

УДК 681.513.8

ВЕЙВЛЕТ-ИНТРОСКОПИЯ БИОСИСТЕМ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

Алдонин Г.М., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Приборостроение и нанoeлектроника» Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского Федерального Университета, e-mail: GAldonin@sfu-kras.ru
Черепанов В.В., аспирант кафедры «Приборостроение и нанoeлектроника» института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского Федерального Университета

WAVELET INTROSCOPY OF HUMAN BIOSYSTEMS

Aldonin G.M., Cherepanov V.V.

An actual problem of monitoring the condition of the cardiovascular system is the development of effective algorithms for computer technologies for processing biosignals based on nonlinear dynamic models of body systems, since bioprocesses have a nonlinear nature and a fractal structure. The paper considers an important connection between the state of body systems, with their organization in the form of self-similar fractal structures with scaling close to the «golden section» in the norm. Obtaining detailed information about the state of bionetworks of the human body for topical diagnostics is possible on the basis of «wavelet-introspect» of biosystems.

Key words: electrocardiogram, photoplethysmogram, self-organization, self-similarity, fractals, scaling, Cayley trees, autowaves, soliton, renormalization group analysis, cardiac conduction nervous system, wavelet analysis, «wavelet-introspect».

Ключевые слова: электрокардиограмма, фотоплетизмограмма, самоорганизация, самоподобие, фракталы, скейлинг, деревья Кейли, автоволны, солитон, ренормгрупповой анализ, вейвлет-анализ, «вейвлет-интроскопия».

Введение

Раннее обнаружение латентных форм заболеваний с помощью индивидуального мониторинга функционального состояния организма (ФСО) позволяет сократить сроки излечения, уменьшить последствия заболеваний и снизить риск наступления инвалидности. Инфаркт и инсульт могут быть первыми и иногда последними предупреждениями о заболевании, т.к. сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) зачастую протекают бессимптомно, а наиболее эффективный способ борьбы с заболеваниями – это своевременная диагностика и профилактика. Уровень развития технического прогресса позволяет создавать все более совершенные средства диагностики с помощью полифункционального мониторинга ФСО. В предлагаемой работе рассматривается метод структурного анализа биосигналов с помощью их вейвлет-преобразования (вейвлет-интроскопии) [1].

Теоретико-прикладная основа разработки методов и средств вейвлет-интроскопии биосетей. В данной работе рассматривается исследование физико-физиологических явлений в биосистемах организма человека, в том числе и электрических процессов в проводящей нервной системе сердца (ПНСС) четырехкамерного сердца и сосудистой системе человека на основе структурного вейвлет-анализа биосигналов [2].

Основные биосистемы организма человека представляют собой фрактальные структуры с масштабно-инвариантным самоподобием. Примеры подобных биосистем – сосудистая система человека (рис. 1, а), мы-

Актуальной задачей мониторинга состояния сердечно-сосудистой системы является создание эффективных алгоритмов компьютерных технологий обработки биосигналов на основе нелинейных динамических моделей систем организма, поскольку биопроцессы имеют нелинейный характер и фрактальную структуру. Работа основывается на важной связи состояния систем организма человека с их организацией в виде самоподобных фрактальных структур со скейлингом, близком к «золотому сечению» в норме.

Получение детальной информации о состоянии биосетей организма человека для топической диагностики возможно на основе «вейвлет-интроскопии» биосистем.

шечная (рис. 1, б) и проводящая нервная системы сердца (рис. 1, в) и бронхиальная системы (рис. 1, г).

Получение детальной информации о состоянии биосистем возможно при учете нелинейного характера процессов в них, фундаментальных законов самоорганизации биопроцессов и биосистем, их самоподобной масштабно-инвариантной фрактальной структуры. Для диагностики биосистем организма актуальна разработка методики их фрактального структурного анализа на основе вейвлет-преобразования биосигналов [3] и на основе положений теории самоорганизации и фрактальной геометрии Б.Мандельброта [4].

