

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

На правах рукописи



**Ивлиев Сергей Андреевич**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА  
ДАННЫХ О СЛОЖНЫХ ПРОБЛЕМНЫХ СИТУАЦИЯХ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА**

Специальность: 05.13.17 – Теоретические основы информатики

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук,  
профессор, лауреат премии Президента РФ  
в области образования, профессор кафедры  
прикладной математики и искусственного интеллекта  
ФБГОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
**Еремеев Александр Павлович**

Москва – 2020

# Оглавление

Введение.....	6
1 Задача анализа сложных проблемных ситуаций.....	13
1.1 Экспертные системы и их роль в решении поставленной задачи .....	13
1.2 Подзадачи интеллектуального анализа данных.....	20
1.3 Когнитивная графика.....	24
1.4 Постановка задачи исследования .....	31
1.5 Выводы по главе 1.....	33
2 Исследование и разработка методов и средств анализа данных о сложных проблемных ситуациях.....	35
2.1 Анализ предметной области диагностики патологий зрения.....	35
2.2 Извлечение данных из диагностических аппаратов.....	36
2.3 Проектирование онтологии системы хранения данных .....	49
2.4 Обработка и выделение статистических характеристик нестационарных сигналов .....	53
2.5 Искусственные нейронные сети и другие методы машинного обучения	
70	
2.6 Применение персептрона с одним скрытым слоем для решения задачи дифференциальной диагностики .....	73
2.7 Классификация сигналов на основе интеграции вейвлет-преобразований и искусственных нейронных сетей.....	74
2.8 Анализ образов при помощи свёрточных нейронных сетей .....	77
2.9 Обобщенный алгоритм классификация на основе интеграции непрерывного вейвлет преобразования и свёрточных искусственных нейронных сетей .....	77
2.9. Выводы по главе 2 .....	79

3 Методы и программные средства сбора, хранения, отображения и интеллектуального анализа данных .....	81
3.1 Выделение основных статистических характеристик сигнала .....	81
3.2 Формальная модель когнитивного образа.....	83
3.3 Проектирование системы хранения данных .....	88
3.4 Выбор программных средств для реализации нереляционной базы данных .....	93
3.5 Система сбора данных о пациентах .....	96
3.6 Описание используемых ИНС .....	103
3.7. Вывод по главе 3 .....	110
4 Тестирование и апробация полученных результатов и прототипа интеллектуальной (экспертной) системы поддержки принятия решений .....	112
4.1 Сеть прямого распространения сигнала для дифференциальной диагностики .....	112
4.2 Свёрточные искусственные нейронные сети для дифференциальной диагностики с кластеризацией.....	116
4.3 Использование свёрточных искусственные нейронные сети для дифференциальной диагностики в области кардиологии.....	120
4.4 Использование свёрточных искусственные нейронные сети для анализа фотографий глазного дна .....	121
4.5 Применение когнитивной графики .....	124
4.6 Реализация прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия решения на основе разработанных методов.....	126
4.7 Выводы по главе 4.....	127
Заключение .....	127
Список литературы .....	130

Приложение 1. Свидетельства о регистрации программного продукта и акты о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы..... 146

Приложение 2. Дополнительный анализ области диагностики патологий зрения ..... 150

## **Список основных сокращений**

CNN – Convolutional Neural Network, свёрточная искусственная нейронная сеть;

HTML – Hypertext Markup Language, язык гипертекстовой разметки;

SQL – Structured Query Language, язык структурированных запросов;

АЭС – атомная электростанция;

БД – база данных;

БЗ – база знаний;

ДВП – дискретное вейвлет преобразование;

ДЗН – диск зрительного нерва;

ДР – диабетическая ретинопатия;

ИАД – интеллектуальный анализ данных;

ИИ – искусственный интеллект;

ИНС – Искусственная нейронная сеть.

ИС – Интеллектуальная система;

ИСППР – ИС Поддержки принятия решений;

ИСПР РВ – ИСПР реального времени;

КБ – килобайт;

КГ – когнитивная графика;

КО – когнитивный образ;

ЛПР – лицо, принимающее решения;

НБД – нереляционная БД;

НВП – непрерывное вейвлет преобразование;

ПЗ – поле зрения;

ПО – предметная область;

РБД – реляционная база данных;

СУБД – система управления базами данных;

ЭРГ–электроретинография (метод исследования), а также  
электроретинограмма;

ЭС – экспертная система.

## **Введение**

**Актуальность темы исследований.** В связи с последними решениями руководства Российской Федерации о развитии искусственного интеллекта и цифровизации экономики России существенно активизировались исследования и разработки, связанные с цифровизацией и анализом поступающей информации с целью создания интеллектуальных систем (ИС) (систем искусственного интеллекта), помогающих человеку (лицу, принимающему решения, ЛПР) в анализе и принятии эффективных решений в проблемных ситуациях в различных предметных/проблемных областях. Для разработки подобных систем необходимо создание соответствующей инфраструктуры и изменение сложившихся подходов к анализу и теоретическому обоснованию получаемой информации. Требуется формирование специальных предварительно оцифрованных наборов (библиотек) данных и процедур (методик), позволяющих использовать современные методы интеллектуального анализа данных (ИАД) (Data Mining and Knowledge Discovery) и обработки больших данных (Big Data) при условии распределенности данных, получаемых из различных источников, наличия в данных различного типа неопределенности (неполноты, нечеткости, противоречивости и т.д.) или, используя терминологию специалистов, наличия «зашумленных (noisy)» данных. Поэтому актуально проведение комплексных исследований, которые позволят при помощи новых методов выработать общие подходы к решению задачи предварительной обработки данных и последующего ИАД для различных областей приложений. Примером одной из таких наиболее чувствительных к данной проблематике областей является медицина. В общем случае специалист в этой области должен запоминать и анализировать огромные объемы информации при диагностике сложных патологий (особенно на ранних стадиях заболевания), что, однако, не гарантирует отсутствие ошибок даже при наличии большого стажа, опыта и запаса знаний. Поэтому в области медицины в одной из первых начали разрабатываться консультирующие экспертные системы (ИС поддержки принятия решений на основе экспертных знаний), которые в настоящее время стали всё более

активно внедряться и в отечественную медицину. Отметим, что по мере разработки и внедрения таких систем и применяемых в них методов обработки и анализа информации, включая методы ИАД, они (дополнительно к телемедицине), как следствие, начали влиять и существенно корректировать традиционные подходы в медицине к сбору, обработке и анализу данных при диагностике сложных патологий и назначении лечения.

В работе рассматривается перспективный подход к решению задачи предварительной обработки (препроцессинг) данных, ориентированный на последующее использование новых методов обработки информации, в частности, методов ИАД, обработки больших объёмах данных, методов машинного обучения (Machine Learning) на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), включая глубинные нейронные сети (Deep Neural Networks, DNN) и сети на свёрточных нейронах (Convolution Neural Networks, CNN). Рассматривается также актуальная при анализе проблемных ситуаций задача образного представления ситуации (патологии) на основе средств когнитивной графики.

Появление больших объёмов данных и собственно термина Big Data привело к появлению новых направлений исследований в области ИАД, в том числе с применением методов машинного обучения и ИНС (работы Аверкина А.Н., Борисова В.В., Городецкого В.И., Голенкова В.В., Редько В.Г., Yann LeCun, Allen Bonde, Yoshua Bengio, Geoffrey Hinton, Jurgen Schmidhuber, Peter Norvig, Alex “Sandy” Pentland, Daphne Koller, Adam Coates, Sebastian Thrun, Monica Rogati, Hilary Mason, Dean Abbott и др.). ИНС различного типа совместно с другими методами искусственного интеллекта активно применяются при ИАД, включая большие данные (работы Гавриловой Т. А., Кудрявцева Д. В., Кузнецова О.П., Кузнецова С.О., Курейчика В.М., Муромцева Д.И., Смирнова А.В., Финна В.К., Фоминых И.Б., Хорошевского В.Ф., Ярушкиной Н.Г., Joo-Ho Lee, Tung-Kuan Liu, Tore Hägglund, W.L. Xu, Qiang Chen, Amit Konar, Yihai He и др.), в системах когнитивной графики (работы Башлыкова А.А., Зенкина А.А., Кулинича А.А., Поспелова Д.А., и др.), в современных ИС поддержки принятия решений (ИСПР) и в экспертных системах (ЭС) для различных приложений (работы Бурдо Г.Б.,

Вагина В.Н., Грибовой В.В., Еремеева А.П., Кобринского Б.А., Ковалева С.М., Колесникова А.В., Курейчика В.В., Микони С.В., Осипова Г.С., Палюха Б.Е., Петровского А.Б., Попова Э.В., Рыбиной Г.В., Федунова Б.Е., T. Warren Liao, Malik Ghallab, Radu-Emil Precup и др.).

Вышесказанное позволяет сделать заключение о том, что тема исследований, связанная с разработкой методов и алгоритмов ИАД о сложных проблемных ситуациях с использованием нейросетевого подхода и когнитивной графики, является актуальной.

**Целью** данного исследования является повышение качества анализа информации о сложных проблемных ситуациях за счет применения предварительной обработки данных, методов ИАД с использованием нейросетевого подхода и когнитивной графики.

**Объектом исследования** являются процессы сбора, предварительной обработки и интеллектуального анализа информации (ИАД) о проблемных ситуациях с применением ИНС и когнитивной графики.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы предварительной обработки и ИАД о сложных проблемных ситуациях с использованием нейросетевого подхода и когнитивной графики и их программная реализация с целью применения в интеллектуальных системах поддержки принятия решений для различных приложений. В качестве области приложения выбрана задача информационного анализа и диагностики сложных патологий зрения.

**Научные задачи** диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1) исследовать современные методы сбора и предварительной обработки данных, получаемых из различных и разнородных источников и при наличии «зашумленности» (НЕ-факторов), применительно к исследуемой предметной области;

2) проанализировать современные методы ИАД и методы работы с большими данными с применением ИНС в плане выявления наиболее предпочтительных ИНС для решения поставленной задачи;

- 3) определить все источники информации, используемые для анализа, формы и структуру данных и разработать онтологию и систему (базу) для хранения данных с учётом специфики предметной области и обрабатываемой информации; подготовить обучающую выборку для ИНС;
- 4) обеспечить визуализацию (образное представление) данных в понятной эксперту и ЛПР форме с применением когнитивной графики;
- 5) провести компьютерное моделирование с целью проверки эффективности полученных результатов.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.17 Теоретические основы информатики: 1. Исследование, в том числе с помощью средств вычислительной техники, информационных процессов, информационных потребностей коллективных и индивидуальных пользователей; 5. Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечениях, разработка и исследование методов и алгоритмов анализа текста, устной речи и изображений.

**Методы исследования**, используемые в работе, включают методы сбора и препроцессорной обработки информации, методы ИАД (включая большие и зашумленные данные) с применением глубинных (сверточных) ИНС, методы обратной разработки приложений, создания человеко-машинных интерфейсов с использованием когнитивной графики.

**Научная новизна** заключается в следующем.

1. Разработаны методы сбора из различных и разнородных источников и предварительной обработки зашумленных данных, позволяющие сокращать размерность массивов данных, а также приводить данные к виду, необходимому для последующего ИАД с применением глубинных (сверточных) ИНС.

2. Разработаны методы и средства для формирования онтологии предметной области и подготовки обучающей выборки с целью последующего использования их для обучения ИНС, отличающиеся от известных тем, что

являются основой человеко-машинного интерфейса, ориентированного на прикладного пользователя (ЛПР).

3. Разработаны методы и алгоритмы анализа зашумленных и неполных данных о сложных проблемных ситуациях при помощи глубинных (сверточных) ИНС, отличающиеся от известных тем, что позволяют делать заключения, оперируя информацией от различных и разнородных (относительно используемых типов данных) источников (оперируя результатами разных исследований).

4. Разработан формальный аппарат когнитивной графики в виде набора специальных продукционных правил для помощи эксперту и ЛПР в анализе и диагностике сложных проблемных ситуаций (на примере патологий зрения).

**Практическая значимость** работы заключается в структуризации выбранной предметной области, построении архитектуры системы интеллектуального анализа зашумленных и разнородных данных с применением онтологии, глубинных (сверточных) ИНС и когнитивной графики, позволяющей сократить время и повысить качество диагностики проблемных ситуаций и являющейся базовым компонентом прототипа ЭС (ИСППР экспертного типа), предназначенного для помощи ЛПР при анализе и диагностике (классификации) проблемных ситуаций на примере сложных патологий зрения.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается теоретическими выкладками, заключениями экспертов, результатами практического применения и сравнением с данными из научных источников.

**На защиту выносятся** следующие положения.

1. Методы сбора данных из различных и разнородных источников и предварительной обработкой зашумленных (с различными НЕ-факторами) данных, позволяющие сокращать размерность, а также приводить данные к виду, необходимому для последующего ИАД с применением глубинных (сверточных) ИНС.

2. Методы и средства формирования онтологии предметной области и обучающей выборки с целью последующего использования их для обучения ИНС,

отличающиеся от известных средств применением человека-машинного интерфейса, ориентированного на прикладного пользователя (ЛПР).

3. Методы и алгоритмы анализа зашумленных данных о сложных проблемных ситуациях при помощи глубинных (сверточных) ИНС, отличающиеся от известных тем, что позволяют делать заключения, оперируя информацией от различных и разнородных (относительно типов данных) источников (т.е. оперируя результатами разных исследований).

4. Архитектура ИНС для ИАД с применением предварительной обработки непрерывной и зашумленной информации (сигналов) с использованием вейвлет-преобразований и средств обработки изображений.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре прикладной математики и искусственного интеллекта (ПМИИ), ряде НИР, выполняемых при поддержке РФФИ, а также совместно кафедрами ПМИИ и Управления и интеллектуальных технологий (УИТ) НИУ «МЭИ» и Федерального Государственного Бюджетного Учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней имени Гельмгольца» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБУ «НМИЦ ГБ им. Гельмгольца» Минздрава России) (отдел клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова) с целью разработки прототипа ЭС (ИСППР экспертного типа) для анализа и диагностики сложных патологий зрения. Получены два свидетельства о регистрации программных продуктов (свидетельства № 2019660564 от 07.08.2019, № 2019660567 от 07.08.2019), акты об использовании (внедрении) результатов диссертации.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Второй Российско-Тихоокеанская конференция по компьютерным технологиям и приложениям, RPC 2017 (Владивосток, 2017), Шестнадцатой Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2018 (24–27 сентября 2018 г., Москва, Россия), Семнадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2019, Ульяновск, Россия), V Международной

научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования» Инфорино-2020 (Россия, Москва, 14–17 апреля 2020 г.).

**Публикации по теме работы.** По теме работы имеется 8 публикаций, из них 3 публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК (журналы «Программные продукты и системы», «Вестник МЭИ»), 4 публикации в зарубежных изданиях, входящих в международные системы цитирования Scopus/WoS. Получены два свидетельства о регистрации программных продуктов, результаты работы отражены в 3-х отчётах по НИР.

Диссертация состоит из 162 страниц машинописного текста, включая 133 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 150 наименований и 2 приложения на 17 страницах.

# **1 Задача анализа сложных проблемных ситуаций**

Первым этапом задачи анализа сложных проблемных ситуаций является формализация предметной области. Это необходимо для выделения основных сущностей, процессов, потоков данных, информации (данных и знаний) о предметной области, сценариев взаимодействия между специалистами (лицами, принимающими решения (ЛПР), экспертами) в этой области с другими участниками. Формирование соответствующих наборов (баз) данных и извлекаемой из них информации позволяет определять какие методы интеллектуального анализа данных (ИАД) могут быть использованы в данной предметной области с целью последующей реализации интеллектуальных помощников ЛПР – консультирующих экспертных систем (ЭС) и интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР). По мере увеличения количества собранных данных и развития методов их хранения появилась возможность использовать новые средства ИАД.

