

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ СЕРДЕЧНОГО РИТМА: КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Мартыненко, Н.И. Яблучанский

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина

РЕЗЮМЕ

Предложена классификация динамических процессов ВСР на основе применения М-индексов: $|M| < 0.03$ – линейный, стационарный; $0.3 > |M| > 0.03$ – слабо нелинейный, квазистационарный; $3 > |M| > 0.3$ – нелинейный, переходной; $|M| > 3$ – сильно нелинейный, переходной. Знак М-индекса определяет направление изменения динамического процесса ВСР (в интегральном смысле): «+» - с ускорением/повышением ЧСС; «-» - с торможением/понижением ЧСС. М-индексы вводят обобщенный базис для выделения стационарных процессов ВСР: Индексы M_0 – определяют как стационарные весь класс инерционных движений в ВСР, т.е. движения с постоянной скоростью либо стохастические колебания вокруг неизменной частоты; Индексы M_1 – определяют как стационарные весь класс периодических и квазипериодических движений в ВСР, как движений сохраняющих постоянным фазовый поток, что достигается за счет введения стрелы времени; Индексы M – учитывают всю совокупность определенных выше стационарных процессов в ВСР.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вариабельность сердечного ритма; нелинейный динамический процесс; классификация; М-индексы

Вариабельность сердечного ритма (ВСР) – один из важнейших функциональных периодических процессов. Она является результатом интегративных влияний регуляторных систем человеческого организма на сердечный ритм (СР) и рассматривается как «окно» в их состоянии [1, 3, 7, 12].

ВСР как процесс и технология очень много дали для медицинской практики и поэтому получили широкое распространение в ее самых разных направлениях. Успешными примерами применения являются космос, кардиология, неврология, пульмонология, и другие отрасли медицины [2, 6, 9, 11].

Многоуровневый нелинейный характер регуляции, однотипность ее реакций при большинстве физиологических и патологических процессов и высокая чувствительность ВСР к этим реакциям обусловили существенные ограничения на стандартные методы исследования и непрерывающиеся попытки поиска новых [4, 5, 8].

Так, спектральные методы ВСР применимы к случаям квазистационарного поведения СР [10]. Это существенным образом ограничивает их использование просто потому, что естественным проявлением жизни есть не квазистационарные, но переходные процессы. При физическом покое в мозге человека, например, совершается множество неконтролируемых психических процессов, «на корню» разрушающих идею «квазистационарности».

Методы хаоса не имеют таких ограничений, но в силу большей степени

общности формируемые на основе их результатов выводы точно так же носят общий рекомендательный характер [7].

Именно поэтому, с нашей точки зрения, от ВСР не удалось получить всего, что ожидалось или может быть получено. На вопрос, существует ли решение проблемы, следует ответить утвердительно. Единственное, что надо сделать, – возратить ВСР в систему пространства-времени, откуда она искусственно была извлечена.

Действительно, как «нельзя дважды войти в одну реку», методологически неверно рассматривать ВСР вне «стрелы времени». СР есть функция времени, а потому его дериват ВСР – тоже функция времени. Введя «стрелу времени», первый результат, который получаем, есть классификация ВСР.

Теория

Изучение динамических процессов ВСР делает необходимым рассмотрение последовательности RR-интервалов с позиций нелинейных динамических систем, т.е. наиболее общего математического подхода к описанию сложных явлений, развивающихся во времени. Центральное место в теории нелинейных динамических систем занимает понятие устойчивости системы и его меры – показателей Ляпунова. Показатели Ляпунова (λ) – количественная мера расхождения первоначально бесконечно близких траекторий (X_0 и $X_0 + \Delta x_0$) в фазовом пространстве (рис. 1.) – были предложены гениальным математиком А.М.Ляпуновым, работавшим в конце XIX начале XX веков в Харьковском университете, для описания устойчивости движения. Эта классическая мера

устойчивости прекрасно себя зарекомендовала при оценке устойчивости движения по достаточно гладким траекториям. В случае нелинейности к начальным условиям. Существует тесная взаимосвязь между показателями Ляпунова и другими известными характеристиками нелинейных динамических систем: энтропией Колмогорова-Синя (КС-энтропия), как максимального λ на траектории; фрактальной размерностью в виде

