

## МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

*Алдонин Г.М.* – доктор техн.наук, профессор, *Кудинов Д.С.* – канд.техн.наук, профессор, Сибирский федеральный университет, г.Красноярск, Россия

Аннотация. Актуально создание современных автономных функционально полных информационно-измерительных систем, математического и программного обеспечения для компьютерных технологий мониторинга сердечно-сосудистой деятельности (ССД) и развитие нелинейных методов анализа состояния организма, поскольку все биопроцессы, для которых, как для развивающихся систем, характерна структурная самоорганизация, имеют нелинейный характер и фрактальную структуру.

Ключевые слова: *мониторинг, сердечно-сосудистая деятельность (ССД), электрокардиосигнал (ЭКС), сигнал пульсовой волны (ПВ), фонокардиосигнал (ФКС), время распространения пульсовой волны (ВРПВ), кардиоритм (КР), системы диагностики.*

Annotation. A integrated nonlinear analysis of cardiosignals, pulse wave and fonocardiosignals of the state is of great interest for the differential diagnosis of the rules and pathology of cardiovascular system.

Keywords: *elektrokardiosignal (ECS), the signal pulse wave (PW), fonokardiosignal (FCS), the time of pulse wave (TDPV), heart rate (HR), the diagnostic system, the cardiovascular system (CVS), cardiovascular activity.*

Введение. Сохранение здоровья участников процесса в современной модели образования и труда позволяет повысить эффективность участия в системе профессиональных отношений, качество и уровень жизни.

Цели. Высокая сердечно-сосудистая заболеваемость требует создания удобных социально-приемлемых индивидуальных средств мониторинга ССД. Важно выявлять латентные формы преморбидных состояний своевременным обнаружением заболеваний и быстрым оказанием квалифицированной

помощи. Задачи. Индивидуальный мониторинг, встроенный в современную инфо-коммуникационную инфраструктуру, необходим для своевременной оперативной диагностики сердечно-сосудистой системы, как для клинического использования, так и в бытовых условиях.

История проблемы. Существующий холтеровский мониторинг состояния здоровья использует диагностику на основе анализа отдельных параметров ССД - электрокардиограммы (ЭКГ), артериального давления (АД) и др. При мониторинге функционального состояния организма важен комплексный анализ и извлечение максимальной информации, содержащейся в сигналах датчиков основных физиологических параметров, в статистических и спектральных характеристиках биопроцессов и биосигналов. Также Европейским кардиологическим обществом и Северо-американским обществом стимуляции и электрофизиологии особо актуальным признано развитие нелинейных методов анализа состояния организма, поскольку все биопроцессы, для которых, как для развивающихся систем, характерна *структурная самоорганизация*, имеют нелинейный характер и фрактальную структуру [1].

Содержание и результаты исследования. Для реализации этих задач в лаборатории медицинской электроники института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета разработан автономный аппаратно-программный комплекс мониторинга ССД холтеровского типа на базе рекордера МКМ-09 [2] (рис. 1.)



Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс мониторинга  
гемодинамики  
на базе рекордера МКМ-09

Основным отличием разработанного АПК от существующих в стране и за рубежом является анализ сердечно-сосудистой деятельности по комплексу основных физиологических параметров и их производных в конструктивно едином мониторе, позволяющем одновременно производить анализ кардиоритма (КР) и variability сердечного ритма (ВСР), электрокардиосигналов (ЭКС), фонокардиосигналов (ФКС), пульсовой волны (ПВ), времени распространения пульсовой волны (ВРПВ), сосудистого тонуса (СТ), артериального давления (АД). Кардиоритм и ВСР отражает состояние регуляторных систем организма, ЭКС, снимаемый с электродов, состояние электропроводящей системы сердца, ПВ – состояние кровеносной системы, а ФКС – состояние мышечной системы сердца, ВРПВ – состояние сосудистого тонуса. Совместный анализ ЭКС и ПВ позволяет количественно оценить параметры кровотока, неинвазивно и атравматично непрерывно мониторировать состояние артериального давления.

