

Р А З Д Е Л I

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ
В КЛИНИКО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ.**

VERY LOW FREQUENCY ВАРИАБЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА

*Флейшман А.Н., Кораблина Т.В. *, Дорошенко В.А. *, Петровский С.А.
«Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и
профессиональных заболеваний»
Сибирский Государственный индустриальный университет**

Резюме

Статья посвящена анализу трехмерной структуры спектрального VLF диапазона variability ритма сердца. Ранее проведенный анализ 50 и 100 сек. колебаний отразил новые адаптивные свойства этого диапазона в условиях функциональных проб малой интенсивности (sevens test, гипервентиляция) и ортостаза. Дальнейшее изучение сложной структуры VLF потребовало совершенствования методики исследования. Расширение диапазона анализируемых колебаний, включая колебания с периодом в 200 сек. потребовали удлинения выборки регистрации ВРС до 15 минут. Подобные изменения отразились как в способах интерпретации, так и в результатах анализа диапазона очень медленных колебаний и собственно структуры ВРС. Для оценки новой структуры ВРС использованы непрерывный вейвлет анализ и преобразования Гильберта-Хуанга. Найдены различия чувствительности и поведения отдельных компонентов VLF в переходных процессах ортостаза и их взаимоотношений.

Ключевые слова: Very Low Frequency, variability ритма сердца, вейвлет анализ, преобразования Гильберта-Хуанга.

VERY LOW FREQUENCY OF HRV: A NEW LOOK AT THE STRUCTURE AND PROPERTIES

*Fleishman A. N., Korablina T.V. *, Doroshenko V.A., Petrovski S.A.
Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational diseases,
Novokuznetsk, Russia
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Summary

This article analyzes the three-dimensional structure of the very low frequency (VLF) spectral range of heart rate variability (HRV). Previously analyzed 50 and 100 sec. oscillations reflected the new adaptive properties of this range in terms of functional tests of low intensity (sevens test, hyperventilation) and orthostatic test. Further study of the complex VLF structure demanded some improvement of the research methodology. The extension of the range of the analyzed oscillations, including the oscillations with a 200 sec. period required elongating of the sample of the HRV registration up to 15 minutes. This change had been reflected both in their methods of interpretation and the analysis of the range of very slow oscillations and the structure of HRV. Continuous wavelet analysis and Hilbert-Huang transform were used for evaluation of the new HRV structure. The differences in the sensitivity and behavior in the individual components of VLF in the transient processes in orthostasis and their relationships were revealed.

Key words: Very Low frequency, heart rate variability, wavelet analysis, Hilbert-Huang transform

Введение

В 1996 году были опубликованы международные рекомендации «Вариабельность ритма сердца. Стандарты измерений, физиологическая интерпретация и клиническое использование» [1]. Эти рекомендации явились итогом предшествующих 20 лет исследований и накопленного опыта в клинике. Было рекомендовано в спектральном анализе ВРС использовать четыре частотных диапазона: HF (0,15 – 0,45Гц) – отражающую парасимпатическую активность вегетативной нервной системы, LF (0,05 – 0,15Гц) – отражающую преимущественно симпатическую ветвь барорецепторного контроля. VLF (0,05 – 0,005Гц) – имеет разнообразную функциональную значимость. Многие исследователи отмечали зависимость данного диапазона от парасимпатической активности, участия системы ренин-ангиотензин, эндокринно-метаболических изменений. Важность энергетики этого диапазона отмечена кардиологами в прогнозе выживания после инфаркта – миокарда [2]. Взаимосвязь симпатoadреналовой активности (LF и HF) с 50 и 100 сек ритмами была изучена в работах наших исследований [3, 4]. В этих работах нами исследовались только 50 и 100 сек. колебания из-за относительно коротких реализаций. Для расширения оценки диапазона VLF до 200 сек. колебаний было удлинено время регистрации ВРС до 15 мин., что позволило более точно оценить диапазон VLF не только в области 50 и 100 сек. колебаний, но и 200 сек. колебаний.

Однако удлинение выборки значительно изменило технические условия анализа и затруднило оценку анализа взаимосвязи отдельных компонентов VLF (200, 100 и 50 колебаний) с диапазонами более высоких частот. Подобные затруднения рассмотрены в статье Porta et al [5] в марте 2015 года в журнале *Frontier in physiology*. Авторы указывают на присутствие двух различных типов нелинейной динамики ВРС, характеризующимися различными временными шкалами. Эта проблема затрудняет экстраполировать симпатовагальный подход к новой структуре ВРС. В связи с этим в данной работе мы ограничимся анализом преимущественно задачами выделения трехкомпонентной структуры VLF и ее динамики в условиях ортостаза.

Фактически, данное исследование является продолжением работ опубликованных в журналах ПНД и в Бюллетени Сибирской Медицины. Можно предположить, что в условиях ортостатической нагрузки различия в реакциях на ортостаз между 200 и 100 сек. ритмами могут быть достаточно сильными, что и отражается в суммарных показателях VLF на коротких записях. Исследованы нелинейные взаимосвязи между 200 и 50 сек ритмами также как и между 200 и 100 сек. ритмами взаимосвязи являются нелинейными.

Цели и задачи работы

Усовершенствовать методику исследования трехкомпонентного спектра VLF. Оценить динамику изменения и взаимосвязь между компонентами VLF на основе изменений на ортостатическую пробу.

