

На правах рукописи



ЖЕЛУДЬКО Сергей Петрович

**РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНИТОРИНГА
БИОСИСТЕМ**

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

05.11.17 – Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2009

Работа выполнена в Институте инженерной физики и радиоэлектроники
(ИИФиРЭ) ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
(ФГОУ ВПО «СФУ»)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Алдонин Геннадий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ченцов Сергей Васильевич
доктор технических наук, доцент
Белик Дмитрий Васильевич

Ведущая организация: **ФГУ «Красноярский центр
стандартизации, метрологии и
сертификации»**

Защита диссертации состоится « 27 » ноября 2009 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.05 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. Г 2-74.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, с подписью составителя просим направить в наш адрес:
ауд. УЛК 318, ИКИТ, ул. Ак. Киренского, 26, г. Красноярск, 660074.

Автореферат разослан « 26 » октября 2009 г. и выставлен на сайте СФУ
URL: <http://www.sfu-kras.ru/>

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДМ 212.099.05



Е.А. Вейсов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальность работы заключается в необходимости создания систем массового мониторинга населения в условиях возрастающих неблагоприятных воздействий окружающей среды и антропогенных факторов.

Рост сердечно-сосудистых, онкологических и других заболеваний серьезно влияет на демографическую ситуацию в настоящее время и, как следствие, может сказаться на ухудшении демографической ситуации в будущем.

Так, ишемическая болезнь сердца является основной причиной смерти в экономически развитых странах и выходит на первое место в структуре смертности и заболеваемости в развивающихся. По данным доклада Европейского регионального бюро Всемирной организации здравоохранения, охватывающего 34 страны мира, с 1972 года Россия занимает первое место по смертности от кардиально-обусловленных заболеваний. Статистика по России выглядит следующим образом: из 100 тысяч человек только от инфаркта миокарда в России ежегодно умирают 330 мужчин и 154 женщины. Среди общей смертности в России сердечно-сосудистые заболевания составляют 57 %, в то время как современные медицинские технологии позволяют снизить эту цифру до 2 %.

Повышение эффективности лечения и возвращение пациентов к активной жизни связаны, прежде всего, со своевременным обнаружением заболеваний и быстрым оказанием квалифицированной помощи, в т. ч. средствами телемедицины. На сегодняшний день всё более широкое распространение приобретают автоматические методы анализа биопроцессов и биосигналов.

Такие системы необходимы не только для клинического использования, но и в амбулаторно-бытовых условиях для анализа различных степеней функционального состояния организма (ФСО): нормального, состояний утомления, депрессии, преморбидных и патологических.

Необходима разработка методического и информационного обеспечения дистанционных систем локального и регионального мониторинга биосистем, алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки и адекватного представления результатов контроля.

Однако в настоящее время аппаратно-программные комплексы мониторинга используют лишь диагностику по одному биосигналу (электрокардиограмма, пульсовая волна и т. д.). В то же время существующий уровень технологий позволяет наращивать функциональные возможности мониторинга по многим параметрам. Современный уровень инфокоммуникационной инфраструктуры позволяет обеспечить возможность дистанционного мониторинга, улучшить эксплуатационные характеристики комплексов, расширить область их применения и мобильность реализации,

уменьшить затраты врача по документообороту, обеспечить его актуальной информацией и удаленными средствами связи.

Удобство таких систем заключается в том, что данные обработки биосигналов можно получить оперативно в любой момент времени, и запуск может быть осуществлён самим больным при плохом самочувствии или во время сердечного приступа.

Основная задача проектирования технических средств мониторинга заключается в создании адекватных моделей процессов с использованием современного математического аппарата и разработке корректных методов обработки информации на основе наиболее современного подхода в информационно-измерительных системах.

Объектом исследования являются биопроцессы и биосигналы, аппаратно-программные комплексы для мобильного контроля параметров функционального состояния организма.

Цель диссертационной работы - исследование, разработка и применение методов повышения корректности и достоверности мониторинга функционального состояния организма аппаратно-программными средствами.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

1. Повышение достоверности количественной оценки индексов функционального состояния организма при мониторинге отражающих как само состояние организма, его адаптивные возможности и эффективность терапевтического воздействия на организм, в частности:

- индекса напряжения (ИН) регуляторных систем по Р.М. Баевскому;
- индекса лабильности (ИЛ) – функциональной подвижности организма;
- индекса эффективности (ИЭ).

2. Разработка методики мониторинга артериального сосудистого тонуса.

3. Разработка методики структурного анализа биопроцессов и биосигналов для количественной оценки степени нормы и патологии ФСО.

4. Разработка вариантов построения аппаратно-программных комплексов (АПК) полифункционального мониторинга.

Методы исследования. Поставленные задачи решались на основе анализа биопроцессов и биосигналов методами теоретических и экспериментальных исследований.

Широкий круг моделей физиологических процессов и технических систем подвергался экспериментальным исследованиям, в том числе на авторских аппаратных средствах.

Большой объем и разнохарактерность экспериментов потребовали применения известных и разработки новых методов, методик и аппаратных средств и компьютерных программ анализа, которые изложены в работе.

Обработка полученных данных проводилась в пакете *Matlab 7, 2007, 2008b*. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с

использованием аппарата математической статистики и пакета прикладных программ *SPSS 13*.

Научная новизна:

1. Разработаны варианты построения АПК полифункционального мониторинга с возможностью использования существующей инфокоммуникационной инфраструктуры.

2. Разработан метод получения максимально правдоподобной оценки индекса напряжения регуляторных систем по Р.М. Баевскому, минимизирующий влияние высокой нестационарности кардиоритма.

3. Разработан алгоритм оценки лабильности ФСО (индекс лабильности) учитывающий время релаксации и динамику восстановления регуляторных функций.

4. Разработан алгоритм количественной оценки эффективности терапевтических бальнео- и физиопроцедур на основе индекса эффективности (ИЭ), позволяющего произвести корректную дозировку и исключить неблагоприятные последствия.

5. Разработана методика неинвазивного, атравматичного мониторинга артериального сосудистого тонуса.

6. Разработана методика оценки ФСО на основе структурного анализа биосигналов.

Практическая ценность и внедрение результатов работы: использование разработанных моделей и методик позволяет повысить эффективность мониторинга биосистем на основе индексов, адекватно отражающих состояние пациентов. Обеспечивает возможность ввести в медицинские исследования новые методики анализа и полифункциональные, мобильные и адаптированные к современной инфокоммуникационной инфраструктуре аппаратно-программные комплексы.

Модели и методики использованы в аппаратно-программных комплексах (АПК) холтеровского типа МКМ-07, 08, разработанных в лаборатории медицинского приборостроения ИИФиРЭ СФУ.

Апробация АПК холтеровского типа МКМ-07, 08 проходила на пациентах, находящихся на стационарном лечении в кардиологическом отделении Городской больницы скорой медицинской помощи (ГБСМП, ГКБ № 6 им. Н.С. Карповича), в Городском кардиологическом центре (г. Красноярск), а также на воспитанниках Специализированной детско-юношеской школы олимпийского резерва № 1 (по спортивной гимнастике) (г. Красноярск). Получены акты о внедрении результатов работы.

На защиту выносятся:

1. Варианты построения АПК полифункционального мониторинга, обеспечивающие анализ проводящей, сосудистой и мышечной систем сердца с возможностью дистанционного мониторинга на основе существующей инфокоммуникационной инфраструктуры, предназначенных для клинического, амбулаторного и бытового использования.

2. Метод повышения достоверности оценки индекса напряжения регуляторных систем по Р.М. Баевскому при мониторинге ФСО с использованием скользящего усреднения и определения квазистационарных интервалов по методу наименьших квадратов (МНК).