Также АПК на базе МКМ-09 обеспечивает возможность дистанционной передачи отчетов о функциональном состоянии пациента в диагностический центр и лечащему врачу с помощью существующей инфокоммуникационной инфраструктуры (e-mail, INTERNET и по сетям сотовой связи на основе

GPRS- технологий). Данные о биосигналах с МКМ-09 через сменный накопитель (MMC-карта) или интерфейс USB передаются в персональный компьютер (ПК). С помощью программного комплекса полученные данные обрабатываются на ПК и представляются в виде графического файла. По сети сотовых операторов, графический файл в виде MMS-сообщения передается лечащему врачу-специалисту. Применение USB-интерфейса позволяет проводить измерения с использованием питания ПК в режиме on-line. Структура АПК на базе МКМ-09 представлена на рис. 2.

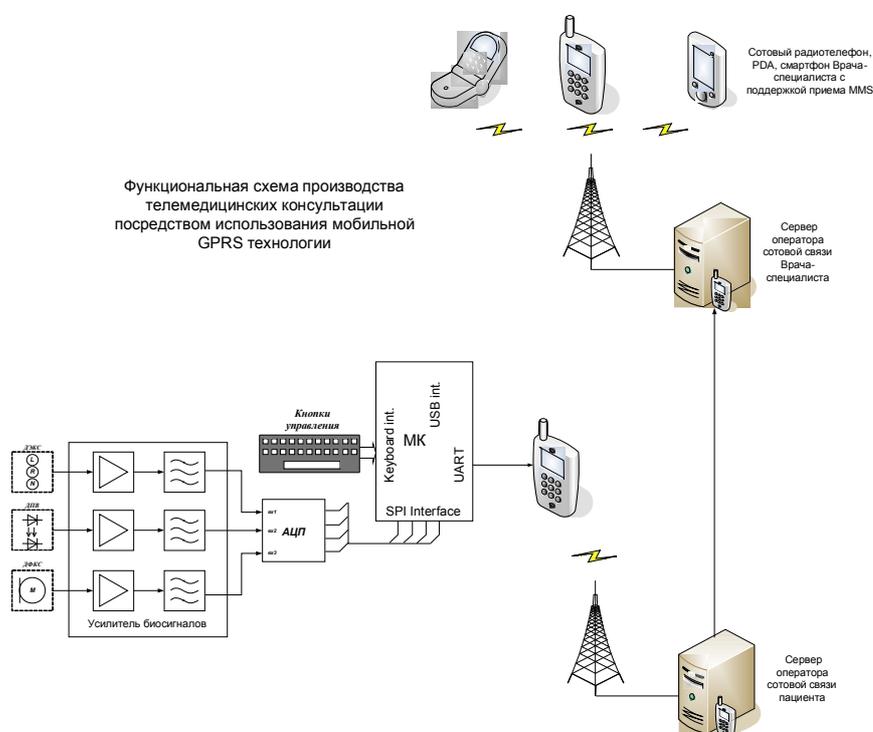


Рис. 2. Реализация АПК дистанционного мониторинга ССД посредством e-mail и Internet-технологий и мобильных GPRS-технологий.

В последнее время наряду с мониторингом ЭКС большой интерес проявляется к контролю состояния артериального сосудистого тонуса по скорости распространения пульсовой волны (СРПВ) [3]. С возрастом эластичность сосудов снижается, и это приводит к увеличению скорости распространения пульсовой волны. Скорость распространения пульсовой

волны (СРПВ) является независимым предиктором ишемической болезни сердца (ИБС) и инсультов у практически здоровых людей – к таким выводам пришла группа исследователей, наблюдавших в рамках Роттердамского исследования 2835 практически здоровых людей, у которых риск сердечно-сосудистых заболеваний увеличивался с ростом индекса СРПВ.

