность возможностей исследования можно восполнить, если исходный системный процесс структурирован во времени. В качестве физического параметра для этой цели выбирается интервал времени между соседними динамическими структурами со статусом их внутреннего времени, поскольку RR-интервалы меняются от кардиоцикла к кардиоциклу и каждый интервал характеризуется своей длительностью. Функции электрокардиограммы (ЭКГ) как временного ряда биопотенциалов трансформируются в RR-интервалограмму в виде апериодической последовательности кардиоциклов. Ритм сердца исследуется как системный процесс работы сердца. Можно предположить, что информация о структуре кардиоциклов и даже об амплитудных значениях биопотенциалов косвенно выражается величинами временных интервалов между соседними зубцами R [1]. Формируемый номерной ряд RR-интервалов представляет RR-интервалограмму, являющуюся по содержанию функцией времен сдвигов *i*-х RR-интервалов относительно наиболее вероятного значения RR-интервала. Подготовленная для анализа модифицированная форма RR-интервалограммы представляет собой номерной ряд абсолютных отклонений *i*-х значений RR-интервалов от величины моды.

Одним из известных сценариев перехода к хаосу является переход через перемежаемость. Под перемежаемостью понимается [3] такой вид сигнала, в котором случайным образом чередуются длинные регулярные (ламинарные) фазы (так называемые окна) и относительно короткие нерегулярные всплески. Замечено, что число хаотических всплесков нарастает при увеличении внешнего параметра, а это означает, что перемежаемость представляет собой непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому.

Явление перемежаемости (слабого хаоса) тесно связано с фликкер-шумом, спектр мощности которого S_f расходится на низких частотах по степенному закону $1 / f^{\delta}$ $(0{,}8 < \delta < 1{,}4)$ [3]. Для объяснения феномена $1/f$-шума в природе была предложена теория самоорганизованной критичности [4], [5]. С этой целью была создана лавинообразная модель, которая самопроизвольно, без тонкой подстройки параметров, способна к генерации $1/f$-шума [6]. При этом система находится в статистически стационарном состоянии, но запись энергии прошедших лавин или времен схождения лавин представляет собой $1/f$-шум.

Открытые системы, состоящие из большого числа простых компонент, способных к кооперативному взаимодействию, самопроизвольно развиваются таким образом, что приходят к состоянию самоорганизованной критичности и обладают сложной динамикой. Основные требования, предъявляемые к системе, для того чтобы она функционировала в режиме самоорганизованной критичности, состоят в следующем [7]:

1) система должна состоять из большого числа элементов, способных взаимодействовать со своими ближайшими соседями;
2) существенно важно запоминание каждым элементом его текущего состояния;
3) необходим постоянный приток энергии в систему, при этом все локальные взаимодействия происходят за много меньшее время, чем время между двумя возмущениями извне.

Фрактальные структуры эволюционируют на грани хаоса, а поведение соответствующих им структур является результатом самоорганизованной критичности и называется «слабым хаосом» [8]. Для гамильтоновских систем (т. е. таких систем, которые могут быть описаны уравнениями движения с помощью N обобщенных импульсов и тем же числом обобщенных координат) слабый хаос проявляется в виде стохастических слоев, являющихся зародышами хаоса и образующихся в окрестности разрушенных сепаратрис (траекторий, проходящих через особые точки типа седла в фазовом пространстве), а также в виде стохастической паутины – объединения всех стохастических слоев, образующих единую сеть в фазовом пространстве.

Важно иметь в виду, что в слабом хаосе еще возможно прогнозировать развитие процесса. Прогнозирование в полностью хаотических системах, находящихся в состоянии чистого (глобального) хаоса (для гамильтоновских систем такое состояние называют «стохастическим морем» [8]), возможно лишь в интервале времени, зависящем от энтропии Колмогорова. В соответствии с теорией самоорганизованной критичности, многие сложные системы никогда не достигают равновесия и эволюционируют, естественным образом переходя от метастабильного состояния к критическому; в критическом состоянии незначительное событие, малая флуктуация могут вызвать реакцию, влияющую на любое число элементов системы и приводящую к последствиям, аналогичным большим воздействиям на систему. Поэтому большие флуктуации являются внутренним и, следовательно, неизбежным свойством сложной системы как единого целого. Если система находится в состоянии самоорганизованной критичности, то ее следует считать нестабильной.