3. Алгоритм оценки функциональной подвижности организма на основе индекса лабильности (ИЛ) как отношение показателей экспоненциальной аппроксимации кардиоритма, учитывающих время релаксации и динамику восстановления регуляторных функций.

4. Алгоритм количественной оценки эффективности терапевтических бальнео- и физиопроцедур на основе индекса эффективности (ИЭ) для корректной дозировки и исключения неблагоприятных последствий.

5. Методика неинвазивного, атравматичного мониторинга артериального сосудистого тонуса с помощью измерения времени распространения пульсовой волны на основе совместного анализа электрокардиограммы и пульсовой волны.

6. Методика структурного анализа биопроцессов для количественной оценки ФСО на основе фрактальной размерности скелетных функций вейвлет-диаграмм биосигналов.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях и выставках, а именно: международной выставке - Сибирском авиакосмическом салоне «САКС-2006», VIII, IX Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2008-2009», всероссийских с международным участием научно-технических конференциях молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» в 2006, 2007, 2008 и 2009 годах, Второй общегородской ассамблее «Красноярск. Технологии будущего» в 2009 году.

Полученные результаты отражены в информационно-образовательном проекте (ИОП) «Распределенная автоматизированная система дистанционного мониторинга состояния человека» ИОП-49 СФУ, 2008 год.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 1 статья опубликована в журнале, рекомендованном ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 86 наименований, и приложений. Основная часть работы изложена на 144 страницах машинописного текста. Работа содержит 92 рисунка и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи работы, объект и предмет исследования,

сформулированы научные положения, выносимые на защиту, определены их научная новизна и практическая значимость, приведены сведения по апробации работы и публикации.

В первой главе рассмотрены существующие в настоящее время подходы к контролю и анализу функционального состояния организма и основные направления дальнейшего развития средств мониторинга, а также методы анализа кардиоинформации.

Типичные медицинские комплексы на платформе карманного персонального компьютера, состоят из четырёх компонентов: 1) модуля получения и первичной обработки информации (чувствительный элемент и преобразователи); 2) модуля передачи данных (передача может осуществляться по проводам - через порт *RS232*, звуковой выход, *USB* и др., а также с использованием беспроводных технологий – *IrDa*, *Bluetooth*, *Wi-Fi*); 3) карманного персонального компьютера (КПК), это практически всегда стандартная модель, которую пользователь может приобрести самостоятельно по рекомендации фирмы-разработчика и 4) программного обеспечения КПК (для операционных систем семейства *Windows* либо *Palm OS*). Программное обеспечение определяет возможности и функциональность комплекса, а также удобство работы с ним. Практически все электрокардиографы имеют программный модуль анализа вариабельности сердечного ритма *BSP (HRV)*. Теоретические положения этих исследований рассмотрены в работах Г.В. Рябыкиной, Р.М. Баевского, Э.Л. Гольдбергера, Д.Р. Ригни, Б.Д. Уэста и многих других. Существующие методы измерения имеют существенные ограничения по интервалам измерения при постоянном мониторинге, эти оценки являются недостоверными и нуждаются в верификации.

Исходя из анализа современного состояния АПК контроля ФСО можно выявить следующие направления совершенствования таких систем: расширение функциональных возможностей систем (АПК, предназначенных для длительного наблюдения автономно и в режиме *on-line* кардиограмм, кардиоритма (КР), электрокардиосигналов (ЭКС) и пульсовой волны (ПВ), кровотока и фонокардиограммы (ФКГ), длительного наблюдения и накопления кардиоинтервалов в режиме *of-line* в твердотельном запоминающем устройстве (на основе мультимедийной карты памяти *MMC*) с последующей обработкой и статистическим, спектральным и структурным анализом кардиоинформации на персональном компьютере (ПК) с целью выявления аритмий; контроль действия физических нагрузок, лекарственных препаратов, физио- и бальнеопроцедур, аутотренинга и психотерапии для донозологической диагностики и в спортивной медицине.

В качестве объектов анализа рассмотрены электрокардиограмма, пульсовая волна и фонокардиограмма, которые являются наиболее оперативными и информативными показателями состояния организма

человека. Они в достаточной степени отражают процессы, происходящие в сердечно-сосудистой системе (ССС).

Вторая глава посвящена разработке методики оценки ФСО на основе системы специальных индексов.

Необходимость повышения достоверности анализа напряжения функциональных систем с помощью ИН Р.М. Баевского обусловлена тем, что кардиоритм является нестационарным процессом. Для выявления этой информации необходимы алгоритмы анализа динамики структуры кардиоритма, которые включают динамический ряд индекса напряжения Р.М. Баевского. Динамический ряд плотности распределения отражает перестройку гомеостаза под влиянием эндогенных и экзогенных факторов в виде ваготонической и симпатотонической реакции.

Для корректной оценки динамики необходимо найти эффективный квазистационарный интервал разбиения вариационного ряда, в пределах которого мы можем найти наиболее достоверную оценку. Это возможно с помощью применения процедуры метода наименьших квадратов (МНК) нахождения «скользящих» средних.

Алгоритм разбиения кардиоинтервалограмм (КИГ) на квазистационарные интервалы для максимально правдоподобной оценки ИН приведен на рис. 1.

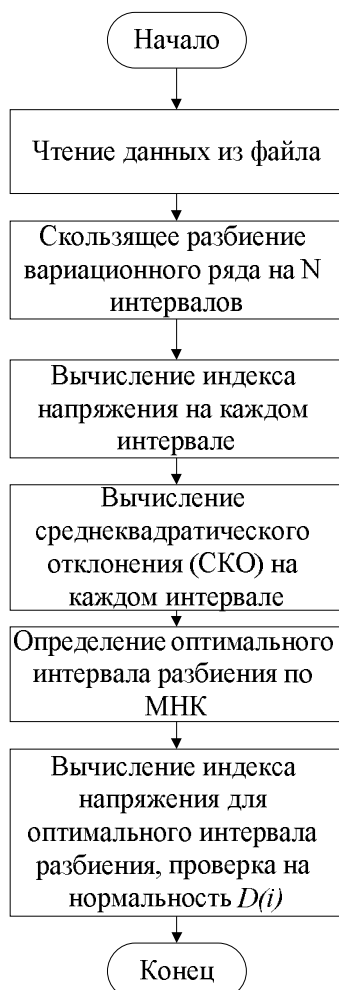


Рис. 1. Алгоритм разбиения КИГ на квазистационарные интервалы



Рис. 2. Кривая вычисления σ ИН

На рис. 2 представлена кривая среднеквадратического отклонения ИН при разбиении кардиоинтервалограммы по 2-, 3-, 4-, 5-, 6-, 7-минутным интервалам в течение 30 минут методом скользящего среднего.

Полученные данные были проверены с помощью непараметрического критерия Колмогорова – Смирнова по уровню $\alpha = 0,05$ (для данного распределения $\lambda = 0,746$ при норме критического значения, по уровню $\alpha = 0,05$, критерий Колмогорова-Смирнова $k_{0,95} = 1,358$), также строится гистограмма распределения (выборка $N = 25$, $std.dev = 83,18$, $Mean = 220,64$), (рис. 3).

