

На правах рукописи



**Аль-Хулейди Нашван Амин**

**СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА  
БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владимир 2014

Работа выполнена на кафедре биомедицинских и электронных средств и технологий ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

**Научный руководитель**

**Сушкова Людмила Тихоновна**

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный работник ВПО РФ  
зав. кафедрой биомедицинских  
и электронных средств и технологий

**Официальные оппоненты:**

**Приоров Андрей Леонидович**

доктор технических наук, доцент  
доцент кафедры динамики электронных  
систем ЯрГУ им. П. Г. Демидова,  
г. Ярославль

**Вертилевский Никита Валерьевич**

кандидат технических наук  
руководитель технического отдела  
ООО «ИнфоЦентр», г. Владимир

**Ведущая организация**

Государственное унитарное предприятие  
«Медтехника», г. Владимир

Защита состоится «10» июня 2014 г. в 16 ч. в ауд. 301-3 на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, корп. 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ.

Автореферат разослан «9» апреля 2014 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

А. Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы**

Использование искусственных нейронных сетей для обнаружения, распознавания и классификации объектов, сигналов и изображений является одной из основных задач радиотехники, применительно к различным областям науки и техники.

Задачей классификации является отнесение образца к одному из нескольких попарно не пересекающихся множеств. Примером таких задач является медицинская диагностика, где необходимо определить, например, тип заболевания.

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются системами обработки информации, отличающимися от обычных систем параллельным характером передачи информации и наличием процесса саморегуляции для обеспечения заданной целевой функции. Указанные свойства способствуют их применению в медицинской диагностике с целью оказания помощи врачам в процессе принятия решения относительно наличия той или иной патологии.

Одним из методов диагностики нарушений сердечно-сосудистой системы применительно к задачам профилактической медицины является анализ информации о вариабельности сердечного ритма (ВСР), оценка которой основана на математическом анализе динамики изменений частоты сердечных сокращений (ЧСС). Данный метод основан на рассмотрении сердечного ритма (СР) как случайного процесса, представленного временным рядом кардиоинтервалов, к которому применимы различные методы обработки, в т.ч. нейросетевые.

Перспективными направлениями анализа биоэлектрического сигнала несущего информацию о ВСР считаются геометрические методы и корреляционная ритмография. Они более корректны для оценки нестационарных процессов, которые характерны для биологических систем.

Большой вклад в развитие нейросетевой технологии обработки и анализа биоэлектрических сигналов внесли многие российские ученые и специалисты, в том числе Конюхов В. Н., Овчинкина Т.В., Митин В.В., Кузьмин А.А. Григорьев Д.С., Спицын В.Т., и зарубежные авторы – Вильям Бакст., Babak M.A., Seyed K.S., Hoher M., Kestler H.A., Palm G. и др.

**Целью данной работы** является разработка системы нейросетевой обработки и анализа биоэлектрического сигнала, несущего информацию о ВСР, обеспечивающей повышение эффективности и качества функциональной диагностики сердечной деятельности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Провести анализ литературы по существующим подходам и методам обработки и распознавания образов гистограммы и скаттерграммы и эффективности применения ИНС в задаче анализа и классификации типов ВСР.
2. Сформировать необходимый объем обучающих и тестовых данных записей кардиоинтервалограмм здоровых людей и людей с нарушениями ритма на основе значений гистограмм и скаттерграмм.
3. Провести исследования вариантов кодирования выходов ИНС для решения задачи анализа скаттерграмм и гистограмм ритма сердца, обеспечивающей получение достоверной информации о функционировании сердца.
4. Разработать специализированные алгоритмы автоматизации проведения экспериментальных исследований ИНС с целью выбора архитектуры и оптимальных параметров нейронной сети для сформированных обучающих баз данных.
5. Провести экспериментальные исследования разработанной нейросетевой системы обработки и анализа биоэлектрического сигнала, несущего информацию о ВСР, и оценить эффективность её функционирования на основе выбранных критериев.

**Объектом исследования** является использование искусственных нейронных сетей для обнаружения, распознавания и классификации объектов, сигналов и изображений в радиотехнических устройствах.

**Предметом исследования** является разработка методики и алгоритмов обработки и нейросетевого анализа биоэлектрического сигнала, несущего информацию о вариабельности ритма сердца.

**Методы исследования.** Для решения поставленных выше задач были использованы методология системного анализа, теории радиотехники и ИНС, распознавания образов и цифровой обработки сигналов, корреляционная ритмография, геометрический метод анализа ВСР, статистика и методология экспериментальных исследований. В процессе работы использовался программный пакет Neural Network Toolbox системы Matlab 7.

Прикладное программное обеспечение для анализа вариабельности ритма сердца разрабатывалось с помощью программной среды Neural Network Wizard и Delphi.

**Научная новизна работы.** В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Методики создания образов скаттерграмм по их бинарному изображению и образов гистограмм биоэлектрического сигнала, несущего информацию о ВСР.

2. Методика кодирования входов и выходов искусственных нейронных сетей для анализа скаттерграмм и гистограмм ритма сердца.

3. Алгоритм поиска оптимального размера ИНС, отличающийся дополнительным циклом уточнения результата. Для выбора зоны поиска оптимального количества нейронов в скрытых слоях персептрона использовалась теорема Арнольда-Колмогорова-Хехт-Нильсена.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Разработанное прикладное программное обеспечение предназначено для оценки и анализа вариабельности ритма сердца для состояний “нормы” и наиболее часто встречающихся отклонений от нормы с чувствительностью 86,9%, специфичностью 92,1% и точностью 90,9%, а также анализ семи типов аритмий сердца с чувствительностью 84,5%, специфичностью 98,7% и точностью 97%.

2. Предложенные методики формирования входных образов для ИНС на основе скаттерграмм по их бинарному изображению и по значениям гистограмм, позволяют сократить себестоимость и время проведения процедуры функциональной диагностики сердца.

3. Разработанное программное обеспечение анализа ВСР может быть использовано для мониторинга функционального состояния работы сердца при проведении диспансеризации и профилактических обследований в различных организациях.

**Личный вклад автора.** Выносимые на защиту положения предложены и реализованы автором самостоятельно в ходе выполнения научно-исследовательских работ на кафедре биомедицинских и электронных средств и технологий (БЭСТ) Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых.

**Достоверность:**

- выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается результатами тестирования на основе баз данных записи кардиоинтервалограмм из архива PhysioNet и записи кардиоинтервалограмм студентов ВлГУ, экспериментальных исследований и апробации разработанных специализированных нейросетевых блоков анализа ВСР;

- выбора оптимального размера ИНС, отличающегося дополнительным циклом уточнения результата, подтверждается тем, что выбор зоны поиска оптимального количества нейронов в скрытых слоях персептрона был осуществлен на основе следствия из теоремы Арнольда-Колмогорова-Хехт-Нильсена;

- оценки эффективности обучения подтверждается использованием общепризнанных критериев оценки эффективности нейросетевых методов анализа, а именно, чувствительность, специфичность и точность.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Методики создания образов электрокардиосигнала (ЭКС) на основе использования гистограммы и скаттерграммы ритма сердца, обеспечивающие получение достоверной информации для распознавания функциональных отклонений в работе сердца.