Очевидным достоинством этого метода является неинвазивность и атравматичность и возможность постоянно проводить измерения ВРПВ по отсчетам задержки ПВ между R-зубцом ЭКС и ПВ в месте установки ФП-датчика (на пальцах левых и правых рук и ног, мочках ушей). Для определения ВРПВ выявляются точка максимального значения R-зубца (пик ЭКС), максимум и минимум пульсовой волны. Временной отрезок между ними  $\Delta T$  означает ВРПВ в систолической –  $\tau_c$  и диастолической фазе –  $\tau_o$  (рис. 3)

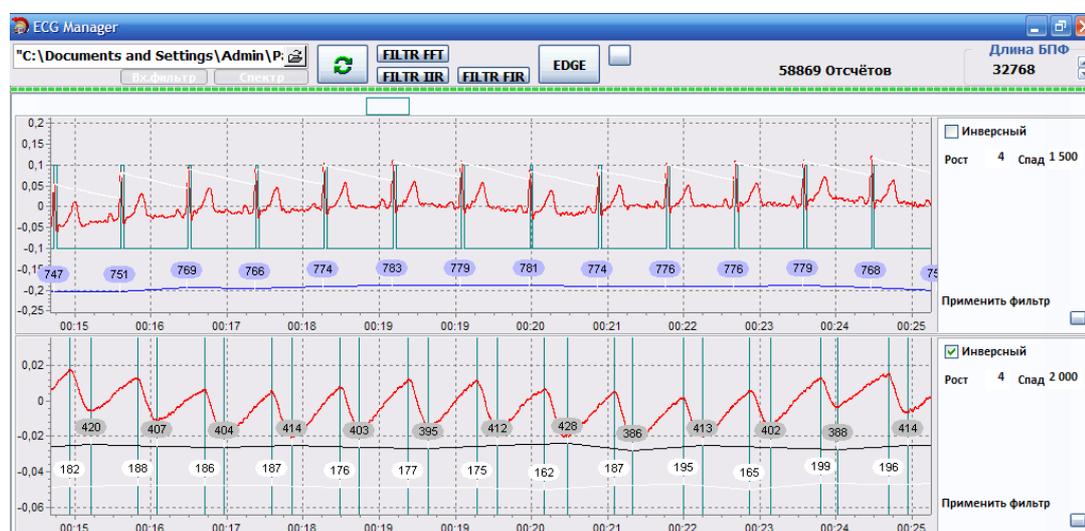


Рис. 3. Совместная запись сигналов ЭКГ и ПВ и измерение времени распространения пульсовой волны (ВРПВ) в фазе систолы (верхняя линия) и диастолы (нижняя линия) с помощью рекордера МКМ-09

Связь ВРПВ с артериальным давлением (АД) (рис.4, а) хорошо проявляется при исследованиях с физической нагрузкой. Разность ВРПВ до нагрузки, после и во время восстановления показывает обратную зависимость ВРПВ, измеренного монитором МКМ-09 (рис.4, а) от

артериального давления, измеренного сертифицированными амбулаторными мониторами VPLab и автоматическим монитором кровяного давления A&D Medical и ВРПВ) (рис.4, б).