## ***1.1 Экспертные системы и их роль в решении поставленной задачи***

Увеличение объема информации, поступающей непосредственно к ЛПР, усложнение решаемых задач, необходимость учета большого числа взаимосвязанных и взаимозависимых факторов и быстроменяющейся обстановки все более настоятельно требуют использовать информационные и компьютерные технологии, в том числе с применением методов ИИ, в процессе принятия решений [1, 2]. Существуют разные ЭС и ИСППР для решения данной задачи.

Одной из первых ЭС для медицины была систему MYCIN, разработанная в Стэнфорде в середине 1970- х гг. Она одной из первых обратилась к проблеме принятия решений на основе ненадежной или недостаточной информации. Все рассуждения ЭС были основаны на принципах управляющей логики, соответствующих специфике предметной области. Многие методики разработки ЭС (коэффициенты уверенности на основе субъективных вероятностей и др.), использующиеся сегодня, были впервые разработаны в рамках проекта MYCIN [3]. MYCIN была спроектирован для диагностирования бактерий, вызывающих

тяжелые инфекции, такие как бактериемия и менингит, а также для рекомендации необходимого количества антибиотиков в зависимости от массы тела пациента.

MYCIN была написана на языке обработки списков LISP. В этой же лаборатории была ранее создана ЭС DENDRAL [4], но на этот раз внимание было акцентировано на использовании решающих правил с факторами неопределенности.

К настоящему времени создано множества различных ЭС и ИСППР на основе экспертических знаний. Обобщенная структура ИСППР приведена на рисунке 1 [5].

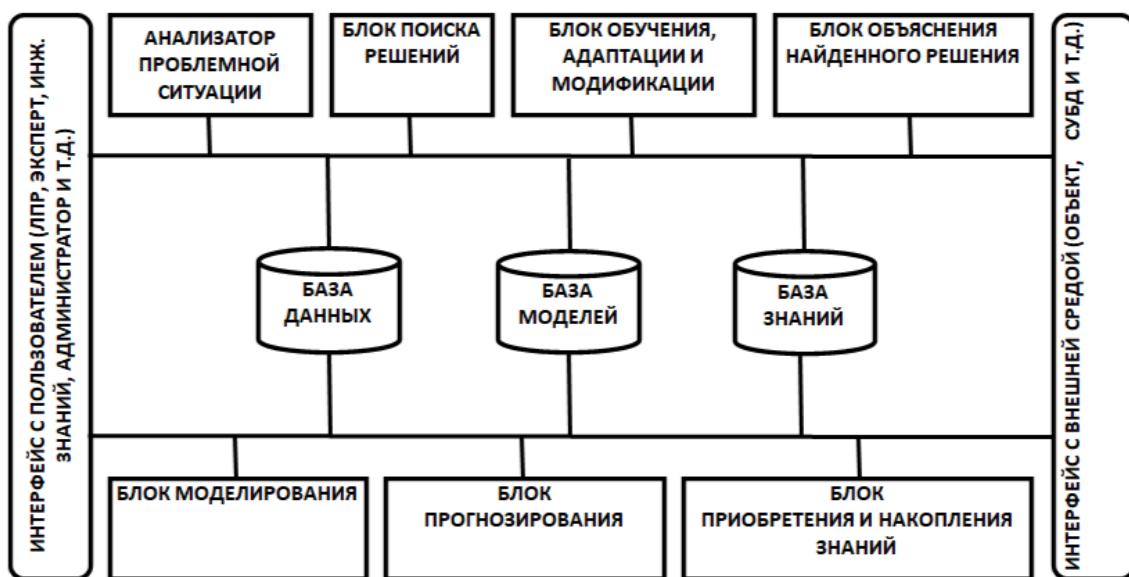


Рис. 1. Обобщенная структура ИСППР

Современным примером консультирующих ЭС в медицине, в частности, в офтальмологии является ЭС «ОСГ-эксперт» [6], анализирующая большой объем клинических данных больных с травматической отслойкой сетчатки и выдающая рекомендации по типу и объему оперативного вмешательства при отслойке сетчатки, прогнозировать возможный результат лечения, планировать этапы реабилитации, определять сроки диспансерного наблюдения.

При построении ЭС «ОСГ-эксперт» основной акцент делался на информацию, полученную при осмотре пациентов. Обработанные данные (параметры) помещались в БД для стандартизации медицинской помощи больным с отслойкой сетчатки.

При обследовании пациентов использовались такие методы исследования в офтальмологии, как:

- определение остроты зрения;
- биомикроскопия;
- стереоофтальмоскопия глазного дна;
- прямая и обратная офтальмоскопия;
- кинетическая и статическая периметрия;
- тонометрия;
- тонография;
- ультразвуковое исследование;
- электрофизиологическое исследование.

При создании данной ЭС был применен метод структурной организации информации и обобщенный алгоритм представления информации, конкретизируемый по содержанию для разных областей медицинских знаний.

Метод структурной организации состоит в выделении минимального числа характеристик (структурных единиц), знания которых достаточно для принятия решения, причем, чем сложнее область знания, тем больше уровней структурирования. В основе метода лежит выделение систем, изучаемых в данной предметной области; объектов; определение функций, выполняемых этими системами, и симптомов, которые выявляются при нарушении функций [7].

Обоснование выводов в медико-биологических исследованиях чаще всего базируется на доказательстве достоверности (или статистической значимости) различий двух сравнимых выборок.

Для оценки достоверности результатов статистического исследования используется методика определения доверительного коэффициента Стьюдента( $t$ ) [7].

«ОСГ–ЭКСПЕРТ» включает в себя три подпрограммы, работающие параллельно: «Диалог», «Справка» и «Вывод» (которые также могут использоваться и автономно).

Структура ЭС «ОСГ–эксперт» представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Структура ЭС «ОСГ-эксперт».

Подпрограмма «Диалог» была разработана сообща с врачами-экспертами и используется при обследовании пациента. В «Диалог» включена следующая информация: паспортные данные пациента, жалобы, записанные со слов пациента, анамнез заболевания, клинические параметры состояния глазного яблока при отслойке сетчатки.

Однородные признаки объединяются в структурные блоки, определяющие состояние сетчатки, что позволяет быстрее и точнее осуществить выбор необходимой для лечения операции. Вся информация хранится в памяти компьютера в соответствующей БД.

С помощью подпрограммы «Справка» у ЛПР (врача) есть возможность ознакомиться с данными пациента, получить информацию о виде материала, хранящегося в соответствующей ячейке, узнать вид и объём оперативного вмешательства при отслойке сетчатки. Также ЛПР может получить консультацию по выбору оперативного лечения.

Подпрограмма «Вывод» формулирует и выводит на экран как общее состояние глаза, так и его отдельных структур, а также на основе используемых в ЭС экспертных знаний рекомендации о типе операции для устранения травмы сетчатки и необходимом послеоперационное лечение.

Следует отметить, что данная система является лишь иллюстративным примером (демонстрационным прототипом) того, как может быть организована ЭС в области офтальмологии. Ее существенным недостатком является отсутствие средств работы с большими данными. Для анализа данных оптической когерентной томографии (ОКТ), ЭРГ, фотографий диска зрительного нерва (ДЗН) прочих исследований требуется перевод их в определённую форму (с предварительной обработкой и оцифровкой) и построение соответствующей БД для возможности последующего применения современных методов ИАД и ИНС типа глубинных и сверточных ИНС.

При разработке ЭС (ИСППР на основе экспертных знаний) необходимо решить задачу сбора и предварительной обработки (препроцессинг) информации [8]. Её основные подзадачи:

- определение типов данных, которыми может оперировать система, частоты их поступления;
- проведение разметки и предобработки данных (в случае, когда это возможно) для последующего решения задач, связанных с классификацией;
- наращивание выборки данных при помощи аугментации данных;
- организация взаимодействия с современными используемыми системами сбора и анализа данных, в том числе и с применением методов обратной разработки.

### **Определение типов данных**

При определении типов данных важно выделить следующие по частоте изменения данные:

- константные параметры в рамках задачи;
- данные, меняющиеся с низкой частотой;

- динамические данные, получаемые в режиме реального времени.

Важно отметить, что с учетом частоты получения информации могут формироваться большие выборки для обработки и хранения которых требуется использовать методы работы с большими данными (Big Data) [9]. Частота получения и динамика изменения данных влияют на используемые методы ИАД.

По формату данных можно выделить следующие:

- пары «ключ-значение», если имеется соответствие между параметром и его значением, чаще всего для константных параметров;
- временные ряды, если один параметр меняется с течением времени;
- графические изображения, получаемые либо однократно, либо с некоторым интервалом и формирующие также временной ряд.

Константные параметры могут свидетельствовать об априорной вероятности какого-либо заключения и возможности использования для анализа вероятностных (как правило, байесовского) методов.

Временные ряды требуют различного подхода в зависимости от типа ряда:

- в случае событийного ряда можно проводить статистический анализ для выделения основных закономерностей в нём;
- при получении данных с какого-либо аппарата можно применять методы цифровой обработки сигналов, определять гармоники, частотно-амплитудные характеристики и т.д.

## Разметка данных

Следующим важным этапом является определение возможности разметки данных и формирование необходимого аппарата для неё. Этот этап достаточно важен, так как часто из-за недостатка данных нельзя применять, например, методы глубинного обучения ИНС. Стоит отметить, что и пользователи Интернета невольно участвуют в разметке наборов данных для компании Google, когда, заходя на сайт, появляется окно проверки ReCAPTCHA [10] и требуется выбрать фотографии с определённым содержимым. Проведение разметки данных позволяет определить дальнейший используемый набор методов и алгоритмов для ИАД.

Также часто требуется дополнительная предобработка (препроцессинг) данных, связанная с фильтрацией и сглаживанием, для устранения помех (шумов) от оборудования. При этом разделяют стационарные (не меняющие свои характеристики во времени) и нестационарные сигналы (изменяющиеся на коротком промежутке). Если для первых хорошо подходит разложение в ряд Фурье и анализ частотно-амплитудных характеристик, то во втором случае более важны амплитудно-временные характеристики, которые можно анализировать с применением непрерывного вейвлет преобразования (НВП), а используя дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) можно сокращать размерность входных сигналов, удаляя, в частности, избыточные (неинформативные или малоинформационные) данные.

При анализе графических изображений ввиду большого объема данных после их сбора [11] требуется дополнительная предварительная обработка для сокращения размерности входных данных [12]. Такая обработка может быть осуществлена при помощи предварительной кластеризации изображения либо при его так называемой бинаризации (выделении границ объектов) [13]. В ряде случаев может быть применено и простое билинейное сжатие изображений. В настоящее время в связи с развитием аппарата глубинных и свёрточных ИНС проблема предобработки изображений с целью упрощения выделения из них существенных признаков отошла на второй план, так как ИНС после обучения способны сами их выделять.

## Аугментация данных

В случае недостатка (неполноты) данных можно использовать методы, связанные с аугментацией данных с целью повышения качества обучения [14]. Под аугментацией понимается намеренное внесение в выборку зашумлений и искажений с целью ее расширения. То есть, имея некоторое множество примеров, можно сгенерировать новые, которые будут относиться к тем же классам, но при этом будут соответствовать гипотетическим ситуациям искажения данных при их снятии.

Аугментация данных на примере изображений (рис. 3) может включать регулировку контрастности, переворот изображений, а также регулировку яркости, что позволяет увеличить обучающую выборку, а также улучшить обобщающую способность искусственной нейронной сети (ИНС) [15, 16].

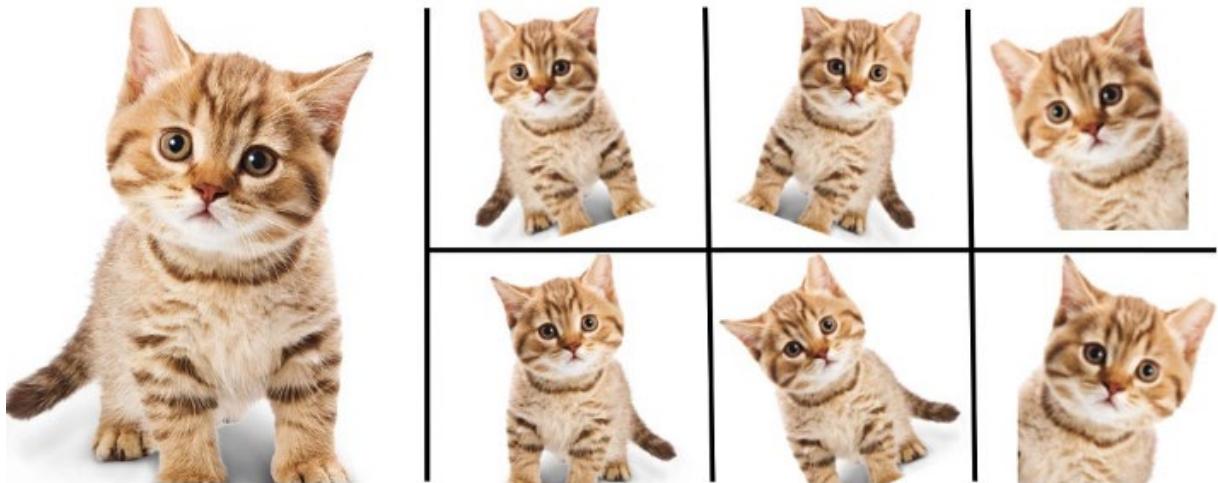


Рис. 3 Пример аугментации для изображений

### Интеграция с существующими ИС

Отметим также актуальность задачи интеграции средств предварительной обработки информации с уже имеющимися системами ИАД и ИС в целом. Эта задача достаточно сложная, поскольку из-за множества технических и других обстоятельств нет возможности организовать взаимодействие с используемой системой через какой-либо открытый программный интерфейс. В данном случае требуется применять методы обратной разработки приложения с целью извлечения необходимых данных. А в разрабатываемых приложениях следует предусмотреть возможности переноса данных в имеющиеся системы или повторение их функциональности [17].

### 1.2 Подзадачи интеллектуального анализа данных

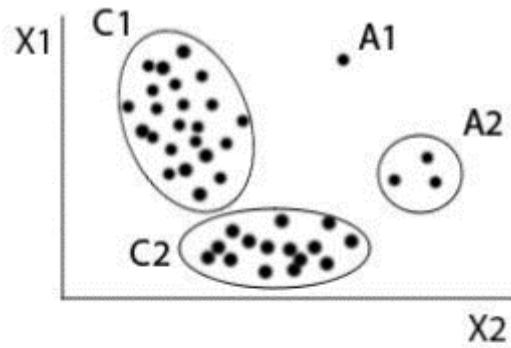
Выполнение некоторых предварительных операций позволяет улучшить качество выборки для обучения ИНС, устранив ошибки при сборе данных, привести их к виду, удобному для ИАД, сократить размерность.

## **Поиск аномалий в данных**

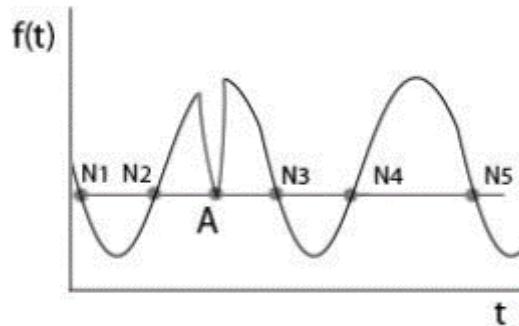
Устранение аномалий в поступающих данных требуется для того, чтобы очистить обучающую выборку от тех примеров, которые могли попасть туда случайно, например, если объект одного класса был отнесён к другому или некоторый объект вообще не поддаётся классификации и его характеристики сильно отличаются от остальных объектов класса, к которому он был отнесён, равно как и от характеристик объектов других классов. Устранение аномалий может быть проведено как при «ручной» предварительной обработке данных, так и при помощи методов ИАД, в частности, с применением ИНС, особенно, если речь идет о больших наборах разнородных (разнотипных, разноформатных) и получаемых из различных источников данных. Виды аномалий приведены на рис. 4 [18].