2. Методика кодирования выходов ИНС для анализа скаттерграмм и гистограмм биоэлектрического сигнала, несущего информацию о ВСР, позволяющая сократить количество выходов ИНС.

3. Модифицированный алгоритм поиска оптимального размера ИНС, отличающийся дополнительным циклом уточнения результата. Выбор зоны поиска оптимального количества нейронов в скрытых слоях персептрона определяется по формуле, являющейся следствием из теорем Арнольда-Колмогорова-Хехт-Нильсена.

**Результаты внедрения работы.** Основные теоретические и практические результаты работы внедрены в научно-исследовательскую деятельность и в учебный процесс кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых при подготовке студентов по направлению 201000 «Биотехнические системы и технологии». Подтверждено актом внедрения. Созданное программное обеспечение прошло апробацию в кардиоцентре ГБУЗ ВО «Городская больница N-4 г. Владимира».

В соответствии с заключением о полезности, методика кодирования входов и выходов ИНС, а также модифицированная методика нахождения оптимального числа нейронов скрытого слоя ИНС представляют научно-практический интерес для ОАО «Владимирское КБ радиосвязи» при решении проектных задач, связанных с обработкой радиотехнических сигналов и изображений.

### **Апробация работы**

Основные научные и практические результаты работы докладывались и обсуждались на 8-й международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации», г. Владимир, 2009г.; Международной конференции «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы», г. Рязань, 2009 г.; IX международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ-2010), г. Владимир, 2010г.; X международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ-2012), г. Владимир, 2012 г.

### **Публикации**

Самостоятельно и в соавторстве по материалам диссертации опубликованы 10 работ, в том числе 3 в профильных журналах, рекомендован-

ных ВАК РФ, 1 на всероссийской конференции, 1 на международном молодежном конкурсе, 5 на международных конференциях.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографического списка, включающего 111 наименований и 2 приложения. Объём диссертации: 143 страницы машинописного текста, 73 рисунка и 42 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задача исследований, научная новизна, приводятся положения, выносимые на защиту и практическая значимость результатов диссертации.

**В первой главе** диссертации представлен обзор научной литературы по применению ИНС для обработки и анализа сигналов и изображений различной природы, а также специфические особенности решения задачи обработки биоэлектрических сигналов.

Также были рассмотрены теоретические вопросы создания ИНС, в том числе: структуры ИНС, функции активации, методы и алгоритмы обучения нейросетей, тип нормализации входных образов и критерии эффективности нейронных сетей.

Из рассмотренных вариантов структуры ИНС для решения поставленной в диссертации задачи представляет интерес исследование нейронных сетей прямого распространения типа многослойный персептрон, а также модульная структура на основе многослойного персептрона.

В качестве функции активации целесообразен выбор сигмоидальной функции. Выбор линейной нормализации входных значений обусловлен необходимостью обеспечения неискаженной формы сигнала.

В качестве критериев эффективности нейронных сетей выбираются чувствительность, специфичность и точность, как наиболее часто используемые на практике.

Определение числа скрытых слоев и числа нейронов в каждом слое зависит от конкретной задачи. Анализ литературы показывает, что вопрос нахождения оптимального числа нейронов скрытого слоя не имеет однозначного решения по причине отсутствия устоявшейся методики.

В данной работе для определения необходимого количества нейронов в скрытых слоях персептрона предполагается использовать следствие теоремы Арнольда-Колмогорова-Хехт-Нильсена.

**Во второй главе** диссертации рассмотрены основные методы оценки variability сердечного ритма. Анализ литературы показывает, что ос-

новными методами анализа сердечного ритма является статистические методы, геометрические методы, корреляционная ритмограмма, спектральные методы, автокорреляционный анализ, методы цифровой фильтрации и методы нелинейной динамики, имеющие свои особенности и области применения. Так, геометрические методы позволяют оценить физиологическое состояние человека. Для распознавания аритмий использование методов статистического и спектрального анализа variability сердечного ритма (ВСР) чаще оказывается малоинформативным или неприемлемым в отличие от применения оценки корреляционной ритмограммы.

Анализ современных методов исследования variability сердечного ритма показал, что анализ гистограммы и скаттерграммы ритма сердца является более корректными для оценки нестационарных процессов, которые характерны для биологических систем. В связи с этим в данной работе для анализа ВСР используются геометрические методы и корреляционная ритмограмма.

С помощью геометрических методов анализа ВСР осуществляется построение и анализ гистограмм распределения RR- интервалов (рис.1).

К методам корреляционной ритмографии относится графическое отображение последовательных пар кардиоинтервалов (предыдущего и последующего) в двумерной координатной плоскости. При этом по оси абсцисс откладывается величина – RR, а по оси ординат величина  $RR_{n+1}$ . График и область точек, полученных таким образом, называется скатерограммой (рис.2).

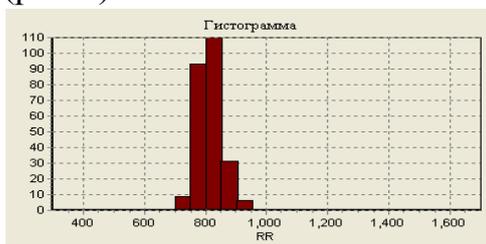


Рис. 1. Гистограмма

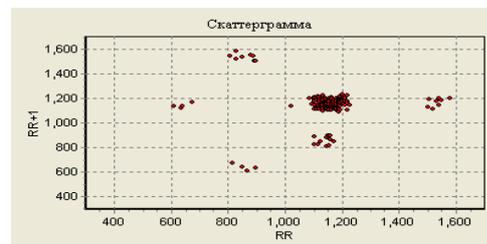


Рис. 2. Скаттерграмма

Нейросетевой анализ обладает достаточной гибкостью, обеспечивает нелинейную обработку исходных данных, имеет хорошую обобщающую способность и возможность обучения. В связи с этим целью настоящей работы является исследование целесообразности и особенностей применения нейронных сетей в автоматизированном анализе ВСР.

На основе указанных выводов далее решается задача исследования эффективности применения ИНС для анализа variability сердечного ритма с целью получения информации о функциональном состоянии сердца.

**В третьей главе** рассматривается проблема автоматического анализа ВСР. На основе архива PhysioBank, а также записей кардиоинтервалограмм студентов ВлГУ, спортсменов и людей с нарушениями ритма сердца в городе Владимире, сформирован необходимый объем обучающих и тестовых баз данных: “Типы ВСР” и “Типы аритмий сердца”.