хаотической динамики показатели Ляпунова позволяют оценить степень хаотичности системы, ее предсказуемость и чувствительность к начальным условиям. Существует ляпуновской размерности, построенной на упорядоченных значениях λ ; среднему значению дивергенции траектории, как суммы всех показателей Ляпунова. Последний показатель, в частности, является мерой диссипативности и сохранения фазового объема в процессе движения системы.

$$\lambda = \lim_{\substack{t \rightarrow \infty \\ |\Delta x_0| \rightarrow 0}} \frac{1}{t} \ln \frac{|\Delta x(X_0, t)|}{|\Delta x_0|}$$

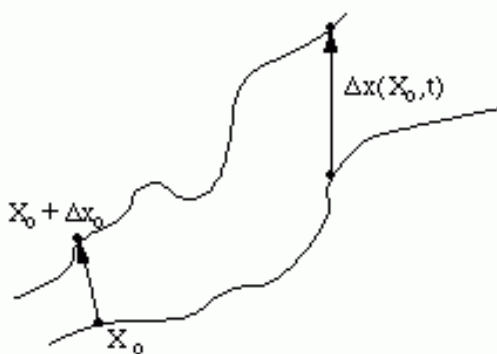


Рис. 1. Показатели Ляпунова

Использование показателей Ляпунова в анализе ВСР сопряжено с рядом трудностей:

- наличие значительной стохастической компоненты в ВСР делает классический алгоритм вычисления статистически незначимым (во всяком случае, на стандартизованных длинах записей ВСР). Пример поточечного вычисления старшего показателя Ляпунова для записи ВСР в 4500 кардиоциклов дан на рис. 2. Для этой записи среднее значение λ составляет 0.7, а дисперсия 1.82, что статистически не достоверно;
- известные аппроксимационные алгоритмы (например [1] как один из самых популярных) являются медленно сходящимися и требуют для своей работы порядка 103-104 кардиоциклов, что также неприменимо для 5-минутных записей и возможно только при анализе результа-

тов Холтеровского мониторинга;

- принципиально не применим для анализа переходных процессов ВСР, как относительно коротких участков нестационарности, соединяющих участки стационарных записей.

Для преодоления указанных трудностей был предложен и разработан метод локальных показателей Ляпунова – М-индексов, который позволяет:

- анализировать участки произвольной длины и степени нелинейности;
- дает статистически значимые и устойчивые к стохастической компоненте результаты.

Анализ той же, что и для рис. 2. записи ВСР с помощью М-индексов дает: среднее значение λ - 0.72 при дисперсии 0.17 (рис. 3.), т.е. при том же среднем дисперсия в 10 раз меньше.

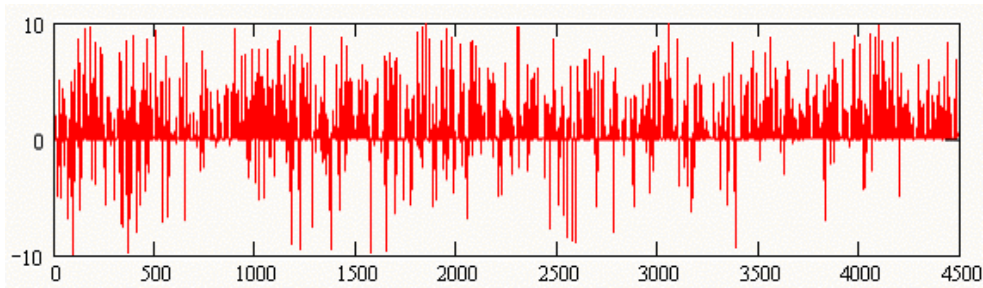


Рис. 2. Пример поточечного вычисления старшего показателя Ляпунова для записи ВСР длиной в 4500 кардиоциклов

