

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ INFORMATION TECHNOLOGIES IN BIOMEDICAL SYSTEMS

УДК 57.087:57.023

М. С. Захаров, e-mail: sergei101@mail.ru
Начальник управления ЗАО "Сбербанк—Технологии", г. Москва

Динамика во времени вегетативных показателей на основе компьютерного спектрально-временного анализа ритмограмм сердца

Представлена методология компьютерного спектрально-временного анализа кардиоинтервалов, позволяющая следить за состоянием вегетативной нервной системы (ВНС) человека во времени. Основу предложенной методологии составляет спектральный анализ Фурье "оконного типа". Использование преобразований Фурье данного типа с уменьшенным числом отсчетов дает возможность исследовать нестационарные спектральные свойства ритмограмм сердца. Изучены мощностные спектральные характеристики, относящиеся к различным отделам ВНС. По площадям спектральных кривых, относящихся к выделенным выше областям спектра, можно судить о балансе механизмов расхода и восстановления энергии в организме и адаптационных процессах во времени.

Ключевые слова: фотоплетизмограмма, кардиоинтервалы, ритмограмма, преобразования Фурье "оконного типа"

Введение

Как известно, динамика временных рядов кардиоинтервалов (КИ) составляет основу метода вариабельности сердечного ритма (ВСР), получившего широкое распространение в донозологической диагностике при исследованиях состояний организма на грани нормы и патологии [1–6]. Данный метод начал развиваться еще в 60-е годы в СССР и до сегодняшнего дня активно используется при подготовке космонавтов. Анализ ВСР по сути представляет собой статистический анализ и позволяет проводить оценку регуляторных систем организма, в частности, функционального состояния различных отделов вегетативной нервной системы (ВНС).

С временными свойствами кардиоинтервалов тесно связаны спектральные особенности. Традиционный спектральный анализ Фурье представляет собой инструмент исследования так называемых стационарных случайных процессов. Данный подход означает, что рассматриваемые процессы можно приближенно считать эргодическими. На самом деле допустимость такого предположения довольно трудно обосновать, поскольку живой организм постоянно испытывает процессы адаптации к изменяющимся условиям внешней среды. Действительно, естественным проявлением жизни являются не квазистационарные, а переходные процессы. По-видимому, методологически неверно рассматривать ВСР вне времени. Поскольку сердечный ритм реализуется во времени, то и основные показатели ВНС также необходимо анализировать динамически.

В настоящей работе предложена методология исследования динамических спектрально-временных свойств кардиоинтервалов, позволяющая исследовать вегетативные функции нервной системы и процесс адаптации организма во времени. Показана существенная нестационарность, возникающая в системах управления сердечным ритмом. Исследованы мощностные характеристики процессов, позволяющие установить временную динамику различных отделов ВНС и ответить на вопрос, как происходит процесс адаптации к изменяющимся условиям внешней среды.

Особенности экспериментального снятия ритмограмм методом фотоплетизмографии

Фотоплетизмограммы (ФПГ) в данной работе регистрировались с помощью аппаратно-программного комплекса (АПК) "Биомышь", разработанного компанией "Нейролаб" (Москва) и предназначенного для проведения экспресс-оценки функционального состояния человека. Основу АПК составлял фотоэлектронный датчик, представляющий собой оптоэлектронную пару (ИК светодиод и фотоприемник) (рис. 1).

Сигнал с датчика подавался на селективный усилитель и оцифровывался с частотой дискретизации 1 кГц. Программное обеспечение позволяло проводить не только математическую обработку по методике ВСР, но также анализировать временную форму сигнала ФПГ.

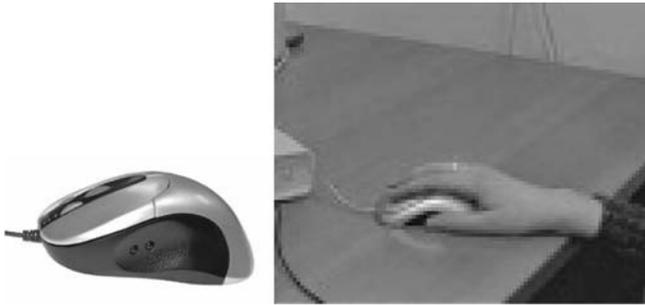


Рис. 1. АПК "Биомышь индивидуальная" (ЗАО Нейролаб) [7]

