

Д.ф.-м.н., проф. С.М. Захаров (ОАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»),
М.С. Захаров (ЗАО «Сбербанк-Технологии»),
к.т.н., проф. В.Е. Красовский (ОАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»)

S. Zakharov, M. Zakharov, V. Krasovsky

СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА КАРДИОИНТЕРВАЛОВ

SPECTRAL-TIME PROPERTIES OF CARDIO INTERVALS

Обсуждаются спектрально-временные свойства кардиоинтервалов, полученных из сигналов пульсовой волны на стандартном пятиминутном временном интервале. В качестве метода регистрации выбран метод фотоплетизмографии. Использование преобразований Фурье «оконного типа» дало возможность исследовать спектральные свойства кардиоинтервалов во времени. Анализ мощностных характеристик позволил определить во времени адаптационные процессы. Представленная методология расширяет возможности метода фотоплетизмографии для диагностики функциональных состояний организма.

Ключевые слова: кардиоинтервалы, временные ряды, ритмограмма, спектры Фурье, фотоплетизмограмма, мощностные характеристики.

The spectral properties of the cardio intervals derived from the pulse wave signals observed on the standard five minutes time period are discussed. The photoplethysmography is selected as a method of registration. The use of Fourier transforms «window-type» has given the opportunity to explore the spectral properties of cardio intervals in time. Analysis of the power characteristics allowed us to determine the time adaptive processes. The presented methodology extends photoplethysmography method for the diagnosis of functional states of the organism.

Key words: cardio intervals, time series, rhythmogram, Fourier spectra, photoplethysmogram, power characteristics.

Введение

Одним из методов, позволяющим оценивать состояние сердечно сосудистой системы и организма в целом, является метод вариабельности сердечного ритма (ВСР) [1–4]. Основу метода ВСР составляет анализ временных рядов кардиоинтервалов, полученных на определенных временных отрезках. Сегодня исследования ВСР активно внедряются в клиническую практику [5]. Установлена диагностическая значимость параметров ВСР при гипертонической болезни, патологии щитовидной железы, неврологических расстройствах, опухолях головного мозга, рассеянном склерозе и ряде других заболеваний [6–8]. Выявлено, что ВСР представляет собой устойчивый предиктор смерти у больных, перенесших острый инфаркт миокарда [9].

С временными свойствами кардиоинтервалов тесно связаны спектральные, позволяющие простым и удобным способом оценивать нервные влияния на сердце. Однако потенциальные возможности метода ВСР до сих пор реализованы не полностью, поскольку предполагается, что формирование сердечного ритма является стационарным случайным процессом.

В статье представлена методология, основанная на использовании спектральных преобразований Фурье «оконного типа» и позволяющая исследовать динамику сердечного ритма во времени. Показана существенная нестационарность процессов управления ритмом сердца. Исследован процесс адаптации организма во время снятия показаний на стандартном пятиминутном временном интервале. Представленная методология позволяет расширить возможности метода ВСР в определении функциональных состояний человека.

1. Методика эксперимента

Временной ряд кардиоинтервалов формировался экспериментально при снятии фотоплетизмограммы (ФПГ) с помощью аппаратно-программного комплекса (АПК) «Био-

мышь», разработанного компанией «Нейролаб» (Москва). Основу АПК составляет фотоэлектрический датчик в виде оптоэлектронной пары (светодиод – фотоприемник), вмонтированный в обычную компьютерную мышь. Кроме того, «биомышь» содержит устройство предварительной обработки, состоящее из селективного усилителя и аналого-цифрового преобразователя. Частота дискретизации выбиралась равной 1 кГц.

Временной ряд кардиоинтервалов выделялся программным образом по максимумам отсчетов ФПГ. Пример полученной таким образом ритмограммы приведен на рис. 1. В дальнейшем для удобства сравнения различных ритмограмм во времени необходимо было привести их к эквидистантным временным отсчетам путем сплайновой кубической интерполяции.