На основе собранных данных были сформированы выборки, объемы которых представлены в табл.1.

Таблица 1. Базы данных “Типы ВСР” и “Типы аритмий сердца”

Наименование БД	Обучающая БД	Тестовая БД	Всего записи БД
База данных “Типы ВСР”	420	418	838
База данных “Типы аритмий”	410	405	815

Для выделения информативных признаков в обучающих выборках использовались значения гистограмм RR-интервалов и бинарной матрицы скаттерграмм.

Образы гистограмм сформированы на основе 250 последовательных кардиоинтервалов. В соответствии с общеизвестными требованиями к построению гистограммы ритма сердца в данной работе образы гистограмм содержат значения попаданий RR-интервалов в диапазон от 300 до 1700 с шагом 50 (в результате чего получается 29 значений).

Образы скаттерграммы сформированы также на основе 250 последовательных кардиоциклов путём разбиения полученного изображения на равные сегменты и последующей его бинаризацией (рис.3).

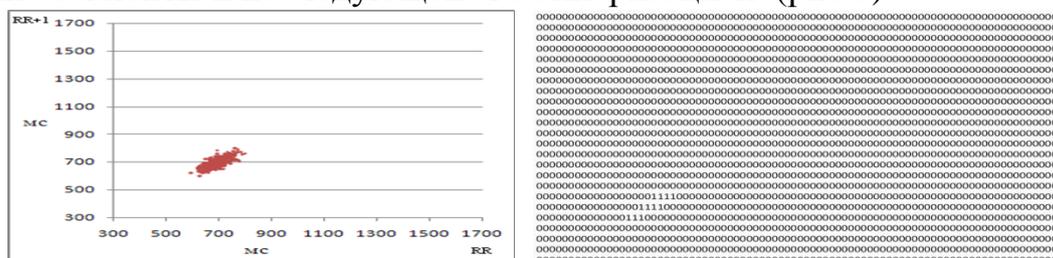


Рис. 3. Скаттерграмма и её бинарная матрица.

С целью выбора оптимального варианта автоматизированного анализа скаттерграмм по их бинарному изображению в ИНС создавались образы скаттерграмм с различным количеством пикселей в матрице: 30\*30, 60\*60, 90\*90, 120\*120, 150\*150.

В качестве критериев эффективности функционирования нейросети (НС) использовались чувствительность, специфичность и точность.

Результат исследования НС в задачах анализа скаттерграммы показан на рисунке 4.

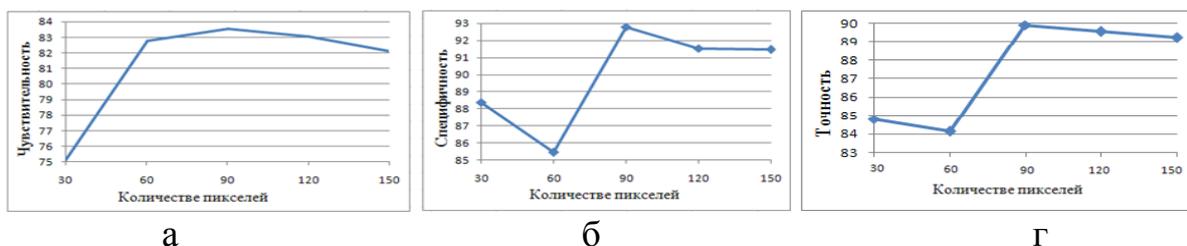


Рис. 4. Результаты тестирования НС при анализе скаттерграммы по её бинарному изображению: а – зависимость между количеством пикселей и чувствительностью, б – зависимость между количеством пикселей и специфичностью, г – зависимость между количеством пикселей и точностью.

Результаты исследований показали, что при количестве пикселей 90\*90 (8100) нейросеть имела лучшие значения средних значений показателей чувствительности (83,6%), специфичности (92,8%) и точности (89,9%).

Для БД “Типы ВСР” все данные были разделены на три основные группы, характеризующие: “симпатический тип” (Тахикардия), “нормальный тип” (Нормокардия) и “парасимпатический тип” (Брадикардия). Кроме того, каждая группа дополнительно разделялась на подгруппы: “норма”, “аритмия”, “дыхание”, “стресс”, а также их комбинации “аритмия и дыхание”, “стресс и аритмия”.

В результате сформированы 18 классов, каждый из которых имеет свой собственный эталон. С целью исследования влияния количества выходов НС, соответствующих классам БД “Типы ВСР”, на эффективность её функционирования была создана еще одна структура базы данных, содержащая 6 классов значений ритма сердца, определяющих 6 выходов ИНС, соответствующих тахикардии, нормокардии, брадикардии, а также наличию аритмии, дыхания и стресса.

Результат формирования БД эталонов из 6 основных классов и кодирования выходов ИНС в соответствии с типами гистограмм или скаттерграмм представлен в таблице 2.

Таблица 2. Кодирование выходов ИНС (6 эталонов)

Тип гистограмм или скаттерограмм		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
“Симпатического” типа (Тахикардия)	Норма	1	0	0	0	0	0
	Аритмия	1	0	0	1	0	0
	Дыхание	1	0	0	0	1	0
	Аритмия и дыхание	1	0	0	1	1	0
	Стресс	1	0	0	0	0	1
	Стресс и аритмии	1	0	0	1	0	1
Нормы (Нормокардия)	Норма	0	1	0	0	0	0
	Аритмия	0	1	0	1	0	0
	Дыхание	0	1	0	0	1	0
	Аритмия и дыхание	0	1	0	1	1	0
	Стресс	0	1	0	0	0	1
	Стресс и аритмии	0	1	0	1	0	1

“Парасимпатического” типа (Брадикардия)	Норма	0	0	1	0	0	0
	Аритмия	0	0	1	1	0	0
	Дыхание	0	0	1	0	1	0
	Аритмия и дыхание	0	0	1	1	1	0
	Стресс	0	0	1	0	0	1
	Стресс и аритмии	0	0	1	1	0	1

Для выделения информативных признаков в обучающих выборках здесь также использовались значения гистограмм RR-интервалов и бинарной матрицы скаттерграмм.

Проведенный сравнительный анализ результатов исследования двух методов кодирования выходов ИНС (18 и 6 классов) для БД “Типы ВСР” (по значению гистограмм и по бинарному изображению скаттерграмм), показал, что лучшими характеристиками чувствительности обладает сеть, имеющая 6 классов. Специфичность и точность нейросети является высокой в обоих случаях методов кодирования выходов ИНС.

Результат исследования НС в задачах анализа гистограммы показан на рисунке 5.