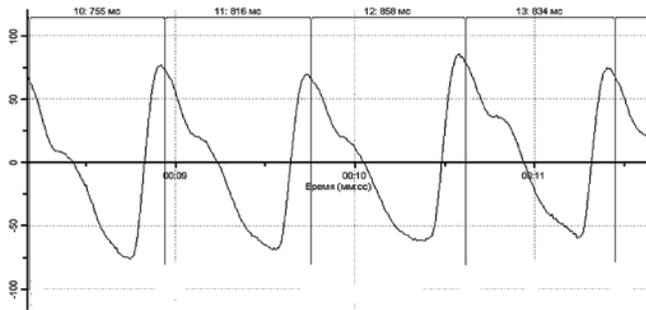


Рис. 2. Временной отрезок сигнала ФПГ, снятый с АПК "Биомышь"

Длительности кардиоинтервалов (мс), соответствующие 100 отсчетам

Номера отсчетов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	828	846	893	875	831	837	830	795	747	755
10	816	858	834	832	863	852	815	810	831	796
20	675	833	858	859	815	812	848	816	762	802
30	856	854	842	831	844	845	811	776	802	782
40	777	791	827	854	844	847	880	884	819	782
50	797	828	809	791	794	765	696	704	726	721
60	749	804	805	784	804	860	852	808	793	834
70	818	819	817	862	854	828	819	827	812	801
80	795	814	837	793	807	820	850	813	822	828
90	821	801	817	821	846	821	837	828	833	809

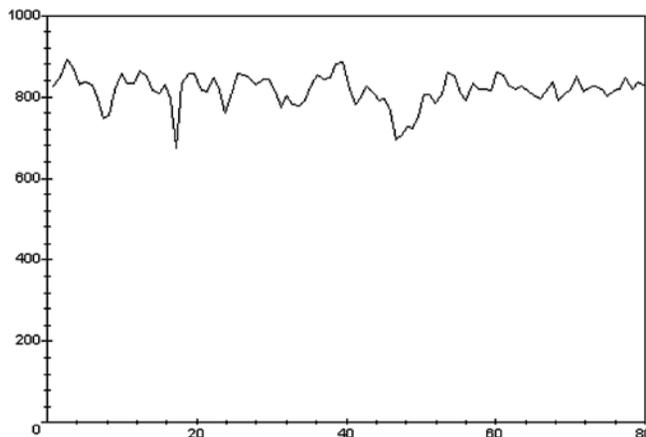


Рис. 3. Ритмограмма (зависимость длительностей кардиоинтервалов в мс, как функция времени, с), записанная по 100 сердечным ритмам. Здесь среднее значение длительности кардиоинтервалов равно $\langle \Delta t_k \rangle = 815,7$ мс (пульс ~ 74 уд/мин)

Временная форма сигнала ФПГ, относящаяся к здоровому пациенту и снятая с датчика АПК "Биомышь", показана на рис. 2.

Длительности временного ряда кардиоинтервалов выделялись из фотоплетизмограммы программным образом по максимумам отсчетов ФПГ и заносились в таблицу. При этом приборная погрешность определения длительности кардиоинтервала составляла ~ 1 мс.

Набор длительностей соответствующих кардиоинтервалов позволяет получить временное их представление или зависимость от текущего времени и построить ритмограмму. Пример таким образом полученной ритмограммы здорового пациента показан на рис. 3, на котором видно, как проявляется синусный характер сердечного ритма.

Компьютерный спектрально-временной анализ ритмограмм на основе преобразования Фурье "оконного" типа

В дальнейшем необходимо отметить, что все вычисления выполнены в среде "Maple 5v4".

Для удобства сравнения различных ритмограмм во времени необходимо их привести к эквидистантному временному интервалу. Это можно сделать путем сплайновой кубической интерполяции.