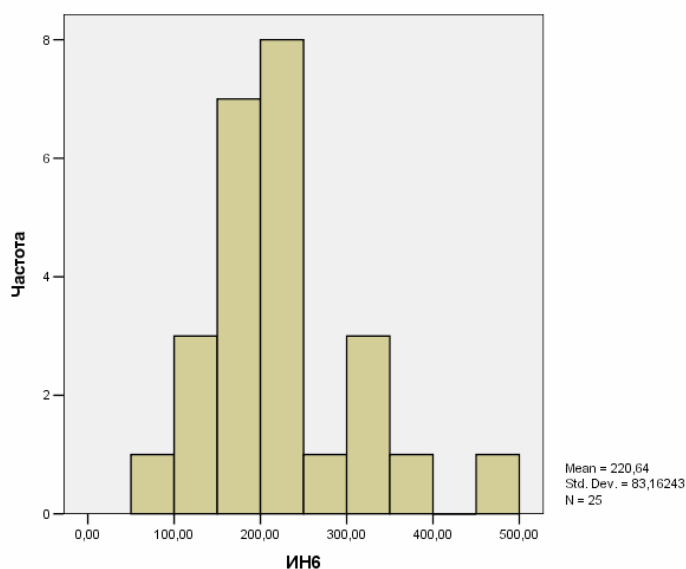


Рис. 3. Гистограмма полученных экспериментально данных

Статистическая проверка показала соответствие полученных данных нормальному закону распределения, что позволяет сделать вывод о том, что данная оценка является оценкой максимального правдоподобия.

Во втором разделе указано на то, что наряду с контролем напряженности функциональных систем большое значение имеет оценка функциональной подвижности (лабильности) организма.

При контроле влияния каких-либо воздействий на организм человека (в частности физических нагрузок, лекарственных препаратов и др.) необходима оценка индивидуальной реакции, по которой можно судить об адаптивных способностях организма. Функциональная подвижность (лабильность) организма как структурная оценка однозначно отражает индивидуальную реакцию на какое-либо воздействие.

Лабильность (от лат. *labilis* — *скользящий, неустойчивый*) (физиол.) — функциональная подвижность, скорость протекания элементарных циклов возбуждения в нервной и мышечной тканях. Понятие «лабильность» введено русским физиологом Н.Е. Введенским (1886), который считал мерой лабильности наибольшую частоту раздражения ткани, воспроизводимую ею без преобразования ритма. Лабильность отражает время, в течение которого ткань восстанавливает работоспособность после очередного цикла возбуждения.

Традиционно лабильность оценивается как время восстановления до нормального уровня ЧСС в покое. При внешних воздействиях различной природы (эмоциональные факторы, физические нагрузки, лекарственная терапия, бальнеопроцедуры и т. п.) возможна структурная перестройка кардиоритма.

Экспериментальные исследования показывают, что характер восстановления после внешнего воздействия близок к экспоненциальной зависимости. По мере релаксации появляются и возрастают волны в кардиоритме, показывающие степень восстановления регуляторных функций. Соответственно необходимо определить показатели минимальной и максимальной экспоненты, аппроксимирующие кардиоритм во время релаксации после внешнего воздействия. Модель, отражающая процесс восстановления, задается в виде

$$RR = 1 - e^{-It},$$

где I — параметр, характеризующий степень крутизны экспоненты аппроксимирующей кривой.

Точкой привязки служит момент снятия внешнего воздействия (физических нагрузок, ортостатических проб и т. п.).

Решая системы нелинейных уравнений на основе моделей при помощи метода наименьших квадратов, получаем граничные параметры I_{\max} и I_{\min} для максимальной и минимальной огибающих экспериментальных зависимостей. Отношение этих параметров можно определить индексом лабильности, характеризующим функциональную подвижность физиологического состояния человека:

$$\text{ИЛ} = I_{\max} / I_{\min}.$$

На рис. 4 представлен алгоритм модуля оценки индекса лабильности.



Рис. 4. Алгоритм модуля оценки индекса лабильности (функциональной подвижности) организма

Предлагаемый функционал использовался в экспериментальных исследованиях среди здоровых людей, и людей с различными патологиями при сеансах психотерапии. Ниже приводятся примеры таких исследований.

В качестве примера хорошей функциональной подвижности дана оценка лабильности молодого человека 21 года. Запись кардиоинтервалограммы и фрагмент записи с физической нагрузкой приведены на рис. 5.

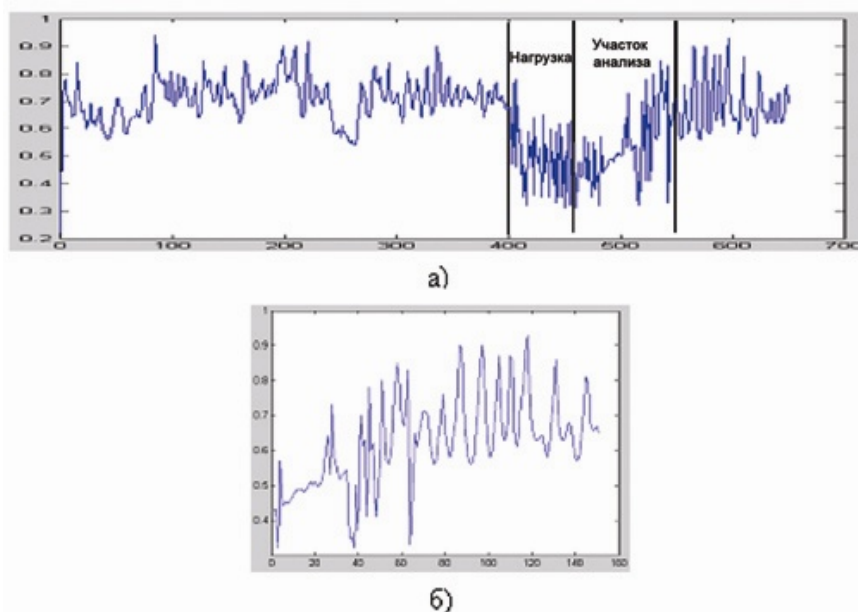


Рис. 5. Кардиоинтервалограмма молодого человека 21 года (а), участок кардиоинтервалограммы, по которому производится анализ (б)

Далее запись аппроксимируется и вычисляется индекс лабильности.

$$\text{ИЛ} = \frac{0,0024}{0,0003} = 8$$

Кардиоинтервалограмма пациента, перенесшего инфаркт миокарда, рис. 6

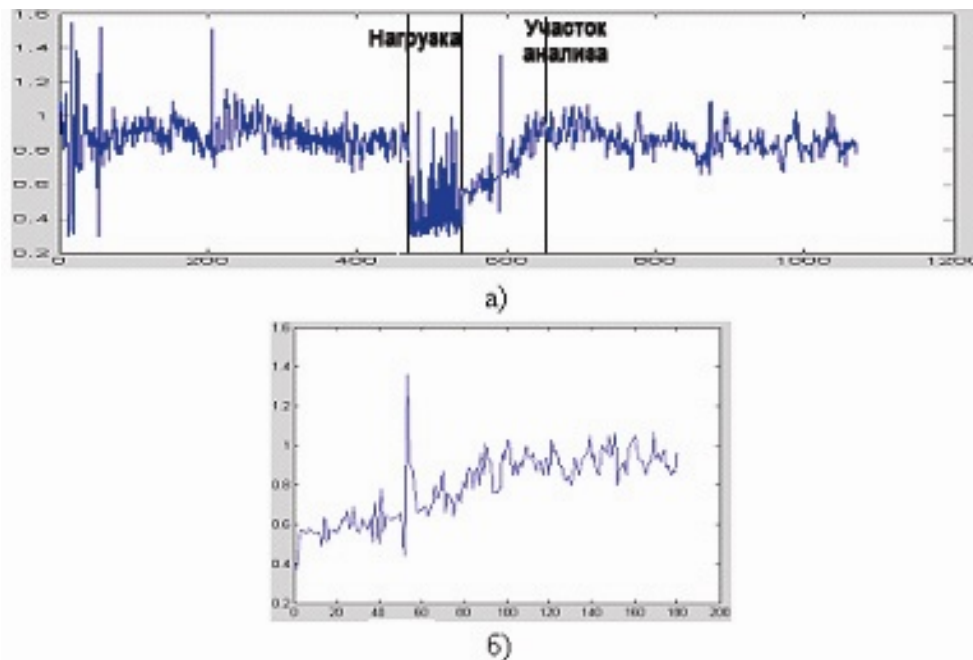


Рис. 6. Кардиоинтервалограмма мужчины (ишемическая болезнь сердца (ИБС), стенокардия) (а), участок кардиоинтервалограммы по которому производится анализ (б)