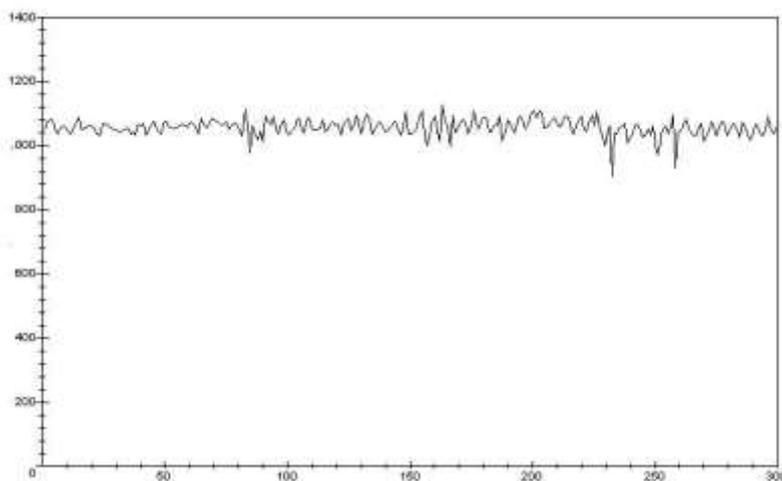


Рис. 1

Исходная ритмограмма – длительность кардиоинтервалов (мс) как функция времени (с) на стандартном пятиминутном отрезке

2. Исходные спектры Фурье

Вычислим исходный спектр Фурье по формулам:

$$F(\nu) = \sum_{k=1}^N \exp(2\pi i \nu t_k) (\Delta t_k - \langle \Delta t_k \rangle) \Delta t_k, \quad P(\nu) = \frac{|F(\nu)|^2}{2T},$$

где $P(\nu)$ – спектральная плотность мощности, T – временной интервал (с), соответствующий пятиминутной записи сердечных циклов ($N = 300$), Δt_k – длительность кардиоинтер-

валов (мс), t_k – текущее время (с):

$$T = \sum_{k=1}^N \Delta t_k, \quad t_k = \sum_{l=1}^k \Delta t_l.$$

Для спектра Фурье, вычисленного по эквидистантным временным отсчетам, будем использовать следующее выражение [10]:

$$F(\nu) = \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \exp(2\pi i \nu t_{k+\frac{N}{2}}) (x_{k+\frac{N}{2}} - \langle x \rangle) \Delta t,$$

где x_k – временные отсчеты на интервалах интерполяции $t_k = k\Delta t = kT/N$ ($k = 0, 1, \dots, N$; $T = 300$ с; $\Delta t = 1$ с; $N = 300$).

Для сравнения на рис. 2 представлены спектрограммы Фурье исходного массива кардиоинтервалов и массива, полученного интерполяцией на эквидистантных временных отрезках (в дальнейшем для простоты мы ограничимся использованием разрешения 0,01 Гц).

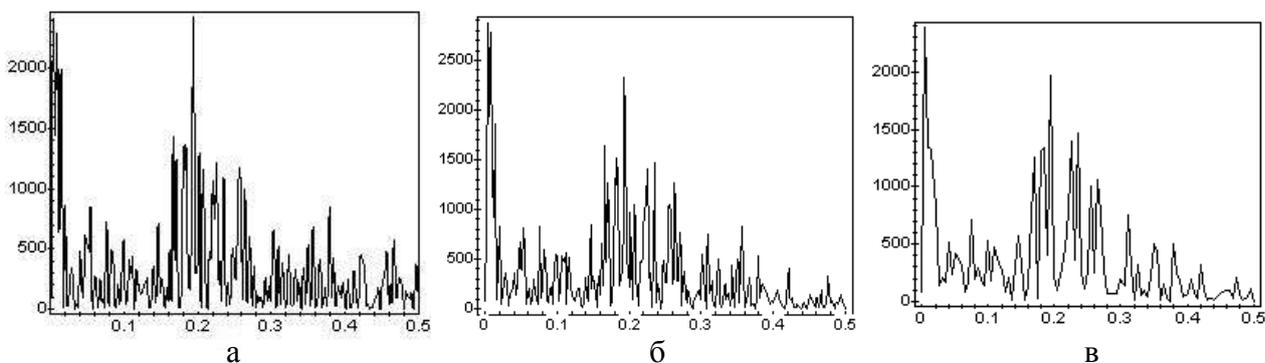


Рис. 2

Спектры Фурье кардиоинтервалов (а – исходный; б – с разрешением $\sim 0,003$ Гц после приведения к эквидистантному виду; в – с разрешением $\sim 0,01$ Гц)