Исходный Фурье спектр будем вычислять по формуле

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

$$P(\nu) = \frac{|F(\nu)|^2}{2T}, \quad (2)$$

где $P(\nu)$ — спектральная плотность мощности; T — временной интервал (с), соответствующий 100 сердечным циклам ($N = 100$); Δt_k — длительности кардиоинтервалов (мс), t_k — текущее время (с):

$$T = \sum_{k=1}^N \Delta t_k; \quad (3)$$

$$t_k = \sum_{l=1}^k \Delta t_l. \quad (4)$$

Для спектра Фурье, вычисленного по эквидистантным временным отсчетам, будем использовать следующее выражение [8]:

$$F(\nu) = \sum_{k=-N/2}^{N/2} \exp(2\pi i \nu t_{k+N/2}) (x_{k+N/2} - \langle x \rangle) \Delta t, \quad (5)$$

где x_k — временные отсчеты на интервалах интерполяции $t_k = k\Delta t = kT/N$ ($k = 0, 1, \dots, N$; $T = 80$ с; $N = 100$).

Для сравнения на рис. 4 представлены спектрограммы Фурье исходного массива кардиоинтервалов и массива, полученного интерполяцией на эквидистантных временных отрезках.

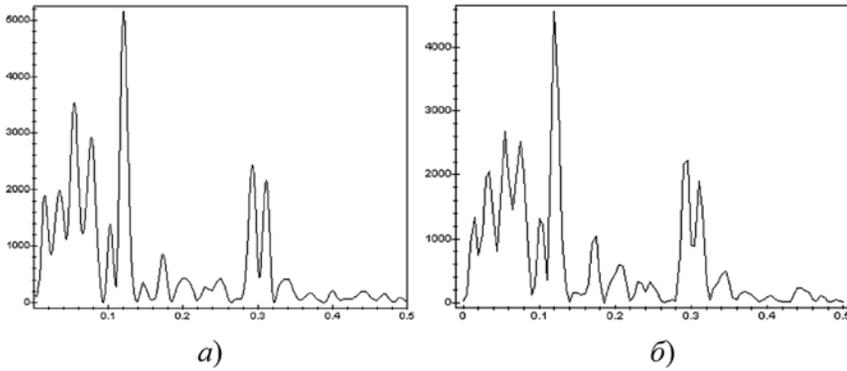


Рис. 4. Фурье-спектры ритмограмм исходной (а) и полученной сплайновой кубической интерполяцией (б). Спектральное разрешение $\sim 0,013$ Гц. По оси абсцисс — частота, Гц; по оси ординат — спектральная плотность мощности, $(\text{мс})^2/\text{Гц}$

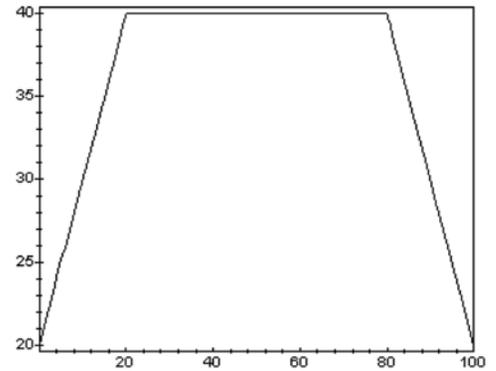


Рис. 5. Вид функции $W(n)$, описывающей зависимость числа временных точек суммирования в выражении (6) от времени ($N = 100$, $M = 40$)

Основная идея использования спектров "оконного" типа состоит в сознательном уменьшении числа временных точек N , необходимых для построения спектра, до величины $M < N$ [8]. При этом, естественно, уменьшается спектральное разрешение (в N/M число раз), но зато появляется возможность анализа спектрограмм во времени. Тогда выражение (5) видоизменится:

$$F(v, t_k) = \sum_{k=-M/2}^{M/2} \exp(2\pi i v t_{k+m}) \times (x_{k+m} - \langle x \rangle) \Delta t. \quad (6)$$

Пределы суммирования в выражении (6) справедливы для временных точек $M/2 < k < N - M/2$. Таким образом, возникает возможность временного анализа ритмограмм в интервале времен $(N - M)\Delta t$. Формально можно расширить временной интервал до полного (от 0 до $N\Delta t = T$) введением функции $W(n)$, описывающей зависимость числа временных точек от времени. Ее вид для $N = 100$ и $M = 40$ представлен на рис. 5.

Отметим, что в последнее время активно развивается направление, связанное с использованием вейвлет-преобразований. В качестве примера можно привести работу [9], в которой исследовались вейвлет-спектры кардиоинтервалов. Помимо неоднозначного выбора базиса спектры такого типа обладают отличительным свойством зависимости спектрального разрешения от частоты. Для наших целей более удобным оказалось использование "оконного" преобразования Фурье с независимым спектральным разрешением.