Для данного пациента:

$$\text{ИЛ} = \frac{0,0039}{0,0015} = 2,6$$

Таким образом, на основе экспериментально полученных данных была построена зависимость ИЛ от параметров кардиоритма (см. рис. 6). Из экспериментальных наблюдений предположили, что существует экспоненциальная зависимость восстановления кардиоритма после воздействия, которая в силу вариабельности кардиоритма имеет показатель экспоненты огибающих по максимуму и минимуму. Эти показатели мы можем задать аналитически. Отношение этих пар показателей экспонент представлены на графике (рис. 7). Из приведенных графиков следует, что данная оценка ИЛ имеет монотонный характер, т. е. отражает меру лабильности в норме и патологии.

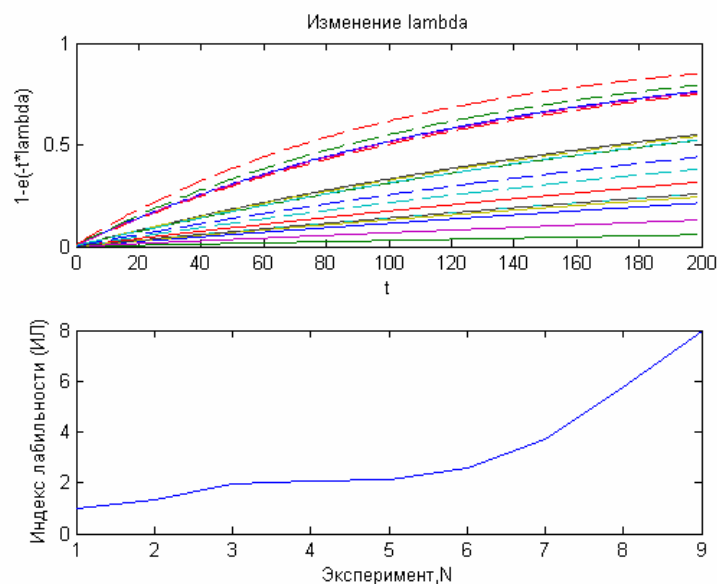


Рис. 7. Зависимость ИЛ от параметров кардиоритма, экспериментальная

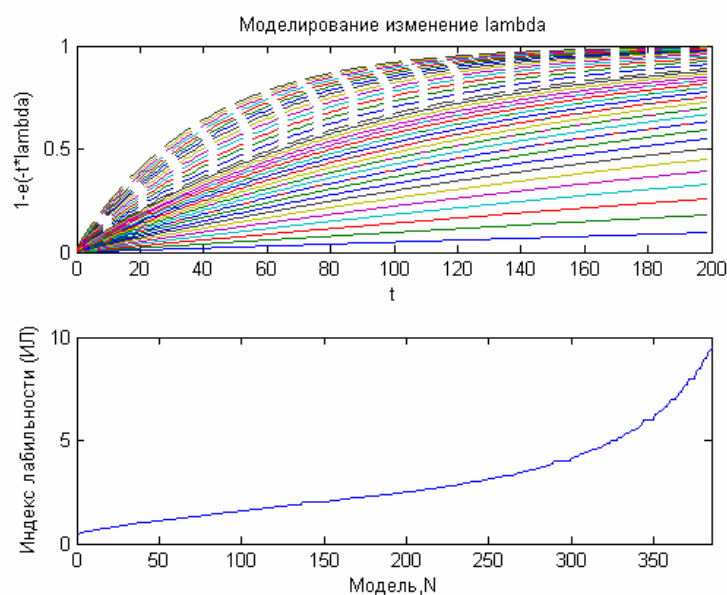


Рис. 8. Зависимость ИЛ от параметров кардиоритма, теоретическая

В таблицу 1 сведены определенные в экспериментах ИЛ, в зависимости от состояний человека (диагнозы верифицированы).

Таблица 1

Различные наблюдаемые состояния и значение ИЛ

Состояние пациентов/Диагноз	ИЛ
Вариант нормы	8
Астма	3,74
ИБС, стенокардия	2,6
ИБС, стенокардия	2,14
ИБС, стенокардия	2,1
ИБС, ИМ	1,98
ИБС, ИМ	1,32
ИБС, ИМ	1,01
Вариант нормы	5,75

Приведенные клинические данные показывают соответствие этой оценки состоянию организма и корректную количественную оценку снижения адаптационных возможностей.

В третьем разделе показано, что изучение данных спектрального анализа помогает количественно оценивать вклад тех или иных влияний на человека. Особенно важно это для наблюдений в динамике.

Суммарная мощность периодических компонентов сердечного ритма позволяет судить о степени активации тех звеньев регуляторного механизма, которые работают в определенном диапазоне частот в пределах длительности анализируемой записи сердечного ритма.

Методы спектрального анализа позволяют выделять колебательные составляющие, характерные для работы различных звеньев регуляторного механизма. При коротких записях (5 минут) выделяют три главные спектральные компоненты. Эти компоненты соответствуют диапазонам дыхательных волн и медленных волн 1-го и 2-го порядка. В настоящее время они получили названия высокочастотных (*High Frequency – HF*, в диапазоне 0,4 - 0,15 Гц), низкочастотных (*Low Frequency – LF*, в диапазоне 0,15 - 0,04 Гц) и очень низкочастотных (*Very Low Frequency – VLF*, в диапазоне 0,04 - 0,015 Гц).

Процедура оценки реакции организма на какие-либо воздействия заключается в следующем: на определенных временных интервалах снятия кардиоинтервалограммы (КИГ) – до воздействия, во время воздействия и после воздействия – снимается спектр КИГ. При этом разность спектральных плотностей мощности (СПМ) КИГ отражает силу воздействия на организм, а отношение спектральных плотностей мощности соответствующих интервалов КИГ может служить индексом эффективности (ИЭ) воздействия на перестройку функциональных систем. В медицинских исследованиях используется подобная, но качественная, а не количественная оценка реакции организма, при этом она не используется при проведении мониторинга.

ИЭ может определяться дифференцированно в заданных полосах спектра, соответствующих определенным регуляторным циклам, в частности как для стандартных диапазонов (*VLF*, *LF* и *HF*).

Интегральное отношение спектральных плотностей мощности $S_1(f)$ и $S_2(f)$ соответствующих интервалов КИГ дает индекс эффективности (ИЭ) воздействия на перестройку функциональных систем:

$$\text{ИЭ} = S_1(f) / S_2(f)$$

Под влиянием различных факторов «стационарно-равновесное» состояние организма нарушается и его дальнейшее состояние зависит от результата взаимодействия условий окружающей среды и внутренних резервов организма.



Рис. 8. Алгоритм модуля оценки индекса эффективности

Приводятся обширные экспериментальные данные, в частности о влиянии галокамеры.