Полагая, что поведение RR-интервалограммы как функции времен сдвигов n описывается одномерным отображением вида $Z_{n+1} = \Phi(Z_n)$, обратимся к выражению спектра мощности такого отображения, полученному в [3] при положительных Z_n:

$$S_f \sim \lim_{N\to\infty}\sum_{m=0}^{N}\cos(2\pi mf)C(m); \quad f \to 0, \tag{1}$$

где

$$C(m) = \lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N} Z_{n+m}Z_n \tag{2}$$

– корреляционные коэффициенты исследуемого сигнала; n – момент времени t, в который наблюдается случайный процесс, описываемый временным рядом $\{Z_n\}$; m – сдвиг по времени, с помощью которого вычисляется ковариационная функция $C(m)$. Вероятность появления окна длиной L в форме фрактала, в предположении о масштабной инвариантности (в области слабого хаоса) изменения вероятности, оценивается как

$$P(L) \approx L^{-d_H}, \tag{3}$$

где d_H – фрактальная размерность Хаусдорфа.

По аналогии с [3], переходя к непрерывному времени и используя преобразование Лапласа, выражение (2) для корреляционных коэффициентов $C(m)$ (с подстановкой выражения (3) для вероятности появления окна длиной L в форме фрактала) и теорему о свертке, а также проделав косинус-преобразование Фурье, можно получить следующее асимптотическое представление спектра мощности [9]:

$$S_f \sim \begin{cases} f^{-(3-d_H)} & \text{при } 2 < d_H < 3; \\ f^{-(-d_H-1)} & \text{при } 1{,}5 < d_H < 2; \\ \dfrac{|\ln f|^2}{f^{0,5}} & \text{при } d_H = 1{,}5; \\ f^{-(5-3d_H)} & \text{при } 1 < d_H < 1{,}5; \\ f^{d_H-1} & \text{при } 0 < d_H < 1; \end{cases} \qquad f \to 0. \tag{4}$$

Это соотношение согласуется с физическими представлениями [10] о том, что в области слабого хаоса Фурье-образ спектральной плотности корреляционной функции отличается от лоренцовой формы и что большие островки регулярности, порождающие малые частоты, появляются с тем меньшей вероятностью, чем больше фрактальная размерность. Из соотношения (4) получается, что если под фликкер-шумом понимать только шум типа f^{-x} при $x > 0$, то ему соответствует фрактал с размерностью, находящейся в интервалах $2 < d_H < 3$; $1{,}5 < d_H < 2$; $1 < d_H < 1{,}5$; $0 < d_H < 1$. Следовательно, в системах с такой размерностью следует ожидать феномена самоорганизованной критичности. Поэтому соотношение (4) можно использовать в качестве критерия нестабильности сложных систем.

Таким образом, свойство самоорганизованной критичности не просто качественно связано со степенным законом, но проявляется только в определенной области значений фрактальной размерности.

Пользуясь программой расчета спектральной мощности в математической среде Matlab, построим график спектра мощности S_f исследуемой RR-интервалограммы, взяв за стандартный набор частот

$$f_k = \frac{k}{2mT}; \quad k = 1, ..., m, \tag{5}$$

где m – целое положительное число; T – длина интервала наблюдения.

На основе алгоритма [11] статистической оценки обобщенной фрактальной размерности $D(q)$ временного ряда $\{x_n(t)\}$, были вычислены значения $D(q)$, $q = 0, 1, \ldots, 10$ для RR-интервалограмм, соот-

ветствующие норме, мерцательной аритмии, желудочковой тахикардии и фибрилляции желудочков (*рис. 1* и *табл. 1*). Для вычислительного эксперимента данные, в которых длительность регистрации выбрана 1 мин, были взяты с общедоступного сайта www.physioNet.org.