Пример спектров "оконного" типа, рассчитанных в первые пять секунд, показан на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что динамика спектров проявляется даже на небольших временных интервалах.

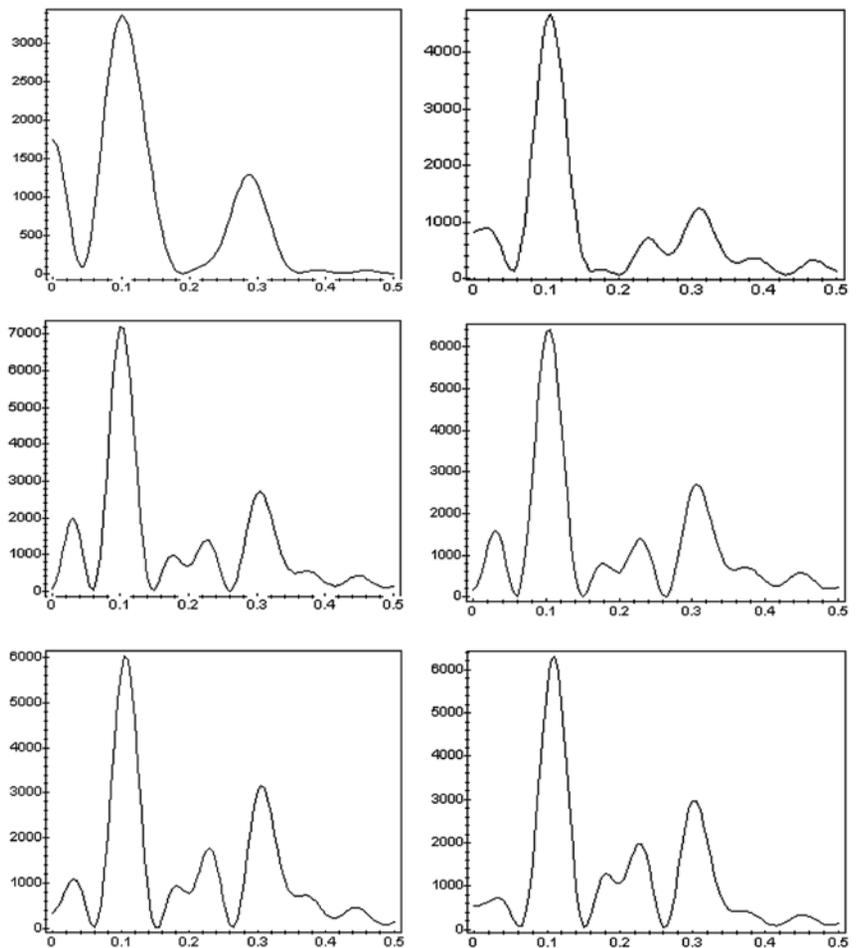


Рис. 6. Динамика спектра Фурье, рассчитанного по 40 из 100 временным отсчетам в течение первых пяти секунд (время увеличивается слева \rightarrow направо \rightarrow вниз). Спектральное разрешение ~ 0.06 Гц. По оси абсцисс — частота, Гц; по оси ординат — спектральная плотность мощности, $(\text{мс})^2/\text{Гц}$

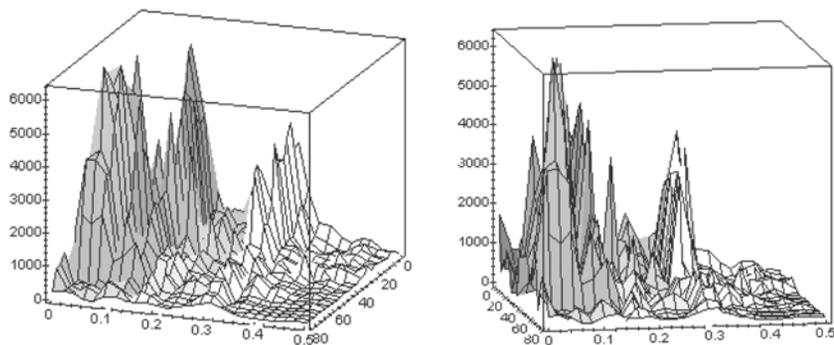


Рис. 7. Трехмерное представление спектров Фурье во времени в различных ракурсах. Ось 0–0.5 относится к частоте, Гц; 0–80 — ко времени, с

Здесь же приводится трехмерный вид спектров в различных ракурсах (рис. 7).