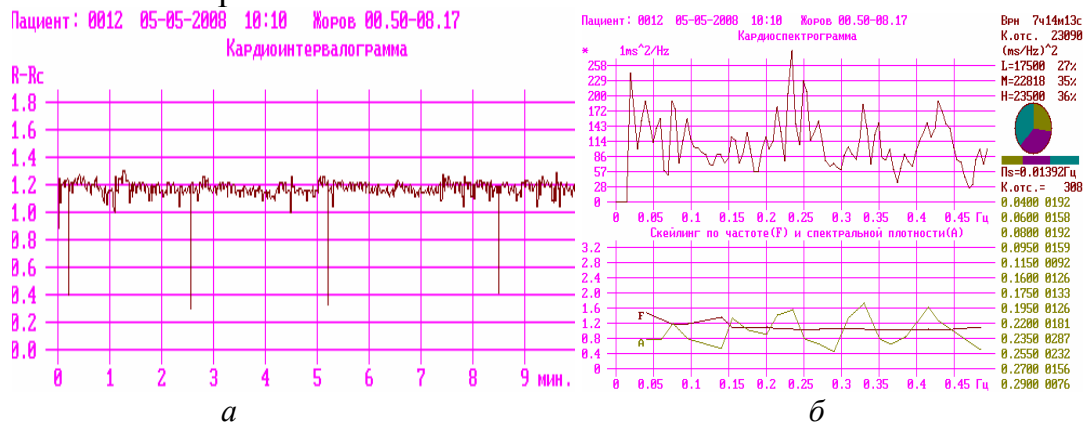


Рис. 9. Кардиоинтервалограмма до сеанса (а) и кардиспектрограмма до сеанса (б)

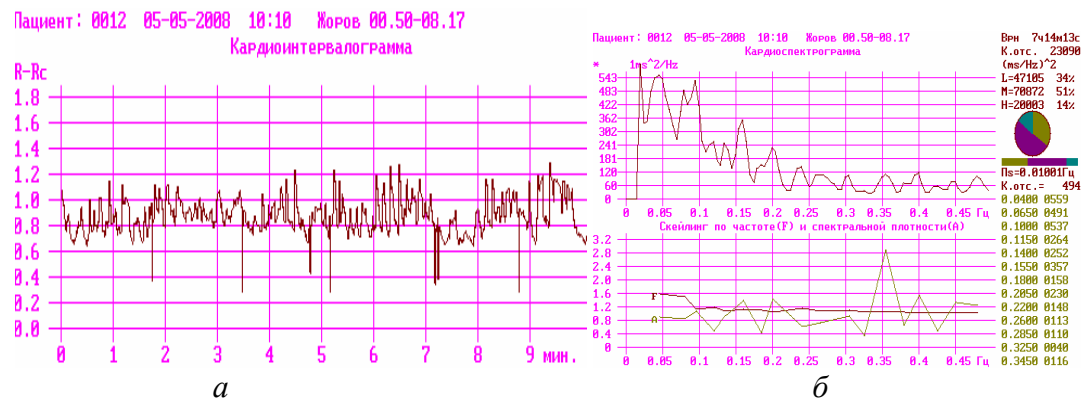


Рис. 10. Кардиоинтервалограмма после сеанса (а) и кардиспектрограмма после сеанса (б)

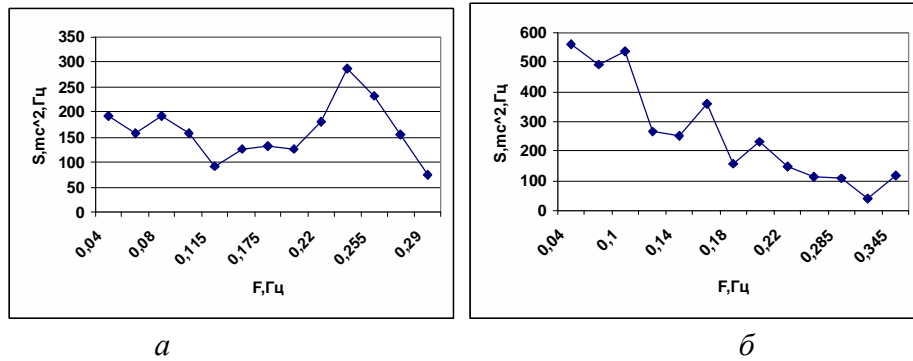


Рис. 11. СПМ до сеанса (а) и после сеанса (б)

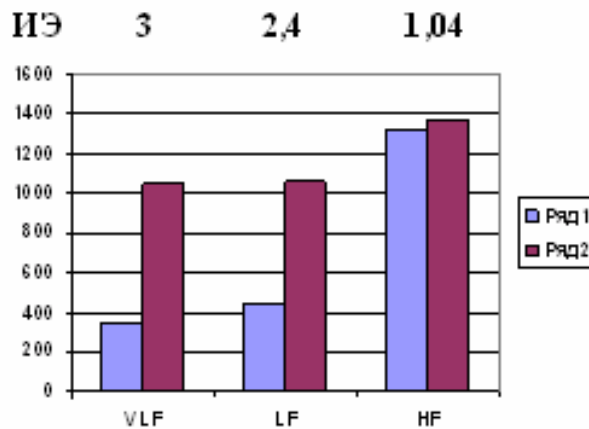


Рис. 12. ИЭ и сравнительная оценка СПМ в VLF, LF и HF диапазонах при психоэмоциональной коррекции

Для данного пациента в ходе эксперимента под влиянием процедуры психоэмоциональной коррекции положительный эффект отражается в низкочастотной области (LF), что характеризует улучшение состояния гуморальных регуляторов.

Поскольку центральная нервная система более оперативна, то в спектре кардиоритма она отражается в высокочастотном диапазоне (HF). Гуморальная регуляция осуществляется за счет транспорта кровотоком продуктов деятельности секреторных систем, определяющих более длительные циклы регуляции, что отражается в низкочастотном спектре кардиоритма (LF, VLF).

Третья глава посвящена исследованию и разработке методов структурного анализа биопроцессов для количественной оценки ФСО на основе методики определения фрактальной размерности (ФР) скелетных функций вейвлет-диаграмм биосигналов в виде «деревьев» Кейли, рассмотренной в работе А.И. Олемского, А.Я. Флата «Использование концепции фракталов в физике конденсированной среды» (рис. 14, в).

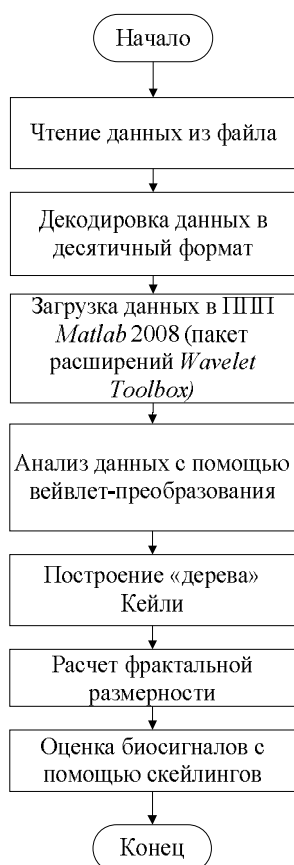


Рис. 13. Алгоритм вейвлет-преобразования

На рис. 13 представлен алгоритм структурного анализа биосигналов, на основе вейвлет-преобразования, построения «дерева» Кейли и вычисления фрактальной размерности.

В таблицу 2 сведены определенные в экспериментах ФР, в зависимости от состояний ССС человека (диагнозы верифицированы).