Аномалии могут быть следующих видов.

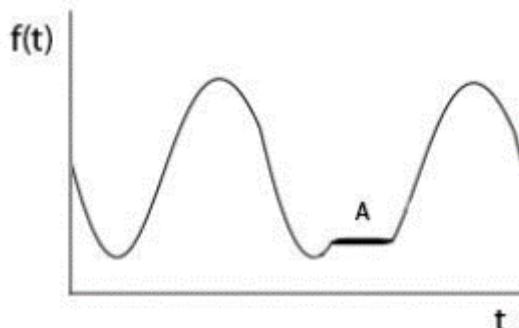
Точечные аномалии, возникающие в ситуации, когда отдельный экземпляр данных может рассматриваться как аномальный по отношению к остальным данным. На рис. 4а экземпляр  $A_1$ , а также группа экземпляров  $A_2$  являются аномальными относительно нормальных экземпляров в группах  $C_1$  и  $C_2$ . Данный вид аномалий является наиболее легко распознаваемым, большинство существующих методов создано для распознавания точечных аномалий.



а) точечные аномалии



б) контекстуальные аномалии



в) коллективные аномалии

Рис. 4 Виды аномалий

Контекстуальные (условные) аномалии (рис. 4б), наблюдаются, когда экземпляр данных является аномальным лишь в определенном контексте. Для определения аномалий этого типа основным является выделение контекстуальных и поведенческих атрибутов.

Коллективные аномалии (рис. 4в) возникают, если последовательность связанных экземпляров данных (например, участок временного ряда) является аномальной по отношению к целому набору данных. Отдельный экземпляр данных в такой последовательности может не являться

отклонением, однако совместное появление таких экземпляров является коллективной аномалией. На рисунке 1в участок *A* является коллективной аномалией.

### **Использование ИНС и других методов для проведения кластеризации и классификации данных**

Для решения задач классификации и кластеризации данных могут быть использованы различные методы [19,20], среди которых:

метод *k*-ближайших соседей (K-Nearest Neighbors) [21];

метод опорных векторов (Support Vector Machines) [22];

классификатор дерева решений (Decision Tree Classifier) [23] / случайный лес (Random Forests) [24];

наивный байесовский метод (Naive Bayes) [25];

линейный дискриминантный анализ (Linear Discriminant Analysis) [26];

логистическая регрессия (Logistic Regression) [27];

методы на основе ИНС [28, 29].

Для решения задач кластеризации могут быть использованы следующие методы [30]:

*k*-средних (*k*-means) [31];

Метод распространения близости (Affinity Propagation) [32];

спектральная кластеризация [33];

методы на основе ИНС [34].

### **Построение выводов и рекомендаций ЛПР**

Отметим, что при наличии (в том числе после предварительной обработки) достаточно формализованных и структурированных данных (например, в формате реляционных моделей) могут быть применены такие методы ИАД как ДСМ-метод [35], методы на основе онтологий, деревьев решений, опорных векторов, биоинспирированные методы [36], а также методы, основанные на использовании продукционных моделей, активно применяемых в ИС (ЭС, ИСППР), использующих экспертные знания, и другие методы [37,38].

Эффективным методом образного представления результатов, помогающим ЛПР лучше воспринять и осознать проблемную ситуацию, является когнитивная графика (КГ), которая позволяет построить некоторый образ (когнитивный образ, КО), который будет быстрее и лучше восприниматься ЛПР, чем набор символов, текст, графики и т.д. [39]. Детализация (графики и т.д.) может понадобиться для уточнения ЛПР проблемной ситуации и принятия решения по ее нормализации.

### ***1.3 Когнитивная графика***

В плане применения КГ (КО) в информатике и, в частности, в ИС типа ИСППР [40] отмечают следующие направления исследований в области методов КГ и построение когнитивных графических образов:

- разработка моделей восприятия информации человеком (ЛПР);
- формирование алфавита понятийно-образного языка представления данных, включающего стереотипные символы, отображающие предметы и явления окружающего мира с той или иной степенью подобия, ассоциативно понятные графические примитивы (иконки), из которых синтезируются КО различной сложности, а также вспомогательные символы, необходимые для связи графических примитивов и привлечения внимания ЛПР к наиболее актуальным КО;
- исследование свойств КО, воздействующих на ЛПР при их восприятии на уровне ощущений (энергетических, геометрических, динамических и др.);
- формирование «грамматики» понятийно-образного языка, то есть базовых правил формирования КО и когнитивных сцен;
- разработка прототипа подсистемы визуализации результатов информационно-аналитического сопровождения и контроля исполнения приоритетных национальных проектов на основе понятийно-образного языка представления данных;

экспериментальная проверка эффективности разработанного прототипа по показателям оперативности, полноты, точности восприятия информации ЛПР [41].

Направление, связанное с использование КГ (КО) в компьютерах системах, в том числе в человеко-машинных системах и ИС типа ИСППР (см., например, [49]) весьма перспективно и активно развивается.

## **Визуализация модели**

Суть когнитивного (познавательного) моделирования – ключевого момента когнитивного анализа - состоит в том, чтобы сложнейшие проблемы и тенденции (динамика) изменения системы отразить в упрощенном (образном) виде в модели, с помощью которой можно исследовать возможные сценарии возникновения кризисных ситуаций, найти пути и условия их разрешения в модельной ситуации.

Основным средством КГ является отражение семантики (и, часто, сложности) исследуемых процессов и явлений в виде КО. Интересным примером в этом отношении являются "многомерные компьютерные поэтические произведения" "болгарского ученого математика-поэта К. Маркова [42]. Посредством цвета, тона, текстуры, формы, размещения он на экране терминала строит различные трансформации стихотворных текстов. Такие средства наглядности и выразительности значительно повышают уровень восприятия "пользователями" соответствующих произведений. При этом, в своих композициях он широко использует такие формы информационного воздействия [43] как: ритм, вариации, симметрия, пропорции, разные последовательности, параллелизм, противоположности, упорядочение, повторение, степени сравнения, равновесие, структура. С точки зрения К. Маркова одной из функций КГ является «ввод человека в состояние творчества».

Поскольку речь идет об отображении семантики в синтаксисе КО, правомерно говорить о грамматике визуального языка. Еще М. Вертгеймер отмечал [44], что при мотивации процессов продуктивного мышления активно используется анализ решения геометрических задач, и часто применял различные операции компоновки, композиции, группировки, ассоциации, структурирования графического материала с целью активации творчества учеников. По сути, Вертгеймер дал описание визуального мышления. Как и другие языки, визуальный

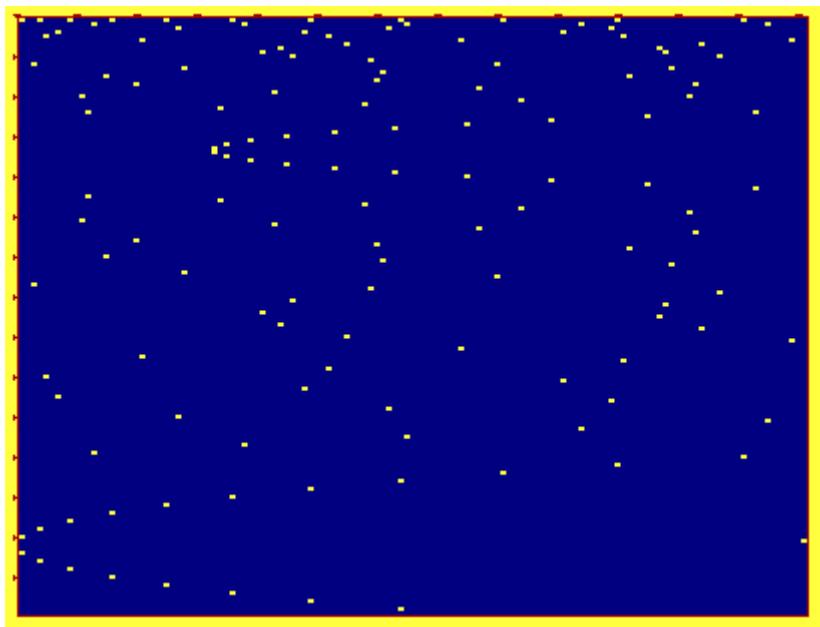
язык имеет свои собственные ресурсы и возможности, характерные именно для него:

- словарь элементов формы;
- грамматику пространственной организации;
- идиомы объемной перспективы;
- синтаксис фразировки образов.

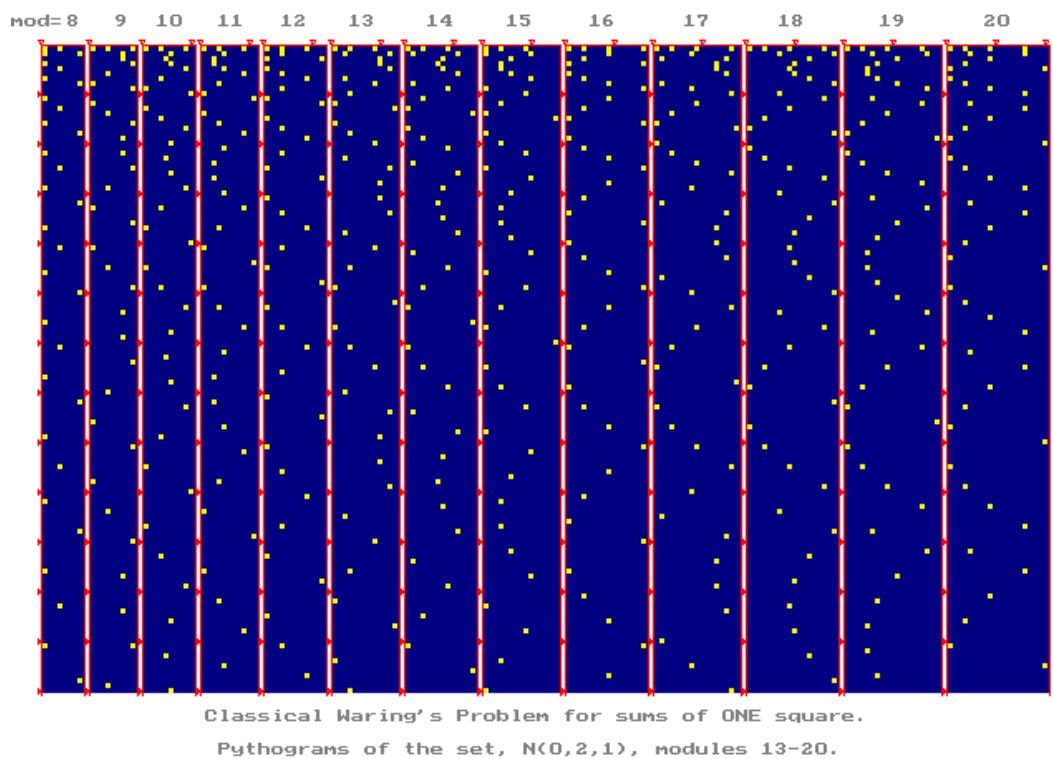
У. Боумен [45] выделяет в словаре форм: точку, линию, фигуру, тон (цвет), текстуру; в грамматике пространства: плоское, многоплановое, непрерывное изображения. Далее он предлагает принципы построения визуальных фраз и графического высказывания в целом, мотивируя их целесообразность многочисленными систематизированными примерами.

Рассмотрим, кратко с этих позиций инструментальный комплекс, предложенный А.А. Зенкиным [46-48]. В качестве элементарной компоненты КО используется "квадратик" (образ точки), соответствующий определенному числу. Семантика числа в создаваемой композиции отображается цветом. Затем автоматизированными средствами, по сути, "погрузив в вычислительную среду" соответствующие правила грамматики визуализации числовых ассоциаций, автор в интерактивном режиме синтезирует и анализирует свои "пифограммы" на экране терминала. И получает выдающиеся результаты в области теории чисел. Следует отметить, что при этом используется минимум элементарных компонентов при максимальной выразительности и семантической насыщенности композиции.

В качестве примера приведем переход от исходной пифограммы, иллюстрирующей квадраты натуральных чисел 1, 4, 9, 16, и т.д. (рис. 5) к более наглядной пифограмме в виде КО при различных модулях (рис. 6), на которой видны определенные закономерности.



**Рис. 5. Пифограмма обычных квадратов натуральных чисел**



**Рис. 6. Пифограмма обычных квадратов натуральных чисел при разном модуле**

Рассмотрим применение КГ (КО) в ИСППР, предназначенных для поддержки оперативно-диспетчерского персонала, управляющего сложны техническим (технологическим) объектом (системой), на примере Системы контроля безопасности работы энергоблока (ЭБ) и выполнения графика несения нагрузки по обобщенным параметрам «ОКО» - информационной автоматизированной

компьютерной многопользовательской системы, предназначеннной для решения задач информационной поддержки принятия решений при оперативном контроле состояния ЭБ АЭС с рабочих мест диспетчерского и административного персонала Кризисного центра концерна «Росэнергоатом» [49].

Пользовательский интерфейс системы «ОКО» основан на методах образного представления состояния площадок АЭС с точки зрения безопасности. Примеры экранов интерфейса «ОКО» для ЛПР с использованием КО приведены на рисунках 7, 8.