Механизм формирования самоподобных фрактальных структур биосигналов объясняется топологией биосетей организма человека (рис. 1). Германом Гельмгольцем с учениками еще в 1850 г. установлена форма нервного импульса и его распространение в виде уединенной волны колоколообразной формы (в современном понимании *солитон*), подобно частице, движущейся с постоянной скоростью [5]. Волна возбуждения в виде солитона распространяется от водителя ритма вначале в правое и затем в левое предсердие, достигая атрио-вентрикулярного (А-В) узла по соответствующим ветвям ПНСС. Затем волна распространяется по межжелудоч-

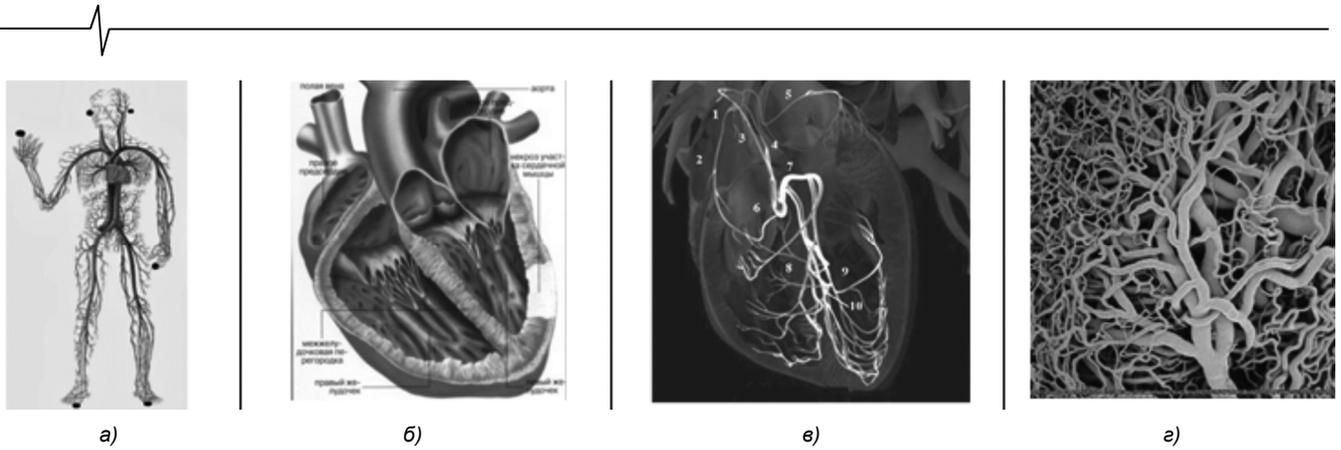


Рис. 1. Фрактальная структура биосистем человека: системы кровообращения человека (а), мышечной системы сердца (б), проводящей нервной сети в сердце (в) и дыхательные пути в легком (г)

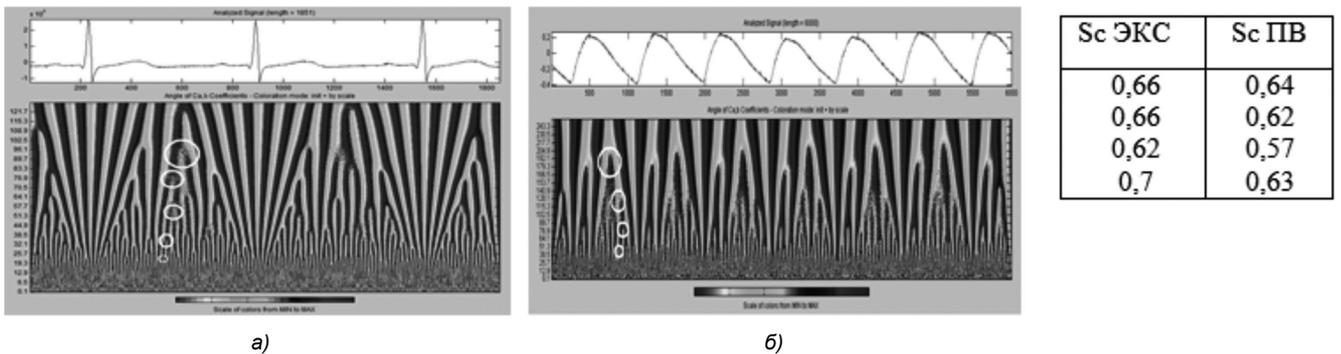


Рис. 2. Вейвлет-диаграммы биосигналов ЭКС и ПВ с турбулентностями в узлах ветвления (а) (отмечены зоны турбулентности), их скейлинги (в)