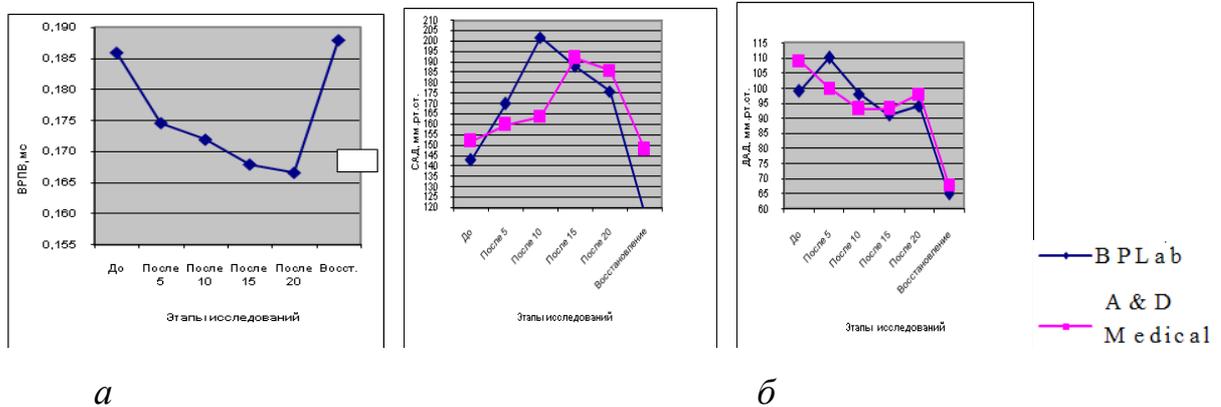


Рис. 4. Графики ВРПВ, измеренные монитором МКМ-08 - а и графики САД - б, ДАД - в, измеренные амбулаторным монитором VPLab и автоматическим монитором кровяного давления A&D Medical

В программное обеспечение АПК на базе МКМ-09 введен нелинейный структурный анализ биопроцессов и биосигналов. Структурная организация биопроцессов и биосигналов выявляется при нелинейном динамическом анализе на основе их вейвлет-преобразований. Биосистемы как высокоорганизованные структуры обладают фрактальной самоорганизацией по принципу масштабно-инвариантного самоподобия [3].

Процедура построения фрактального множества может быть представлена геометрическим образом в виде иерархического дерева Кейли, что сопоставляет каждому элементу фрактального множества точку ультраметрического пространства [4].

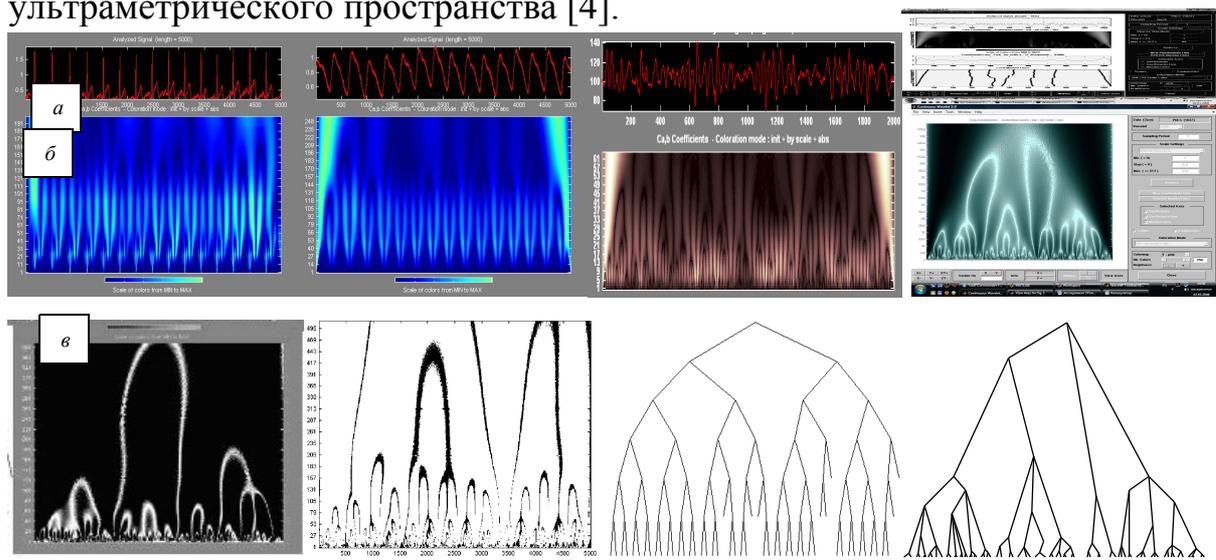
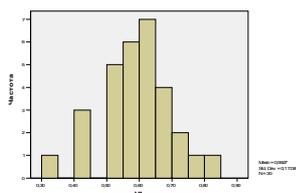