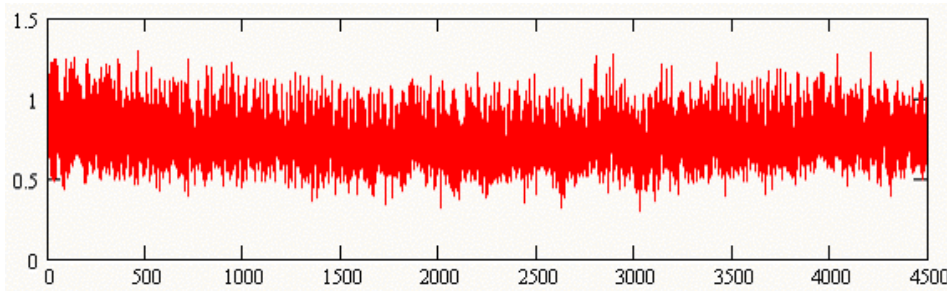


Рис. 3. Поточечный анализ той же, что и для рис.2 записи с помощью М-индексов

Для построения М-индексов выделим элемент траектории исследуемого процесса с последовательно наблюдаемыми произвольными точками $i-1$, i , $i+1$. В общем случае траектория рассматривается в N -мерном фазовом пространстве процесса. Например, при исследовании

вариабельности сердечного ритма на коротких записях таким пространством может быть установленное пространство регуляторных воздействий АНС: гуморальное (G), симпатическое (S) и парасимпатическое (P) (рис. 4).

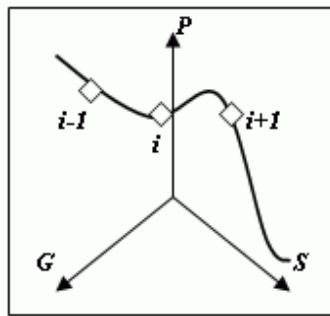


Рис. 4. Установленное пространство регуляторных воздействий АНС

Участок траектории полностью характеризуется собственной координатой матрицей A размера $N \times N$ или для введенного фазового пространства ВСР

$$A = \begin{pmatrix} G_{i-1} & S_{i-1} & P_{i-1} \\ G_i & S_i & P_i \\ G_{i+1} & S_{i+1} & P_{i+1} \end{pmatrix}. \quad (0)$$

Очевидно, что для этого малого участка траектории (предполагается, что расстояние между ближайшими точками на траектории мало) может быть построена элементарная аппроксимация представляющая участок

кривой системой линейных дифференциальных уравнений с матрицей постоянных коэффициентов B (индекс i вверху означает принадлежность матрицы к i -ому участку траектории). Количество

дифференциальных уравнений совпадает с размерностью фазового пространства N.

Решение системы (1) в общем случае имеет вид [2]

$$\frac{dX_j}{dt} = B^i X_j, j=G,P,S, \quad (1)$$

$$X=e^{Bt}X_0,$$

или через показатели Ляпунова λ

$$X=\Sigma(Z_1+ Z_2t+ \dots + Z_kt^k)e^{\lambda t}X_0,$$

где X_0 – вектор начальных значений фазовых переменных, Z_k – составляющие матрицы или компоненты матрицы B, t – время.

Для 3-х мерного фазового пространства GSP с симметричной матрицей коэффициентов B

$$B=\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}, b_{ij}=b_{ji}$$

решение системы один имеет явный вид [3]

$$G=C_1e^{\lambda_1 t}+C/b_{23}e^{\lambda_2 t}; S=C_2e^{\lambda_1 t}+C/b_{13}e^{\lambda_2 t}; P=C_3e^{\lambda_1 t}+C/b_{12}e^{\lambda_2 t}; \quad (2)$$

$$C_1/b_{23}+ C_2/b_{13}+ C_3/b_{12}=0.$$

Здесь λ_1, λ_2 – показатели Ляпунова, C, C₁, C₂, C₃ – постоянные коэффициенты. Для каждой i-ой точки фазового про-

странства GSP, задаваемой матрицей A, из (2) могут быть найдены локальные показатели Ляпунова

$$\lambda_1=0.5(\ln(2G_{i+1}b_{23}-S_{i+1}b_{13}-P_{i+1}b_{12})-\ln(2G_{i-1}b_{23}-S_{i-1}b_{13}-P_{i-1}b_{12})), \quad (3)$$

$$\lambda_2=0.5(\ln(G_{i+1}/b_{23}-S_{i+1}/b_{13}-P_{i+1}/b_{12})-\ln(G_{i-1}/b_{23}-S_{i-1}/b_{13}-P_{i-1}/b_{12})).$$

Таким образом, вычисляя показатели для всего исследуемого участка ВСП, мы определим индекс M₀ как среднее значение

наибольшего локального показателя Ляпунова на исследуемом участке ВСП

$$M_0=m_0 \frac{1}{K} \sum_k (\max(\lambda_i))_k, \quad (4)$$

K – количество исследуемых на участке ВСП RR-интервалов, m₀ – нормировочный коэффициент, который выбирается таким образом, что M₀=1 для функции exp(t). Знак индекса M₀ показывает, что преобладает на исследуемом участке ВСП: «+» – ускорение, т.е. движение увеличивающее ЧСС, «-» – торможение – уменьшающее ЧСС. А величина – степень нелинейности участка ВСП в сравнении с функцией exp(t). Если исследуемый участок линеен, то M₀=0. Очевидно, что для стационарных записей ВСП M₀ также будет близко к нулю.