Материал и методы

В результате эксперимента были собраны данные 21 человека (10 девушек и 11 юношей в возрасте от 18 до 23 лет) без нарушения здоровья. Исследование для каждого испытуемого проводилось в три этапа (запись каждого этапа длилась в течение 15-20 минут):

– первая запись сердечных ритмов (исходное состояние) производилась в покое, пациент лежал, не разговаривая, дышал в обычном ритме, до и после записи измерялось артериальное давление и пульс;

– вторая запись сердечных ритмов производилась в вертикальном положении. До и после записи измерялось артериальное давление и пульс;

– третья запись сердечных ритмов осуществлялась так же, как и на первом этапе с измерением артериального давления и пульса.

В результате для каждого человека было получено три ряда данных с числом R-R интервалов не менее 1024 значений, из которых с помощью метода Гильберта - Хуанга были выделены последовательности мгновенных значений квази мощности спектра Гильберта для частотных областей, соответствующих 200, 100 и 50 секундным ритмам.

При исследовании особенностей компонент спектра определены пять частотных областей (рисунок 3 и 4):

- 1 область 200 секундных ритмов [0,003; 0,007) Гц;
- 2 область 100 секундных ритмов [0,007; 0,015) Гц;
- 3 область 50 секундных ритмов [0,015; 0,04) Гц;
- 4 область 10 секундных ритмов [0,04; 0,15) Гц;
- 5 область высоких частот (HF) свыше 0,15 Гц.

Графическое представление пяти частотных областей спектра представлено на рисунке 1. Сложная структура спектра частотной области VLF хорошо визуализируется как при анализе с помощью преобразования Гильберта-Хуанга, так и с помощью вейвлет-преобразования (рисунки 1, 2) [3].