Исследование адапционных процессов организма методом спектрально-временного анализа ритмограмм сердца

Исследование процессов адаптации организма человека и животных является одним из фундаментальных направлений современной биологии и физиологии. Адаптационная деятельность обеспечивает не только выживание и эволюционное развитие, но и повседневное приспособление к изменениям окружающей среды. Г. Селье описывает фазовый характер адапционных реакций и обосновывает ведущую роль истощения регуляторных систем в развитии большинства патологических состояний и заболеваний. При этом система кровообращения может рассматриваться как чувствительный индикатор адапционных реакций организма в целом.

Определяющую роль в процессах адаптации и поддержании постоянства внутренней среды или установлении гомеостаза при различных воздействиях на организм играет вегетативная нервная система и взаимодействие ее отдельных систем. Как известно, симпатический отдел ВНС отвечает за мобилизацию внутренних ресурсов организма, за повышение энергообразования. Парасимпатический отдел ВНС отвечает за расслабление, отдых, сохранение и накопление жизненной энергии.

Применение спектрального анализа позволяет количественно оценить различные частотные области ритма сердца и наглядно представить соотношения разных составляющих, отражающих активность определенных отделов регуляторного механизма ВНС. Анализ спектральной плотности мощности колебаний дает информацию о распределении мощности в зависимости от частоты.

При спектральном анализе большое значение имеет объем анализируемой информации. При коротких записях (5 мин и менее) выделяют три главных спектральных области [4, 5]:

HF (High Frequency) — высокие частоты. Их частотный интервал составляет 0,15...0,4 Гц, а длительность — 2,5...6,6 с;

LF (Low Frequency) — низкие частоты. Частоты данной области относятся к интервалу 0,04...0,15 Гц, а длительности — 6,6...25,0 с;

VLF (Very Low Frequency) — очень низкие частоты или медленные волны. Их частоты — 0,015...0,04 Гц, а длительности — 25...66 с;

TF (Total Power TF = HF + LF + VLF) — полная, или суммарная, мощность во всех спектральных диапазонах.

До сих пор еще идут споры по поводу определения биологического значения и точных границ этих диапазонов, но в большинстве случаев исследователи сходятся на следующем понимании.

HF-диапазон отражает процессы парасимпатической активности, LF-диапазон связан с симпатической активностью, VLF-диапазон отражает гуморально-метаболические влияния. Гуморальная регуляция — один из эволюционно ранних механизмов регуляции процессов жизнедеятельности в организме, осуществляемый через жидкие среды организма (кровь, лимфу, тканевую жидкость) с помощью гормонов, выделяемых клетками, органами, тканями. У высокоразвитых животных и человека гуморальная регуляция подчинена нервной регуляции и составляет совместно с ней единую систему нейрогуморальной регуляции.

По площадям спектральных кривых, относящихся к выделенным выше областям спектра, судят о балансе механизмов расхода и восстановления энергии в организме. При выполнении неравенства $HF > LF$ происходит преобладание процесса восстановления энергетического потенциала. Неравенство $LF > HF$ означает преобладание процесса истощения энергетического потенциала. Нормой считается соотношение LF/HF (индекс вагосимпатического взаимодействия) $\sim 1,5...2$. Если данный коэффициент превышает 2, то это свидетельствует о том, что человек сильно мобилизован. Когда мобилизация происходит в момент выполнения какой-либо работы (нагрузки), то это нормально, а если человек все время находится во "взвинченном" состоянии, то ничего хорошего в этом нет. Другая крайность — сильное расслабление, когда соотношение $LF/HF < 1$. Это совершенно естественно для человека, который устал, и его организм переключился в режим отдыха.