3. Динамика спектров во времени

Для того чтобы иметь возможность динамического исследования спектров во времени, необходимо выбирать количество отсчетов NN , меньшее исходного N [10], тогда появляется возможность их изучения на временном отрезке $(N - NN)\Delta t$, правда, с уменьшен-

ным в N/NN число раз спектральным разрешением. Формально интервал времен можно расширить от нуля до $N\Delta t$ введением функции «оконного типа», учитывающей переменное число отсчетов. Вид данной функции для $N = 300$ и $NN = 120$ представлен на рис. 3.

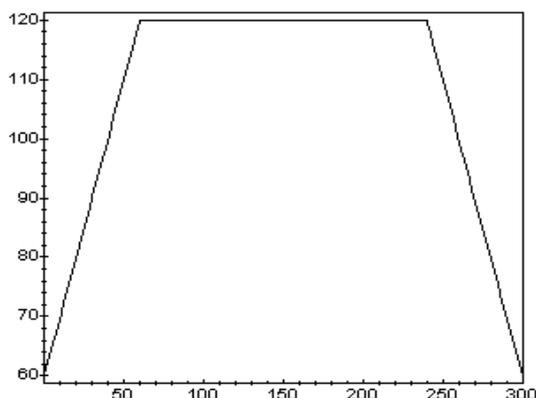


Рис. 3

Вид оконной функции ($N = 300$, $NN = 120$) для учета переменного числа отсчетов

Вид спектров Фурье «оконного типа» в конце каждой из пяти минут представлен на рис. 4.

На рис. 5 приводится трехмерное представление спектров Фурье оконного типа, иллюстрирующее динамику во времени.

4. Мощностные спектральные характеристики

Спектральный анализ позволяет количественно оценить различные частотные области ритма сердца и выделить определенные отделы регуляторного механизма. При коротких записях (5 минут и менее) важную роль играют три спектральные области:

- **HF** (High Frequency) – высокие частоты в интервале 0,15 – 0,4 Гц, отражающие парасимпатическую активность, связанную с дыхательными процессами;
- **LF** (Low Frequency) – низкие частоты в интервале 0,04 – 0,15 Гц, относящиеся к симпатической активности. В отличие от парасимпатического отдела вегетативной нервной системы, отвечающего за расслабление, отдых, сохранение жизненной энергии, симпатический отдел вегетативной нервной системы отвечает за мобилизацию внутренних

ресурсов организма;

- **VLF** (Very Low Frequency) – очень низкие частоты 0,015 – 0,04 Гц, относящиеся к гуморальной регуляции, осуществляемой через жидкие среды организма (кровь, лимфа, тканевая жидкость) с помощью гормонов.