Таблица 2
Различные состояния пациентов и значения ФР

Состояние пациентов/Диагноз	ФР
Вариант нормы	4,95
Вариант нормы	5,67
ИБС, ИМ	3,47
ИБС, ИМ	3,32
ИБС, ИМ	2,1
ИБС, ИМ	2,54
ИБС, ИМ	2,78
ИБС, ИМ	3,43
ИБС, ИМ	3,14
ИБС, ИМ	1,89
ИБС, ИМ	2,3
ИБС, ИМ	3,08
ИБС, ИМ	3,29
ИБС, ИМ	3,34
ИБС, ИМ	2,97
ИБС, ИМ	3,13

Предложенные структурные оценки в виде фрактальной размерности скелетов вейвлет-диаграмм биосигналов позволяют количественно оценить меру нормы и патологии функционального состояния.

Анализ экспериментальных данных показывает, что для нормального состояния скелетоны имеют большую динамику и регулярные ветвления. В случае стенокардии и инфаркта миокарда динамика и ветвление вырождаются по мере выраженности патологии, т. е. структурной дезорганизации гомеостаза.

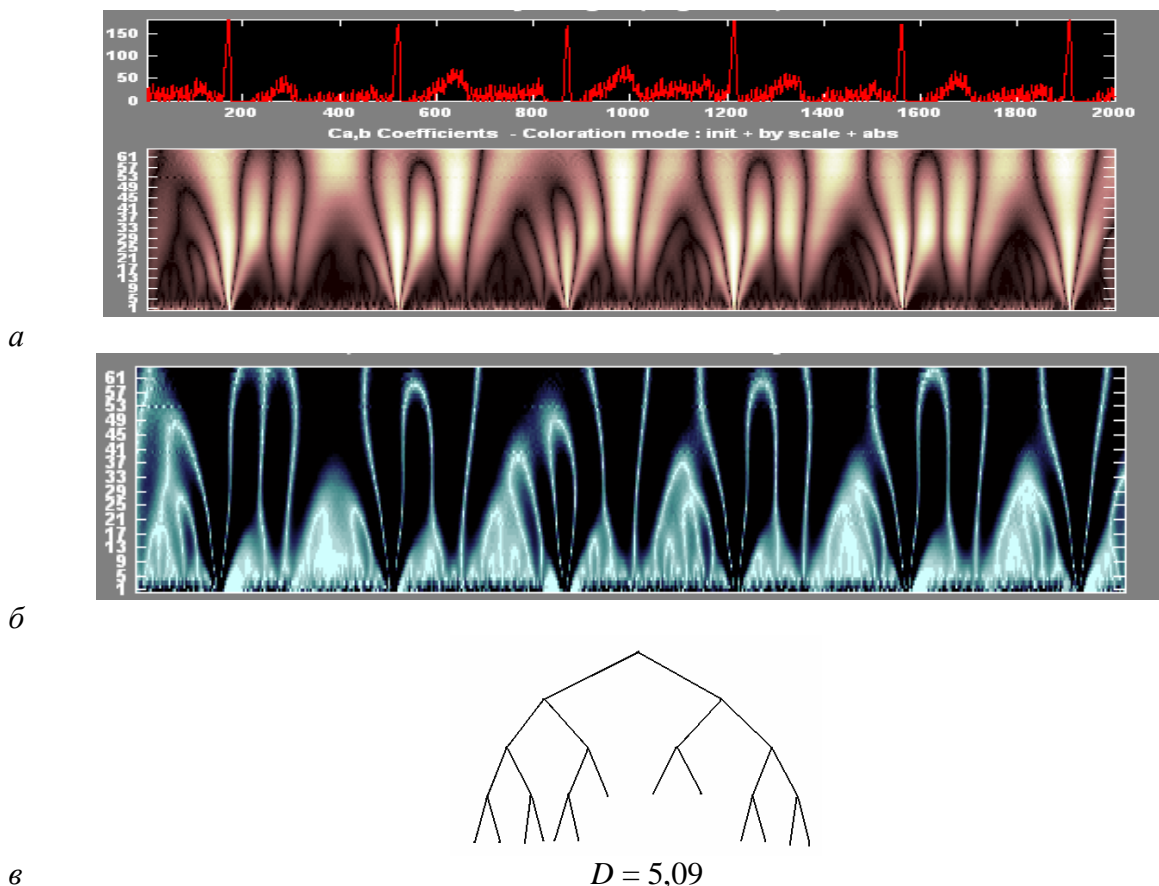


Рис. 14. Электрокардиограмма человека, перенесшего инфаркт миокарда, вейвлет-преобразование (а), скелетоны (б), «дерево» Кейли (в)

В четвертой главе рассмотрены возможности полифункционального мониторинга ФСО, представлен разработаный аппаратно-программный комплекс МКМ-08.

В АПК МКМ-08 введены расширенные функциональные возможности, позволяющие извлекать дополнительную информацию из совместного анализа различных биосигналов и их производных, в частности информацию о состоянии артериального и венозного сосудистого тонуса по скорости распространения пульсовой волны и фотоплетизмографического индекса. Предусмотрена возможность дистанционной передачи информации через

сети сотовой связи. Функциональная схема АПК МКМ-08 представлена на рис. 15.

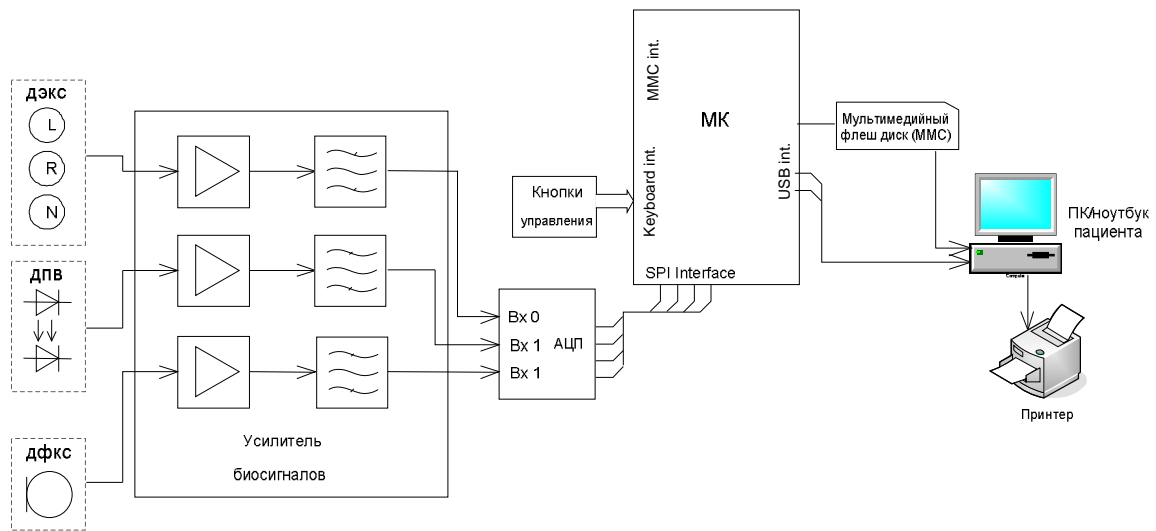


Рис. 15. Функциональная схема АПК

Для реализации системного подхода программное обеспечение мониторинга включает следующие модули (рис. 16).