Мощности выделенных областей спектра в абсолютных единицах ($мс^2$) и относительных HF/TF , LF/TF , VLF/TF (где $TF = HF + LF + VLF$) как функции времени показаны на рис. 8. Следует отметить возникающие во времени осцилляции, носящие не совсем регулярный характер и возникающие, по-видимому, из-за дискретного характера изменений в спектрах. Кроме того, из рис. 8, б видно, как относительные симпатическая и парасимпатическая регуляторные системы "работают" со временем в противофазе.

На рис. 8 можно проследить, как происходит адаптация сердечно-сосудистой системы организма в процессе снятия ФПГ. На участке 0...30 с парасимпатическая и симпатическая активности регуляторного механизма сбалансированы и находятся в относительном равновесии. Далее на участке 30...65 с возрастает роль гуморальных процессов и процессов активации симпатического звена регуляции. И лишь в промежутке времени 65...80 с наступает релаксация организма.

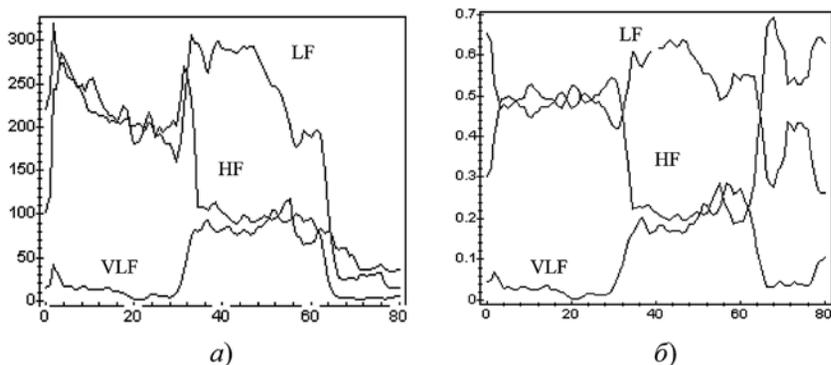


Рис. 8. Спектральные мощности как функции времени, относящиеся к областям HF, LF, VLF в абсолютных (mW^2) — (а) и относительных единицах (в отношении к TF) — (б)

Централизация управления ритмом характеризуется индексом централизации IC, который вычисляется по формуле $IC = (HF + LF)/VLF$. Данный индекс возрастает при усилении автономных влияний. Суть его сводится к тому, что он отвечает на вопрос: справляется ли вегетативная нервная система (LF, HF) с функцией управления ритмом сердца, либо ей на помощь приходит сосудодвигательный (вазомоторный) центр и гуморальные механизмы регуляции (VLF). Неравенство $IC > 1$ означает, что процесс регуляции физиологических функций характеризуется преобладанием автономных влияний в управлении, отражая оптимальное функционирование системы. Если $IC < 1$, то процесс регуляции физиологических функций характеризуется преобладанием центральных влияний в управлении, отражая напряжение функционирования системы. График IC как функции времени показан на рис. 9. Здесь же приводится график вагосимпатического взаимодействия [5].

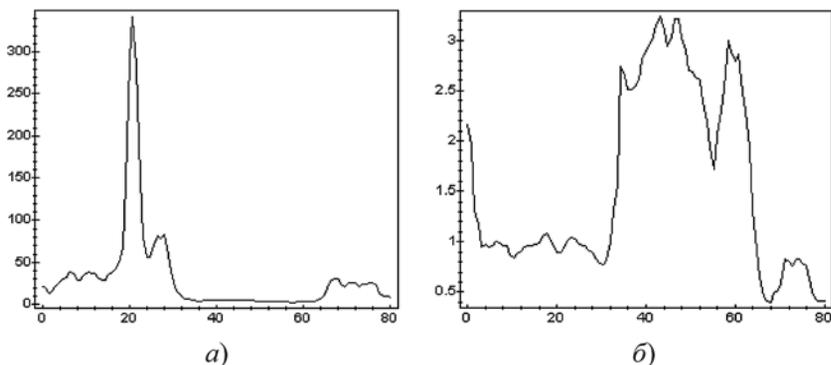


Рис. 9. Индексы централизации (а) и вагосимпатического взаимодействия (б) как функции времени, с

Представляет интерес также анализ максимального значения гармоники в той или иной области спектра [10]. На рис. 10 показаны зависимости во времени максимальной гармоники в областях HF (нижняя кривая) и LF (верхняя кривая) (а), а также в областях HF и VLF (б).