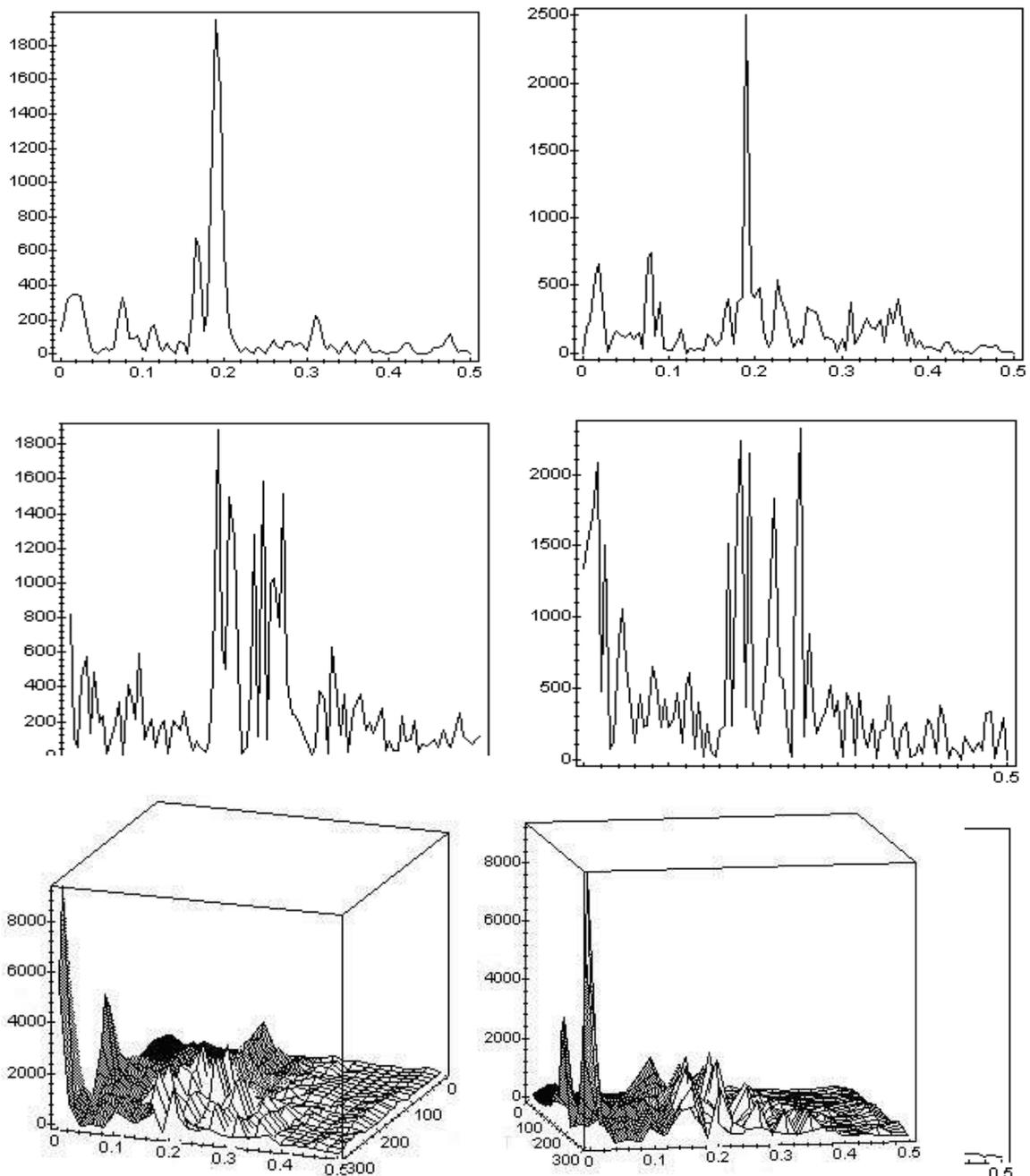
Рис. 4

Динамика спектра Фурье, рассчитанного по 120 отсчетам в конце каждой из пяти минут

Рис. 5

Трехмерное представление спектров во времени в различных ракурсах

TF (Total Power) $TF = HF + LF + VLF$ – полная, или суммарная мощность во всех ча-



стотных диапазонах.

По мощностям, относящимся к различным спектральным диапазонам, судят о балансе механизмов расхода и восстановления энергии в организме. При выполнении неравенства $HF > LF$, как это следует из рис. 6, происходит преобладание механизма восполнения энергии. В обратном предельном случае ($HF < LF$) человек мобилизован, и расход энергии преобладает над восстановлением.