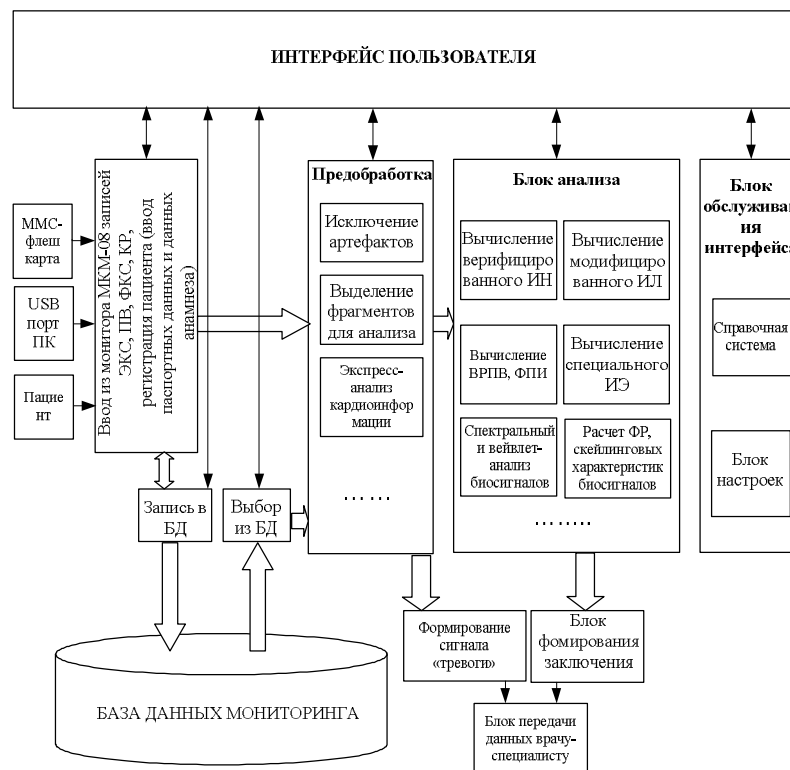


Рис. 16. Структурно-функциональная схема программных средств

Программный комплекс «Биосигнал» разработан для микроэлектронного кардиомонитора МКМ-08. Он позволяет считывать массив записей ЭКГ, ПВ, ФКС из кардиомонитора с последующей их визуализацией на экране и проведением различных методов анализа (спектральный, статистический и др.). Также предоставляется возможность ведения базы данных пациентов.

На АПК МКМ-08 была проведена серия экспериментов по измерению времени распространения пульсовой волны (ВРПВ).

На рис. 17 показана совместная запись ЭКГ и ПВ.

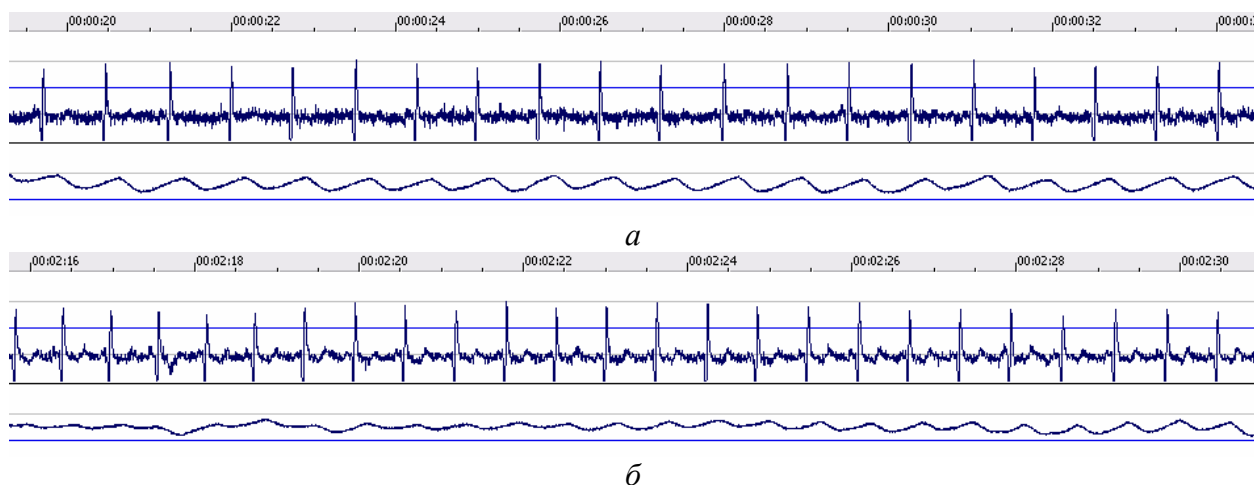


Рис. 17. Сигналы ЭКГ и ПВ, б - до нагрузки (в спокойном состоянии), в - после нагрузки

Сигналы ЭКГ и ПВ от пациента поступают на вход МКМ-08. Исследуемому измеряют артериальное давление (АД) общепринятым методом Короткова. Полученные цифры систолического и диастолического давления, рост, а также возраст исследуемого вносят в ПК, и с этого момента начинают собственно мониторинг ВРПВ.

Используется задержка между R зубцом электрокардиосигнала и пиком пульсовой волны.

Это позволяет непрерывно и с достаточной точностью определять время распространения пульсовой волны, а также предоставляет возможность осуществлять мониторинг артериального сосудистого тонуса и определения скорости распространения пульсовой волны.

Рассмотрены аппаратно-программные средства диагностики функционального состояния организма, обеспечивающие возможность автономного дистанционного мониторинга на основе существующей инфокоммуникационной инфраструктуры.

Предлагаемый механизм реализации телемедицины посредством *e-mail* на базе АПК МКМ-08 выглядит следующим образом (функциональная схема представлена на рис. 18, фотография рекордера МКМ-08 – на рис. 19):

- посредством АПК МКМ-08 снимаются биосигналы;
- через сменный накопитель (MMC-карта) или интерфейс *USB* данные передаются в компьютер;
- с помощью программы «*KSRG*» и «Диагностика» обрабатываются полученные данные и представляются в виде графического файла;
- посредством электронной почты графический файл передается либо в соответствующий консультационный центр, либо лечащему врачу-специалисту;

- специалист, получив электронную почту, анализирует полученные данные и принимает оперативные решения по поводу состояния здоровья пациента.