ковой перегородке через пучок Гиса и проходит по правой и левой ножкам пучка Гиса и разветвляется по волокнам Пуркинье на миокарде левого и правого желудочков, вызывая их сокращение.

Частота и мощность электрофлуктуаций ЭКС соответствуют топологии ПНСС. Двигаясь по ветвям сети, импульс возбуждения формирует флуктуации сигнала от больших ветвей русла сети к гармонически уменьшающимся по длине ее ветвей и соответственно возрастающим по частоте флуктуациям при изменения сечения ветвей в узлах ветвления. Дробление сети приводит в той же зависимости к падению по мощности флуктуаций ЭКС в дихотомически ветвящейся ПНСС по закону $1/f$. Эти флуктуации и формируют гармонический вейвлет-спектр ЭКС вида $1/f$ в норме, что подтверждается статистической проверкой соответствия нормальному закону распределения скейлингов вейвлет-спектра с модой распределения близкой к отношению «золотого сечения».

Гельмгольц также установил автоволновый характер распространения пульсовой волны по сосудистому руслу в виде одиночной волны колоколообразной формы. Спектр сигнала пульсовой волны при этом будет аналогично определяться турбулентностями (рис. 1, а), возникающими при ветвлении сосудистой сети при распространении потока крови по сосудистому руслу кровеносной системы с переменным сечением сосудов (рис. 2, б).

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала заключается в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами соли-

тоноподобной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. В ходе исследования использовались различные материнские вейвлеты, из которых наиболее адекватными для анализа биосигналов являются «Мексиканская шляпа» и «Солитон».

Интерпретация отображения электрокардиосигнала в вейвлет-диаграмме требует более детальных исследований, особенно при выявлении патологий. Все элементы вейвлет-диаграммы отображают тонкую структуру процессов, происходящих в проводящей системе сердца, фазовые и амплитудные отношения во всех разделах четырехкамерного сердца.

Например, при вейвлет-преобразовании ЭКС явно проявляются волны возбуждения право- и лево-сторонних ветвях ПНСС (, а), в отличие от ЭКГ, где данный процесс не всегда заметен. Вейвлет-преобразование явно показывает обе волны и характеризует межпредсердную проводимость. Например, учитывая, что электрический потенциал охватывает возбуждением прежде всего правое предсердие, в котором находится синусовый узел, можно говорить о его более короткой ветви что отражено в модели, уменьшением ее длины и структура Р-волны ЭКС наблюдается как сумма отдельных волн правого и левого предсердий и отражает истинное распространение возбуждения по миокарду правого и левого желудочков (рис. 3, б).

Достоинством вейвлет-спектра является их представление в частотной и временной области, т.е. содержит пространственно-временную информацию о процессах протекающих в биосети.

