УДК 612.014.08:519.24

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ БИОСИГНАЛОВ

Г. М. Алдонин, В. В. Черепанов

Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск

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). Примеры подобных структур – кровеносная система человека (рис. 1, *а*), а так же мышечная (рис. 1, *б*) и нервная системы сердца (рис. 1, *в*), дыхательные пути в легком (рис. 1, *г*).

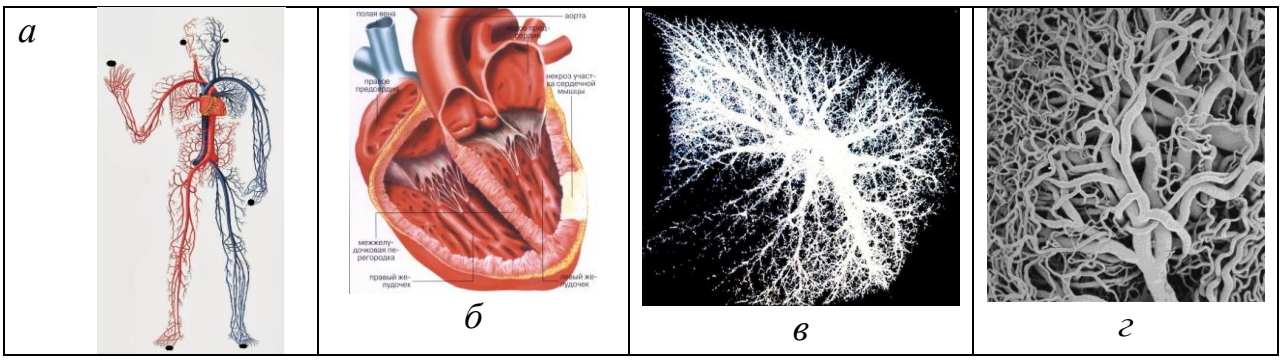


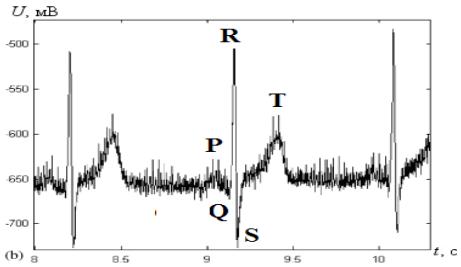
Рис. 1. Фрактальная структура биосистем: системы кровообращения человека (*а*) мышечной системы сердца (*б*), проводящей нервной сети в сердце (*в*) и дыхательные пути в легком (*г*)

С помощью вейвлет-преобразования электрокардиосигнала (ЭКС), снимаемый с электродов ЭКГ (рис. 2, *а*), фотоплетизмосигнала (ФПС) (рис. 2, *в*) с фотодатчика пульсовой волны и фонокардиосигнала (ФКС) (рис. 3, *б*) и спирограммы СГ (рис. 3, *в*), получаемого с помощью микрофона, можно выявить структуру процессов в проводящей нервной системе (ПНСС) и мышечной

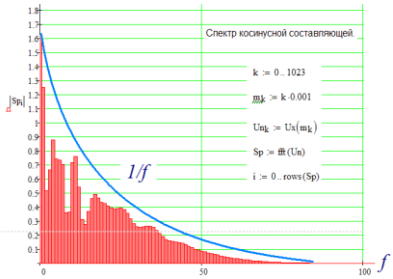
деятельности разделов сердца – предсердий, клапанов желудочков и бронхо-легочной системы, которые проявляются как элементы вейвлет-спектра ЭКС, ФКС, ФПС и СГ.

В строении биосистем фрактальность в структуре биосигналов отражается в их спектре. Например Фурье- спектр ФКС и ФПС имеет гармонический вид 1/*f* (рис. 2 *б,г*). Частота и мощность флуктуаций соответствуют топологии биосистемы – максимальные флуктуации от больших ветвей русла к гармонически уменьшающимся по длине и возрастающим по частоте и в той же зависимости падающим по мощности флуктуациям дробящегося по закону «золотого сечения» (ЗС), что объясняет формирование гармонического Фурье-спектра вида 1/*f*.