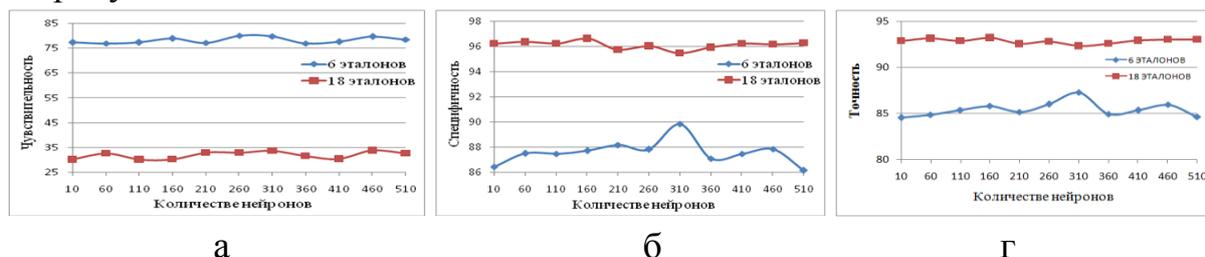


Рис. 5. Результаты тестирования НС при анализе гистограмм:

а – зависимость между количеством нейронов и чувствительностью, б – зависимость между количеством нейронов и специфичностью, г – зависимость между количеством пикселей и точностью.

Результат исследования НС в задачах анализа скаттерграммы показан на рисунке 6.

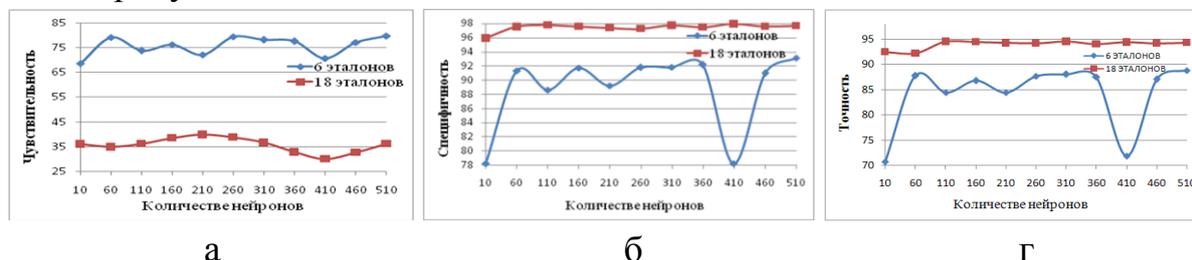


Рис. 6. Результаты тестирования НС при анализе скаттерграмм:

а – зависимость между количеством нейронов и чувствительностью, б – зависимость между количеством нейронов и специфичностью, г – зависимость между количеством пикселей и точностью.

Это можно объяснить тем, что при использовании 6 классов, количество обучающих данных каждого класса увеличивается и, как следствие, увеличивается чувствительность нейросети.

В связи с этим, в дальнейших исследованиях использовался вариант кодирования выходов искусственных нейронных сетей на 6 классов.

Патологии, связанные с аритмией сердца, были выделены в отдельную базу данных и для выделения информативных признаков использовались скаттерграммы по её бинарному изображению, которые в случаях, когда на фоне монотонного ритма встречаются редкие и внезапные нарушения (наличие аритмии) являются более информативным, чем гистограммы. Обучающая база содержит наиболее часто встречающиеся 7 видов аритмии.

В работе проведено сравнение многослойного персептрона и модульной структуры, построенной на многослойном персептроне, как вариантов построения системы автоматизированного анализа ВСР.

На рисунке 7 приведены структуры многослойного персептрона (МП) и модульный вариант НС, построенной на основе МП.

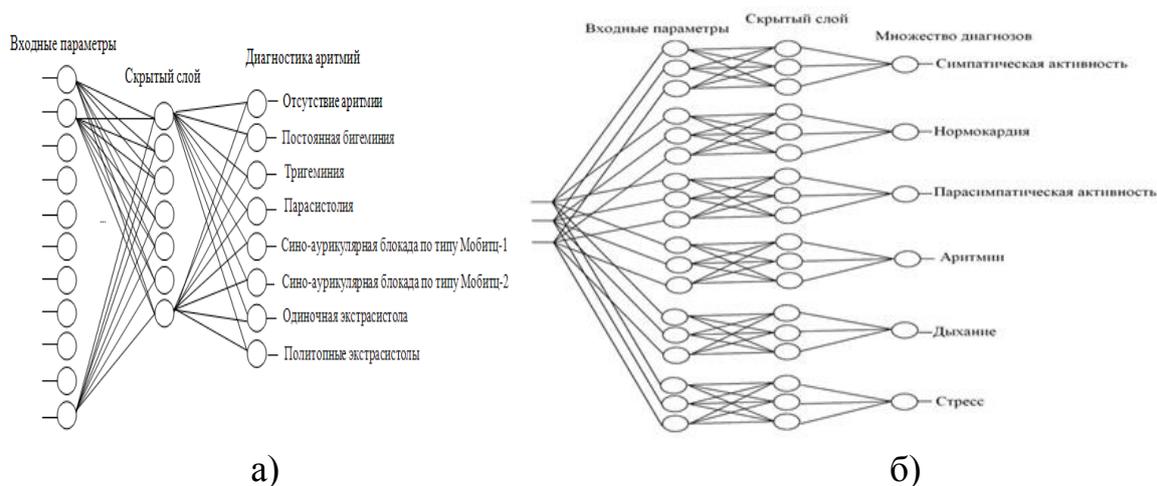


Рис. 7. Схема многослойного персептрона (а) и модульный вариант НС, построенной на основе МП (б).

Для исследования ИНС на основе структуры многослойный персептрон и структуры модульного варианта МП в задачах анализа ВСР были разработаны соответствующие алгоритмы и программы.

В качестве примера на рисунке 8 представлен алгоритм исследования структуры ИНС типа многослойный персептрон.