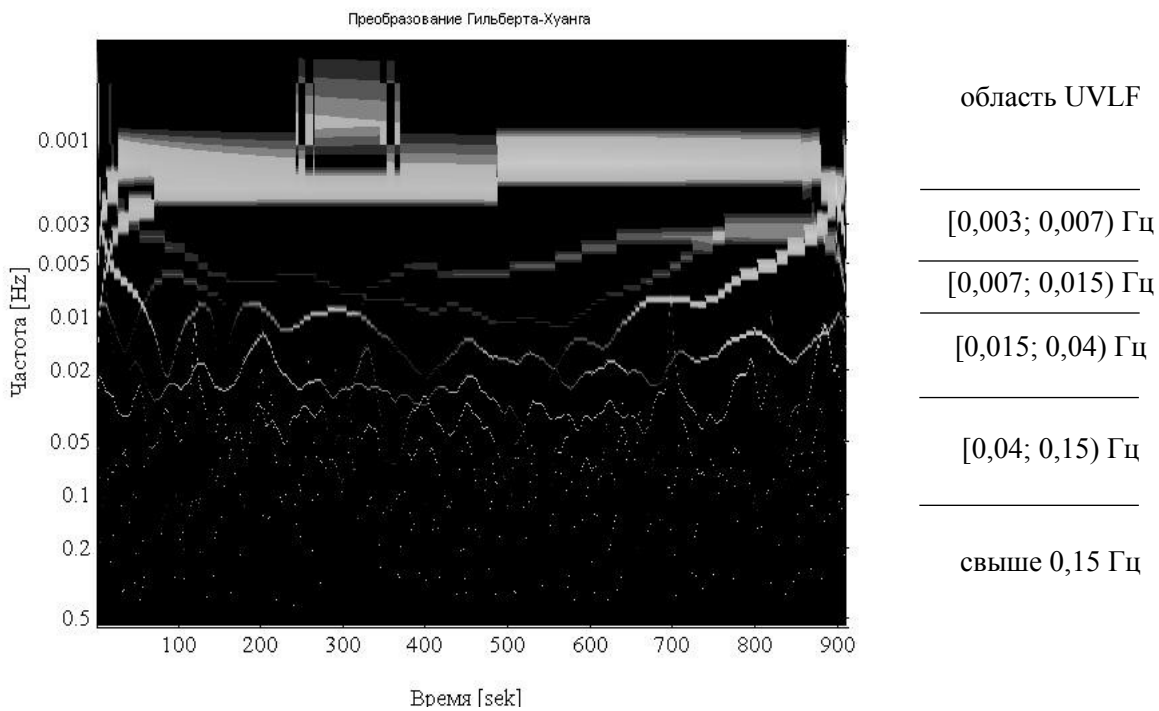


Рисунок 1 – Спектральная структура ВРС с выделенными областями

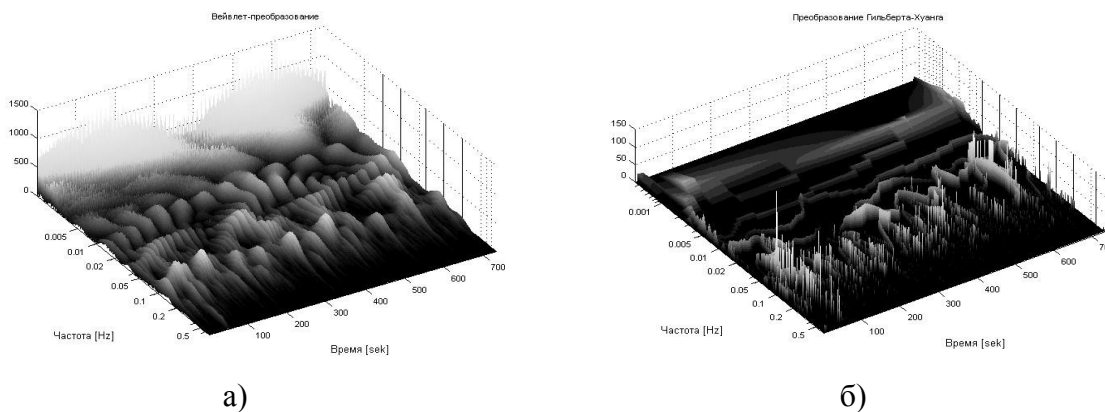


Рисунок 2 – Спектр ВРС, рассчитанный с помощью а) вейвлет-преобразования; б) преобразования Гильберта-Хуанга

Математический анализ

Возникающие в системе колебательные процессы могут отражать состояние самой системы, а также характер протекания различных процессов в ней. Однако определение необходимых информативных признаков колебаний является весьма сложной задачей. Это прежде всего связано с выбором методов обработки сигналов, учитывающих их свойства и структуру. В большинстве случаев для этих целей используются методы спектрального анализа, основанные на дискретном преобразовании Фурье, имеющие ряд ограничений: исследуемая система должна быть линейной, а исследуемый сигнал стационарным. Частично указанные проблемы можно решить путем использования оконных преобразований Фурье [6].

Применение вейвлет-анализа существенно расширяет возможности исследования сложных нелинейных и нестационарных процессов, позволяя детально анализировать их структуру в частотно-временном представлении. Другим эффективным методом частотно-временного анализа является преобразование Гильберта-Хуанга (Hilbert-Huang transformation, ННТ), которое не требует априорного функционального базиса. Базисные функции получают непосредственно из самих исходных данных путем разложения на отдельные компоненты, получившие название эмпирические моды (EMD – empirical mode decomposition). Далее строится гильбертов спектр, позволяющий выявить частотно-временные особенности исследуемого сигнала [7].

Тогда исходный сигнал $x(t)$, разложенный на набор компонент, можно представить, как

$$x(t) = \sum_{k=1}^K c_k(t) + r(t), \quad (1)$$

где $c_k(t)$ – k -ая мода;

$r(t)$ – остаток;

K – количество эмпирических мод, которое устанавливается в ходе вычислений.

Алгоритм определения эмпирических мод состоит из следующих шагов:

1. В сигнале $x(t)$ находятся все локальные максимумы и минимумы.
2. С помощью, например, кубических сплайнов вычисляются огибающие, отдельно по значениям локальных максимумов $E_{max}(t)$ и отдельно по значениям локальных минимумов $E_{min}(t)$.
3. Рассчитываются средние значения между верхней и нижней огибающими:

$$m_1(t) = \frac{1}{2}(E_{max}(t) + E_{min}(t)), \quad (2)$$

4. Находится разность между сигналом $x(t)$ и функцией $m_1(t)$, которую принимают за первую функцию $h_1(t) = x(t) - m_1(t)$.

5. Повторяются шаги 1 и 2, взяв вместо исходного сигнала $x(t)$ функцию $h_1(t)$: $h_2(t) = h_1(t) - m_2(t)$. Последующие итерации выполняются аналогично и последовательно находятся функции $h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_k(t)$. С увеличением k функции $h_k(t)$ и $m_k(t)$ становятся все более гладкими. Остановка итерационного процесса осуществляется в соответствии со значением выбранного критерия. На практике чаще всего достаточно 6-8 итераций. Последнее значение $h_k(t)$ итераций принимается за наиболее высокочастотную функцию $c_1(t) = h_k(t)$ (первую моду) семейства IMF, которая непосредственно входит в состав исходного сигнала $x(t)$.

6. Высокочастотная функция IMF вычитается из исходного сигнала $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$. Функция $r_1(t)$ обрабатывается как исходный сигнал $x(t)$ по аналогичной методике с нахождением второй функции IMF – $c_2(t)$, после чего процесс продолжается.

Таким образом, получается декомпозиция сигнала:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K c_k(t) + r_K(t), \quad (3)$$

где $c_k(t)$ – k -ая мода;

$r_K(t)$ – остаток на последнем этапе декомпозиции.

Для каждой IMF находится преобразование Гильберта:

$$H[m_i(t)] = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{m_i(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (4)$$

где PV – главное значение интеграла.

Это приводит к аналитическому сигналу:

$$z_i(t) = m_i(t) + jH[m_i(t)] = a_i(t) \cdot e^{j\theta_i(t)},$$

$$a_i(t) = \sqrt{m_i^2(t) + H^2 m_i(t)}, \quad \theta_i(t) = \arctg \left[\frac{H[m_i(t)]}{m_i(t)} \right], \quad (5)$$

$a_i(t)$ – амплитуда сигнала в момент t ; $\theta_i(t)$ – фаза сигнала в момент t .