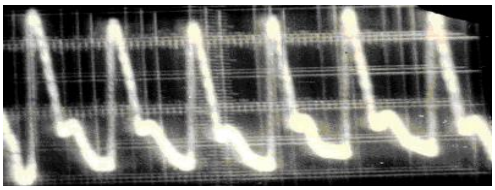
Таким же методом вейвлет-преобразования можно выявить структуру прохождения пульсовой волны по кровеносному руслу сонных артерий и магистральных сосудов рук и ног (рис. 3, *г*) (системы крепления датчиков изображена на рис. 1, *а*), визуализировать мышечную деятельность разделов сердца и так же работу бронхиальной системы легких, получая сигналы с микрофона (рис. 3, *в,г*).



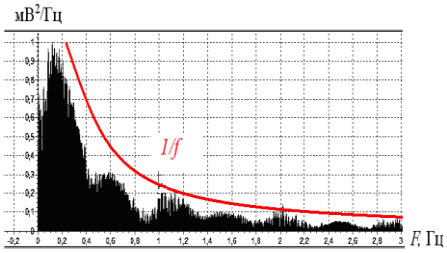
а



б

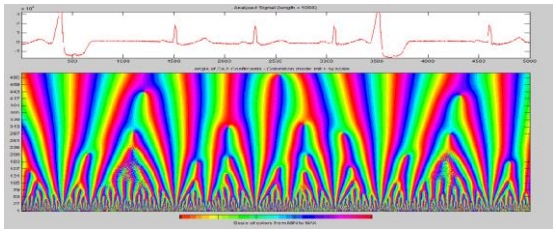


в

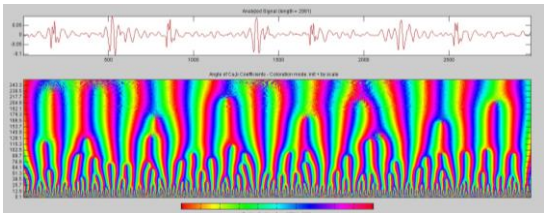


г

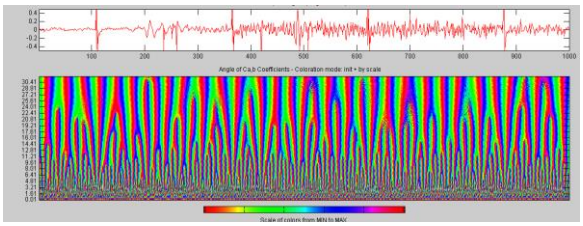
Рис. 2. Экспериментальный электро-кардиосигнал – *а* и его Фурье-спектр ЭКС– *б;* осциллограммы (*в*) и Фурье-спектр ПВ (*г*)



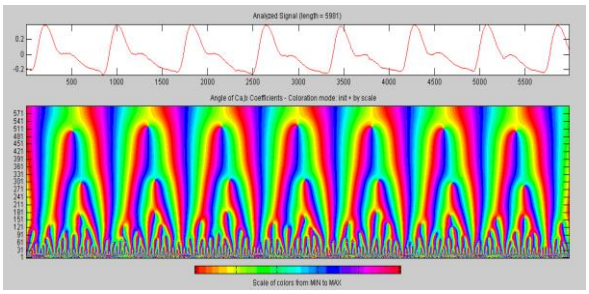
а



б



в



г

Рис. 3. Вейвлет-преобразования ЭКС – *а*, ФКС – *б*, сигнала спирограммы – *в*, ФПС – *г*

Ренормгрупповой анализ фрактальных структур вейвлет-спектров биосигналов показывает структурную устойчивость биопроцессов. Оценка скейлинговых характеристик биосигналов и их статистический анализ приведены в таблицах 1…3 и рис. 4.