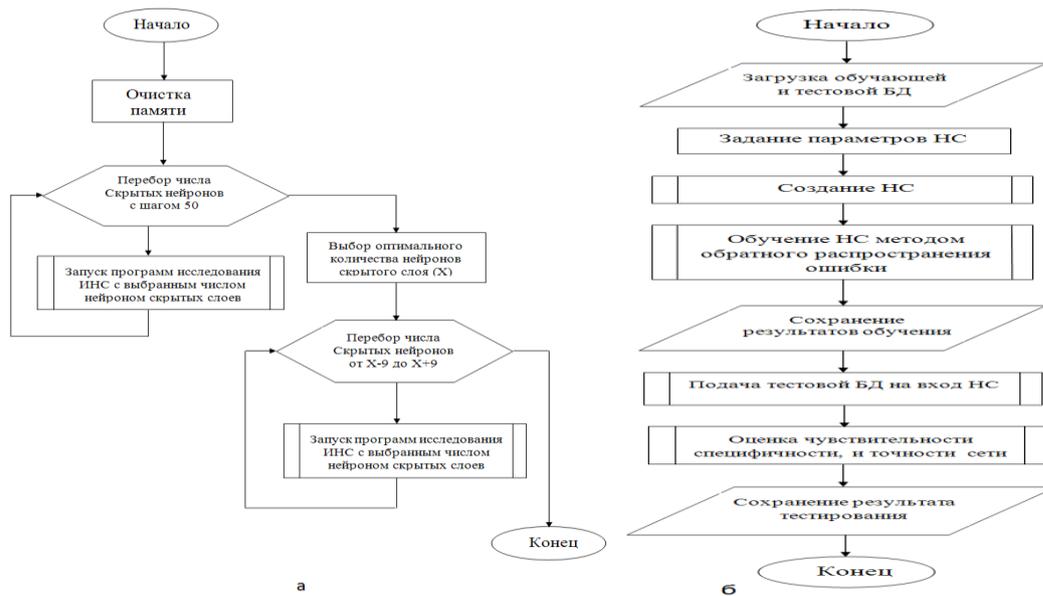


Рис. 8. Алгоритмы исследования структуры ИНС многослойный персептрон:  
 а) программа автоматизации исследования НС для анализа ВСР;  
 б) подпрограмма исследования НС для анализа ВСР.

Исходя из выше изложенного, экспериментальные исследования работы ИНС для анализа ВСР проводятся поэтапно в соответствии со структурой, представленной на рис.9.

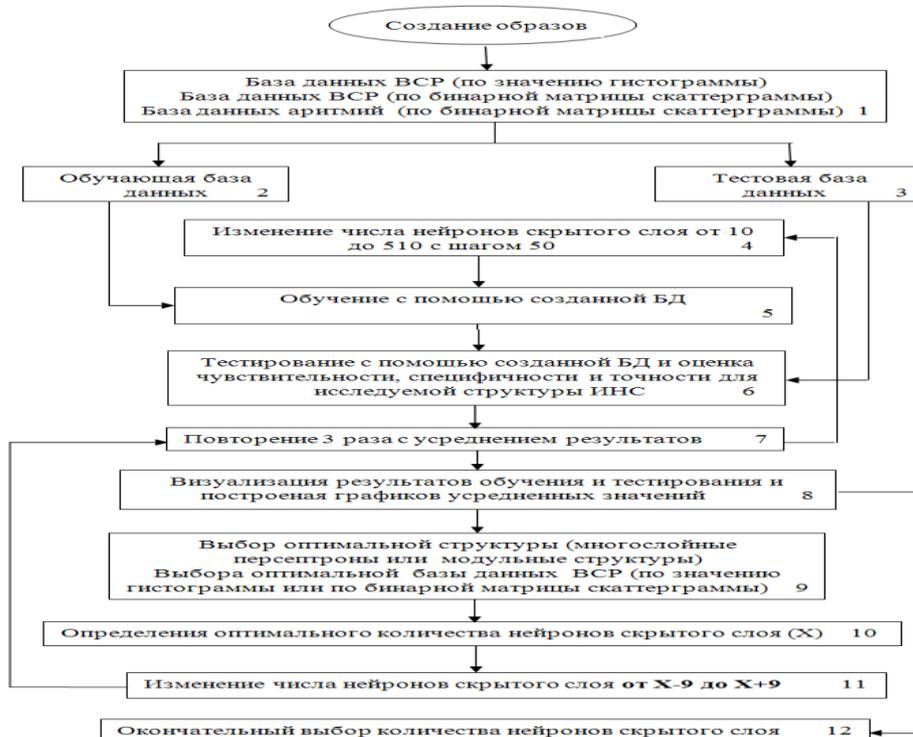


Рис. 9. Основные этапы экспериментального исследования структуры ИНС в задаче анализа ВСР.

**В четвертой главе** приводятся результаты исследования функционирования нейронных сетей на основе структуры «многослойный персептрон» и структуры модульного типа для баз данных «Типы ВСР» и «Типы аритмий сердца».

Результаты экспериментальных исследований для двух вариантов структурного построения нейросетевого блока (многослойный персептрон и модульного варианта) для БД типов ВСР по гистограмме и по скаттерграмме представлены в табл. 3 и табл.4.

Таблица 3. Результаты исследования нейронных сетей при оценке и анализе ВСР по гистограмме

Выход	Чувствительность	Специфичность	Точности	Число нейронов
Многослойный персептрон				
Тахикардия	95,3	96,9	96,5	60
Нормокардия	95,4	95,7	95,5	
Брадикардия	88,9	98,3	97	
Аритмии	71,4	72,4	71,9	
Дыхание	62	76	70,3	
Стресс	67,4	92,1	86,5	
Модульная структура				
Тахикардия	94,7	99,1	97,9	310
Нормокардия	99,4	98,7	99,1	10
Брадикардия	100	100	100	10:510
Аритмии	76,1	72,4	74,3	160
Дыхание	61,6	76,6	70,7	510
Стресс	75,6	96,7	91,8	510

В таблице 4 представлены результаты исследования нейронных сетей при оценке и анализе ВСР по скаттерграмме.

Выход	Чувствительность	Специфичность	Точность	Число нейронов
Многослойный персептрон				
Тахикардия	82,7	97,2	93,4	10
Нормокардия	95,9	82,7	90,6	
Брадикардия	95,1	95,6	95,5	
Аритмии	82,8	84,9	83,9	
Дыхание	68,4	69,3	68,9	
Стресс	67,4	94,1	88	

Модульная структура				
Тахикардия	94	98,9	97,8	10
Нормокардия	99,1	96,5	98,1	10
Брадикардия	100	100	100	460
Аритмии	79,8	80,6	80,2	10
Дыхание	54,3	71,6	64,6	210
Стресс	67,4	97,7	90,8	210

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшей эффективностью обладает модульная структура построения нейросетевого анализатора гистограмм и скаттерграмм ритма сердца. Результаты вычисления средней чувствительности, специфичности и точности построения ИНС для базы данных «Типы ВСР» по гистограмме и скаттерграмме приведены в табл. 5.

Таблица 5. Сопоставительные данные результатов обучения и тестирования ИНС при оценке и анализе ВСР по гистограмме и скаттерграмме

Тип структуры ИНС	Средняя Чувствительность %	Средняя специфичность %	Средняя точность%
По гистограмме			
Многослойный перцептрон	80,1	88,6	86,2
Модульная структура	84,5	90,6	89
По скаттерграмме			
Многослойный перцептрон	82	87,3	86,7
Модульная структура	82,4	91	88,6

Результаты исследования нейронных сетей для базы данных «Типы ВСР» показывают, что во всех случаях (кроме случаев аритмий) наибольшая эффективность распознавания тахикардии, нормокардии, брадикардии, а также дыхания и стресса достигается при использовании в качестве источника информации значений гистограммы ритма сердца, а для распознавания наличия аритмий использование образов скаттерграммы по их бинарному изображению (табл 3 и 4).