Мгновенная частота может быть вычислена по формуле:

$$\omega = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (6)$$

После выполнения преобразования Гильберта на каждой компоненте IMF первоначальные данные могут быть выражены в следующей форме:

$$x(t) = RE \left\{ \sum_{i=1}^K a_i(t) \exp \left[j \int \omega_i(t) dt \right] \right\}. \quad (7)$$

Уравнение (7) также позволяет представить амплитуду и мгновенную частоту как функцию времени в трехмерном пространстве. Это частотно-временное распределение амплитуды называется амплитудным спектром Гильберта $H(\omega, t)$.

На практике спектр Гильберта представляет собой частотно-временное распределение, как матрица, наименования строк которой соответствуют дискретным значениям частоты, столбцы – дискретным значениям времени, а значения, находящиеся в ячейке таблицы, – это амплитуда.

Одной из характеристик сигнала является маргинальный спектр мощности, определяемый как

$$S(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt, \quad (8)$$

T – длительность анализируемого сигнала.

Он является мерой мощности, соответствующей каждому значению мгновенной частоты. В некотором смысле маргинальный спектр можно рассматривать как аналог частотного спектра Фурье для нестационарных сигналов.

На рисунке 3 приведены спектр мощности Фурье и маргинальный спектр ряда данных о вариабельности ритмов сердца молодой девушки (21 год). Видно, что структура спектров схожи

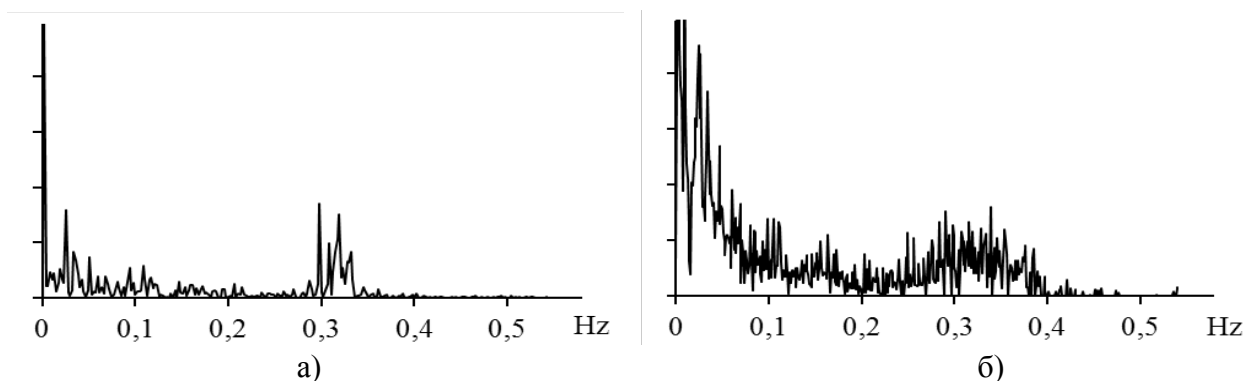


Рисунок 3 – Сравнение спектра Фурье (а) и маргинального спектра Гильберта (б)

В дополнение к маргинальному спектру можно определить мгновенное значение плотности энергии

$$E(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega. \quad (9)$$

С учетом формулы (9) на рисунке 4 представлен график мгновенных значений квази энергии спектра Гильберта сигнала, полученных как сумма всех частот, присутствующих в спектре, в соответствующий момент времени.

Аналогичным образом, используя преобразование Гильберта-Хуанга, могут быть рассчитаны последовательности значений квази энергии спектра Гильберта, соответствующие различным частотным диапазонам исследуемого сигнала, а полученные ряды данных подвергнуты анализу на предмет выявления взаимосвязей между компонентами спектра и их характера.

Для оценки силы и характера взаимосвязей между спектральными компонентами использовались алгоритмы корреляционного анализа и аппарата многовариантных функций детерминации (МВФД-аппарат) [8].