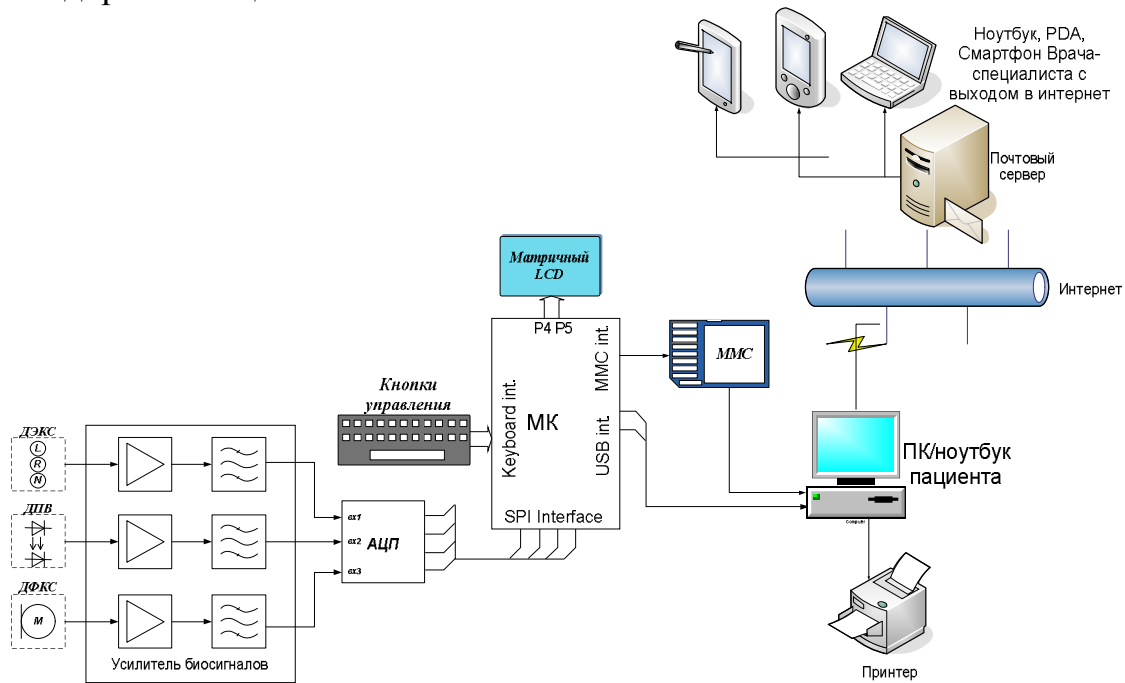


Рис. 18. Вариант реализации телемедицины посредством *e-mail*



Рис. 19. Фотография рекордера МКМ-08

Примеры передачи данных на смартфон представлены на рис. 20



Рис. 20. Передача данных на смартфон

Во всех предложенных схемах врач-специалист принимает решение на основе анализа удаленно полученных данных. Все схемы реализации телемедицины используют существующую инфокоммуникационную инфраструктуру и не требуют введения дополнительных стандартов и систем. Приводится оценка ресурсов, необходимая для передачи данных для всех уровней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам приведенных исследований были определены пути совершенствования аппаратно-программных средств холтеровского типа для диагностики функционального состояния организма, исследованы адекватные модели биопроцессов и биосигналов. Разработаны АПК, соответствующие современному уровню техники и технологии.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны варианты построения АПК полифункционального мониторинга, обеспечивающие анализ проводящей, сосудистой и мышечной систем сердца с возможностью дистанционного мониторинга на основе существующей инфокоммуникационной инфраструктуры, предназначенные для клинического, амбулаторного и бытового использования.

2. Разработанный метод оценки индекса напряжения (ИН) по Р.М. Баевскому повышает её достоверность при мониторинге ФСО. Это обеспечивается определением квазистационарных интервалов по минимуму дисперсии оценки ИН на различных интервалах усреднения при скользящем сглаживании вариационного ряда кардиоинтервалограммы. Таким образом дисперсия оценки ИН уменьшается в 1,5 – 3 раза.

3. Разработан алгоритм оценки функциональной подвижности организма (ФПО) с помощью индекса лабильности (ИЛ), учитывающий время релаксации и динамику восстановления регуляторных функций. Аппаратно-программный комплекс МКМ-08 контроля ФСО адекватно оценивает лабильность с помощью предложенных алгоритмов, так как наряду со

скоростью релаксации оценивает и динамику регуляторных циклов, выраженную в нарастании амплитуды колебаний кардиоритма. Отношение показателей аппроксимирующих экспонент характеризует степень адаптации организма к внешним воздействиям. Экспериментальные данные показывают, что предлагаемая оценка ИЛ корректно отражает степень адаптивности организма в зависимости от индивидуального состояния здоровья пациента.

4. Разработан алгоритм количественной оценки эффективности терапевтических бальнео- и физиопроцедур на основе индекса эффективности (ИЭ) для корректной дозировки и исключения неблагоприятных последствий. При положительном эффекте терапии происходит увеличение мощности спектральных составляющих *LF*, *VLF* по мере улучшения состояния организма, если этого не происходит – терапия не эффективна.

5. Разработана методика неинвазивного, атравматичного мониторинга артериального сосудистого тонуса с помощью измерения времени распространения пульсовой волны на основе совместного анализа электрокардиограммы и пульсовой волны. Этот метод максимально комфортен, не имеет неблагоприятных последствий от механического воздействия, позволяет непрерывно контролировать изменения АД.

6. Разработана методика структурного анализа биопроцессов для количественной оценки ФСО на основе фрактальной размерности скелетных функций вейвлет-диаграмм биосигналов. Данная методика позволяет количественно оценивать меру деградации ФСО, учитывает меру иерархической структурной организации и согласие регуляторных циклов.

Прогресс в микроэлектронной технологии позволяет неограниченно наращивать функциональные возможности извлечения и обработки информации для более глубокого анализа ФСО и обеспечивать простоту, удобство использования в клинических, амбулаторных, бытовых условиях, а также для дистанционного мониторинга (телемедицины) и большей доступности в медицинской практике и быту.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Желудько, С.П. Моделирование и анализ сигналов сердечно-сосудистой системы / С.П. Желудько, С.В. Исаев, Г.М. Алдонин // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр./ ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов. – М. : Радио и связь, 2006. – С. 194–196.

2. Аппаратно-программные средства в медицинских исследованиях / С.П. Желудько, О.Ю. Тарасова, Т.А. Гаврилова, Г.М. Алдонин // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. ст./ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов; отв. за вып. В.В. Сухотин, С.И. Трегубов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2007. – С. 372–374.

3. Применение СМТ у юных гимнастов 13 лет, имеющих 2-1 взрослый массовый спортивный разряд для повышения физической работоспособности/

Г.М. Алдонин, О.Ю. Тарасова, **С.П. Желудько**, И.В. Кубушко, С.В. Клеменков, Э.В. Каспаров // Научные труды VIII Международного конгресса «Здоровье и образование XXI веке. Концепции болезней цивилизации», 14–17 ноября 2007 г., РУДН. – М., 2007.

4. Оптимизация тренировочного процесса у юных гимнастов 9 лет 3, 2 юношеских массовых спортивных разрядов с помощью СМТ / Г.М. Алдонин, О.Ю. Тарасова, **С.П. Желудько**, И.В. Кубушко, С.В. Клеменков, Э.В. Каспаров // Актуальные вопросы современной хирургии: сб., посвященный 60-летию со дня рождения проф. Ю.С. Винника. – М.; Красноярск, 2008. – С. 421–423.

5. **Желудько, С.П.** Разработка программного модуля вейвлет-анализа биосигналов / С. А. Дорофеева, С.П. Желудько, Г.М. Алдонин // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – С. 173–175.

6. Программный модуль оценки индекса лабильности организма / Т. Ю. Казакова, В.В. Черепанов, **С.П. Желудько**, Г.М. Алдонин // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – С. 176–178.

7. Аппаратно-программный комплекс мониторинга и фрактальной коррекции функционального состояния организма / К.А. Жоров, Д.В. Шалыгин, О.А. Тронин, **С.П. Желудько**, Г.М. Алдонин // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – С. 181–184.

8. **Желудько, С.П.** Структурный анализ на основе полифункционального мониторинга состояния сердечно-сосудистой системы / С.П. Желудько, Г.М. Алдонин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 4. – С. 102–106.

(Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК).

9. **Желудько, С.П.** Автоволновая модель возбуждения проводящей сети сердца / С.П. Желудько, Г.М. Алдонин // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / науч. ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов; отв. за вып. А.А. Левицкий. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С. 200–203.

10. **Желудько, С.П.** Фотоплетизмографический дистанционный мониторинг сосудистого тонуса / Н.К. Латышева, С.П. Желудько, Г.М. Алдонин // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / науч. ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов; отв. за вып.: А.А. Левицкий. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С. 215–218.

11. **Желудько, С.П.** Повышение корректности оценки индекса напряжения при мониторинге функционального состояния организма / Г.М. Алдонин, С.П. Желудько // ЭФТЖ. 2009. Т. 4. С. 48-53 зарегистрировано в Информрегистре 11.08.2009 № 0420900047/0005.

Желудько Сергей Петрович

Разработка аппаратно-программных комплексов
с целью повышения эффективности мониторинга биосистем
Автореферат диссертации

Подписано в печать 22.10.09 г. Формат 60×84/16

Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ **794/09**

Отпечатано в ИПК СФУ 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82