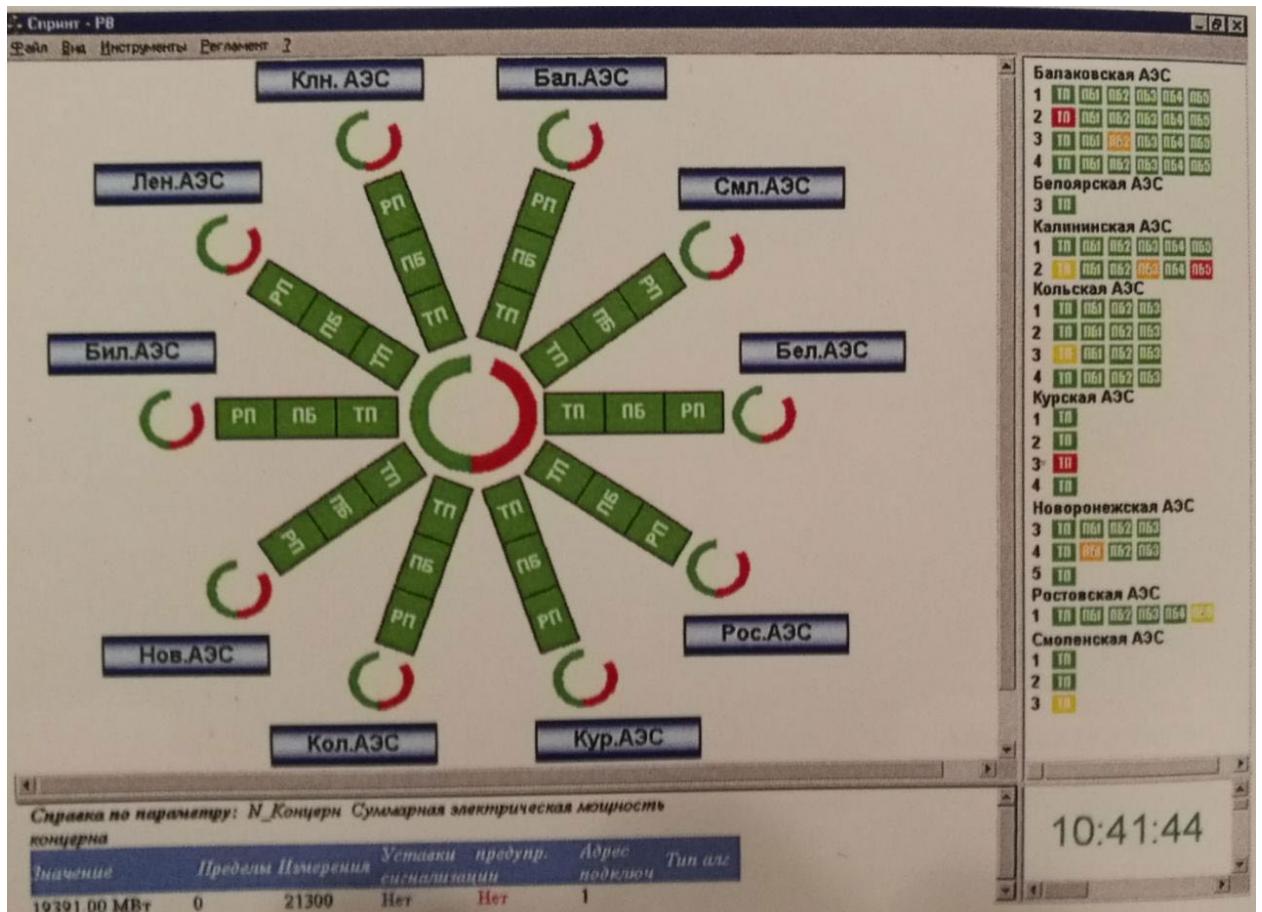
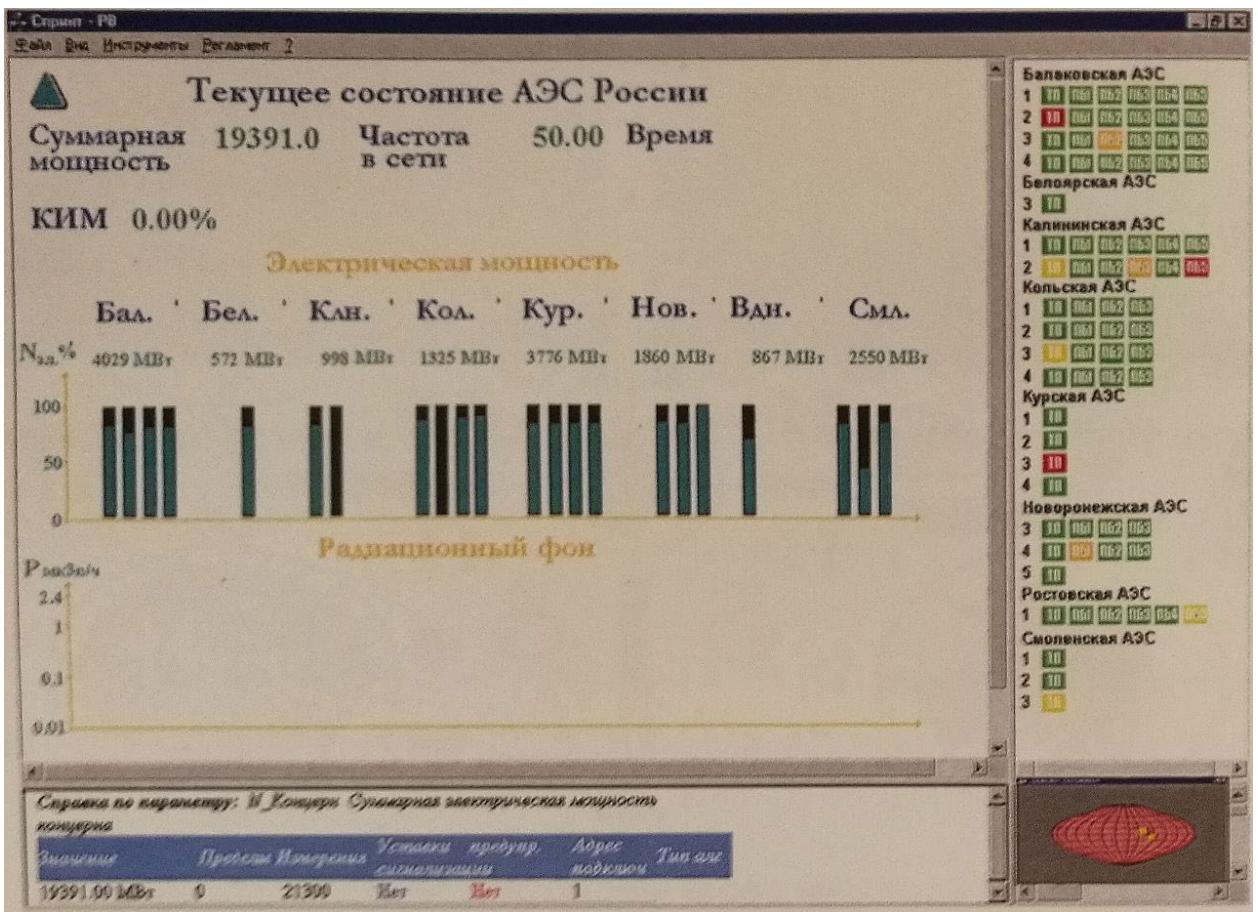


Рис. 7. Интерфейс «ОКО» для ЛПР с информацией состояния АЭС



**Рис. 8. Интерфейс «ОКО» для ЛПР с информацией об электрической мощности и радиационном фоне АЭС**

В системах КГ можно выделить словарь элементов форм и грамматику (правила) их композиции, что позволяет структурировать и систематизировать используемые средства визуализации исследуемых процессов и явлений, а также операции отображения их в синтаксические формы и процессы композиции визуальных высказываний.

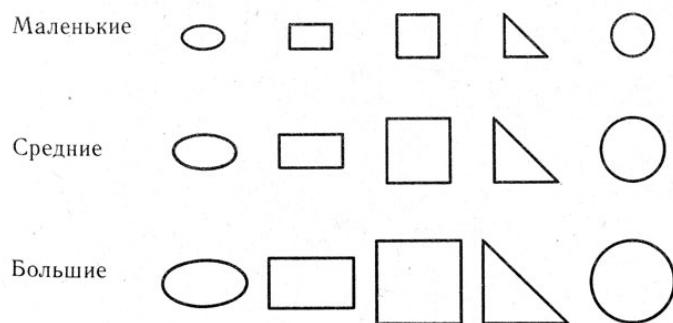
Можно выделить несколько подходов к демонстрации изменения свойств элемента.

*Изменение изображения:* каждому состоянию элемента сопоставляется некоторое изображение, условно уникальное для данного вида концепта (рис. 9) [50]. Применимо к концептам, чьи атрибуты имеют дискретные значения (логические или строковые) или точное значение атрибута непрерывного типа не является важным (определяется вхождение значение в некоторый интервал, дискретизация значения).



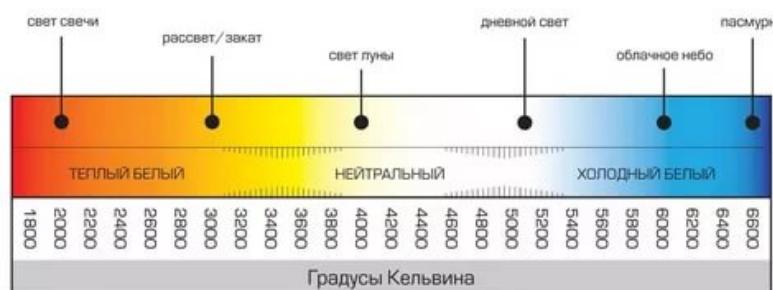
**Рис. 9. Изменения изображения как способ визуализации изменений объекта**

*Изменение размера изображения:* каждому элементу сопоставляется некоторое изображение, чья форма остаётся неизменной, а на изменения значений атрибутов элемента указывает изменение размера изображения (рис. 10) [51]. Наиболее эффективно применяется для элементов, имеющих атрибуты непрерывного типа.



**Рис. 10. Пример изменения размера изображения**

*Изменение цвета изображения:* каждому элементу сопоставляется некоторое изображение, чья форма и размер остаются неизменными, а на изменение состояния элемента указывает изменение цвета изображения (рис. 11) [52].



**Рис. 11. Пример зависимости цвета от значения атрибута**

Для представления сложных элементов (например, обладающих многими атрибутами) используется комбинированный подход, при котором могут изменяться и вид изображения, и размер, и цвет (рис. 12).

Если необходимо отразить в когнитивном образе не только значения атрибутов, но и влияющие на их изменения данные, изображение может быть поделено на зоны, некоторые из которых будут демонстрировать атрибуты, а остальные – получаемую информацию [53].



**Рис. 12. Визуализация зависимости элемента от входных данных на примере образа дерева**

#### **1.4 Постановка задачи исследования**

При оценке ситуации специалисту (ЛПР) необходимо обращать внимание на множество факторов, он должен держать в голове большое число данных и на их основе делать вывод [54]. Это очень трудно, а если при этом ЛПР (оператор, врач и т.д.) неопытен, то ему может просто не хватить знаний для постановки правильного диагноза.

ИС (ЭС, ИСППР) должна, анализируя все параметры и учитывая историю состояний, хранящуюся в БД, предложить ЛПР свой вариант диагноза и возможные при этом рекомендации по нормализации ситуации. Характерной особенностью подобных диагностических систем является неоднозначность в постановке диагноза в ситуациях, когда ряд элементов, составляющих сложную структуру диагностируемого объекта (системы), могут менять в динамике свои свойства. В таких случаях окончательное решение остается за экспертом (ЛПР), а ИС

функционирует в режиме советчика. Следует отметить, что ЭС и ИСППР, как правило, являются ИС-консультантами.

Диагностика развивающихся неисправностей (аномалий) в динамических системах сложной структуры является актуальной задачей для исследователей, особенно в режиме реального времени, когда поставить диагноз и принять решения по нормализации проблемной ситуации необходимо в достаточно жестких временных ограничениях. Решение таких задач зависит от самого диагностируемого объекта: сложности его структуры, возможности получения информации о деятельности различных его подсистем, возможности формальных (математических) методов, наличие зашумленных данных (НЕ-факторов) и т.д. Из-за сложности и разнородности обрабатываемой информации разрабатывается множество систем диагностики с использованием статистических методов, мягких вычислений, ИНС, ЭС, кластерного анализа и др. [55].

Диагностируемые объекты условно можно разделить на две группы: объекты, для анализа которых возможно использовать специальные методы тестирования (эксперименты) на функционирующем объекте; объекты, для которых нельзя провести эксперименты с работающим объектом, естественно, в этом случае задача диагностирования существенно усложняется.

Соответственно, сложные динамические объекты с разветвлённой структурой плохо поддаются традиционным методам диагностики и классификации. К подобным сложно-диагностируемым объектам динамической структуры относятся не только технические, но и биологические объекты, в частности, человек и его органы. Например, в офтальмологии состояние сетчатки глаза диагностируется двумя способами: визуально – по виду глазного дна и с применением электроретинографии по откликам сетчатки в форме ЭРГ на различные световые раздражители. Такой объект следует отнести к первой группе, когда возможно использование экспериментов с тестирующими сигналами. Ко второй группе объектов можно отнести сердце, диагностируемое по виду электрокардиограммы (ЭКГ).

Таким образом, задачей диссертационной работы является построения систем диагностики динамических объектов (на примере органа зрения), для которых можно использовать различные методы диагностики с получением данных разных типов и форматов. В качестве объекта рассматривается сетчатка глаза человека, основное внимание должно быть уделено анализу ЭРГ и клинических данных, получаемым при визуальном осмотре сетчатки глаза.

Полученные результаты должны помочь врачам-офтальмологам в диагностике сложных патологий зрения и расширить возможности применения методов ИАД с использованием ИНС.

### ***1.5 Выводы по главе 1***

В главе описан общий подход к формализации задачи анализа сложных проблемных ситуаций, в том числе с применением методов ИАД. Рассмотрена история решения этой задачи в контексте разработки ИС (ЭС, ИСППР), позволяющих ЛПР принимать более качественные решения в условиях роста объёма анализируемых данных. Рассмотрена эволюция таких систем в связи с формулированием новых требований к их деятельности, методам работы, интерфейсом с экспертом и ЛПР, с их технической реализацией.

На основании этого сформулированы следующие основные исследовательские задачи:

- исследовать современные методы сбора и предварительной обработки данных, получаемых из различных и разнородных источников и при наличии «зашумленности» (НЕ-факторов), применительно к исследуемой предметной области;
- проанализировать современные методы ИАД и методы работы с большими данными с применением ИНС в плане выявления наиболее предпочтительных ИНС для решения поставленной задачи;
- провести формализацию предметной области с целью определения всех возможных источников информации для анализа и более точной диагностики сложных патологий;

- проанализировать используемые формы и структуру данных и разработать онтологию и систему (базу) для хранения данных с учётом специфики предметной области и обрабатываемой информации; подготовить обучающую выборку для ИНС;
- обеспечить визуализацию (образное представление) данных в понятной эксперту и ЛПР форме с применением когнитивной графики;
- провести компьютерное моделирование с целью проверки эффективности полученных результатов.

## **2 Исследование и разработка методов и средств анализа данных о сложных проблемных ситуациях**

В данной главе приводится описание и сравнительный анализ методов и средств анализа данных о сложных проблемных ситуациях. Поскольку, как было отмечено ранее, существуют достаточно много методов для решения подобного класса задач, то исследование проводится с привязкой к избранной предметной области (ПО) – диагностике сложных патологий зрения [55]. Заметим, что привязка является минимальной и все предложенные методы применимы к другим схожим ПО, где требуется решать задачи классификации, собирать и проводить препроцессинг данных, анализировать нестационарные и стационарные сигналы и т.д. и использовать методы инженерии знаний [56].

### ***2.1 Анализ предметной области диагностики патологий зрения***

В результате анализа ПО и консультаций с экспертами были выделены следующие базовые параметры, характеризующие состояние пациента (его зрительный аппарат), представленные в виде данных типа «ключ-значение»:

- диск зрительного нерва – место (структура) соединения всех нервных волокон сетчатки, при анализе которого в первую очередь обращают внимание на такие факторы, как цвет и границы;
- макула глаза – анатомическая структура сетчатки, которая обеспечивает четкое зрение и цветовое восприятие зрительного образа и при исследовании которой выделяют следующие основные признаки: без очаговых изменений, рефлекс четкий смазан, дистрофические очажки, отёк;
- периферическое зрение – зрительное восприятие, за которое отвечают периферические отделы сетчатки и которое ответственно за светоощущения, способность видеть в сумеречное и тёмное время суток;
- поле зрения (ПЗ) – угловое пространство, видимое глазом при фиксированном взгляде и неподвижной голове;

- острота зрения (ОЗ) – определяется по минимальному угловому расстоянию между двумя точками, при котором они воспринимаются раздельно.

Данные типа образов:

- фотография глазного дна – фотография сетчатки, включая макулу, ДЗН и структуру сосудов сетчатки глаза;
- данные оптической когерентной томографии (ОКТ) – трёхмерная картинка изменения структуры сетчатки и зрительного нерва.

Данные типа временных рядов – различные типы ЭРГ – биопотенциалов сетчатки, снимаемых специальным прибором (электроретинографом) с глаза при подаче разных стимулирующих световых сигналов.

Подробное описание данных параметров дано в приложении 2.

## **2.2 Извлечение данных из диагностических аппаратов**

Аппарат EP-1000 (Tomey) [57] является компьютеризированной полуавтоматической системой диагностики зрения. Программное обеспечение, поставляемое с данной системой, позволяет записывать и сводить данные о всех наблюдаемых пациентах, а также о результатах исследований, в единую БД. В дальнейшем возможен просмотр и редактирование такой БД.

Аппарат поддерживает следующие виды исследований сетчатки глаза:

- ERG – электроретинография (запись и представление в виде ЭРГ биопотенциалов, возникающих в области глаз);
- VEP – зрительные вызванные потенциалы (ЗВП) (запись биопотенциалов, возникающих в ответ на определённые стимулы);
- PERG – паттерн ЭРГ (ПЭРГ) (исследование ЭРГ с использованием заготовленных шаблонов стимуляций);
- EOG – электроокулография (снятие потенциалов в различных областях головы в ответ на световые стимулы);
- Multi-Channel VEP – многоканальные ЗВП (запись биопотенциалов, возникающих в ответ на определённые стимулы с использованием большого количества каналов);

- ERG – ядерная ЭРГ первого порядка;
- mfERG – мультифокальная ЭРГ;
- mfVEP – мультифокальные ЗВП;
- FOK SOK ERG – ядерная ЭРГ второго порядка;
- mfERG pattern – аналогично mfERG, но выдаются результаты реакции на 9 различных паттерн-стимулов.