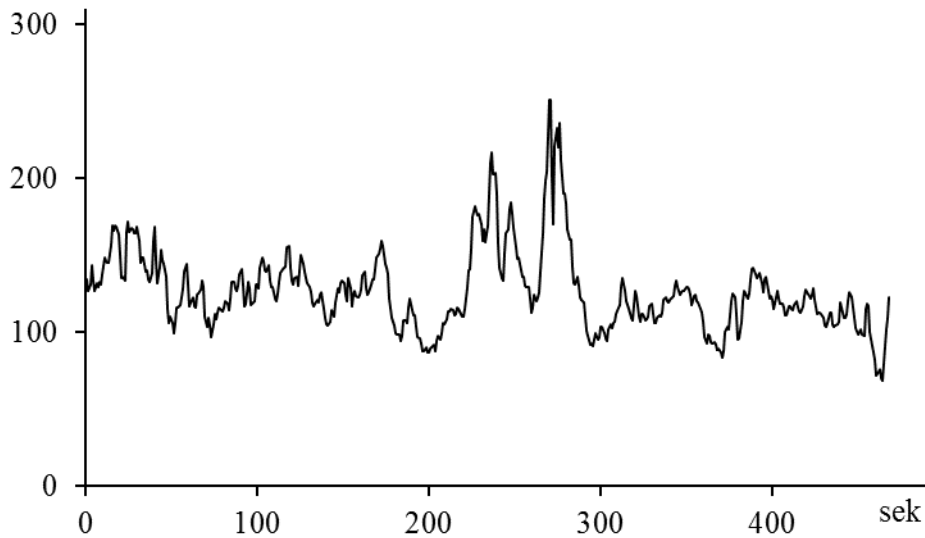


Рисунок 4 – Мгновенные значения энергии сигнала

Поскольку величины анализируемых рядов данных не являются нормально распределенными, то для исследования линейных взаимосвязей использовались алгоритмы непараметрического корреляционного анализа, которые более эффективны для изучения связи между случайными величинами, основанные на применении порядковых статистик, либо на замене наблюдаемых величин их рангами. Такие методы, обладая повышенной устойчивостью к отклонениям распределения от нормального, в большинстве случаев позволяют упростить вычисления, оставляя на приемлемом уровне статистические характеристики получаемых заключений по гипотезам [9]. В работе для оценки наличия и силы линейных связей использовался коэффициент корреляции Спирмена ρ .

$$\rho = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{\ell=1}^L d_{\ell}^2}{L(L^2 - 1)}, \quad (10)$$

где $d_{\ell} = R_{\ell} - R_j^*$ – разность рангов, соответствующая паре (x_{ℓ}, y_{ℓ}) ;

R_{ℓ} – последовательность рангов, соответствующая величине x_{ℓ} ;

R_j^* – последовательность рангов, соответствующая величине y_j ;

L – объем выборки.

Проверка гипотезы о значимости корреляционной связи между случайными величинами, т. е. значимости отклонения коэффициента корреляции от нуля, проводилась с использованием аппроксимация Имана-Коновера с уровнем значимости $\alpha=0,95$.

Для оценки наличия и силы всех видов связей, и линейных и нелинейных, использовался МФД-аппарат. Каждая многовариантная функция детерминации представляет собой набор значений показателя степени детерминированности какой-либо переменной величины в зависимости от её собственной предыстории и от других факторов. В роли показателя степени детерминированности Sd используется относительная доля изменчивости определяемой величины, объясняемая учитываемыми определяющими факторами. При строго линейных связях показатель степени детерминированности равен модулю коэффициента корреляции, а при двухаргументных нелинейных связях он практически совпадает с корреляционным отношением. Весь упор сделан на представления нелинейной динамики, в том числе на многовариантный детерминированный хаос, а не на традиционные математико-статистические представления с внешней массовой случайностью.

Оценивать наличие и силу нелинейных связей позволяет показатель степени нелинейности S_n парных и множественных связей между различными переменными величинами:

$$S_n = S_d^2 - \rho^2 \quad (11)$$

где S_d и ρ – показатель степени детерминированности (корреляционное отношение) и коэффициент корреляции соответственно.

Результаты исследования

Результаты расчетов значения показателя степени детерминированности (корреляционного отношения) S_d и коэффициента взаимной корреляции Спирмена ρ между реализациями мгновенных значений квази энергии частотных областей, соответствующих 200, 100 и 50 секундным ритмам, при проведении ортостатической пробы для 21 человека в трех состояниях приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения корреляционного отношения и коэффициента корреляции

Фамилия	1 состояние				2 состояние				3 состояние			
	200-100		200-50		200-100		200-50		200-100		200-50	
	S_d	ρ	S_d	ρ	S_d	ρ	S_d	ρ	S_d	ρ	S_d	ρ
Бор-н	0,65	0,56	0,47	0,06	0,95	0,57	0,68	0,49	0,74	0,12	0,51	-0,26
Гон-в	0,52	-0,28	0,52	0,09	0,60	0,13	0,67	-0,12	0,73	-0,34	0,43	-0,07
Гу-нов	0,88	0,69	0,54	-0,18	0,30	-0,03	0,81	-0,57	0,88	-0,58	0,57	0,18
Ма-ов	0,92	-0,47	0,57	0,21	0,52	-0,11	0,56	-0,06	0,68	-0,01	0,64	0,18
Ма-ов	0,68	0,42	0,69	-0,18	0,95	0,60	0,79	0,08	0,69	-0,01	0,67	0,18
На-ин	0,83	-0,02	0,67	-0,29	0,54	-0,08	0,62	-0,29	0,70	-0,05	0,58	0,05
Ур-ий	0,72	-0,33	0,65	0,11	0,55	-0,28	0,47	0,14	0,76	0,20	0,49	0,07
Оч-ий	0,85	-0,81	0,66	0,55	0,85	-0,40	0,63	-0,12	0,55	0,32	0,62	0,17
Ша-ов	0,74	0,22	0,57	0,22	0,53	0,15	0,51	-0,29	0,49	-0,26	0,36	-0,20
Ш-ин	0,64	-0,31	0,54	-0,06	0,46	-0,07	0,66	-0,13	0,80	0,22	0,41	-0,16
Як-о	0,73	0,16	0,56	-0,23	0,87	-0,53	0,62	0,21	0,90	0,25	0,79	-0,05
А-нко	0,77	-0,43	0,58	-0,10	0,87	-0,68	0,64	0,18	0,62	-0,11	0,58	0,05
Ан-а	0,62	0,10	0,58	-0,18	0,69	0,49	0,49	0,02	0,82	-0,58	0,48	-0,23
Ано-а	0,81	0,11	0,52	0,17	0,74	0,03	0,74	-0,08	0,62	0,02	0,59	-0,23
Го-ук	0,49	-0,16	0,41	0,24	0,74	-0,10	0,47	0,06	0,59	0,04	0,50	-0,20
Зл-ва	0,79	0,34	0,68	-0,02	0,51	-0,32	0,58	-0,04	0,65	0,52	0,54	-0,03
Ко-ова	0,41	0,35	0,43	-0,14	0,79	0,30	0,60	-0,17	0,94	0,52	0,87	-0,29
Ко-ина	0,62	-0,27	0,80	0,11	0,82	0,27	0,60	-0,09	0,67	-0,25	0,60	0,21
На-ва	0,45	0,11	0,51	-0,14	0,66	0,12	0,67	-0,16	0,58	-0,09	0,34	-0,09
Си-на	0,73	0,21	0,45	0,09	0,68	0,08	0,67	-0,42	0,61	-0,35	0,34	-0,09
Ян-ая	0,55	-0,09	0,67	0,56	0,50	0,46	0,67	-0,02	0,56	0,23	0,67	0,36