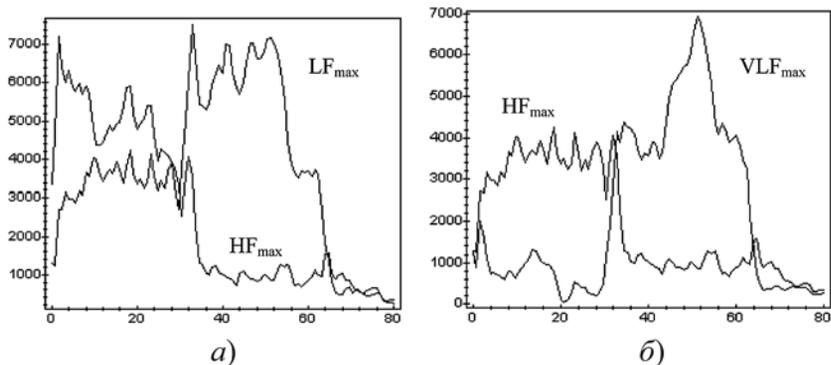


Рис. 10. Значения максимумов частот в различных областях (HF, LF) — (а) и (HF, VLF) — (б) как функции времени, с

Из графиков, изображенных на рис. 10, а, следует, что парасимпатическая система регуляции ритма сердца незначительно преобладает над симпатической на отрезке времени 0...30 с, но имеются и моменты времени, когда, наоборот, симпатическая преобладает над парасимпатической (моменты времени ~ от 30 до 65 с). Точно также из рис. 10, б следует, что парасимпатическая система главенствует во времени над системой VLF на отрезке 0...30 с, но также имеются моменты времени (область от 30 до 65 с) с обратным влиянием. Особенно это становится заметным тогда, когда максимумы различных спектральных областей приводятся на одном графике (рис. 11).

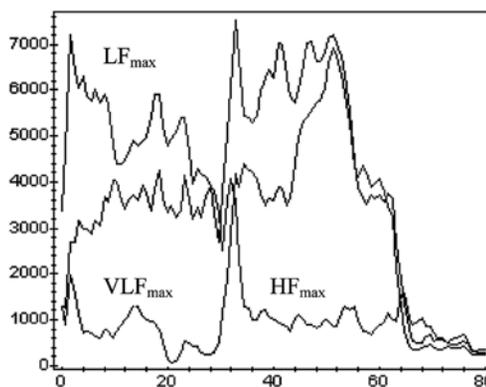


Рис. 11. Значения максимумов гармоник, относящихся к областям спектра HF, LF и VLF как функции времени, с

Результаты приведенного динамического спектрального анализа ритмограмм во времени свидетельствуют о существенной нестационарности механизмов регуляторного влияния на сердечный ритм. Дискретные изменения, возникающие в спектрах во времени, приводят к возникновению своеобразных осцилляций, носящих не вполне регулярный характер. Аналогичным образом проявляются зависимости во времени мощностных характеристик, относящихся к различным отделам нервногуморальной регуляции. Представленная методология позволяет проследить за тем, как происходит процесс адаптации организма во времени. В дальнейшем представляет интерес исследование динамики спектров и нестационарных процессов регуляции нервной системы на более протяженных временных отрезках, в частности, стандартном пятиминутном, а также при холтеровском мониторинге. Рассмотренный спектрально-временной анализ ритмограмм расширяет возможности использования метода ВСП в клинической практике и в донозологической диагностике.

Автор выражает признательность проф. Шилкову В. В. за полезные обсуждения полученных результатов.

1. **Баевский Р. М.** Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии. М.: Медицина, 1979. 205 с.
2. **Баевский Р. М., Берсенева А. П.** Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М.: Медицина, 1997. 265 с.
3. **Баевский Р. М., Берсенева А. П.** Введение в донозологическую диагностику. М.: Слово, 2008. 220 с.
4. **Вариабельность** сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования (Рекомендации Рабочей группы Европейского кардиологического общества и Северо-Американского общества стимуляции и электрофизиологии) // Вестник аритмологии. 1999. № 11. С. 52—77.
5. **Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В.** и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем. (Методические рекомендации) // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65—87.
6. **Михайлов В. М.** Variability ритма сердца: опыт практического применения метода. Изд. 2-е. Иваново: Иван. гос. мед. академия, 2002. 290 с.
7. **ЗАО "Нейролаб"**. Биомышь визуальная. URL: www.neurolab.ru/downloads/personal/biomouse_personal_booklet.pdf
8. **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.
9. **Захаров С. М.** Вейвлет-анализ кардиоинтервалов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 11. С. 43—48.
10. **Захаров М. С.** Временной спектральный анализ кардиоинтервалов // Сб. трудов XIV Международной заочной научно-практической конференции "Научная дискуссия: инновации в современном мире" (2 июля 2013 г.). М.: Междунар. центр науки и образования, 2013. С. 6—11.