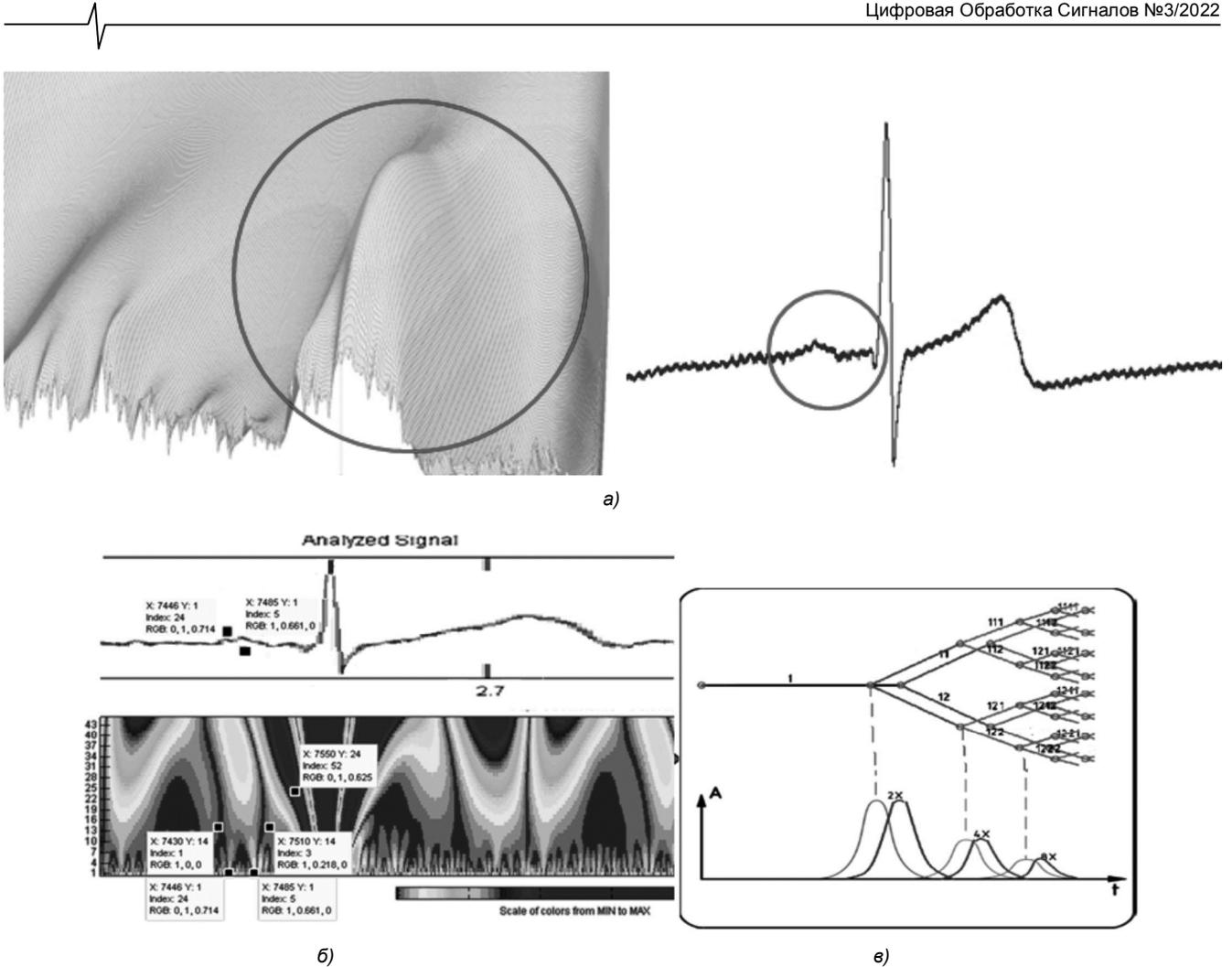


Рис. 3. 3d вейвлет-диаграмма ЭКС (а) и вейвлет-диаграмма 2d (б) в правом и левом предсердии (а), представление ветвистой структуры ПНСС в правом и левом предсердии в виде деревьев Кейли (б)

Топологическая эквивалентность фрактальных структур позволяет каждому элементу фрактального множества сопоставить точку ультраметрического пространства, геометрический образ которого представляется деревом Кейли (рис. 3, в). Учитывая, что электрический потенциал охватывает возбуждением прежде всего правое предсердие, в котором находится синусовый узел, можно говорить о его более короткой ветвистой структуре. Это отражено в модели, увеличением длины одной из ветвистых структур.