Для решения задачи оценки количества нейронов скрытого слоя в данной работе были проведены двухэтапные исследования. На первом этапе для определения оптимальной структуры нейронной сети, а также значений входов для БД «Типы ВСР» и выбора оптимального количества нейронов скрытого слоя изменение числа нейронов скрытого слоя осуществлялось в интервале от 10 до 510 с шагом в 50 нейронов. Затем найденное значение количества нейронов скрытого слоя  $X$  уточняется на втором этапе в интервале  $X-9$  до  $X+9$  с шагом 1.

Из таблицы 3 и 4 следует, что в случае распознавания парасимпатиче-

ской активности показатели чувствительности, специфичности и точности являются максимальными (100%). Поэтому второй этап экспериментального исследования для данного класса отсутствует.

Результаты второго этапа экспериментального исследования ИНС для БД «Типы ВСР» представлены на рисунках 10-12.

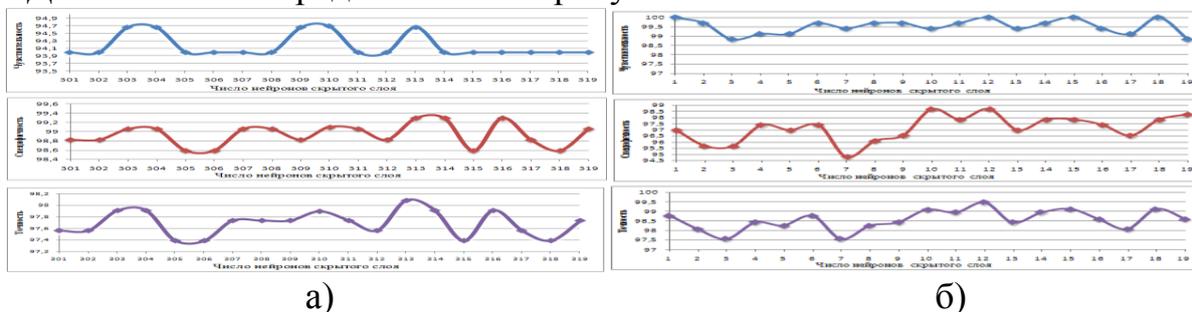


Рис.10. Значения чувствительности, специфичности и точности для распознавания: а) тахикардии и б) нормокардии.

Как видно из рисунка 10, для тахикардии при чувствительности 94,7%, специфичности 99,3% и точности 98,1% оптимальное число нейронов скрытого слоя составляет 313, а для нормокардии при чувствительности 100%, специфичности 98,7% и точности 99,5% оптимальное число нейронов скрытого слоя составляет 12.

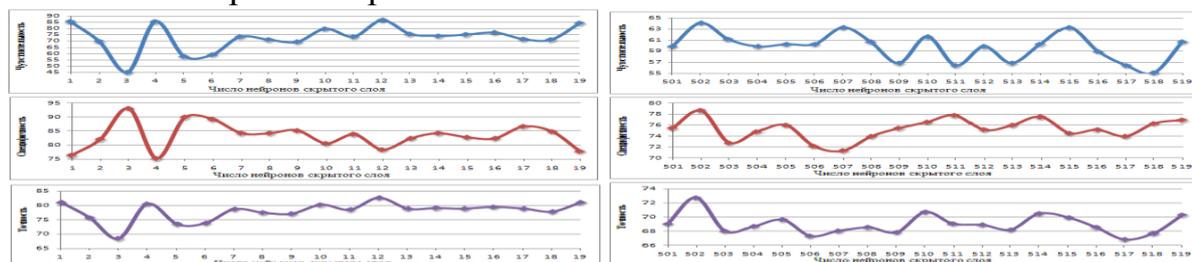


Рис.11. Значения чувствительности, специфичности и точности для распознавания: а) аритмии; б) дыхания.

Из рисунка 11 видно, что оптимальное число нейронов скрытого слоя составляет 12 при чувствительности 86,5%, специфичности 78,5% и точности 82,6%, а оптимальное число нейронов скрытого слоя для дыхания составляет 502 при чувствительности 64,1%, специфичности 78,7% и точности 72,7%.

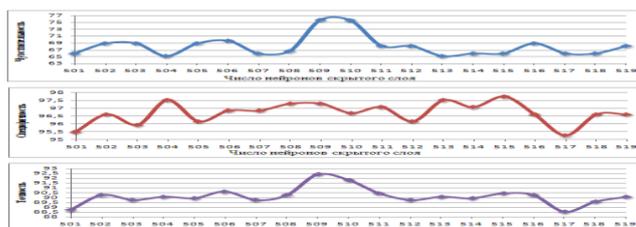


Рис.12. Значения чувствительности, специфичности и точности для распознавания стресса

Из рисунка 12 следует, что оптимальное число нейронов скрытого слоя составляет 509 при чувствительности 75,8%, специфичности 97,3% и точности 92,4%. Результаты второго этапа экспериментального исследования ИНС для БД «Типы ВСР» представлены в табл.6.

Таблица 6. Результаты второго этапа экспериментального исследования ИНС для БД «Типы ВСР»

Наименование тип образа ВСР	Чувствительность	Специфичность	Точность	Число нейронов
Тахикардия	94,7	99,3	98,1	313
Нормокардия	100	98,7	99,5	12
Аритмии	86,5	78,5	82,6	12
Дыхание	64,1	78,7	72,7	502
Стресс	75,8	97,3	92,4	509

Результаты экспериментальных исследований для двух вариантов структурного построения нейросетевого блока (многослойный персептрон и модульного типа) для случая распознавания аритмии ритма сердца представлены в табл.7.

Таблица 7. Результаты исследования НС при распознавании аритмии сердца по скаттерграмме

Выход	Чувствительность	Специфичность	Точность	Число нейронов
Многослойный персептрон				
Y1	100	98	98,6	360
Y2	66,7	98,1	95,6	
Y3	100	100	100	
Y4	77,8	99,5	97,8	
Y5	83,3	97,5	96,1	
Y6	70	99	95,2	
Y7	55,6	100	94,7	
Y8	66,7	97,1	94,7	
Модульная структура				
Y1	100	100	100	110, 160 и 510
Y2	100	100	100	110
Y3	100	100	100	360
Y4	83,3	100	98,7	210
Y5	95,8	97,1	96,9	10
Y6	70	98	94,3	310
Y7	55,6	100	94,7	10
Y8	66,7	94,3	92,1	160

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что наибольшей эффективностью распознавания аритмий сердца обладает также модульная структура построения нейросетевого блока.