Таблица 1.Скейлинги скелетона ФКС Таблица 2. Скейлинги скелетона ПВ

i / j	1	2	3	4	5
1	0,5	0,5	0,75	0,9	0,92
2	0,66	0,8	0,66	0,8	0,5
3	0,6	0,72	0,66	0,63	0,8
4	0,5	0,64	0,69	0,88	0,63
5	0,66	0,65	0,81	0,69	0,66
6	0,75	0,85	0,89	0,76	0,8
$\overline{Sc}$	0,61	0,69	0,74	0,78	0,72

i / j	1	2	3	4	5
1	0,5	1	1,5	2	2,5
2	0,66	1	1	0,66	1
3	1	0,66	0,66	1	0,66
4	0,75	0,75	0,6	1	0,75
5	0,8	0,8	0,83	0,75	0,8
6	0,55	0,45	0,6	0,57	0,83
$\overline{Sc}$	0,71	0,78	0,87	0,99	1,09

Таблица 3. Скейлинги скелетона ЭКС

i/ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,5	0,62	0,62	0,67	0,78	0,66	0,66	0,65	0,64	0,85
2	0,66	0,71	0,73	0,66	0,73	0,7	0,66	0,72	0,62	0,73
3	0,64	0,66	0,66	0,73	0,66	0,71	0,62	0,64	0,57	0,6
4	0,75	0,75	0,6	0,68	0,75	0,65	0,7	0,58	0,63	0,6
5	0,8	0,8	0,83	0,75	0,8	0,53	0,71	0,72	0,6	0,72
6	0,55	0,45	0,6	0,57	0,83	0,6	0,65	0,61	0,67	0,61
7	0,71	0,78	0,87	0,99	0,59	0,5	0,53	0,62	0,6	0,72
$\overline{Sc}$	0,66	0,68	0,70	0,72	0,73	0,62	0,65	0,65	0,62	0,69

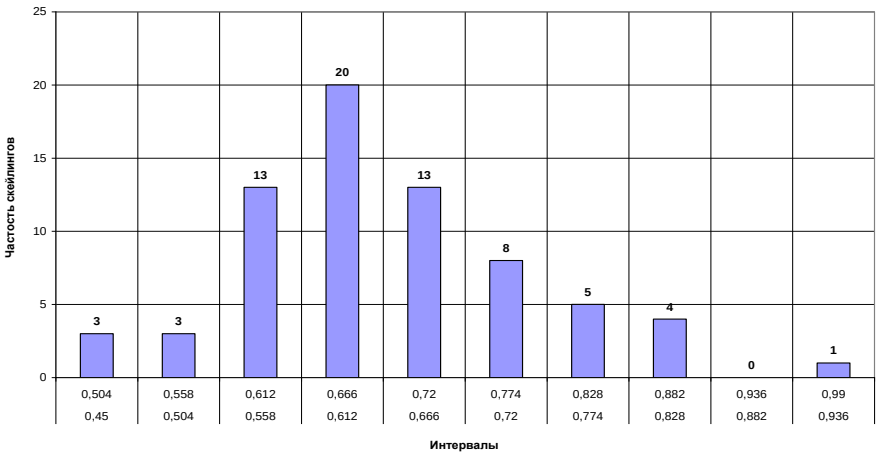


Рис. 4. Распределение скейлингов вейвлет-преобразований

Основным способом получения оценок параметров генеральной совокупности скейлингов по данным выборки является метод максимального правдоподобия (ММП) и метод наименьших квадратов (МНК), которые имеют большое практическое применение в задачах оценивания неизвестных параметров генеральной совокупности по выборке.

Проверка распределения значений скейлингов на соответствие нормальному закону производилась с помощью критериев согласия Колмогорова–Смирнова. Гистограмма распределения (рис. 6) и полученное значение λ с 0.95–квантилью распределения Колмогорова–Смирнова, $\lambda<0{,}95$, означает, что это распределение соответствует нормальному закону. Следовательно, получено полное соответствие критериям максимального правдоподобия, т. е. получена достоверная оценка. Закон распределения выборочной оценки скейлингов, имеет нормальный закон распределения или, а оценка скейлингов отвечает свойству асимптотической несмещенности и асимптотической эффективности.

Вейвлет-преобразования биосигналов показывают изоморфность их структуры и возможность для их использования для вейвлет-интроскопии биосистем организма человека и топической диагностики. Вейвлет-представления биосигналов могут быть использованы в качестве инструмента для обнаружения различных заболеваний и визуализации их на мониторе ПК по скелетным функциям вейвлет-преобразования биосигналов. В то же время интерпретация отображения биосигналов в вейвлет-диаграмме требует более детальных исследований, особенно при выявлении патологий.