Как известно [12], значение $D(q)$ при $q = 0$ совпадает с фрактальной размерностью Хаусдорфа d_H.

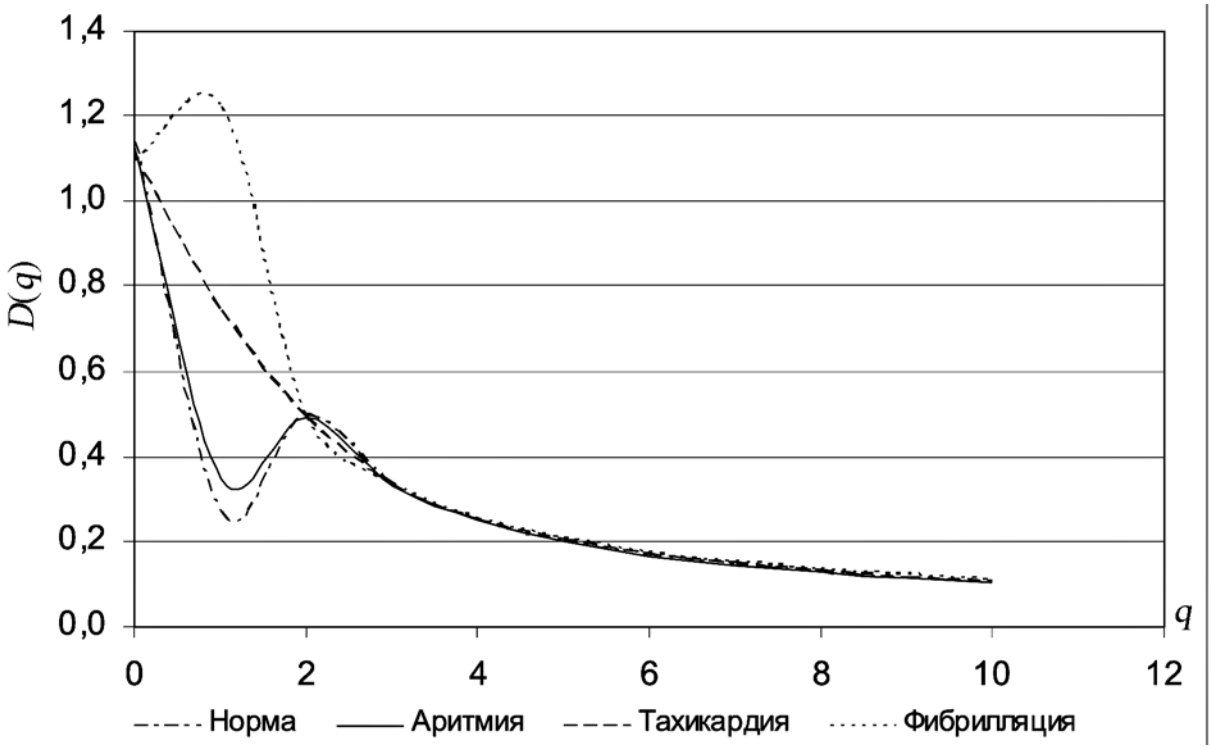

Рис. 1. Зависимость обобщенной фрактальной размерности от параметра q для RR-интервалограммы