Таблица 8. Сопоставительные данные результатов обучения и тестирования ИНС при распознавании аритмии сердца

Тип структуры ИНС	Средняя чувствительность %	Средняя специфичность %	Средняя точность %
Многослойный персептрон	77,5	98,7	96,6
Модульная структура	83,9	98,7	97,1

Из таблицы 7 следует, что в случае распознавания отсутствия аритмии, аллоритмии (при постоянной бигеминии) и аллоритмии (при тригеминии) показатель чувствительности, специфичности и точности являются максимальными (100%). Поэтому второй этап экспериментального исследования для этих классов отсутствует.

Результатам второго этапа экспериментального исследования ИНС для БД «Типы аритмий» представлены на рисунках 13-15.

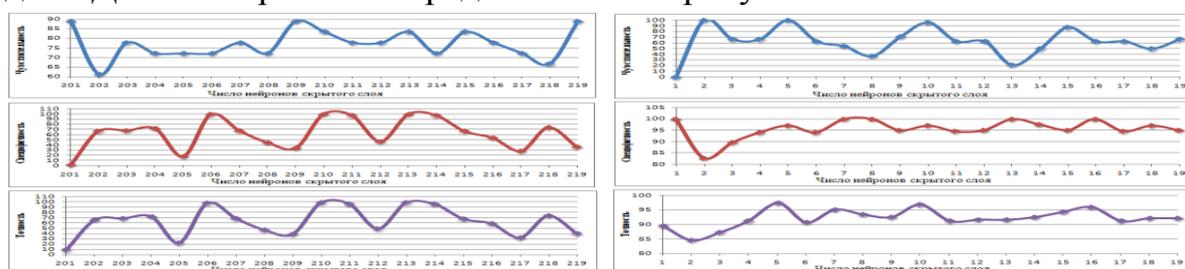


Рис. 13. Значения чувствительности, специфичности и точности для распознавания:  
а) парасистолы; б) сино-аурикулярной блокады (Мобитц-1).

Анализ приведенных на рисунке 13 зависимостей показывает, что для парасистолы при чувствительности 83,3%, специфичности 100% и точности 98,7% оптимальное число нейронов скрытого слоя составляет 210 и 213, в то время как для сино-аурикулярной блокады (Мобитц-1) при чувствительности 100%, специфичности 97,1% и точности 97,4% оптимальное число нейронов скрытого слоя составляет 5.

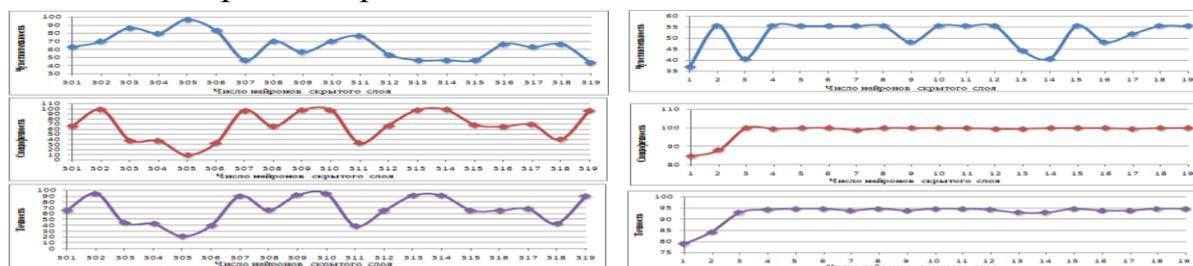


Рис. 14. Значения чувствительности, специфичности и точности для распознавания:  
а) сино-аурикулярной блокады (Мобитц-2); б) одиночной экстрасистолы.

Из рисунка 14 видно, что оптимальное число нейронов скрытого слоя для сино-аурикулярной блокады (Мобитц-2) составляет 302 при чув-

ствительности 70%, специфичности 98,5% и точности 94,7%, а оптимальное число нейронов скрытого слоя для одиночной экстрасистолы составляет 5, 6, 8, 10, 11, 15, 18 и 19 при чувствительности 55,6%, специфичности 100% и точности 94,7%.

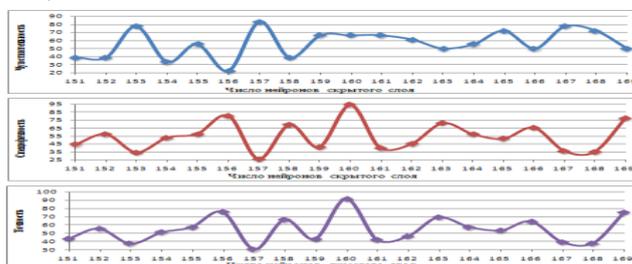


Рис. 15. Значения чувствительности, специфичности и точности для распознавания политопной экстрасистолы.

Из рисунка 15 следует, что оптимальное число нейронов скрытого слоя составляет также 160 (результаты первого этапа) при чувствительности 66,7%, специфичности 94,3% и точности 92,1%.

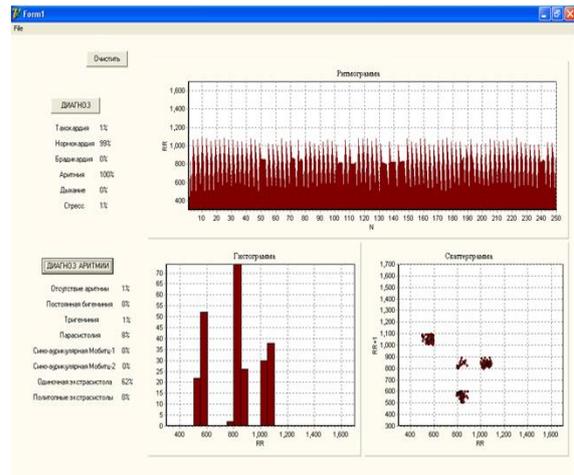
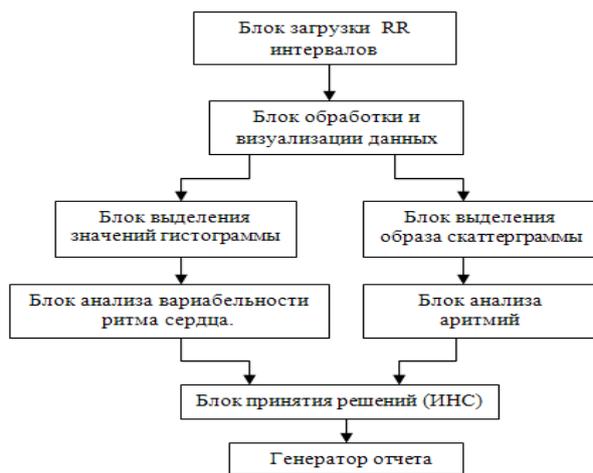
Результаты второго этапа экспериментального исследования ИНС для случая распознавания аритмии ритма сердца представлены в табл. 9.