Как видно из таблицы, во всех состояниях у двадцати из двадцати одного испытуемых значения взаимно корреляционного отношения превышают значение 0,5. При этом модуль значения коэффициента корреляции в 25% случаев не превышает значение 0,3. Это дает основание предположить наличие достаточно сильных связей между 200 секундными и 100 секундными ритмами с большей долей связей нелинейного характера.

Для наглядного представления характера связей на рисунке 5 приведен пример корреляционных полей, построенных по 1024 мгновенным средним значениям квази энергии спектра Гильберта для частотных областей, соответствующих 200 и 100 секундным ритмам, молодого мужчины 21 года. На рисунках отчетливо просматривается наличие сложных нелинейных связей между низкочастотными компонентами спектра, особенно при проведении измерений ВРС в вертикальном положении.

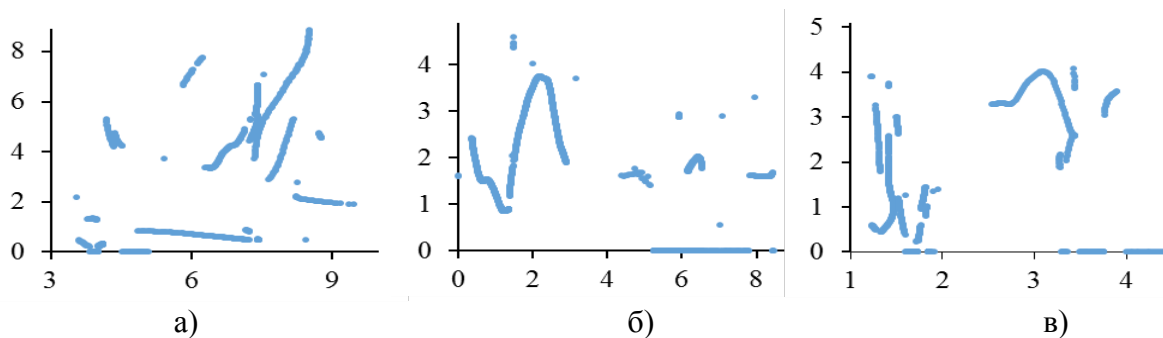


Рисунок 5 – Корреляционные поля, построенные по мгновенным средним значениям квази энергии спектра Гильберта для частотных областей, соответствующих 200 и 100 секундным ритмам: а) и в) запись сердечных ритмов производилась в покое; б) запись сердечных ритмов производилась в вертикальном положении.

По вертикальной оси отложены: мгновенные средние значения квази энергии спектра Гильберта, соответствующие 100 секундным колебаниям; по горизонтальной оси: мгновенные средние значения квази энергии спектра Гильберта, соответствующие 200 секундным колебаниям.

При исследовании связи между 200 и 50 секундными ритмами также имеется связь средней силы, корреляционное отношение в среднем имеет значение $0,57 \pm 0,03$ при малом значении коэффициента корреляции. Существенных связей между мгновенными значениями энергии, соответствующей 100 и 50 секундным ритмам, не выявлено и в таблице не приводится.

Аналогичные расчеты показателей степени детерминированности (корреляционных отношений) и коэффициентов взаимной корреляции были проведены с вариантносью по сдвигам между отсчетами λ рассматриваемых рядов данных и построены соответствующие функции. Как показали расчеты с увеличением сдвига в основном сила связей снижалась, но для отдельных лиц наблюдалось повышение значений корреляционного отношения при сдвигах $\lambda=1$ и $\lambda=2$ между отсчетами двух рядов данных, соответствующих 200 и 100 сек. ритмам, по сравнению с показателем при $\lambda=0$. Это свидетельствует о наличии запаздывания в рассматриваемой системе.

Проведенные исследования дают основание предполагать наличие устойчивой взаимосвязи между 200 секундными и 100 секундными, колебаниями ВРС. Физиологическая оценка этих взаимосвязей требует экспериментальных исследований и полученные результаты в дальнейшем могут быть полезными для построения математических нелинейных моделей, описывающих протекающие процессы в организме человека, для оценки функционального состояния и в прогностических целях.