происходит во времени с записью ВСП, т.е. приводит ли движение в фазовом пространстве к расширению или сжатию фазового потока. Для этого необходимо использовать время не просто как скалярный параметр, упорядочивающего следование регистрируемых RR-интервалов, а следует задать его в виде направленного вектора – «стрелы времени». С этой целью домножим ряд значений RR-интервалов на время (с начальной точкой отсчета в начале исследуемого отрезка ВСП), т.е. будем использовать вместо координатной матрицы A матрицу A¹

Следующий индекс позволит оценить, что

$$A^t = \begin{pmatrix} G_{i-1}t_{i-1} & S_{i-1}t_{i-1} & P_{i-1}t_{i-1} \\ G_i t_i & S_i t_i & P_i t_i \\ G_{i+1}t_{i+1} & S_{i+1}t_{i+1} & P_{i+1}t_{i+1} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Используя аппроксимацию, коэффициентов B найдем локальные показатели Ляпунова для каждой i -ой точки исследуемого участка ВСП

$$B = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{pmatrix}, \beta_{ij} = \beta_{ji} \quad (6)$$

$$\lambda_1^t = 0.5(\ln(2G_{i+1}\beta_{23} - S_{i+1}\beta_{13} - P_{i+1}\beta_{12}) - \ln(2G_{i-1}\beta_{23} - S_{i-1}\beta_{13} - P_{i-1}\beta_{12}) + \ln(t_{i+1}) - \ln(t_{i-1})),$$

$$\lambda_2^t = 0.5(\ln(G_{i+1}/\beta_{23} - S_{i+1}/\beta_{13} - P_{i+1}/\beta_{12}) - \ln(G_{i-1}/\beta_{23} - S_{i-1}/\beta_{13} - P_{i-1}/\beta_{12}) + \ln(t_{i+1}) - \ln(t_{i-1})).$$

Аналогично (4) вычисляем индекс M_1

$$M_1 = m_1 \frac{1}{K} \sum_k (\max(\lambda_i^t))_k, \quad (7)$$

m_1 – нормировочный коэффициент, который выбирается таким образом, что $M_1=1$ для функции $exp(t)$. Знак индекса M_1 показывает, что происходит в интегральном смысле с ЧСС на исследуемом участке ВСП: «+» – увеличение, «-» – уменьшение. А величина –

степень изменения фазового потока на исследуемом участке ВСП в сравнении с функцией $exp(t)$. Если исследуемый участок стационарен, либо изменения носят строго периодический характер, то $M_1=0$.

Наконец введем композитный индекс M

$$M = abs(M_0)M_1, \quad (8)$$

характеризующий нелинейность и нестационарность переходного процесса на исследуемом участке записи ВСП. Знак «+» – означает нелинейное движение при переходном процессе в направлении увеличения ЧСС; «-» – означает нелинейное движение при переходном процессе в направлении уменьшения ЧСС. Величина индекса M показывает степень нелинейности переходного процесса ВСП.

Дадим несколько примеров с пояснениями.

Переход $exp(t)$: $M_0=1$; $M_1=1$; $M=1$ –

положительный ускоряющий переход с выраженными нелинейностью и расширением фазового пространства. Нелинейный неустойчивый переход. Если к основной функции перехода $exp(t)$ добавить случайную компоненту, например, наложить гауссовский случайный процесс с максимальной амплитудой $\pm 10\%$ от величины основной функции (рис. 5.), то значения M -индексов изменятся только в пределах 3-5%, что говорит об устойчивости выбранной меры к шуму. Для рис. 5.: $M_0=0.97$; $M_1=0.97$; $M=0.95$.