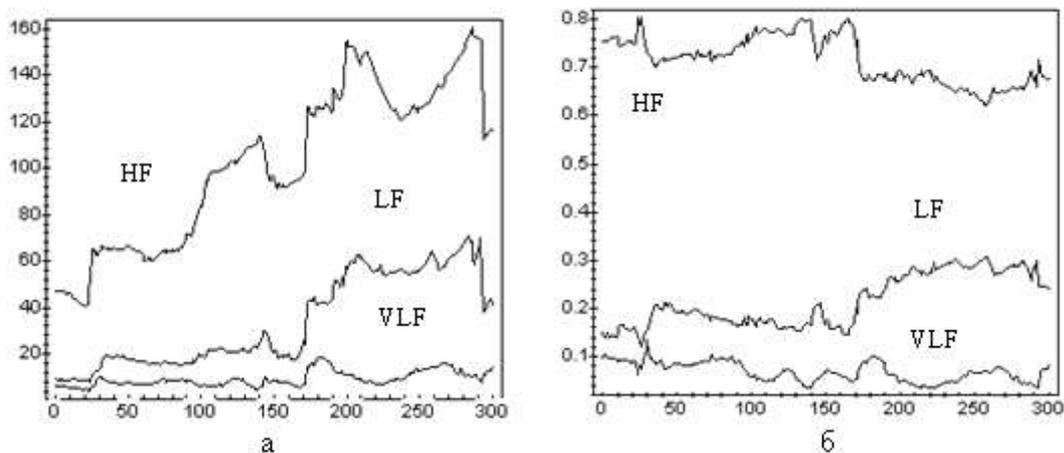


Рис. 6

Спектральные мощности, относящиеся к областям HF, LF, VLF, как функции времени (а – в абсолютных единицах ($mс^2$); б – в относительных единицах (в отношении к TF))

Графики на рис. 6 говорят о симпато-парасимпатическом взаимодействии нервных влияний на систему управления сердечным ритмом. В целом можно сказать, что оно носит «антагонистический» характер (рис. 6б), т.е. рефлекторное увеличение парасимпатического тонуса сопровождается согласованным снижением симпатического тонуса и наоборот.

Следует отметить, что рост кривых на рис. 6 не является монотонным. При этом заметны своеобразные осцилляции, проявляющиеся на сравнительно больших временных отрезках.

Важной величиной, говорящей о балансе механизмов восполнения и расхода энергии, является индекс вагосимпатического взаимодействия $IV = LF/HF$. Нормой считается $IV \sim 1,5-2$. Если данный коэффициент превышает 2, то это означает, что человек сильно мобилизован. Значения IV , меньшие 1, означают сильное расслабление, отдых. График коэффициента IV как функция времени приводится на рис. 7.

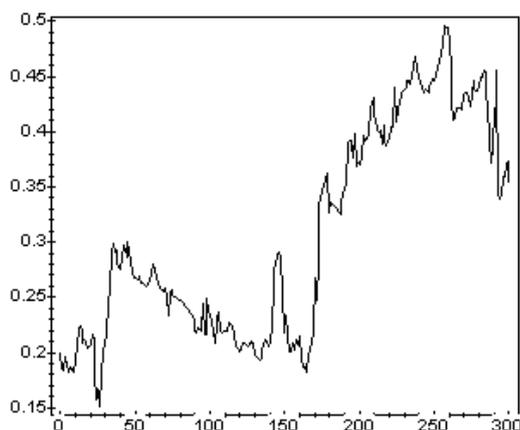
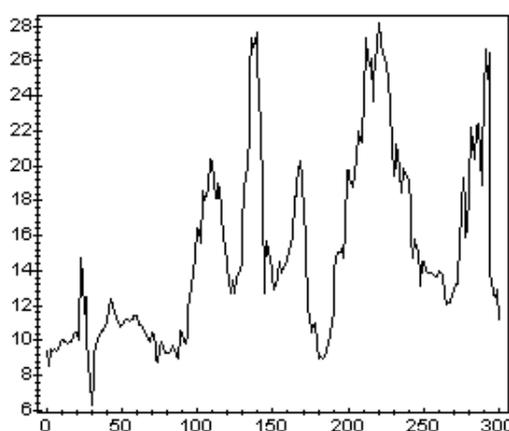


Рис. 7

Коэффициент вагосимпатического взаимодействия как функция времени

Еще одним важным коэффициентом, характеризующим работу вегетативной нервной системы, является индекс централизации $IC = (HF + LF)/VLF$, который говорит о том,



справляется ли эта система с функцией регуляции сердечного ритма или ей на помощь приходит гуморальный механизм регуляции. Оптимальное значение индекса централизации относится к области $IC > 1$. $IC < 1$ означает напряжение в регуляции ритма и функционировании системы. График IC как функция времени показан на рис. 8.