На рисунке 6 представлен пример реализации мгновенных средних значений квази энергии трех первых частотных областей VLF спектра Гильберта, соответствующих 200, 100 и 50 секундным ритмам, молодого мужчины 21 года при проведении ортостатической пробы в положении стоя. На всех графиках отчетливо видны резкие изменения значений энергии всех компонент спектра VLF области на начальной стадии с последующей адаптацией.

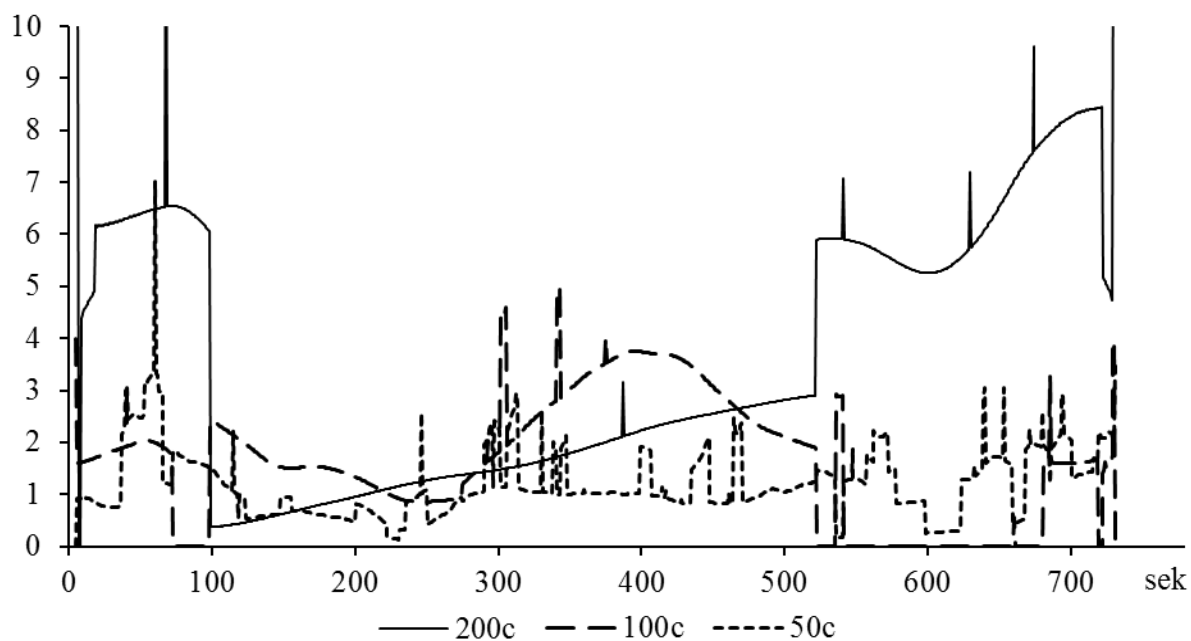


Рисунок 6 – Реализации мгновенных средних значений квази энергии частотных областей, соответствующих 200, 100 и 50 секундным ритмам

Раздельное представление динамики на ортостаз 200, 100 и 50 сек колебаний представлены на рис. 7(а,б,в); 8 (а,б,в); 9 (а,б,в).

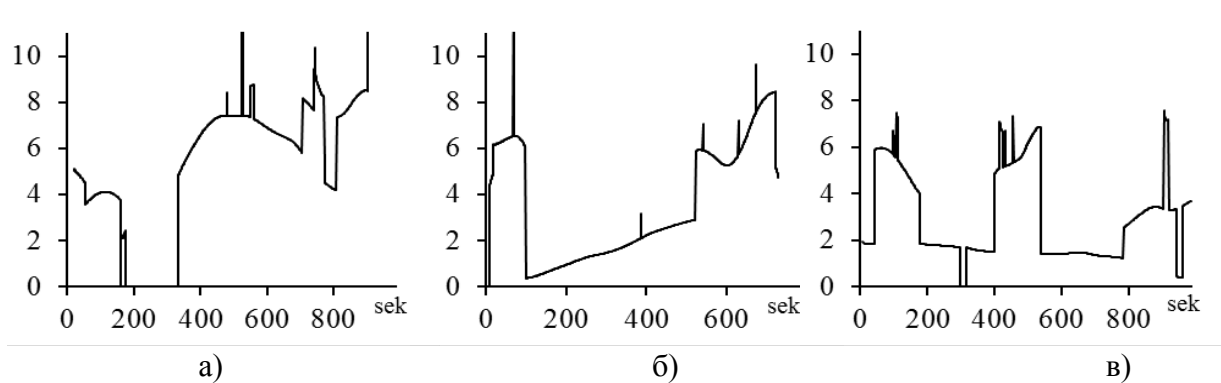


Рисунок 7 – зависимость средних значений квази энергии спектра Гильберта в полосе 200 секундных ритмов от времени: а) исходное состояние; б) ортостатическая проба; в) восстановление