M. S. Zakharov, e-mail: sergei101@mail.ru

Head of Department of CJSC "Sberbank—Technology", Moscow

Dynamics in Time Vegetative Indices Based on Computer Spectral Analysis of Heart Rhythmograms

The methodology of computing spectral temporal analysis of cardio intervals, which allows to monitor the state of the autonomic nervous system (ANS) a man in time is presented. The basis of the proposed methodology is the Fourier spectral analysis "window-type". Using Fourier transforms of this type with a reduced number of samples makes it possible to investigate the spectral properties of non-stationary cardio intervals. Rhythmogram heart rate was recorded by photoplethysmography at one hundred counts with using an optoelectronic sensor built in the computer mouse. For ease of comparison of various rhythmograms in time they all led to equidistant time interval. This procedure was carried out using a spline cubic interpolation. By singling out certain frequency ranges (HF — high frequency, LF — low frequency and VLF — very low frequency) the dynamics of the ANS of a healthy patient in time is studied. Power spectra characteristics relating to the various departments VNS is investigated. By area of spectral curves pertaining to selected regions of above spectrum, one can judge the balance of flow mechanisms and restore the body's energy and adaptation processes in time.

Keywords: photoplethysmogram, cardio interval, rhythmogram, "windowed" Fourier transforms

References

1. **Baevskiy R. M.** *Prognozirovanie sostoyaniy na grani normy i patologii*. M.: Meditsina, 2009. 205 p.
2. **Baevskiy R. M., Berseneva A. P.** *Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostey organizma i risk razvitiya zabolevaniy*. M.: Meditsina, 1997. 265 p.
3. **Baevskiy R. M., Berseneva A. P.** *Vvedenie v donozologicheskuyu diagnostiku*. M.: Slovo, 2008. 220 p.
4. **Variabel'nost'** serdechnogo ritma. Standarty lzmereniya, fiziologicheskoy interpretatsii i klinicheskogo ispol'zovaniya (Rekomendatsii Rabochey gruppy Evropeyskogo kardiologicheskogo obshchestva i Severo-Amerikanskogo obshchestva stimulyatsii i elektroфизиологии). *Vestnik Aritmologii*. 1999. N. 11. P. 52—77.
5. **Baevskiy R. M., Ivanov G. G., Chireykin L. V.** i dr. Analiz variabel'nosti serdechnogo ritma pri ispol'zovanii razlichnykh elektrokardiograficheskikh sistem. (Metodicheskie rekomendatsii). *Vestnik Aritmologii*. 2001. N. 24. P. 65—87.
6. **Mikhailov V. M.** Variabel'nost' ritma serdtsa: opyt prakticheskogo primeneniya metoda. Izd. 2-e. Ivanovo: Ivan. Gos. med. akademiya, 2002. 290 p.
7. **ЗАО Neyrolab**. "Biomyshe' individual'naya". URL: www.neurolab.ru/downloads/personal/biomouse_personal_booklet.pdf
8. **Berezhnoy V. N., Zakharov M. S., Zakharov S. M.** Dinamika vo vremeni spektral'nykh osobennostey signalov pul'sovoy volny, poluchennykh metodom fotopletizmografii. *Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2013. N. 6. P. 36—43.
9. **Zakharov S. M.** Veyvlet-analiz kardiointervalov. *Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2012. N. 11. P. 43—48.
10. **Zakharov M. S.** Vremennoy spektral'nyy analiz kardiointervalov. Sb. trudov XIV Mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnaya diskussiya: innovatsii v sovremennom mire" (2 iyulya 2013 g.). M.: Mezhdunarodnyy tsentr nauki i obrazovaniya, 2013. P. 6—11.