Рис. 8

Индекс централизации как функция времени

Аналогичный характер носят зависимости во времени максимальных значений в спектрах частот, относящихся к различным областям (рис. 9).

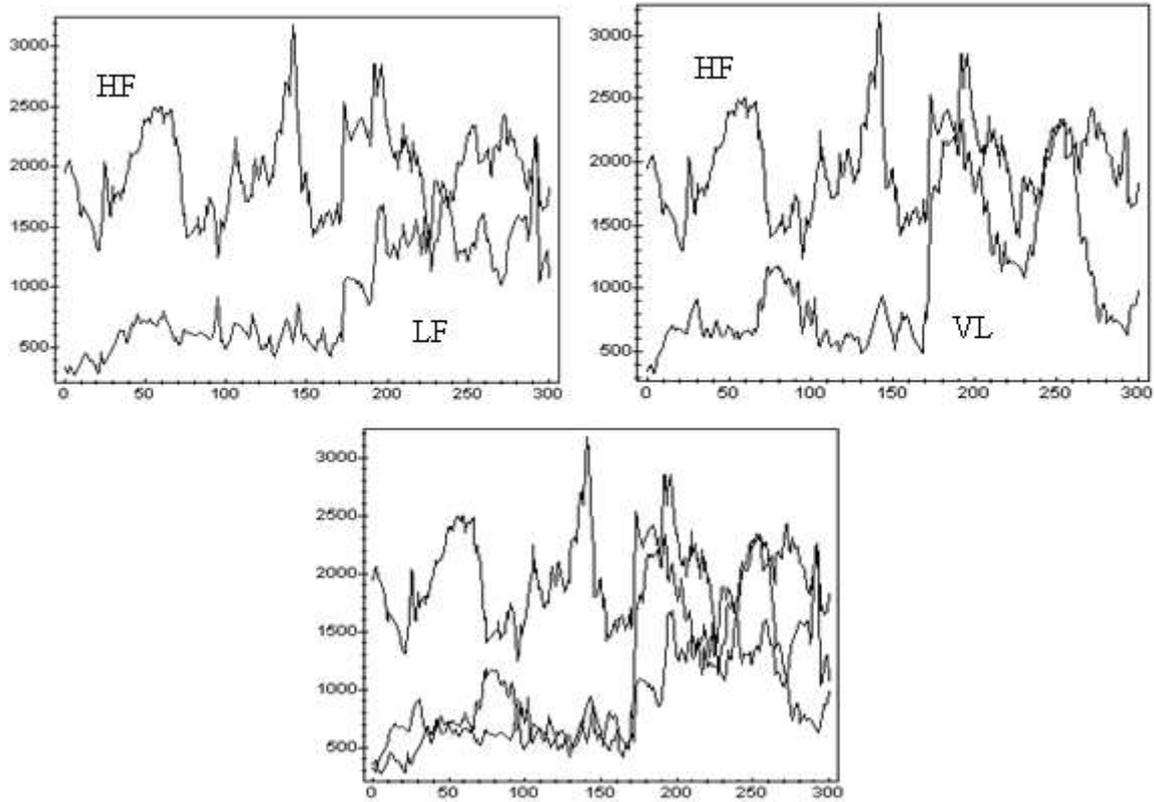


Рис. 9

Значения максимумов частот в различных областях (HF, LF), (HF, VLF), (HF, LF, VLF) как функции времени

Другой вариант спектрально-временной динамики, относящейся к стандартной пятиминутной записи временного ряда кардиоинтервалов, показан на рис. 10 – 12. Здесь также парасимпатический отдел, связанный с расслаблением и отдыхом, преобладает над симпатическим отделом ВНС, однако гуморальный вклад в процесс регуляции сердечным ритмом сравним с симпатическим.