Рис. 5. ФКС, ЭКГ, ПВ, кардиоинтервалограмма (КИГ) (а), вейвлет-анализ (б) и их скелетные функции (деревья Кейли) (в)

Таблица 1  
Таблица 2  
Таблица 3  
Скейлинги ПВ  
Скейлинги ЭКС  
Скейлинги КИГ

$i/j$	0.8	0.661	0.631	0.64
1	0.656	0.727	0.791	0.803
2	0.714	0.937	0.789	0.8
3	0.333	0.84	0.8	0.75
4	0.8	0.761	0.75	0.83
5	0.65	0.625	0.555	0.76
6	0.615	0.8	0.84	0.631
7	0.75	0.5	0.666	0.5
$\overline{Sc}$	0.646	0.670	0.686	0.714
$\sigma$	0.08	0.057	0.035	0.01

$i/j$	1	2	3	4	5
1	0.55	0.56	0.45	0.69	0.57
2	0.66	0.61	0.77	0.53	0.31
3	0.57	0.59	0.61	0.42	0.54
4	0.62	0.65	0.51	0.82	0.75
5	0.65	0.62	0.68	0.55	0.61
6	0.75	0.53	0.41	0.67	0.53
$\overline{Sc}$	0.62	0.59	0.57	0.61	0.55
$\sigma$	0.027	0.016	0.046	0.05	0.053



	N	M	$\sigma$
V1	30	0,592	0,111
V2	28	0,713	0,128

Номер сечения	Скейлинги скелетонов КИГ
1	0,6
2	0,55
3	0,56
4	0,64
5	0,67

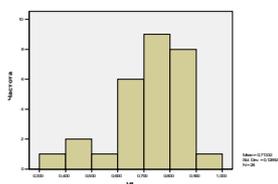


Рис. 6. Оценка ренормализационной инвариантности ЭКС, ФКС, ПВ и КР

В ренормгрупповом подходе скелетные функции (скелетоны) вейвлет-преобразования, как картина линий локальных экстремумов поверхностей выявляют структуру анализируемого процесса в виде деревьев Кейли (рис.

5,6), а их скейлинги – масштабную инвариантность или самоподобие. Для нормального состояния организма человека распределение скейлингов биопроцессов и биосигналов имеет нормальный закон (рис. 6) и близки к значению 0,618 (табл. 1...3), т. е. отношению «золотого сечения».

#### Заключение

Совместный анализ ЭКС, ФКС и ПВ позволяет контролировать такой важный показатель ФСО, как состояние сосудистого тонуса и его реакцию на какие-либо воздействия. Предлагаемый метод не требует дорогостоящего оборудования и может найти широкое применение в практическом здравоохранении.

Нелинейный структурный анализ биопроцессов и биосигналов позволяет объективно оценить норму и патологию функционального состояния организма человека. Скелетные функции (*скелетоны*) вейвлет-преобразования биосигналов и биопроцессов выявляют структуру анализируемого процесса, а скейлинги – масштабную инвариантность или самоподобие, как критерий нормы функционального состояния.

#### Литература

1. Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования / Рабочая группа Северо-Американского общества стимуляции и электрофизиологии. СПб.: Институт кардиологической техники, 2001.
2. Алдонин Г.М., Тронин О.А. Многофункциональный анализ сигналов датчиков сердечно-сосудистой системы / М., Датчики и системы, № 1, 2008  
Алдонин Г.М. Робастность в природе и технике. – М.: Радио и связь, 2003.
3. Олемский А.И., Флат А.Я. Использование концепции фракталов в физике конденсированной среды // Успехи физических наук. 1993. Т. 163 (№12).