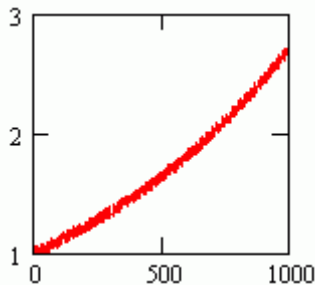


Рис. 5. Переход типа $exp(t)$ с гауссовым шумом

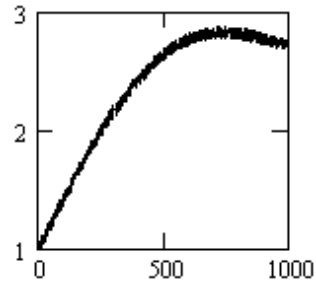


Рис. 6. Пример слабо неустойчивого, но сильно нелинейного переходного процесса

Пример слабо неустойчивого, но сильно нелинейного переходного процесса дан на следующем рисунке рис. 6. Это результат

композиции: $exp(t)+10\%$ случайная компонента+полупериод синусоиды. Для такого переходного процесса $M_0=-3.5$;

$M_1=0.025$; $M=0.1$, т.е. положительный тормозящий переход со значительной нелинейностью и слабым растяжением фазового пространства или сильно нелинейный слабо неустойчивый переход.

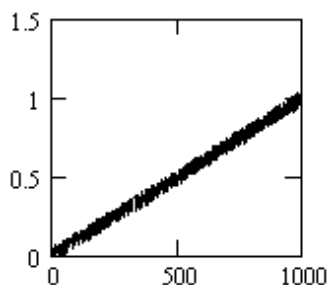


Рис. 7. Переход в виде композиции линейной функции с 10%-ой случайной компонентой, для которого $M_0=0.004$; $M_1=0.74$; $M=0.0031$ – положительный линейный переход с фазовым расширением

Примеры устойчивых переходных процессов даны ниже.

Линейный переход+10% случайная компонента+полупериод косинусоиды (рис. 8.): $M_0=-0.045$; $M_1=-0.83$; $M=-0.036$ – отрицательный слабо тормозящий и почти линейный переход с фазовым сжатием. Слабо нелинейный близкий к безразлично

Далее (рис. 7.) показан переход в виде композиции линейной функции с 10%-ой случайной компонентой, для которого $M_0=0.004$; $M_1=0.74$; $M=0.0031$ – положительный линейный переход с фазовым расширением. Линейный безразлично устойчивый переход.

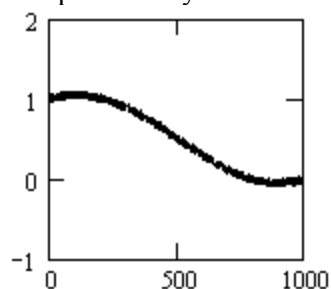


Рис. 8. Линейный переход+10% случайная компонента+полупериод косинусоиды

устойчивому переход.

Линейный переход+ $\exp(-2t)$ +10% случайная компонента+полупериод косинусоиды (рис. 9.): $M_0=-0.83$; $M_1=-0.67$; $M=-0.57$ – отрицательный тормозящий нелинейный переход с фазовым сжатием. Нелинейный устойчивый переход.

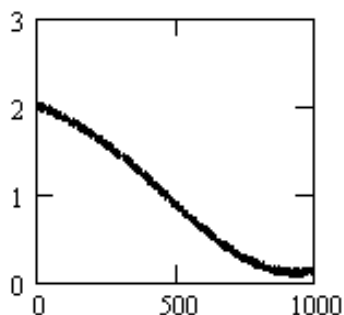


Рис. 9. Линейный переход+ $\exp(-2t)$ +10% случайная компонента+полупериод косинусоиды

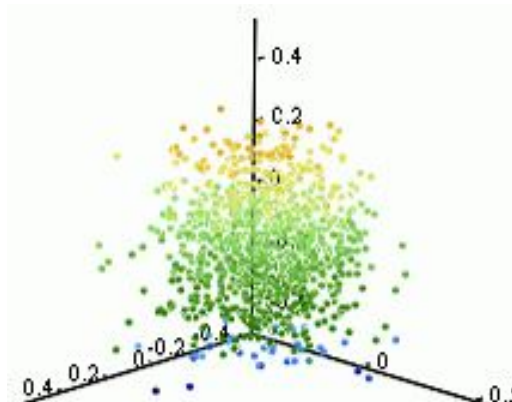


Рис. 10. 3-х мерное распределение случайной величины по Студенту

Для того, чтобы представить классификацию динамических процессов ВСП, следует вначале обратиться к исследованию с помощью М-индексов случайных распределений. Для этого моделировались 3-х мерные случайные величины с различными результатами распределения (см. на рис.10 пример распределения Стюдента), для которых вычислялся М-индекс.