На выходе прибора выдаются графики (ЭРГ), представляющие набор сигналов, амплитудные и временные характеристики.

### Устройство базы данных аппарата

БД, поставляемая в составе программного обеспечения аппарата EP-1000, реализована на основе ядра Borland Database Engine версии 5.0.1 и носит название “Paradox”. СУБД написана языке Delphi. Средства разработки и драйверы чтения для данной БД обновлялись последний раз в 1996 году. После этого разработка и поддержка данного продукта была прекращена, но использование его в офтальмологии продолжается. Однако в интернете осталась часть документации и программ [58-60].

Пример главного окна СУБД аппарата EP-1000 приведен на рис. 32.

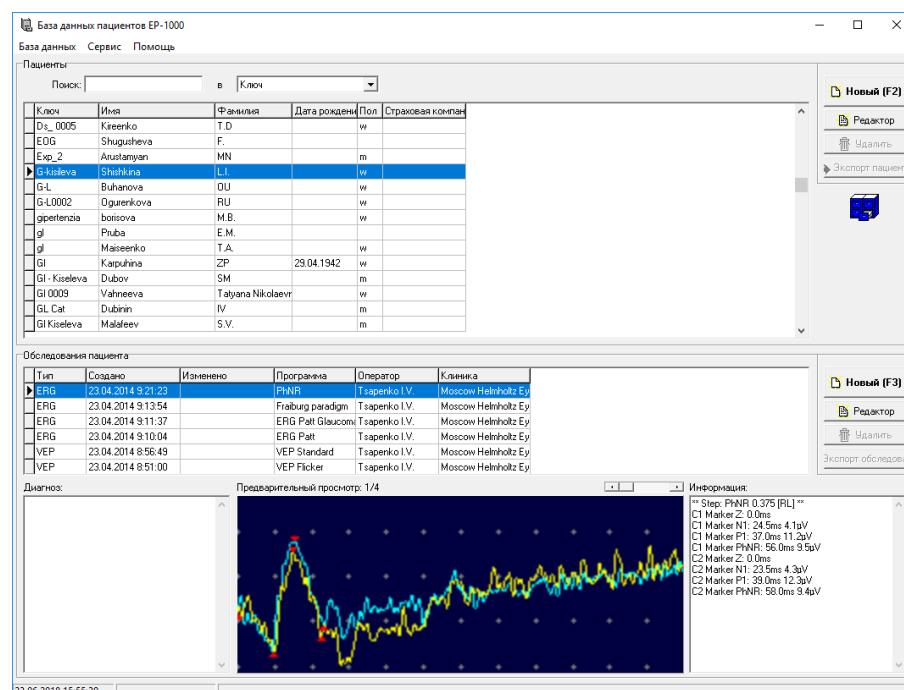
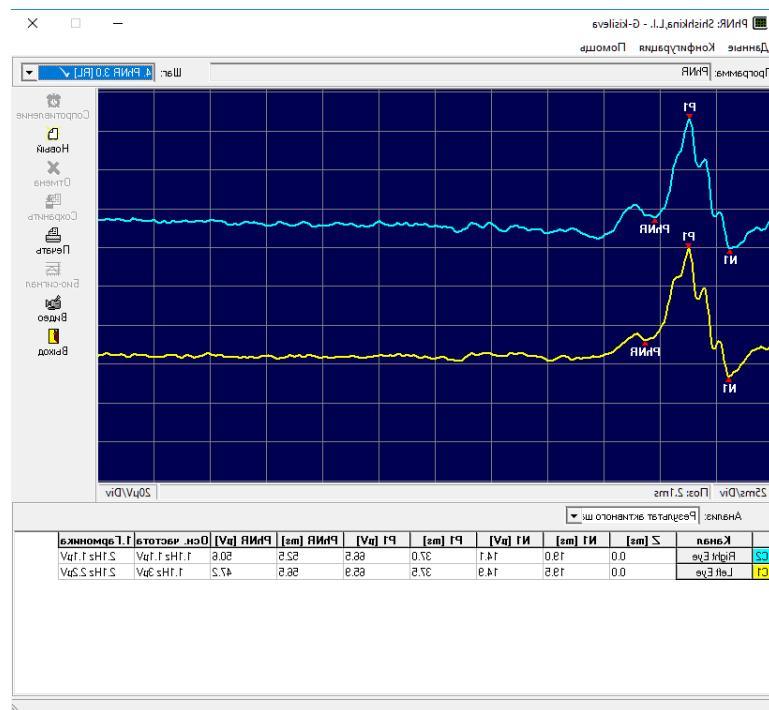


Рис. 13. Главное окно СУБД аппарата EP-1000.

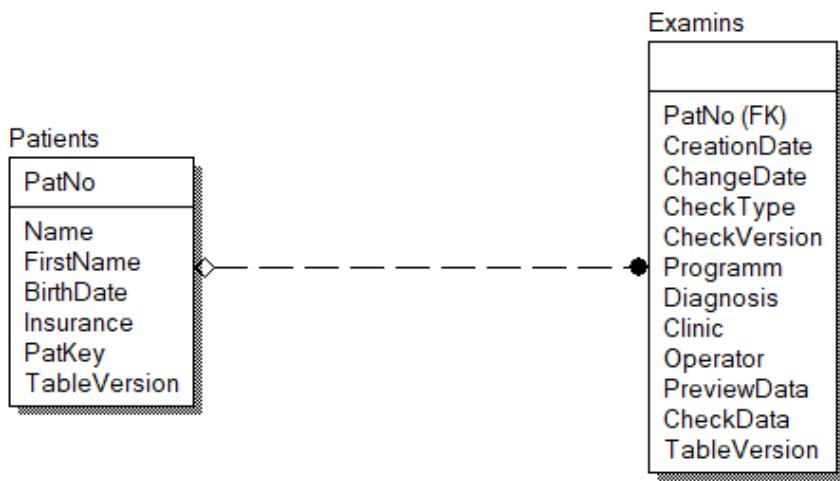
Также приведем пример окна просмотра и редактирования результатов исследования (рис 33).



**Рис. 14. Окно просмотра и редактирование исследования СУБД ЕР-1000.**

База данных аппарата содержит две таблицы: Exams и Patients.

На рис. 34 приведена логическая схема сущностей БД. Данной схеме соответствуют таблицы в БД. Ключевой сущностью является пациент, для каждого экземпляра пациента может быть несколько экземпляров сущности. Ключевым атрибутом является числовой атрибут PatNo, входящий в состав сущности пациента.



**Рис. 15. Логическая схема сущностей БД ЕР-1000.**

На рис. 35-38 приведены примеры таблиц Patients и Examins: их составляющих Properties (свойства) и Structure (структура), заполнение полей.

PATIENTS.DB	
Properties	
Table Type	PARADOX 5
Language Driver	ANSIINTL
Code Page	1252
Protection	False
Version	87
Field Count	8
RefInt Check Count	1
Index Count	4
Validity Check Count	1
Filter Count	0
Password Count	0
File Size	118,00 KB
Structure	
PatNo	Auto-incrementing 32-bit integer counter
Name	String(41)
FirstName	String(41)
BirthDate	Date
Sex	String(2)
Insurance	String(41)
PatKey	String(41)
TableVersion	16-bit integer

**Рис. 16. Пример таблицы Patients**

	PatNo	Name	FirstName	BirthDate	Sex	Insurance	PatKey	TableVersion
1 ►	1	Test	Test	10.11.1966	m		123	4096
2	2	*** DEMO ***		01.10.1979	w		*** DEMO ***	4096
3	3						XR0006	4096
4	4						GL0001	4096
5	6						DR0001	4096
6	7						NEU	4096
7	8						NEU0001	4096
8	9						NEU0002	4096
9	10							4096
10	11							4096
11	12						DR0030	4096
12	13						halkos001	4096
13	14						NEU0003	4096
14	15						DR0004	4096
15	16						DR0005	4096
16	17						AZN_PIN	4096
17	18						DR0032	4096
18	19						DR0006	4096
19	20						XR0004	4096
20	21						XR0005	4096
21	22						111	4096
22	23						PR	4096
23	24							

Рис. 17. Поля таблицы Patients (пикселизацией закрыты личные данные пациентов)

Examins.DB	
<b>Properties</b>	
Table Type	PARADOX 7
Language Driver	ANSIINTL
Code Page	1252
Protection	False
Version	190
Field Count	12
RefInt Check Count	1
Index Count	2
Validity Check Count	1
Filter Count	0
Password Count	0
File Size	1,92 MB
<b>Structure</b>	
PatNo	32-bit integer
CreationDate	Date and time
ChangeDate	Date and time
CheckType	String(11)
CheckVersion	16-bit integer
Programm	String(41)
Diagnosis	Text memo
Clinic	String(129)
Operator	String(41)
PreviewData	Binary Large OObject
CheckData	Binary Large OObject
TableVersion	16-bit integer

Рис. 18. Пример таблицы Examins

	PatNo	CreationDate	ChangeDate	CheckType	CheckVersion	Programm	Diagnosis	Clinic	Operator	PreviewData	CheckData	TableVersion
1	1	08.12.2008 15:59:37	18.12.2008 12:21:33	ERG	12288	ERG Flash	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
2	1	18.12.2008 12:21:09	18.12.2008 12:21:33	VEP	12288	VEP Visus intern	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
3	1	18.12.2008 12:48:15		VEP	12288	VEP Standard	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
4	1	18.12.2008 12:52:24		VEP	12288	VEP Flicker	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
5	1	18.12.2008 12:56:41		VEP	12288	VEP Flicker	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
6	1	18.12.2008 13:02:49		VEP	12288	VEP Patt On/OFF	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
7	1	18.12.2008 13:07:14		VEP	12288	VEP Visus intern	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
8	1	18.12.2008 13:08:55		VEP	12288	VEP Visus intern	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
9	1	18.12.2008 13:11:57	18.12.2008 13:19:13	VEP	12288	VEP Flash	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
10	2	04.04.2006 11:51:01		VEP	4868	VEP Standard ext.	Demo Clinic		(BLOB)	(BLOB)	4096	
11	2	30.08.2006 12:48:15		ERG	4865	ERG Std [glatt]	Demo Clinic		(BLOB)	(BLOB)	4096	
12	2	30.08.2006 13:25:11		ERG	4865	ERG Flash Farbe	Demo Clinic		(BLOB)	(BLOB)	4096	
13	2	30.08.2006 13:11:43		MERG	4865	MERG BitR FOK	Demo Clinic		(BLOB)	(BLOB)	4096	
14	2	30.08.2006 13:25:11		MERG	4865	MERG BitR FOK	Demo Clinic		(BLOB)	(BLOB)	4096	
15	2	06.09.2006 13:57:00		ERG	4865	ERG Std [glatt]	Demo Clinic		(BLOB)	(BLOB)	4096	
16	2	28.11.2006 10:11:10		EOG	8192	EOG undilated	Demo Clinic		(BLOB)	(BLOB)	4096	
17	2	14.10.2010 14:29:45	31.10.2013 13:43:52	ERG	12288	PNR	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
18	3	10.02.2009 11:20:35	10.04.2009 12:33:22	ERG	12288	ERG Soft	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
19	3	10.02.2009 11:20:35	10.04.2009 12:30:23	ERG	12288	ERG Soft [soft]	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
20	3	10.02.2009 11:49:49		ERG	12288	ERG Hard	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
21	4	11.03.2009 10:50:23		VEP	12288	VEP Flash	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
22	4	11.03.2009 11:07:35	22.04.2010 16:32:05	ERG	12288	ERG Std [soft]	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
23	6	02.03.2009 13:25:45	10.04.2009 12:40:03	ERG	12288	ERG Std [soft]	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
24	6	02.03.2009 13:25:27	10.04.2009 12:38:59	ERG	12288	ERG Standard	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
25	6	02.03.2009 13:57:24		VEP	12288	VEP Standard	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	
26	6	02.03.2009 14:01:16		VEP	12288	VEP Flash	Moscow Helmholtz Eye Diseases Institute 105062, Moscow, Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19 str.	Tsapenko I.V.	(BLOB)	(BLOB)	4096	

**Рис. 19. Поля таблицы Examins**

Так как программное обеспечение аппарата EP-1000 не является открытым и уже не поддерживается разработчиком, то возникает проблема извлечения данных из таблиц БД аппарата для их последующего анализа. На данный момент известно всего два вида интерфейсов, позволяющих считывать данные из семейства БД на основе Borland Database Engine (BDE). Это интерфейсы Object Linking and Embedding (OLE) [61] и Open Database Connectivity (ODBC) [62]. Оба интерфейса входят в состав фреймворка .NET и позволяют считывать лишь текстовые, временные и числовые поля. Наиболее значимыми для анализа являются данные, хранящие непосредственно результаты исследования. Эти данные являются бинарными объектами типа Binary Large Object (BLOB) и хранятся в полях PreviewData и CheckData таблицы Examins. Необходимо реализовать программное средство для корректного считывания и предварительной обработки (в частности, удаления неинформативных/ второстепенных данных) информации из всех полей БД, так как это не представляется возможным осуществить с помощью имеющихся интерфейсов считывания.

Для решения данной задачи необходимо исследовать файловую структуру имеющейся БД.

### Структура бинарных данных БД аппарата EP-1000

Поскольку архитектура и файловая структура БД аппарата EP-1000 достоверно неизвестна (в силу, как отмечено ранее, закрытости программного обеспечения), будем исходить из предположения (гипотезы), что поля, хранящие бинарные данные исследований, не хранят эту информацию в чистом виде, а

ссылаются на некоторые внешние файлы или области внешних файлов. Для того, чтобы подтвердить или опровергнуть эту гипотезу, рассмотрим список файлов БД (таблиц Patients и Exams) (рис. 39).

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
Exams	16.05.2018 0:58	Data Base File	1 970 КБ
Exams.MB	16.05.2018 0:58	Файл "MB"	152 628 КБ
Exams.PX	16.05.2018 0:58	Файл "PX"	22 КБ
Exams.VAL	16.05.2018 0:58	Файл "VAL"	1 КБ
Exams.XG0	16.05.2018 0:58	Файл "XG0"	202 КБ
Exams.YG0	16.05.2018 0:58	Файл "YG0"	8 КБ
PATIENTS	16.05.2018 0:58	Data Base File	118 КБ
PATIENTS.PX	16.05.2018 0:58	Файл "PX"	4 КБ
Patients.VAL	16.05.2018 0:58	Файл "VAL"	1 КБ
PATIENTS.X07	16.05.2018 0:58	Файл "X07"	30 КБ
PATIENTS.XG0	16.05.2018 0:58	Файл "XG0"	52 КБ
PATIENTS.XG1	16.05.2018 0:58	Файл "XG1"	8 КБ
PATIENTS.Y07	16.05.2018 0:58	Файл "Y07"	4 КБ
PATIENTS.YG0	16.05.2018 0:58	Файл "YG0"	8 КБ
PATIENTS.YG1	16.05.2018 0:58	Файл "YG1"	4 КБ

Рис. 20. Файлы БД

Основными файлами, представляющими соответствующие таблицы, являются Exams.db и Patients.db. Файлы имеют существенный размер (сотни тысяч КБ), поэтому с большим основанием можно считать, что в них хранится основной объём данных представляют информацию из полей таблицы.

Известно, что бинарные поля включены в состав сущности Exams, поэтому следует проанализировать файлы, относящимся к этой сущности (файлы с названием Exams). Среди таких файлов есть несколько файлов малого размера (менее 10 КБ), которые обычно хранят данные о связях, целостности и другую вспомогательную информацию о сущности. Но имеется так же файл особо крупного размера - Exams.mb (более 150000 КБ). Рассмотрим этот файл в побайтовом виде. Будем исходить из предположения, что файл разделен на записи, число которых равно числу исследований, представленных в БД. В проведенных экспериментах БД с тестовым набором данных содержит 3934 записи об исследованиях. Для анализа файла будем использовать редактор файлов 010 Editor [63].