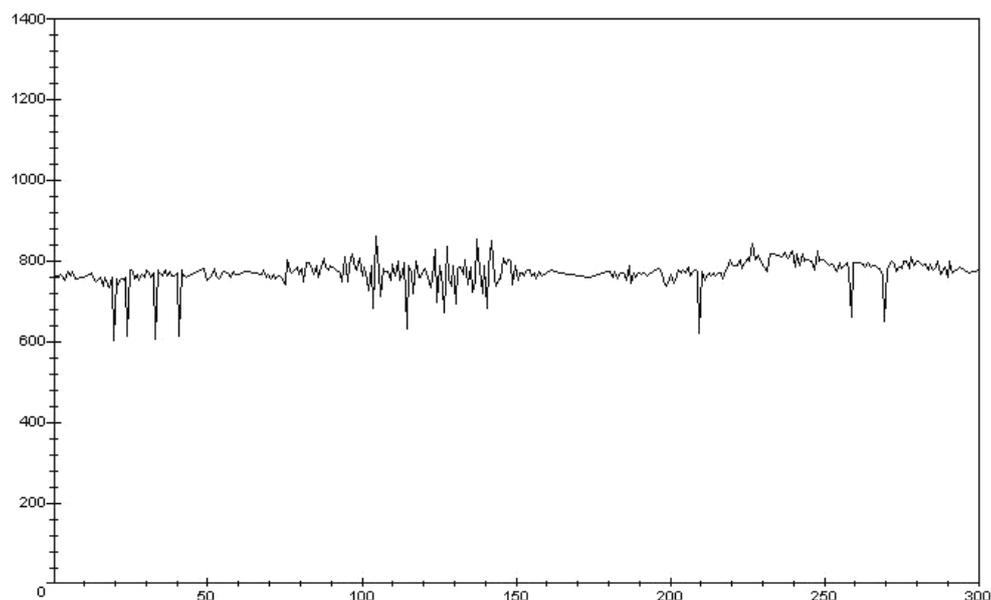


Рис. 10

Другой вариант пятиминутной записи кардиоинтервалов

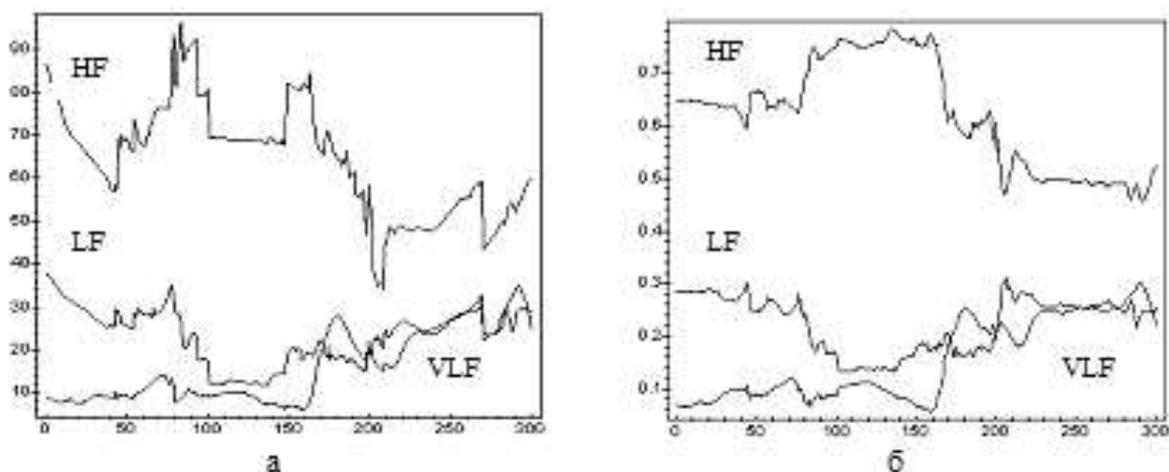


Рис. 11

Спектральные мощности HF, LF, VLF для записи на рис. 10 в абсолютных (а) и относительных (б) единицах