Максимальные абсолютные значения М-индексов сведены в табл. 1.

Таблица 1

М-индексы для различных случайных распределений

Случайное распределение	М-индекс (макс.)
Нормальное	0.005
Пуассона	0.005
Стюдента	0.004

Вейбула	0.007
Биномиальное	0.008
χ^2	0.004
Γ	0.006

Классификация

Получается, независимо от закона распределения случайной величины, мы можем констатировать, что М-индекс хорошо справляется с оценкой стохастического набора данных и позволяет надежно отделить стационарные данные с любым стохастическим шумом на уровне ± 0.008 .

Тогда, можно предложить следующую классификацию динамических процессов ВСП (учитывая опыт применения М-индексов):

- $|M| < 0.03$ – линейный, стационарный;
- $0.3 > |M| > 0.03$ – слабо нелинейный, квазистационарный;
- $3 > |M| > 0.3$ – нелинейный, переходной;
- $|M| > 3$ – сильно нелинейный, переходной.

Напомним, что знак М-индекса дает следующую интерпретацию для изменений ЧСС на анализируемом участке ВСР:

- $M_0 > 0$ – ускорение; $M_0 < 0$ – торможение;
- $M, M_1 > 0$ – увеличение; $M, M_1 < 0$ – уменьшение.

М-индексы вводят обобщенный базис для выделения стационарных процессов ВСР:

- Индексы M_0 – определяют как стационарные весь класс инерционных движений в ВСР, т.е. движения с постоянной скоростью либо стохастические колебания вокруг неизменной частоты;

Квазистационарными являются эпизоды (эпохи, участки) ВСР, где система остается инерционной в классическом смысле (линейные движения) либо отсутствуют изменения в фазовом потоке (периодические движения). Соответственно, переходными являются эпизоды ВСР, в которых наблюдаются ускоренные движения, выводящие систему, в той или иной степени, из состояния текущего равновесия. То есть, уже на первом шаге мы получаем прецизионно точный инструмент выделения квазистационарных и переходных эпизодов в ВСР.

Любой эпизод ВСР с равной нулю производной от «стрелы времени» независимо от степени варьирования длин RR-интервалов будет квазистационарным. Равная нулю производная означает, что скорость «стрелы времени» для ВСР постоянна. Выделяя три типа постоянной скорости «стрелы времени» – положительную, нулевую и отрицательную, естественно выделять три типа квазистационарных эпизодов ВСР: линейно возрастающий, постоянный, линейно уменьшающийся.

Заметим, что стандартные спектральные методы ВСР применимы только к случаям квазистационарных эпизодов ВСР с постоянным относительно веденной для

- Индексы M_1 – определяют как стационарные весь класс периодических и квазипериодических движений в ВСР, как движений сохраняющих постоянным фазовый поток, что достигается за счет введения стрелы времени;
- Индексы M – учитывают всю совокупность определенных выше стационарных процессов в ВСР.

Первый уровень классификации делит все разнообразие форм ВСР на два хорошо известные упомянутые выше принципиально разные класса, а именно, квазистационарные и переходные. При этом принципиально важно осознание исключительного значения «стрелы времени» для ВСР позволяет ввести меру ее квазистационарных и переходных типов.

системы «стрелой времени», что не трудно показать, довольно редко в обычной жизни. Отчасти они приложимы к эпизодам ВСР с малой (близкой к нулю) постоянной скоростью «стрелы времени». Не в этом ли одна из возможных причин высокой variability показателей ВСР? Задача спектрального анализа квазистационарных эпизодов ВСР с отличной от нуля постоянной скоростью «стрелы времени» решается заменой методов быстрого преобразования Фурье, авторегрессионного, Вейвлета, методом интегральной аппроксимации.

Любой эпизод ВСР, носящий аперриодический характер с отличной от нуля производной от «стрелы времени» ВСР будет переходным (нестационарным).