Анализируя общую структуру файла, можно заметить, что он заполнен информацией неравномерно. “Пустые” (не содержащие информации) участки чередуются с участками, содержащими некоторую информацию (рис. 40). Будем считать, что информативные участки и являются записями, хранящими данные об исследованиях.

Examins.MB X																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	0123456789ABCDEF
1E40h:	BE	94	44	F7	A5	24	BA	2F	25	4D	B7	E5	DD	A3	83	5B	%“D-¥\$°/%M·ÅÝ£f[
1E50h:	E5	EB	D7	B2	7F	69	06	83	F6	E9	C7	FD	F7	A3	76	E7	åë×“.i.föéÇý=£vç
1E60h:	CD	F6	5E	BB	B6	BA	71	7F	B3	7D	B1	F7	E4	65	3B	18	íö^»Pºq.º}±-äe;.
1E70h:	DC	B9	FD	75	BD	DD	7A	75	F8	76	FF	FB	7D	3E	2A	C7	Ü¹ýx·Åzuøvý°}>*ç
1E80h:	D6	DE	7D	95	7B	CD	7B	7D	DI	76	C7	AI	4E	8F	7D	7A	Öþ}~}m{}Övç-N.)z
1E90h:	36	7B	6C	A7	1C	DB	D8	3C	FF	D8	76	37	6A	87	DD	EA	6{1S.ÛØ<ÿØv7j‡Ýè
1EA0h:	83	99	63	DD	39	9D	EE	82	4E	77	41	A7	FB	AB	B3	B6	f™cÝ9.i,NwASÙ«’¶
1EB0h:	3A	3C	39	D6	FC	04	60	91	A4	28	08	3F	E0	4B	00	00	:<9Öü..`'h(.?àK..
1EC0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1ED0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1EE0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1EF0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F00h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F10h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F20h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F30h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F40h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F50h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F60h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F70h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F80h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1F90h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1FA0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1FB0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1FC0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1FD0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1FE0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
1FF0h:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
2000h:	02	02	00	68	11	00	00	01	00	0C	51	AB	67	03	00	02	...h.....Q«g...
2010h:	00	5C	11	00	00	C3	78	0C	51	AB	67	07	00	00	00	24	.\\...Äx.Q«g....\$
2020h:	02	00	00	01	00	01	00	14	10	01	1A	02	16	45	52	47	.....ERG
2030h:	20	46	6C	61	73	68	00	00	00	00	00	00	07	02	67	02	Flash.....g.
2040h:	09	65	37	13	03	45	52	47	11	06	04	24	5E	02	43	32	.e7..ERG...\$^..C2
2050h:	11	04	04	33	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	...=...y...`
2060h:	5D	C2	43	31	11	07	04	A2	85	80	43	4F	4D	10	00	08	]ÂC1...€COM...
2070h:	13	00	00	FA	44	00	00	00	00	14	00	00	00	00	00	0F	...úD.....
2080h:	00	01	00	5A	09	00	1D	01	00	4C	65	66	74	20	45	79	...Z....Left Ey
2090h:	65	00	00	00	00	00	6F	12	83	3A	00	00	00	40	00	00	e.....o.f....@..

Рис. 21. Побайтовый вид файла Examins.mb

Так как файл состоит из записей, то необходимо выделить для всех информативных участков некоторую последовательность байт, которая может являться заголовком для всех записей об исследованиях. В результате

экспериментов удалось найти такую последовательность - 0C 51 AB 67 03 00 02 00.

На рис. 41 показан результат поиска числа вхождений данной последовательности в файл.

Find Results	
	Address
2009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
4009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
8009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
E009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
10009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
13009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
15009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
17009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
1A009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
1D009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
23009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
2D009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
33009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
6F009h	0C 51 AB 67 03 00 02 00
3934	AC009h 0C 51 AB 67 03 00 02 00

**Рис. 22. Результат поиска вхождения последовательности байт 0C 51 AB 67 03 00 02 00 в файле Examins.mb**

Из рис. 41 видно (внизу справа), что число вхождений соответствует количеству записей (3934) об исследованиях в БД. А поскольку данная последовательность находится в начале каждой записи, то будем считать ее заголовочной. Далее следует проанализировать байты, расположенные между найденными заголовками, т.е. байты, образующие запись.

Будем исходить из предположения, что данные внутри каждой записи так же упорядочены и структурированы. Проанализируем структуру каждой записи.

В результате анализа определен набор байт, который делит запись на отдельные участки - 0C 51 AB 67. Результат поиска данной последовательности в записи представлен на рис. 42.

Examins.MB X																		
	Edit As: Hex		Run Script		Run Template													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	0123456789ABCDEF	
21E0h:	00	1D	01	00	4C	65	66	74	20	45	79	65	00	00	00	00	....Left Eye....	
21F0h:	00	6F	12	83	3A	00	00	00	40	00	00	96	43	10	10	05	.o.f:....@...-C...	
2200h:	64	00	03	12	46	6C	61	73	68	20	31	2E	30	00	00	00	d...Flash 1.0...	
2210h:	00	00	00	00	02	01	05	C8	00	03	12	46	6C	61	73	68	.....E... Flash	
2220h:	20	32	2E	30	00	00	00	00	00	00	02	01	05	2C	01	2.0.....,		
2230h:	03	12	46	6C	61	73	68	20	33	2E	30	00	00	00	00	..Flash 3.0.....		
2240h:	00	00	02	01	00	00	00	OC	51	AB	67	09	00	00	00	24	.....Q«g....S	
2250h:	00	00	00	00	03	72	6F	74	04	62	6C	61	75	05	67	72	.....rot.blau.gr	
2260h:	75	65	6E	00	00	00	07	6C	6F	67	20	32	2E	35	06	00	uen....log 2.5..	
2270h:	04	22	CB	38	02	01	00	OC	51	AB	67	08	00	00	00	E8	."È8....Q«g....è	
2280h:	0E	00	00	01	00	OC	51	AB	67	0A	00	00	00	20	00	00	.....Q«g.....	
2290h:	00	E7	C5	3A	53	D5	6D	E3	40	04	00	00	00	15	D4	D3	.çÄ:Sõmä@....Öö	
22A0h:	42	00	00	48	42	01	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	B..HB.....	
22B0h:	00	OC	51	AB	67	0F	00	00	00	DC	00	00	00	14	10	01	..Q«g....Ü.....	
22C0h:	D8	00	16	45	52	47	20	46	6C	61	73	68	00	00	00	00	Ø..ERG Flash....	
22D0h:	00	00	07	02	67	02	01	65	37	10	01	08	13	00	00	FA	....g..e7.....ú	
22E0h:	44	00	00	00	00	14	00	00	00	00	00	0F	00	01	00	5A	D.....Z	
22F0h:	09	00	1D	01	00	4C	65	66	74	20	45	79	65	00	00	00	....Left Eye...	
2300h:	00	00	6F	12	83	3A	00	00	00	40	00	00	96	43	10	10	....o.f:....@...-C..	
2310h:	09	01	1D	01	00	52	69	67	68	74	20	45	79	65	00	00	....Right Eye..	
2320h:	00	00	6F	12	83	3A	00	00	00	40	00	00	96	43	10	10	....o.f:....@...-C..	
2330h:	0A	0F	CD	CC	CC	3D	00	00	00	00	00	17	B7	D1	38	00	..ííí=....Ñ8..	
2340h:	81	0B	00	0E	01	4E	31	00	00	00	6F	12	03	3C	0A	D7	....Nl...o..<..	
2350h:	23	3D	0B	01	0E	04	50	31	00	00	00	8F	C2	F5	3C	8F	#=....Pl....Åõ..	
2360h:	C2	75	3D	02	13	09	01	00	00	A0	41	01	00	00	00	05	Åu=.....A.....	
2370h:	00	00	64	00	06	00	00	0A	0C	0A	00	00	00	00	FF	FF	..d.....ÿý	
2380h:	FF	FF	FF	FF	03	12	46	6C	61	73	68	20	31	2E	30	00	ÿÿÿ..Flash 1.0..	
2390h:	00	00	00	03	01	00	03	01	00	OC	51	AB	67	0E	00	00	.....Q«g...	
23A0h:	00	DC	06	00	00	01	00	00	OC	51	AB	67	0B	00	00	00	Ü.....Q«g.....,	
23B0h:	00	00	00	01	00	0C	00	01	00	00	00	00	F4	FD	D4	3C	97	.....öýÔ<-
23C0h:	A7	4F	B9	02	00	0C	00	04	00	00	00	6F	12	03	3D	43	\$0¹.....o.=C	
23D0h:	D1	EA	38	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	OC	Ñè8.....	
23E0h:	51	AB	67	0C	00	00	00	44	03	00	00	59	00	C9	00	00	Q«g....D...Y.É..	
23F0h:	00	25	FA	3B	38	CA	48	84	37	5A	FD	E8	B7	8A	4E	9B	.%ú;8ÊH,,7Zýè.ŠN>	
2400h:	B8	4E	C4	E8	B8	45	2B	0B	B9	A9	D5	14	B9	D0	E0	19	,NÄè,E+.¹@Ö.¹Ðà.	
2410h:	B9	C5	0C	22	B9	EB	5A	2F	B9	00	AE	3D	B9	B9	B7	46	¹Å."¹ëZ/¹.®=¹¹·F	
2420h:	B9	E7	DA	46	B9	92	49	3F	B9	76	0A	34	B9	55	C9	27	¹çÚF¹/I?¹v.4¹UÉ¹	
2430h:	B9	7C	F0	18	B9	28	6B	02	B9	4A	27	BF	B8	FE	B0	41	¹ Ø.¹(k.¹J¹z.¹b¹A	

Find Results

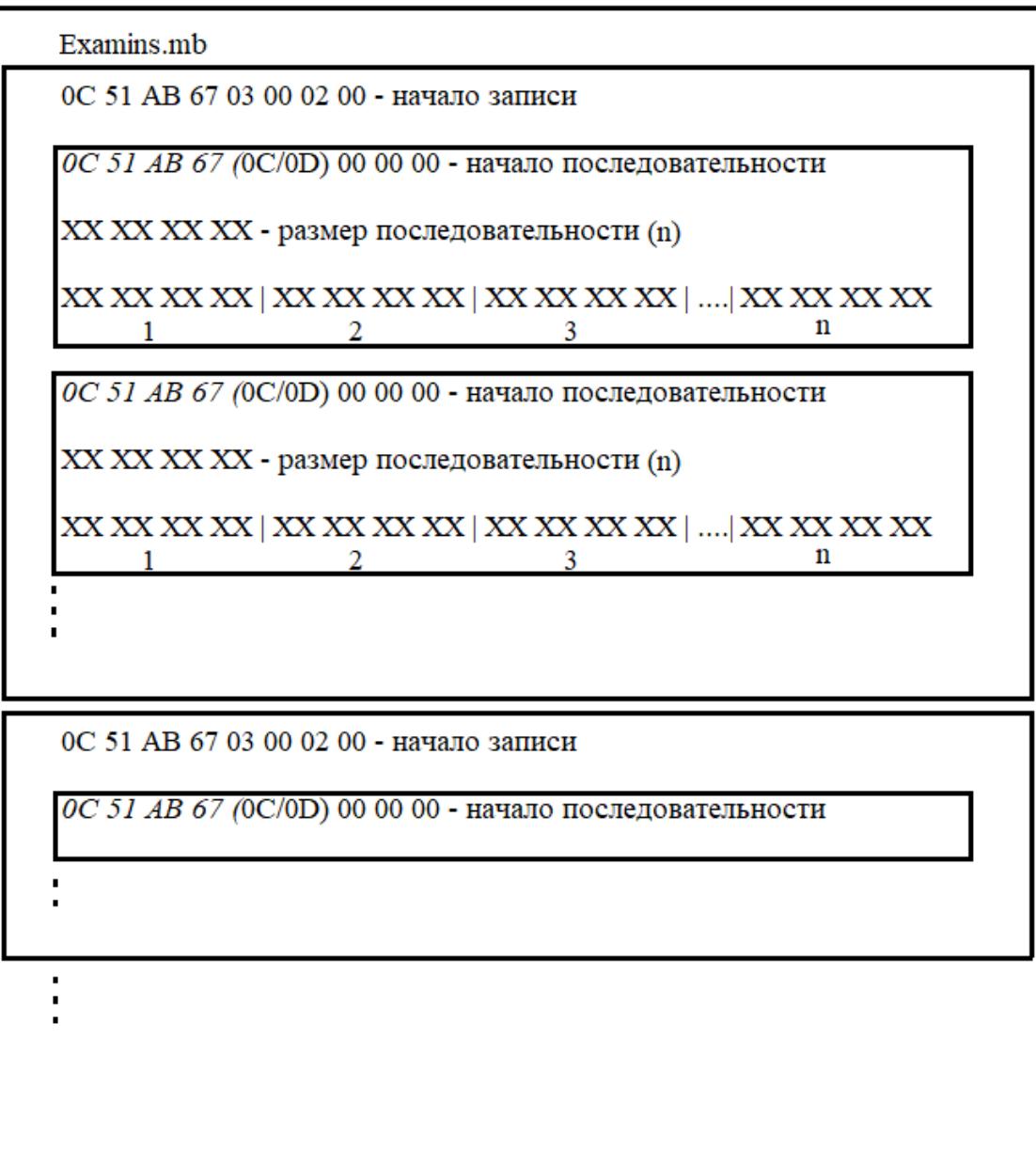
Address	Value
1150h	0C 51 AB 67
1710h	0C 51 AB 67
1BE0h	0C 51 AB 67
2009h	0C 51 AB 67
2017h	0C 51 AB 67
2247h	0C 51 AB 67
2277h	0C 51 AB 67
2285h	0C 51 AB 67
22B1h	0C 51 AB 67
2399h	0C 51 AB 67
23A7h	0C 51 AB 67
23DFh	0C 51 AB 67
272Fh	0C 51 AB 67
2A81h	0C 51 AB 67
167446 2A8Eh	0C 51 AB 67

Output   
 Find Results   
 Find in Files   
 Compare   
 Histogram   
 Checksum   
 Process

Found 167446 occurrences of '0C 51 AB 67'. (press Esc to hide results)

Рис. 23. Результат поиска последовательности 0C 51 AB 67 в файле Examins.mb

Предположим, что данные (как правило) хранятся в виде чисел с плавающей запятой, т.е. в виде данных типа float. Так как такие данные представляются четырьмя байтами, то имеем дело с последовательностями (наборами) из четверок байт. Установлено, что найденный набор не всегда относится к участкам записи, содержащим дробные значения исследования. Поскольку результат исследования на основе аппарата EP-1000 (на основе ЭРГ) представляет собой хорошо детализированный график, то количество точек в нем велико. Следовательно, интерес представляют длинные промежутки между найденными наборами. На рис. 41 (верхняя часть) видно, что промежутки между наборами слишком малы, чтобы допустить размещение в них последовательностей дробных значений. В результате анализа удается найти еще несколько наборов, наличие которых характерно для промежутков большой длины. Это наборы 0C 00 00 00 и 0D 00 00 00. При дальнейшем анализе найденных участков, содержащих последовательности дробных значений, удается обнаружить, что следующие четыре байта после найденных наборов хранят целое число, отражающее количество следующих за ним дробных значений. В результате получаем полную картину структуры бинарного файла, хранящего результаты исследований (рис. 43).



**Рис. 24 Общий вид структуры бинарного файла Examins.mb**

Установлено, что все записи в файле следуют в таком же порядке, как и записи в таблице Examins. Поэтому к записи в таблице с номером *n* будет относиться запись из файла под тем же номером.

В результате проведенного исследования была определена структура файла. Поочередно находя в файле нужные байтовые последовательности, можно считывать данные всех исследований.