В нелинейных системах в результате бифуркационных процессов фазовая траектория системы принимает вид так называемой стохастической паутины, которая в соответствии с теорией универсальности Фейгенбаума имеет фрактальную структуру, обладающую масштабно-инвариантным самоподобием. Процессы и системы с самоподобной фрактальной структурой исследуются с позиций ренорм-группового анализа. Аттрактор Фейгенбаума в бифуркациях удвоения периода положил начало новому направлению в динамике, называемому ренормализацией [2]. Сама процедура ренормализации, или универсального масштабирования (universal scaling), возникла в физике (перенормируемые, калибровочные теории) и обработке сигналов (теория вейвлетов). Ренорм-групповой анализ позволяет выяснить, при каких условиях рассматриваемая теория обладает свойством универсальности.

Биоструктуры, как самоорганизующиеся системы,

необходимо рассматривать на основе прикладной теории самоорганизации. Структура биосигналов тесно связана с масштабно-инвариантной организацией биологических структур и процессов в организме человека, то есть организация «систем коммуникации» организма в виде самоподобных фрактальных биосистем со скейлингом, близком к «золотому сечению» (ЗС).

Анализ выявления узлов биосетей по вейвлет-диаграмме биосигналов возможен визуальным исследованием поверхности вейвлет-диаграммы, либо машинной ее обработкой с использованием следующего алгоритма (рис. 4). Алгоритм выполняет пошаговое сечение полученной вейвлет-диаграммы биосигнала вдоль оси времени начиная с низкочастотной части в сторону высокочастотной, ведя подсчет точек перегиба каждой кривой с фиксацией времени их возникновения. Если количество точек перегиба последующей кривой больше, чем предыдущей, то алгоритм фиксирует координаты новой точки. По полученным координатам точек строится скелетная функция биопроцесса, которая отображает топологию исследуемой биосети.

Аналогично необходим структурный анализ кардиоритма. Ритмическая структура пульса, связанная с различными функциями и процессами организма, несет в себе ценную информацию о состоянии организма в целом и отдельных его систем. Отклонению определенных



функций организма, как правило, предшествуют скрытые изменения их ритмической структуры. При синергетическом подходе человеческий организм – это открытая диссипативная система с внутренним трением, а гомеостаз – система слабосвязанных нелинейных эндо-

генных осцилляторов, взаимодействующих с экзогенными циклами окружающей среды [2].

Мерой нормы ФСО может служить фрактальная размерность $D(FrD)$ (рис. 6, а, рис. 7, а).