Очевидно, что подсчет М-индексов для всей записи ВСР позволит установить является ли данная запись стационарной. Если нет, результаты спектрального анализа для всей записи нельзя считать корректными, и в этом случае М-индексы помогут найти участки ритмограммы, где спектральный анализ применим. Пример такого автоматического разбиения ритмограммы дан на рис. 11. для дневного интервала суточной записи ВСР (79% записи квазистационарные; 21% – нестационарные):

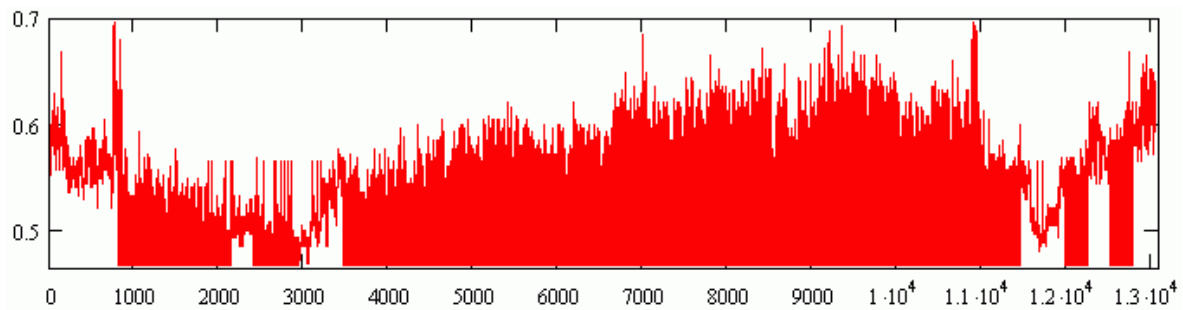


Рис. 11. Выделение стационарных (79%) и нестационарных (21%) участков в дневной записи ВСР

и ночного интервала (95% записи квазистационарные; 5% - нестационарные):

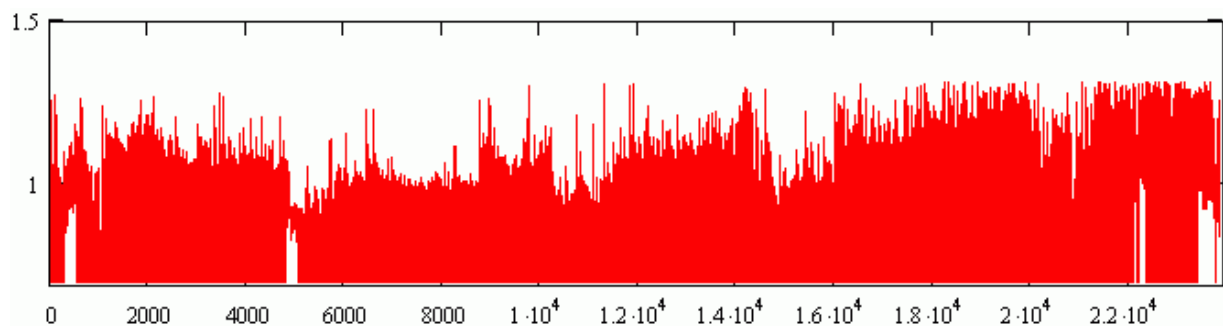


Рис. 12. Выделение стационарных (95%) и нестационарных (5%) участков в ночной записи ВСР

Выводы

Во-первых, нельзя просто классифицировать эпизоды ВСР на квазистационарные и переходные. Во-вторых, существование подтипов этих процессов предполагает их дифференциацию с изолированным описанием количественных характеристик каждого из них. В третьих, и это едва ли не самое главное, ВСР является функцией «стрелы времени» и не может рассматриваться вне последней.

Предлагаемая классификация построена на естественной философии необратимости времени и по нашему убеждению будет способствовать как росту интереса к исследованиям, так и более весомым научным и практическим результатам в области медицинских применений ВСР.

Мы выделяем два основных направления использования предложенных М-индексов:

- оценка границы применимости стандартного спектрального анализа ВСР и тем самым повышение надежности результатов такого анализа;
- описание переходных процессов в ВСР.

Более детальный анализ методов исследования разных типов эпизодов ВСР – тема специальной статьи.