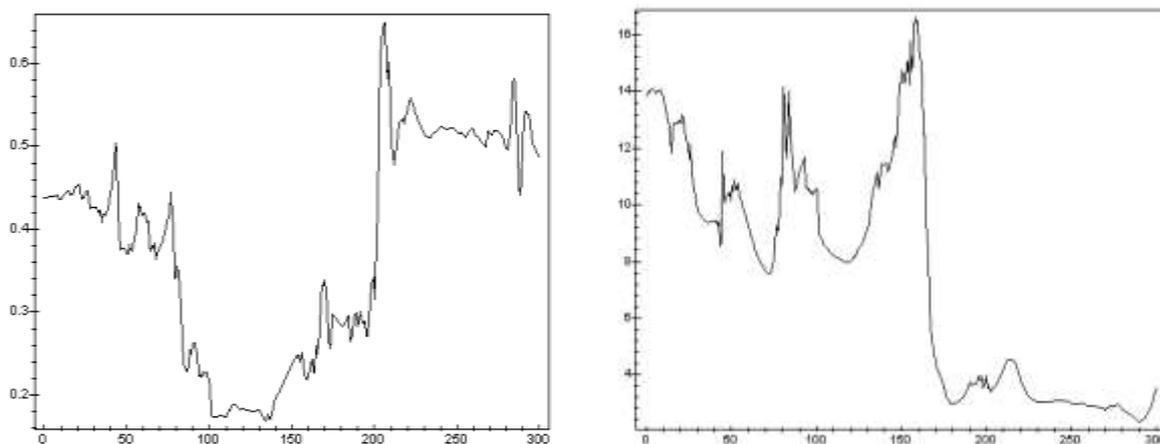


Рис. 12

Индексы вагосимпатического взаимодействия и централизации как функции времени для записи на рис. 10

Заключение

Таким образом, метод спектральных преобразований «оконного типа» позволяет исследовать процессы управления сердечным ритмом во времени. При этом важной является динамика мощностных характеристик, относящихся к различным отделам нервногуморальной регуляции. Представленная методология существенно расширяет возможности метода вариабельности сердечного ритма и может найти дальнейшее применение в донозологической диагностике.

Литература

1. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. – М., Наука, 1984, 221 с.
2. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Оценка адаптационных возможностей организма и риска развития заболеваний. – М., Медицина, 1997, 265 с.
3. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Введение в донозологическую диагностику». - М., Слово, 2008, 220 с.
4. Захаров С.М., Захаров М.С., Знайко Г.Г., Красовский В.Е. Спектральный анализ

кардиоинтервалов в донозологической диагностике. – «Вопросы радиоэлектроники», сер. ЭВТ, 2013, вып. 3, с. 178–188.

5. Соколов С.Ф., Малкина Т.А. Клиническое значение оценки variability ритма сердца. – «Сердце», 2002, №2, с. 72–75.

6. Рябыкина Г.В. Влияние различных факторов на variability ритма у больных артериальной гипертонией. – «Терапевтический архив», 1997, №3, с. 55-58.

7. Серебрякова О.В. Патогенетические механизмы формирования кардиомиопатии при тиреотоксикозе и гипотиреозе: Автореф. диссертации на соиск. уч. степени доктора медицинских наук, Чита, 2008.

8. Актуальные проблемы неврологии и нейрохирургии. Сб. научн. тр. Вып. 13. Под ред. С.А. Лихачева.– Минск., Минсктиппроект, 2010, 224 с.

9. Чуян Е.Н., Бирюкова Е.А., Раваева М.Ю. Физиологические механизмы variability сердечного ритма: Ученые записки Таврического Национального Университета им. В.И. Вернадского. Сер.: Биология, химия, 2008, 21(3), с. 168–189.

10. Бережной В.Н., Захаров М.С., Захаров С.М. Динамика во времени спектральных особенностей сигналов пульсовой волны, полученных методом фотоплетизмографии. – «Биомедицинская радиоэлектроника», 2013, №6, с. 36–43.