## **Общий алгоритм для извлечения данных в случае закрытых форматов**

В работе предложен оригинальный метод для определения структуры данных, хранящихся в закрытых БД при отсутствии информации о внутренней структуре части полей, либо эта информация зашифрована и недоступна пользователю.

Основные этапы метода:

- 1) определение типа БД, используемого в программе;
- 2) извлечение из программы данных для доступа к БД (логина и пароля, при их наличии);
- 3) извлечение информации о структуре БД;
- 4) извлечение из бинарных полей информации о временных рядах (наборах вещественных чисел):
  - 4.1) поиск непрерывных последовательностей чисел в одном из форматов представления вещественных чисел в компьютере;
  - 4.2) сравнение найденных последовательностей с имеющимися данными о ПО и их классификация;
  - 4.3) поиск полей, содержащие дополнительную информацию (частоту дискретизации данных, количество данных, дополнительные метки).

Данный метод составляет основу разработанного программного конвертера для преобразования данных из закрытого формата (закрытой БД) в открытый формат (открытую БД) для возможности дальнейшей обработки данных (ИАД) и обмена с другими системами.

Отметим, что при решении различных задач, связанных с обработкой данных (включая ИАД), часто возникает проблема преобразования данных из закрытого формата в открытый и формирование открытых БД (например, при использовании медицинских приборов для снятия ЭРГ в офтальмологии, ЭКГ в кардиологии и др.). К преимуществу предложенного метода и реализованного на его основе программного конвертера относится достаточная универсальность, позволяющая

работать с различными типами закрытых данных. Разработанный конвертер зарегистрирован как программный продукт.

### **2.3 Проектирование онтологии системы хранения данных**

В работе [64] показан пример использования онтологий для представления геномных данных для хранения в нереляционной базе данных (НБД) на примере граф-ориентированной НБД. В диссертационной работе предлагается построение онтологии и использование документной НБД, которая перед традиционными реляционными БД (РБД) представляет преимущества в хранении плохо структурированных и постоянно обновляемых данных.

Определим базовые элементы онтологии.

#### **Понятия (Классы):**

- 1) *обследование (O)* – данные обследования, представленного в виде некоторого документа с заданной или неопределенной структурой. Обследование может содержать в себе разные экземпляры, типа «исследование ЭРГ», «фотография сетчатки» и др.;
- 2) *назначение (N)* – итоговый результат, выданный экспертом (ЛПР) на основании анализа данных одного или нескольких обследований. Назначение может содержать в себе разные экземпляры, такие как «назначение лекарств», «назначение обследования у другого врача» и т.д.;
- 3) *знание (Z)* – результат получения знаний из данных автоматическими методами (методами ИАД) либо в результате их формирования при помощи опросников и других методов прямого получения знаний от экспертов. Знание состоит из экземпляров разного рода, например: «опросник офтальмолога», «опросник невропатолога», «результат анализа нейросетью», «результат, полученный методом Демпстера-Шеффера», «методом Байеса» и др.;
- 4) *документ порождения (DR)* – документ, порождаемый посредством генерации новых документов и связанный с одним из отношений порождения  $R_x$ .

Отношения:

- 1) *порождение* ( $R_{gen}$ ) – порождение  $Z$  из множества  $O, Z, N$ ;
- 2) *обобщение* ( $R_{int}$ ) – порождение  $Z$  из множества  $Z$ ;
- 3) *заключение* ( $R_{sum}$ ) – порождение  $N$  из множества  $Z$  на основе экспертного заключения.

Предложенная онтология позволяет описать процесс **порождения (вывода)** на временном интервале  $[t, t+1]$  нового знания  $Z(t + 1)$  и назначения  $N(t + 1)$  из имеющихся знаний и назначений  $Z(t), N(t)$  по следующим формулам:

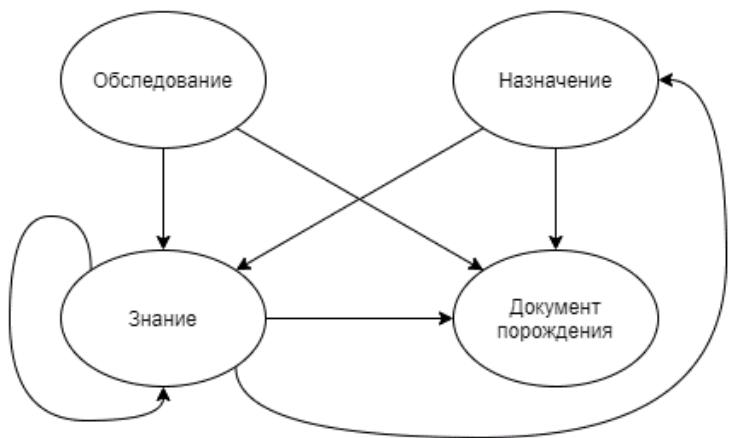
$$Z(t + 1) = R_{int}(R_{gen}((O(t) \times N(t) \times Z(t))^2), N(t + 1) = R_{sum}(Z(t + 1))$$

где:

- $N(t + 1)$  – новое заключение;
- $Z(t + 1)$  – обобщение имеющихся знаний на момент построения вывода;
- $O(t)$  – множество всех обследований на момент построения;
- $N(t)$  – множество всех назначений на момент построения;
- $Z(t)$  – множество всех знаний на момент построения
- $(O(t) \times N(t) \times Z(t))^2$  – множество всех подмножеств декартового произведения полученных на данный момент обследований, назначений и знаний, т.е. исходные данные для повторной операции извлечения знаний из данных и знаний, полученных на данный момент.

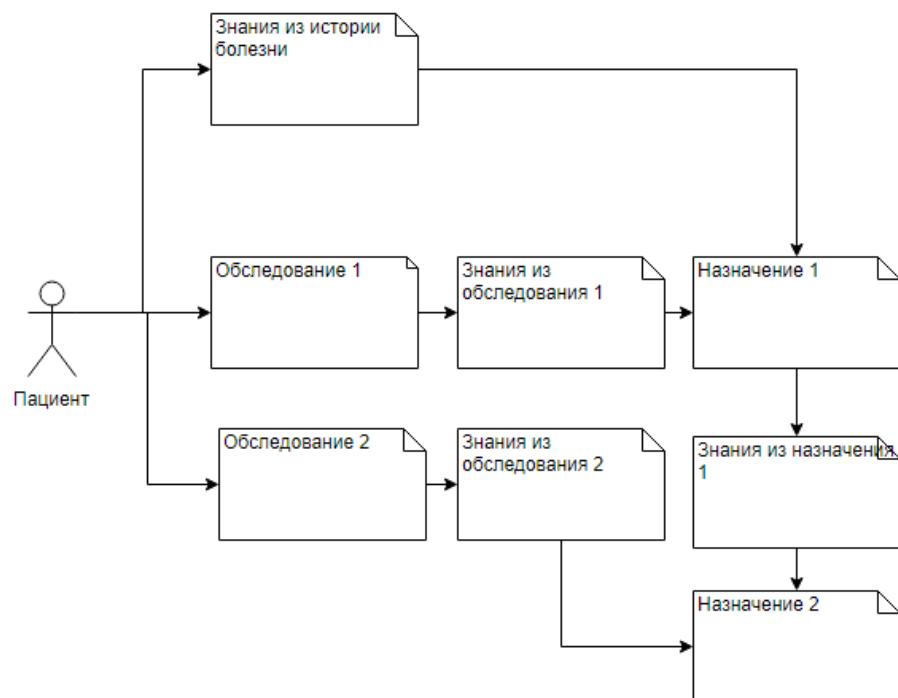
Данная онтология является упрощённой базовой моделью для организации представления и хранения знаний. Поскольку каждая генерация выполняется с применением методов (алгоритмов), соответствующих отношениям порождения  $R_x$ , то в результате генерируется некоторый документ DR, позволяющий исследовать в ретроспективе полученные последовательности выводов.

На рис. 44 представлена укрупненная схема онтологии. Следует отметить, что все понятия могут храниться в НБД в открытом и расширяемом формате (формализованном или нет), причем НБД открыта для занесения в неё новых понятий.



**Рис. 25. Схема онтологии**

В итоге можно сделать вывод, что использование предложенной онтологии позволяет формализовать процессы работы с НБД, расширить её возможности для применения в ИАД и в ЭС (ИСППР) в целом в сложных проблемных ситуациях. Также имеется возможность в НБД объединить онтологию с БД, сделав её расширяемой на низшем уровне. На рис. 45 приведена схема, отображающая процесс сбора данных о пациенте и генерации назначений. Стрелки на схеме представляют отношения порождения RD, используемые для последующего анализа, включая ИАД.



**Рис. 26. Схема процесса сбора данных и генерации новой информации**

Предложенный подход позволяет интегрировать разные модели извлечения знаний и подготовки итоговых решений [65-67], причем для разных обследований могут использоваться разные методы получения знаний.

В частности, для классификации ЭРГ [66] на основе ИНС предложены следующие продукционные правила (правила вывода):

$RD \text{ (классификация на основе ИНС)} \leftarrow (O(\text{ЭРГ}), R_{\text{gen}}, Z(\text{диагноз на основе ИНС})).$

Также может быть использован метод классификации на основе имитационных моделей (ИМ) [67]:

$RD \text{ (классификация на основе ИМ)} \leftarrow (O(\text{ЭРГ}), R_{\text{gen}}, Z(\text{диагноз на основе ИМ})).$

При формировании опросников, которые позволяют получить знания ( $Z$ ), возможно порождение новых знаний, которые окажутся более полными и понятными для эксперта [65]:

$RD \text{ (вывод на основе метода Демстера-Шеффера (МД-Ш))} \leftarrow (Z(\text{опросник 1}), Z(\text{опросник 2}), R_{\text{int}}, Z(\text{диагноз на основе опросника})).$

Формирование общего заключения может быть выполнен с применением интегрированного вывода, например:

$RD \text{ (итоговый вывод назначения)} \leftarrow Z(\text{диагноз на основе ИНС}), Z(\text{диагноз на основе ИМ}), Z(\text{диагноз на основе МД-Ш}), Rsum N(\text{назначение}).$

Для возможности учета фактора времени (временных зависимостей) и специфики динамических данных, изменяемых в результате тех или иных назначений, могут быть рекомендованы методы прогнозирования, в частности:

- на основе ИНС для анализа набора параметров [68];
- метод опорных векторов, случайные леса и др. для кластеризации и выделения признаков [69].

Следует отметить, что предложенная модель способствует использованию методов ИАД и для анализа непосредственно данных (заключений) врачей (ЛПР,

экспертов), что может дать дополнительные знания для постановки диагноза и выбора лечения (см. пример в [70]).

## 2.4 Обработка и выделение статистических характеристик нестационарных сигналов

### Сглаживание

Поскольку при снятии биологического потенциала (в частности, используя ЭРГ) часты помехи, связанные со случайными движениями мышц, то целесообразно применить какую-либо сглаживающую процедуру. Это является обоснованным, так как при анализе важна общая форма больших колебаний на графике, а не единичные пики.

В качестве метода фильтрации помех предложено использовать сглаживание на основе окна Хэмминга [71], которое имеет следующий вид (рис. 46). Удаление слабых помех позволяет лучше визуализировать и анализировать данные при помощи ручных методов. Другие методы сглаживания позволяют получить более наглядные результаты, однако более сложны для тонкой настройки и при решении данной задачи не рассматриваются.

$$w(n) = 0.53836 - 0.46164 * \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$$

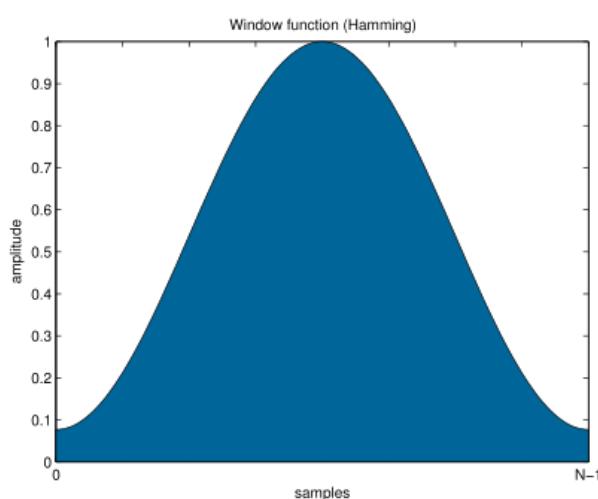
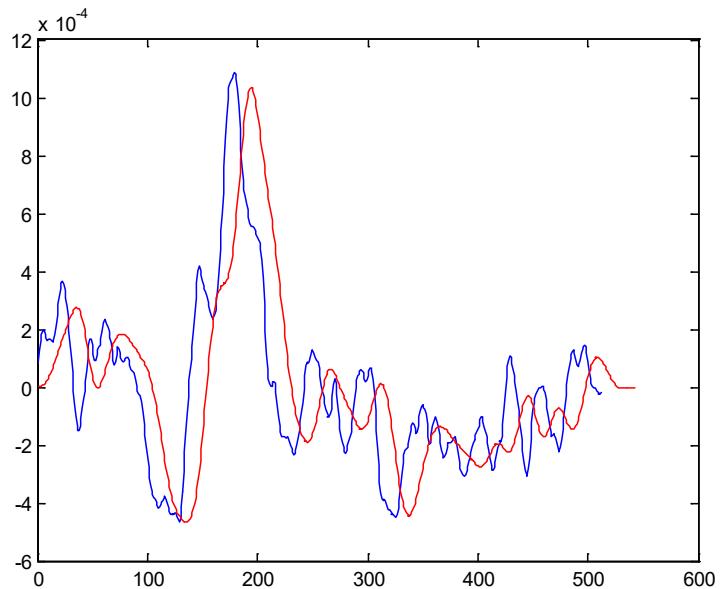


Рис. 27. Окно Хэмминга. По оси  $X$  указано количество сэмплов для сглаживания, по оси  $Y$  – коэффициент, с которым они берутся.

На рис. 47 представлены данные (графики) ЭРГ до сглаживания и после. Размер окна (равен 32) подобран эмпирически с целью сохранения основных признаков ЭРГ.

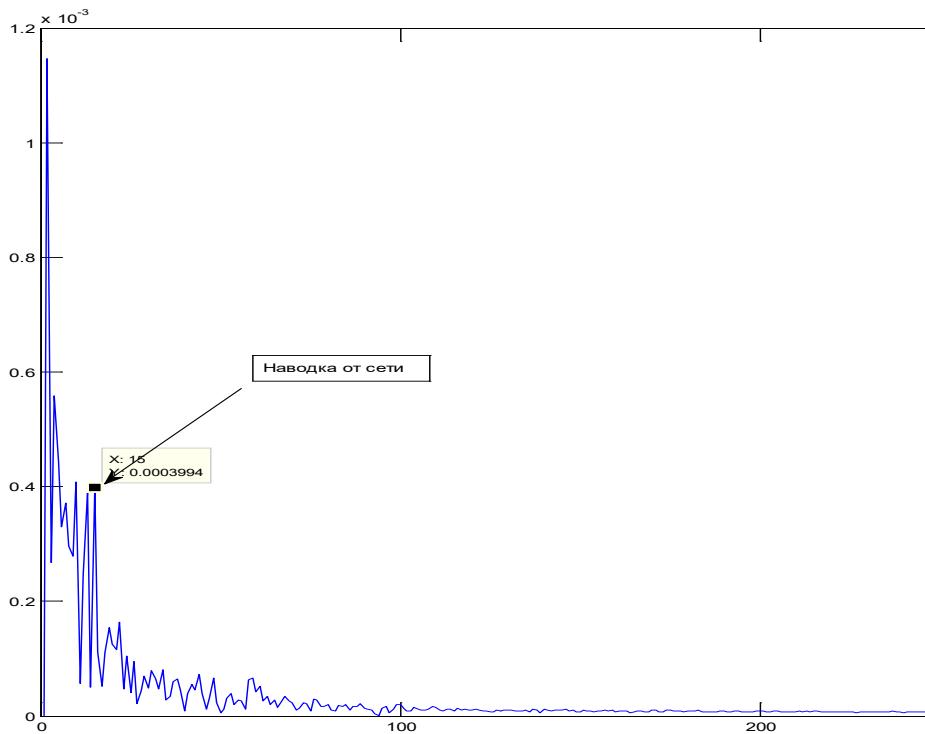


**Рис. 28** ЭРГ до сглаживания (синий) и после (красный). По оси  $X$  указывается номер отсчёта семплирования, по оси  $Y$  напряжение в вольтах.