Авторы были бы слишком скромными, если бы не считали обратить внимание на необходимость распространения изложенных философии и классификации на все множество периодических физиологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баевский РМ, Иванов ГГ. // Ультразвуковая и функциональная диагностика. - 2001. - № 3. - С. 106-127.
2. Добове моніторинання ЕКГ. Рекомендації українського товариства кардіології. - Київ. - 2002. - 76 с.
3. Миронова ТВ, Миронов В.А. Клинический анализ волновой структуры синусового ритма сердца (Введение в ритмокардиографию и атлас ритмокардиограмм). - Челябинск. - 1998. .
4. Рябыкина ГВ, Соболев АВ. Вариабельность ритма сердца. -М.:СтарКо. - 1998. .
5. Яблунчанский НИ, Кантор Б.Я, Мартыненко АВ, и др. Вариабельность сердечного ритма в современной клинике. -Донецк:ЧНИПФ "Будень". - 1997. - 108 с.
6. Яблунчанский НИ, Мартыненко АВ, Исаева АС. Основы практического применения неинвазивной технологии исследования регуляторных систем человека. - Харьков: Основа. - 2000. - 88 с.
7. Яблунчанский Н.И., Мартыненко А.В., Исаева А.С. и др. Исследуем регуляторные процессы. Для настоящих врачей. - Донецк: ЧП Бугасова. - 2005. - 196 с.
8. Хемминг Р.В. Численные методы. -М.:Наука. - 1972.
9. Aubert AE, Ramaekers D. // Acta cardiol. - 1999. - Vol. 5(3). - P. 107-120.

10. Baevskii R.M. // Human Physiology. - 2002. - Vol. 28(2). - P. 70-82.
11. Task force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Circulation. - 1996. - № 93. - P. 1043-1065.
12. <http://www.BCPcongress.org>

ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ СЕРЦЕВОГО РИТМУ: КЛАСИФІКАЦІЯ І АНАЛІЗ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ

О.В. Мартиненко, М.І. Яблучанський

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Україна

РЕЗЮМЕ

Запропонована класифікація динамічних процесів ВСР на основі застосування М-індексів: $|M| < 0.03$ – лінійний, стаціонарний; $0.3 > |M| > 0.03$ – слабо нелінійний, квазістаціонарний; $3 > |M| > 0.3$ – нелінійний, перехідний; $|M| > 3$ – сильно нелінійний, перехідний. Знак М-індексу встановлює напрямок змін у динамічному процесі ВСР (у інтегральному значенні): «+» - з прискоренням/підвищенням ЧСС; «-» - з гальмуванням/пониженням ЧСС. М-індекси вводять узагальнений базис для виділення стаціонарних процесів ВСР: Індекси M_0 – визначають як стаціонарні весь клас інерційних рухів у ВСР, тобто рухи з постійною швидкістю або стохастичні коливання навкруги незмінної частоти; Індекси M_1 – визначають як стаціонарні весь клас періодичних і квазіперіодичних рухів у ВСР, як рухів, які зберігають постійним фазовий потік, що досягається за рахунок введення стріли часу; Індекси M – враховують всю сукупність визначених вище стаціонарних процесів у ВСР.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: варіабельність серцевого ритму, нелінійний динамічний процес, класифікація, М-індекси

HEART RATE VARIABILITY: CLASSIFICATION AND DYNAMIC SYSTEM ANALYSIS

A.V. Martynenko, M.I. Yabluchansky

V.N. Karazin Kharkov National University, Ukraine

SUMMARY

The proposed classification of dynamic HRV processes is based on M-indexes: $|M| < 0.03$ – linear, stationary; $0.3 > |M| > 0.03$ – weakly nonlinear, quasi stationary; $3 > |M| > 0.3$ – nonlinear, transient; $|M| > 3$ – strongly nonlinear, transient. The character of M-index gives following interpretation for direction of dynamic HRV process (integrated for analyzing record): «+» – accelerating; «-» – decelerating. Thus M-indexes introduce generalized basis for allocation of HRV stationary processes: M_0 indexes – determine as stationary the whole class on inertial movements in HRV, i.e. movement with constant speed or stochastic vibrations around unchanged frequency; M_1 indexes – determine as stationary the whole class of periodical and quasi periodical movements in HRV, the movements which keep constant phase flow what can be achieved by introducing of time arrow; M indexes – consider the whole system of appointed above stationary processes in HRV.

KEY WORDS: heart rate variability, nonlinear dynamic process, classification, M-indexes