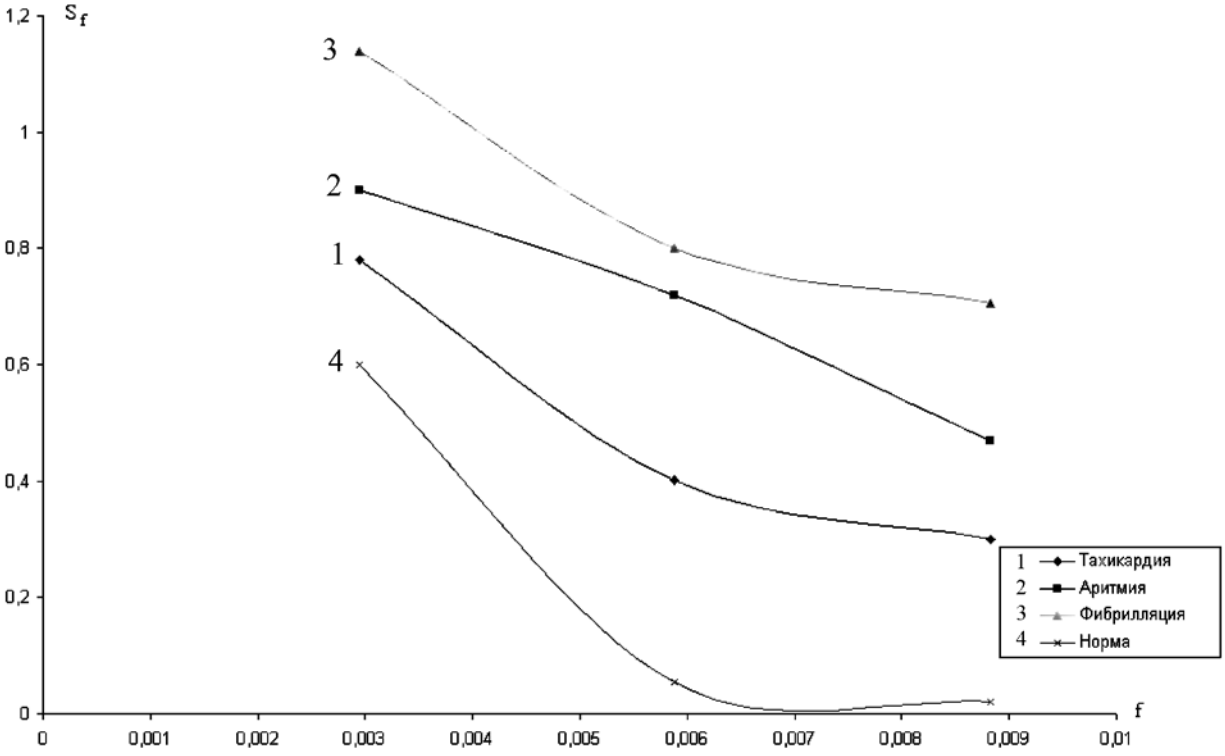

Рис. 2. Зависимость спектральной мощности сигналов от частоты:
1 – тахикардия; 2 – аритмия; 3 – фибрилляция; 4 – норма

Обозначим значения d_H для нормы, аритмии, тахикардии и фибрилляции соответственно через $d_H^{(1)}$, $d_H^{(2)}$, $d_H^{(3)}$ и $d_H^{(4)}$. Из *табл. 1* находим

$$d_H^{(1)} = 1{,}14155;\ d_H^{(2)} = 1{,}12949;$$

$$d_H^{(3)} = 1{,}10827;\ d_H^{(4)} = 1{,}09407. \qquad (6)$$

Таблица 1

Значения обобщенной фрактальной размерности D_q для нормальной и ряда аритмических ЭКГ

q	Норма	Аритмия	Тахикардия	Фибрилляция
0	1,14155	1,12949	1,10827	1,09407
1	0,26854	0,34978	0,74294	1,22144
2	0,49645	0,49340	0,49115	0,49172
3	0,33209	0,33014	0,33047	0,33314
4	0,24994	0,24858	0,25017	0,25387
5	0,20065	0,19965	0,20199	0,20631
6	0,16779	0,16703	0,16987	0,17460
7	0,14431	0,14373	0,14692	0,15195
8	0,12671	0,12625	0,12972	0,13497
9	0,11302	0,11266	0,11633	0,12176
10	0,10206	0,10179	0,10563	0,11119

Поскольку $d_H^{(i)} \in (1;\ 1{,}5)$ $(i = \overline{1, 4})$, то согласно соотношению (4) имеем

$$S_f^{(i)} \sim f^{-\delta(i)};\quad i = \overline{1, 4};\quad f \to 0, \qquad (7)$$

где $\delta^{(i)} = 5 - 3d_H^{(i)}$ с величинами $d_H^{(i)}$ $(i = \overline{1, 4})$ из соотношения (6) и $S_f^{(i)}$ означают спектры мощности на низких частотах для RR-интервалограмм, соответствующих: норме (i = 1), аритмии (i = 2), тахикардии (i = 3) и фибрилляции (i = 4). Соотношения (7) дают возможность диагностировать указанные состояния ССС.