Таблица 9. Результаты второго этапа экспериментального исследования ИНС для случая распознавания аритмии сердца

Наименование тип образца аритмии	Чувствительность	Специфичность	Точность	Число нейронов
Парасистолия	83,3	100	98,7	210 и 213
Сино-аурикулярная блокада (Мобитц-1)	100	97,1	97,4	5
Сино-аурикулярная блокада (Мобитц-2)	70	98,5	94,7	302
Одиночная экстрасистола	55,6	100	94,7	10,11,15,18 и 19
Политопные экстрасистолы	66,7	94,3	92,1	160

На основе результатов научных исследований анализа variability сердечного ритма, полученных в данной диссертации, разработано прикладное программное обеспечение для анализа ВСР.

Разработанная структурная схема прикладного программного обеспечения для анализа ВСР на основе модульной структуры показана на рисунке 16.



а)

б)

Рис. 16. Прикладное программное обеспечение (ППО) для анализа ВСР:  
а) структурная схема, б) интерфейс ППО.

Разработанное прикладное программное обеспечение для анализа вариабельности ритма сердца предназначено для использования в системах автоматизированного анализа функционального состояния работы сердца. В результате выполнения программы выдается информация о наличии или отсутствии отклонений в вариабельности ритма сердца, а также распознавание наиболее часто встречающихся аритмий.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена решению научно-технической задачи совершенствования и развития нейросетевых методов обработки и анализа ЭКГ сигнала, несущего информацию о вариабельности ритма сердца и создания прикладного программного обеспечения для автоматического анализа вариабельности сердечного ритма на этапе профилактических мероприятий.

В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. Обзор и анализ научной литературы позволил выбрать параметры ИНС для разработки прикладного программного обеспечения оценки ЭКГ сигнала, несущего информацию о вариабельности ритма сердца. В качестве основы построения ИНС для разработки прикладного программного обеспечения анализа ВСР была выбрана модульная структура нейросетевого блока.

2. На основе архива PhysioBank, а также записей кардиоинтервалограмм студентов ВлГУ, спортсменов и людей с нарушениями ритма сердца в г. Владимире, сформирован необходимый объем обучающих и тестовых баз данных: “Типы ВСР” и “Типы аритмий сердца”.

3. Проведенный сравнительный анализ результатов исследования двух методов кодирования выходов ИНС (18 и 6 классов), для БД «Типы ВСР» (по значению гистограмм и по бинарному изображению скаттерграмм), показал что сеть, имеющая 6 классов, обладает большей чувствительностью. Специфичность и точность нейросети являются высокими в обоих случаях методов кодирования выходов ИНС.

4. Результаты исследования нейронных сетей для базы данных «Типы ВСР» показывают, что во всех случаях (кроме случаев аритмий) наибольшая эффективность распознавания тахикардии, нормокардии, брадикардии, а также дыхания и стресса достигается при использовании в качестве источника информации значений гистограммы ритма сердца, в то время как для распознавания наличия аритмий использование образов скаттерграмм по их бинарному изображению обеспечивает более высокие показатели критериев эффективности ИНС.

5. С целью выбора оптимального варианта автоматизированного анализа скаттерграмм по их бинарному изображению в ИНС создавались образы скаттерграмм с различным количеством пикселей в матрице (30\*30, 60\*60, 90\*90, 120\*120, 150\*150). Результаты исследований показали, что при количестве пикселей 90\*90 (8100) нейросеть имела лучшие значения средних значений показателей чувствительности (83,6%), специфичности (92,8%) и точности (89,9%).

6. Для решения задачи оценки количества нейронов скрытого слоя в данной работе были проведены двухэтапные исследования. На первом этапе для определения оптимальной структуры нейронной сети, а также значений входов для БД «Типы ВСР» и выбора оптимального количества нейронов скрытого слоя изменение числа нейронов скрытого слоя осуществлялось в интервале от 10 до 510 с шагом в 50 нейронов. Найденное значение количества нейронов скрытого слоя  $X$  уточнялось на втором этапе в интервале  $X-9$  до  $X+9$  с шагом 1.

7. Разработанное прикладное программное обеспечение для анализа variability ритма сердца, предназначено для использования в системах автоматизированного анализа функционального состояния сердечно-сосудистой системы. В результате выполнения программы выдается информация о наличии или отсутствии отклонений в variability ритма сердца, а также оценка и анализ наиболее часто встречающихся аритмий.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Аль-Хулейди Н.А. Результаты исследования нейронных сетей в задачах распознавания variability сердечного ритма. Аль-Хулейди Н.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. № 6. , 2012г., С. 61-67.
2. Аль-Хулейди Н.А. Распознавание аритмий с помощью искусственных нейронных сетей. Аль-Хулейди Н.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // *Биомедицинская радиоэлектроника*. № 6. , 2012г., С. 28-34.
3. Аль-Хулейди Н.А. Исследование методов кодирования выходов искусственных нейронных сетей при классификации variability сердечного ритма. Аль-Хулейди Н.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. № 6. , 2013г., С. 48-54

### **Материалы конференций**

4. Аль Хулейди Н.А, Исаков Р.В. Обработка ритма сердца в искусственной нейронной сети // «Перспективные технологии в средствах передачи информации» Материалы 8-й международной научно-технической конференции, том 2, Владимир, 2009, с.200-203.
5. Аль-Хулейди Н.А., Исаков Р.В. Нейросетевой анализ в диагностике variability сердечного ритма.//Сборник трудов Международной конференции «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы», Изд-во РГРУ, Рязань, 2009, с.321-326.
6. Исаков Р.В., Нашван А.А. Применение искусственных нейронных сетей для оценки variability сердечного ритма // «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» Доклады 9-й межд. науч.-техн. конф., Владимир, 2010, с.162-165.
7. Аль-Хулейди Н.А., Исаков Р.В. Классификация variability сердечного ритма с использованием искусственных нейронных сетей // *Медицинские приборы и технологии: Сборник научных статей*, г.Тула, ТулГУ, 2011, с.109-112.
8. Аль-Хулейди Н.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. Применение нейросетей в распознавании бинарных изображений скаттерграмм ритма сердца. Современные тенденции в науке: новый взгляд: сб. науч. тр. по мат-лам Междунар. заоч. науч.-практ. конф. 29 ноября 2011 г.: Часть 1. Тамбов, 2011. С.12-14.
9. Аль-хулейди Н.А., Исаков Р. В., Сушкова Л.Т. Прикладное программное обеспечение для анализа variability ритма сердца // «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» X межд. науч.-техн. конф. Книга 2. Владимир, 2012, с.173-175.
10. Аль-хулейди Н.А. Применение нейронных сетей для анализа функциональной состояния ритм сердца. Студент и научно-технический прогресс. Сборник научных работ участников международного молодежного конкурса. Т.1. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2012, с.256-1258.

Подписано в печать 09.04.14.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.