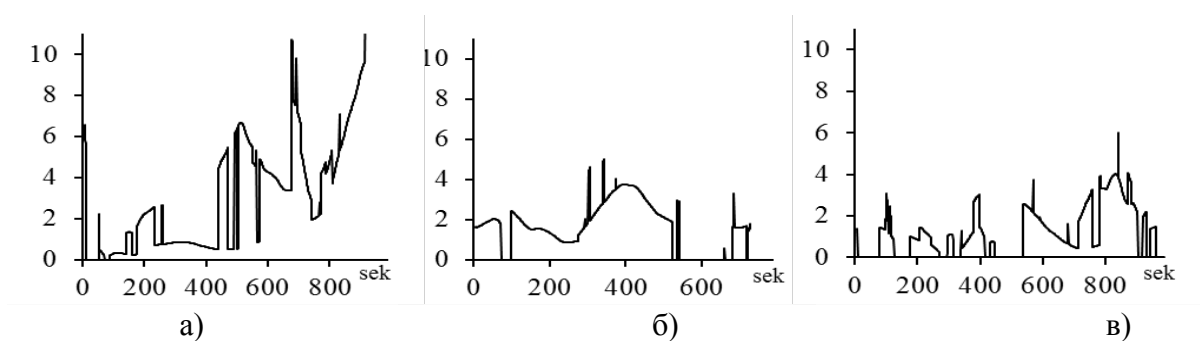


Рисунок 8 – зависимость средних значений квази энергии спектра Гильберта в полосе 100 сек ритмов от времени: а) исходное состояние; б) ортостатическая проба; в) восстановление

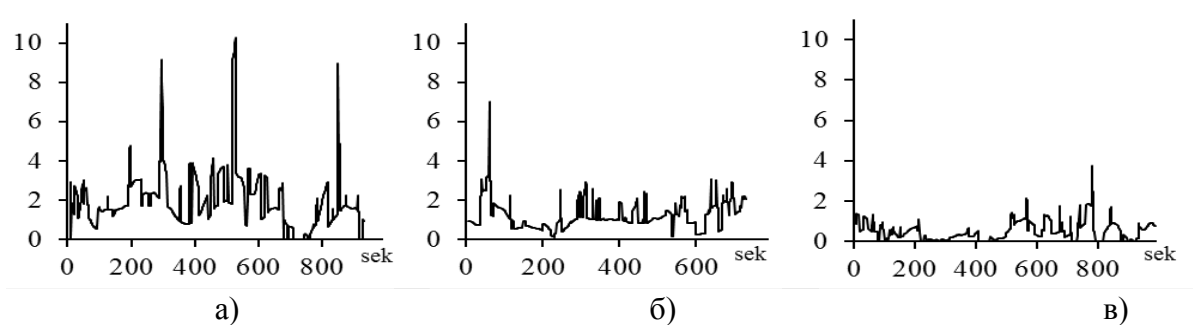


Рисунок 9 – зависимость средних значения квази энергии спектра Гильберта в полосе 50 сек ритмов от времени: а) исходное состояние; б) ортостатическая проба; в) восстановление

Из рисунка видна различная чувствительность отдельных диапазонов к ортостатической пробе. Общая динамика спектральной мощности VLF указывает на снижение мощности при ортостазе с различной чувствительностью каждого диапазона и неполным восстановлением спектров в период восстановления (в). Причем, темп восстановления 200 сек. колебаний опережает 50 сек. колебания.

Отдельный анализ структуры VLF и ее частотных компонентов 200, 100 и 50 сек. в дальнейшем будет дополнен анализом взаимосвязи этих компонентов с барорецепторной (LF) и вагальной активностью (HF), что будет способствовать более четкому пониманию физиологической роли этого диапазона и отдельных компонентов.

Список литературы

1. Heart Rate Variability. Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use / Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology // *Circulation*. 1996. V. 95, № 5. P. 1043–1065.
2. Kleiger R.E., Miller J.P., Bigger J.T., Moss A.J., and the Multicenter post-infarction research group. Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after acute myocardial infarction // *Am. J. Cardiol*. 1987. Vol. 59. P. 256.
3. Флейшман А.Н., Кораблина Т.В., Петровский С.А., Мартынов И.Д. Сложная структура и нелинейное поведение Very Low Frequency variability ритма сердца: Модели анализа и практические приложения // *Изв. вузов «ПНД»*, т. 22, № 1, 2014
4. Флейшман А.Н., Мартынов И.Д., Петровский С.А., Кораблина Т.В. Ортостатическая тахикардия: диагностическое и прогностическое значение Very Low Frequency variability ритма сердца // *Бюллетень сибирской медицины*, 2014, том 13, № 4, с. 136–148.
5. [Alberto Porta](#), [Vlasta Bari](#), [Andrea Marchi](#), [Beatrice De Maria](#), [Dirk Cysarz](#), [Peter Van Leeuwen](#), [Anielle C. M. Takahashi](#), [Aparecida M. Catai](#) and Tomaso Gnecci-Ruscione. Complexity analyses show two distinct types of nonlinear dynamics in short heart period variability recordings // *Front. Physiol.*, 2015, doi: 10.3389/fphys.2015.00071.
6. Марпл мл.С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер с англ / Под ред. И.С. Рьжака. – М.: Мир, 1990.
7. Huang N.E. Introduction to the Hilbert-Huang transform and its related mathematical problem// *The Hilbert-Huang transform and its application*. Canada, World Scientific Pub. Co. – 2005. – P. 1-26.

-
8. Авдеев В.П., Криволапова Л.И., Кораблина Т.В. Комплекс алгоритмов и программ с многовариантными функциями детерминации и нелинейными предикторами // Изв. вузов. Черная металлургия. 2000 № 5. – С. 56 – 77.
 9. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.