Построим на одном и том же *рисунке* (см. *рис. 2*) графики функций S_f и $S_f^{-\delta(i)}$ $(i = \overline{1, 4})$. Пусть $\alpha^{(i)}$ есть отношение площадей под графиками S_f и $S_f^{-\delta(i)}$. Тогда

$$\alpha^{(i^*)} = \arg \max_{i=1,\,4} \alpha^{(i)}$$

определяет, какое именно i из возможных значений i = 1, 2, 3, 4 соответствует состоянию ССС исследуемого пациента.

Более того, значение $\alpha^{(i^*)}$ характеризует вероятность попадания в область слабого хаоса (самоорганизованной критичности). Это может произойти при любом значении i^*, в частности и при $i^* = 1$, в случае депрессии, стресса, возбуждения и других внешних воздействий на состояние ССС человека.

Как видно из *рис. 2*, спектральные мощности $S_f^{(i)}$ $(i = \overline{1, 4})$ для рассматриваемых состояний ССС не пересекаются друг с другом в области низких частот и упорядочены по мере возрастания степени тяжести состояния пациента. При этом график функции $S_f^{(4)}$ располагается выше графиков функций $S_f^{(i)}$, соответствующих другим аритмическим состояниям. Таким образом, предлагаемый подход к оценке состояния ССС на основе асимптотики спектральной мощности RR-интервалограммы позволяет дифференцировать различные нарушения ССС.

Список литературы:

1. *Кавасма Р.А., Кузнецов А.А., Сушкова Л.Т.* Автоматизированный анализ и обработка электрокардиографических сигналов. Методы и системы / Под ред Л.Т. Сушковой. – М.: Сайнс-пресс, 2006.
2. *Исаков Р.В. Кузнецов А.А., Сушкова Л.Т.* Методы и средства обработки информации при оценке функционального состояния организма человека. – Владимир: Собор, 2006.
3. *Шустер Г.* Детерминированный хаос: введение. – М.: Мир, 1988.
4. *Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.* Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 59.
5. *Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.* Self-organized criticality // Phys. Rev. A. 1988. Vol. 38.
6. *Бак П., Чен К.* Самоорганизованная критичность // В мире науки. 1991. № 3.
7. *Браже А.Р.* Фрактальный и вейвлет-анализ электрической активности нервных клеток / Дис. на соиск. уч. степ. канд. биолог. наук. – М.: МГУ, 1988.
8. Слабый хаос и квазирегулярные структуры / Под ред. Г. Заславского и др. – М.: Наука, 1991.
9. *Коханенко И.К.* Фракталы в оценке эволюции сложных систем // Автоматика и телемеханика. 2002. № 8.
10. *Заславский Г.М., Сагдеев Р.З.* Введение в нелинейную физику. – М.: Наука, 1988.
11. *Абдуллаев Н.Т., Алиев Т.А., Дышин О.А.* Алгоритм вычисления статистической оценки обобщенных размерностей множеств // Информационные технологии. 2010. № 4.
12. *Павлов А.Н.* Методы анализа сложных сигналов. – Саратов: Научная книга, 2008.

Абдуллаев Намик Таир оглы,
канд. техн. наук, зав. кафедрой,
Дышин Олег Александрович,
канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,
Аббаскулиев Айдын Сахим оглы,
доцент,
кафедра «Биотехнические и медицинские приборы»,
Азербайджанская государственная нефтяная академия,
г. Баку, Азербайджан,
e-mail: a.namik46@mail.ru