Сопоставление численных значений FrD показывает,

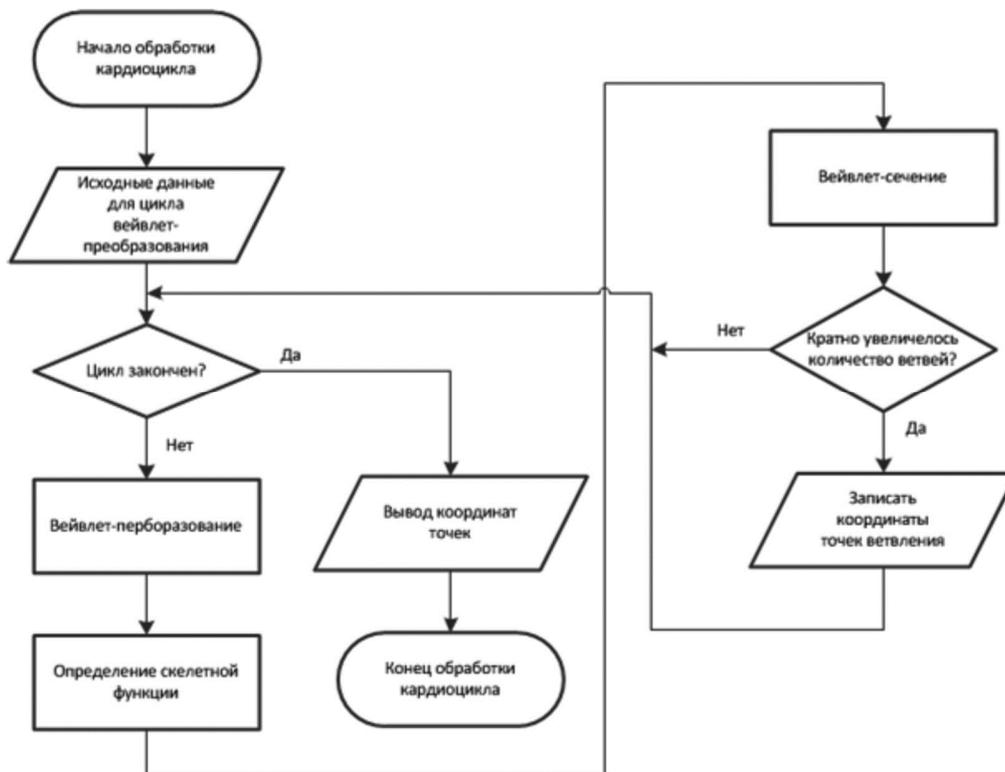


Рис. 4. Блок-схема алгоритма нахождения узлов ветвления сети

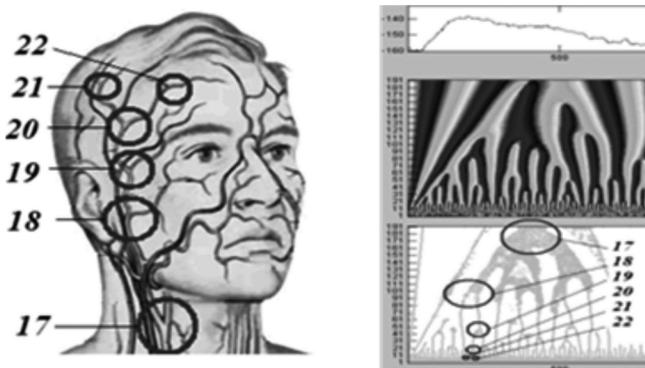
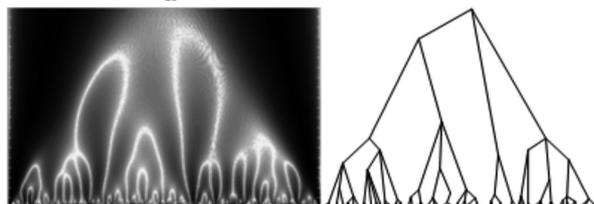
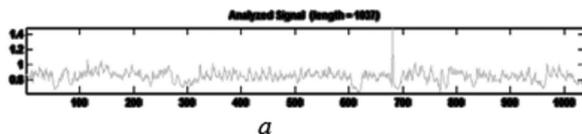


Рис. 5. Вейвлет-диаграмма правой сонной артерии и выявление узлов ветвления сосудов



Номер сечения	Скейлинги скелетонов
1	0,66
2	0,5
3	0,54
4	0,81
5	0,58

$$D=4,56$$

а)

б)

в)

Рис. 6. КИГ до процедуры (фитобочка) (а), ее вейвлет-преобразование (б), скелетная функция КИГ (дерево Кейли) (в), фрактальная размерность и сечения по узлам дерева Кейли (г)

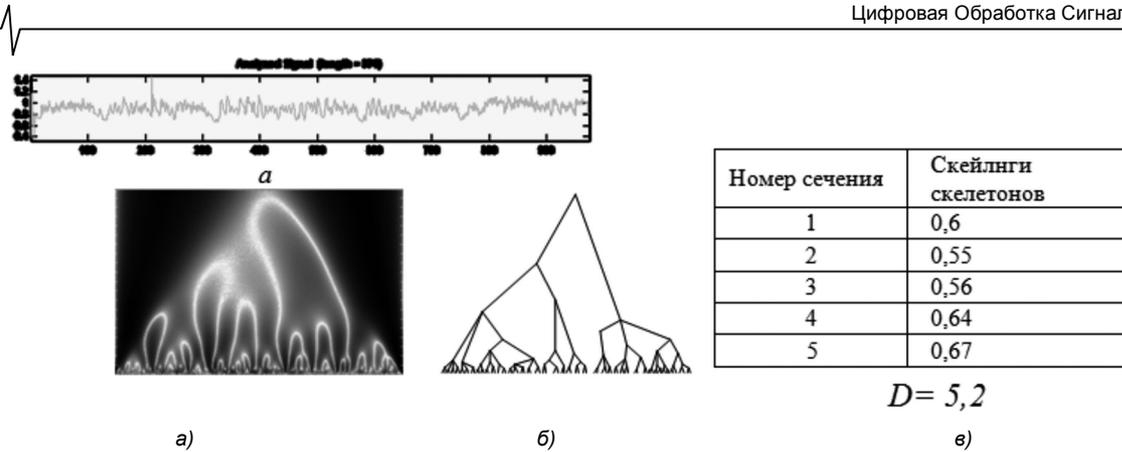


Рис. 7. КИГ после процедуры (фитобочка) (а), ее вейвлет-преобразование (б), скелетная функция КИГ (в), скейлинги по узлам дерева Кейли и фрактальная размерность (г)

что реальный сигнал ритма сердца, полученный от объекта, занимает хорошо выраженное промежуточное положение между детерминированным и чисто стохастическим сигналом, что свидетельствует об адекватности модели детерминированного хаоса применительно к описанию процессов формирования сердечного ритма у человека. При анализе основных физиологических процессов имеют дело в основном с нестационарными сигналами. Нестационарность здесь заключается в дрейфе среднего значения во времени.

Анализ экспериментальных данных по кардиоритму показывает, что для нормального состояния его скелетоны имеют большую динамику и регулярные ветвление и, соответственно, большую, чем при патологии, фрактальную размерность (рис. 6, в и рис. 7, в). В норме экстремумы скелетонов хорошо приближаются к Фибоначчи-сечениям.

Для диагностики состояния биосистемы важно установить ее определяющие параметры. При возникновении и развитии патологий сердечно-сосудистой системы аттрактор вариаций частоты сердечных сокращений утрачивает фрактальную топологию. Количественной оценкой структурной организации проводящей сосудистой и мышечной систем сердца является фрактальная размерность скелетных функций вейвлет-спектров.

Заключение

В настоящее время особо актуально развитие нелинейных методов анализа состояния параметров организма и их производных, поскольку биопроцессы имеют нелинейный характер и фрактальную структуру, для которых, как для развивающихся систем, характерна структурная самоорганизация по принципу масштабно-инвариантного самоподобия. Математические модели и программные средства вейвлет-интроскопии позволяют извлекать из биосигналов дополнительную информа-

цию о состоянии биосистем. Анализ масштабно-инвариантной фрактальной структуры биосистем с самоподобием вида $1/f$ дает их физически и физиологически адекватное описание, устанавливают критерии структурной устойчивости биосистем, как критерии их нормы, выявляют скрытые дефекты в ССД. Это дает общую теоретико-прикладную основу разработки методов и средств вейвлет-интроскопии для структурного анализа биосигналов. Методы структурного анализа на основе вейвлет-преобразования биосигналов являются методической основой для достоверного описания и топической диагностики биосистем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (грант проект № 19-37-90072).

Литература

- Soldatov A.V., Aldonin G.M., Cherepanov V.V. Hardware-Program Complex on the Basis of Recorder MCM-11. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. 11(6), pp. 671-678
- Алдонин Г.М. Структурный анализ самоорганизующихся систем. Монография, Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 344 с.
- Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. Успехи физических наук. Т. 166 (№ 11). 1996. С. 1050-1056.
- Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 660 с.
- Гельмгольц Г. Скорость распространения нервного возбуждения. М.: ГИЗ, 1923.
- Олемский А.И., Флат А.Я. Использование концепции фракталов в физике конденсированной среды. Успехи физических наук. 1993. Т. 163 (№12). С. 6-9.
- Soldatov A.V., Aldonin G.M., Cherepanov V.V. Wavelet Analysis of Cardiac Electrical Activity Signals. Biomedical Engineering. July 2018, vol. 52, no. 2, pp. 120-124.