### Фильтрация

Также важной проблемой при использовании различной аппаратуры (в том числе медицинской) для снятия данных является наличие посторонней наводки от электрической сети. На рис. 48 представлены данные ЭРГ, искажённые этой наводкой (частота дискретизации данных 1,7 кГц, замеры проводились в течении 0,3 с.).

Для решения этой проблемы выбран полосовой фильтр Баттервортса с полосой частот от 0 до 45 герц и от 55 герц до частоты дискретизации [72]. Данный фильтр выбран потому, что одно из его свойств – максимальная гладкость на частотах пропускания, что важно при анализе данных типа ЭРГ.



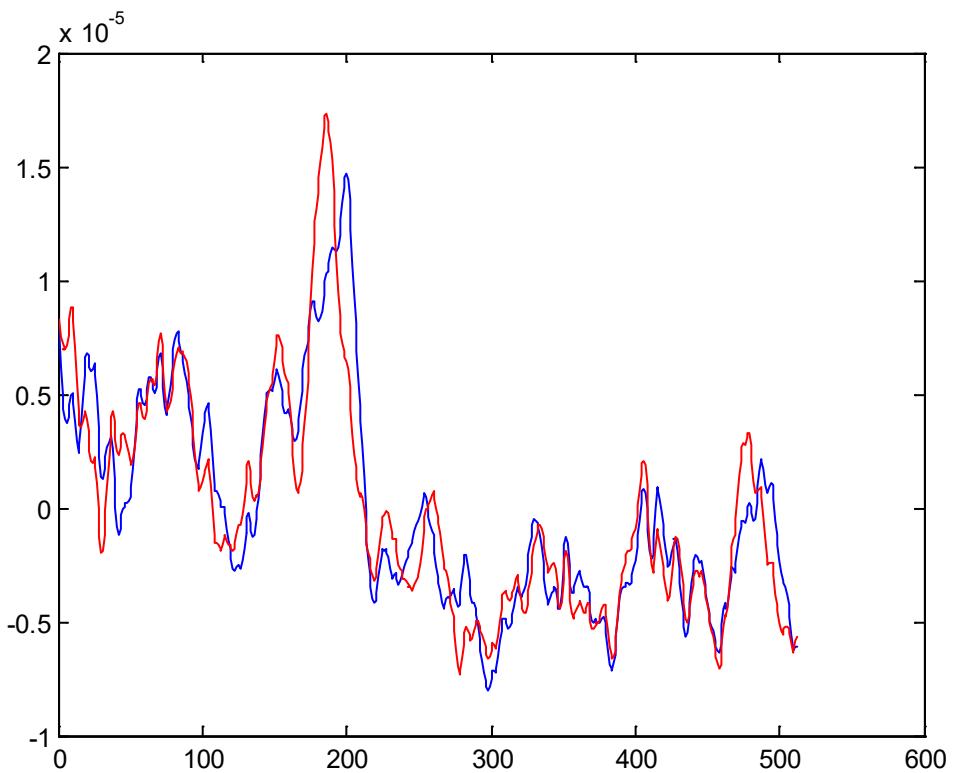
**Рис. 29 Дискретное преобразование Фурье для данных с большой наводкой. По оси X – номера гармоник, по оси Y – амплитуда гармоники.**

Амплитудно-частотная характеристика  $G(\omega)$  фильтра Баттерворта n-го порядка может быть получена из передаточной функции  $H(s)$ :

$$G^2(\omega) = |H(j\omega)|^2 = \frac{G_0^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}$$

- $n$  — порядок фильтра;
- $\omega_c$  — частота среза (на которой амплитуда равна  $-3\text{dB}$ );
- $G_0$  — коэффициент усиления по постоянной составляющей сигнала.

Результат применения данного фильтра к ЭРГ представлен на рис. 49.



**Рис. 30. ЭРГ до фильтрации (синее) и после фильтрации (красное)**

### Методы сокращения размерности и выделения признаков

Известно достаточно много различных методов сокращения размерности входных данных [73], представленных в виде различных временных рядов, в том числе получаемых с медицинских приборов типа ЭРГ, ЭКГ, ЭЭГ (электроэнцефалограмма) [74,75].

Поскольку в работе рассматривается именно ЭРГ, то в плане ИАД и обучения ИНС можно выделить некоторые статистические характеристики, такие как минимум, максимум, среднее значение и среднеквадратичное отклонение. Поскольку нам важна только часть ЭРГ, то будем рассчитывать данные характеристики соответственно только по информативной части. Следует отметить, что описанные методы сглаживания и фильтрации достаточно универсальны и могут быть применены для различных временных рядов.

Для того, чтобы показать эффективность предлагаемых решений в процессе обучения ИНС, приведём распределения значений, полученных на основе одной из ЭРГ (так называемой, фотопической ЭРГ), в зависимости от диагноза (рис. 50-57). Здесь и далее, значению 1 по оси ординат соответствует диагноз (заболевание)

«миопия», а значению 0 по оси ординат –диагноз «отслоение сетчатки». По оси абсцисс указываются значения рассматриваемого параметра в вольтах. Каждая из точек помечена номером, являющимся порядковым номером исследования в массиве входных данных.

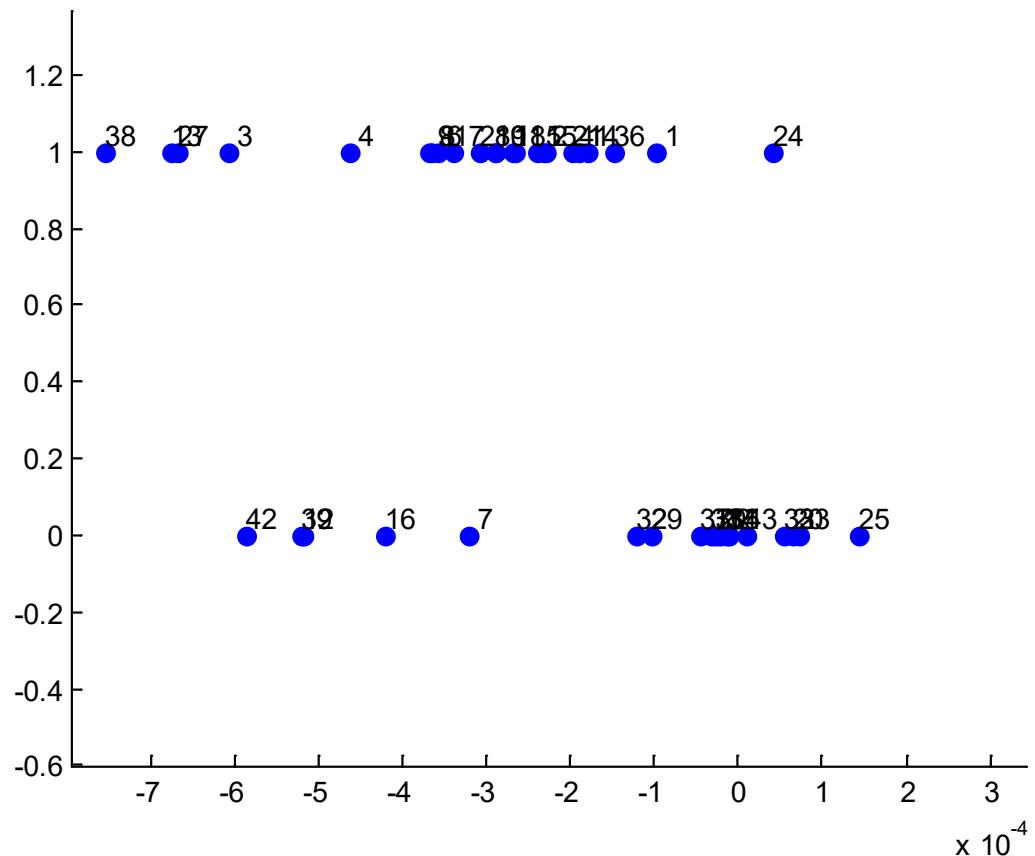
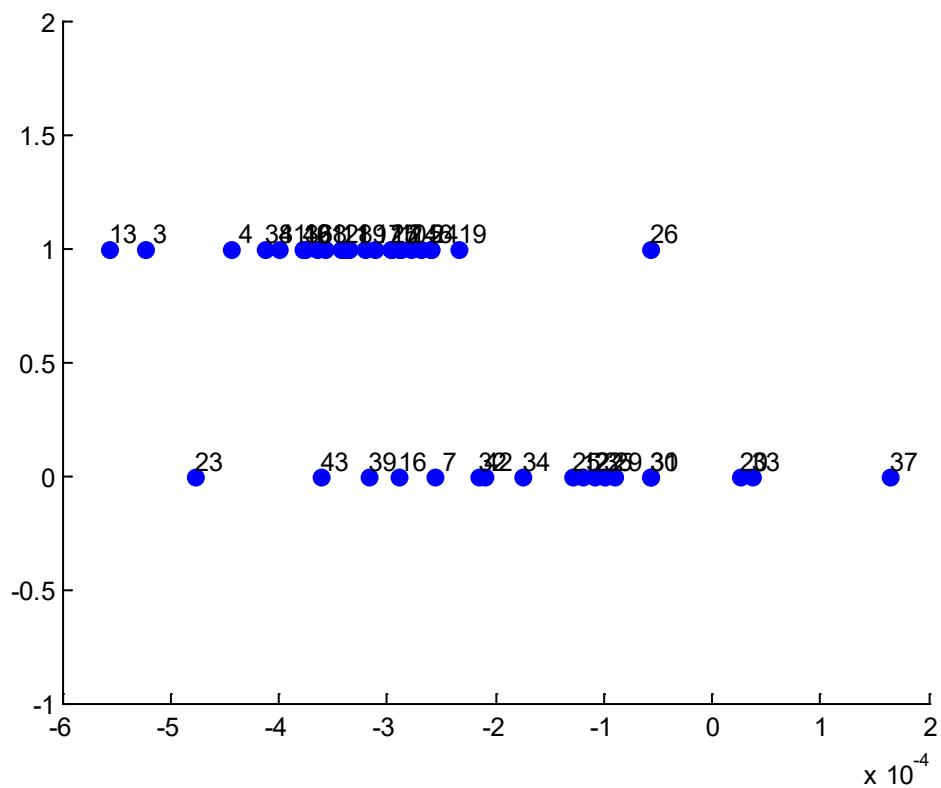
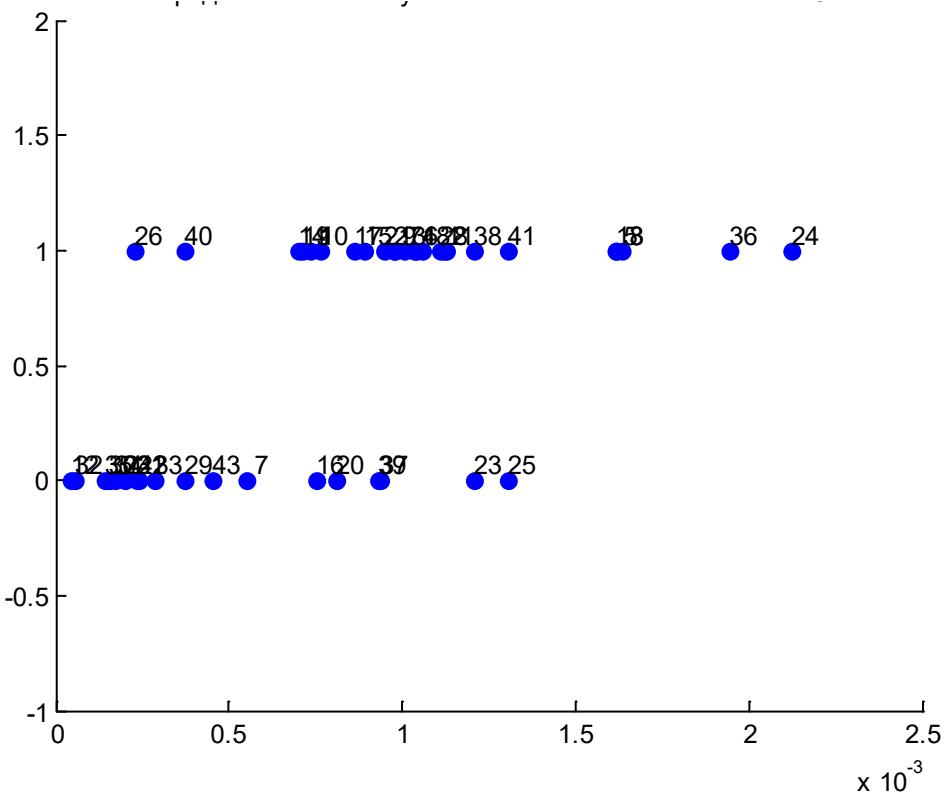


Рис. 31. Распределение минимумов по диагнозам на основе данных ЭРГ



**Рис. 32. Распределение минимумов по диагнозам на основе данных ЭРГ (частота 30 Гц)**



**Рис. 33. Распределение максимумов по диагнозам на основе данных ЭРГ**

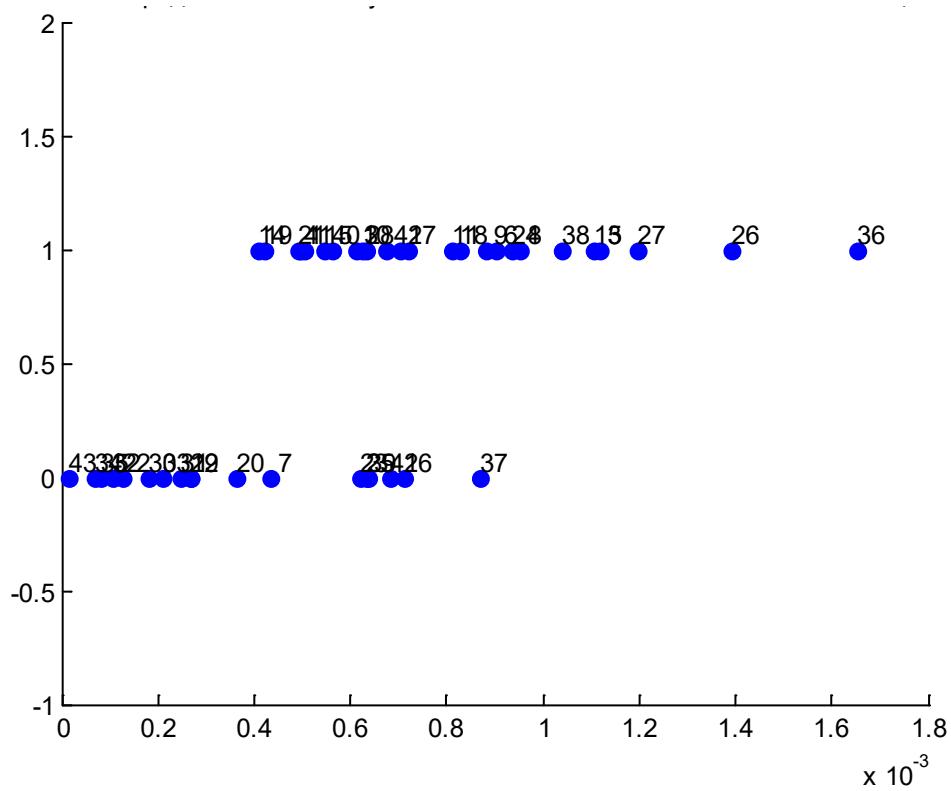


Рис. 34. Распределение максимумов по диагнозам на основе данных ЭРГ (частота 30 Гц)

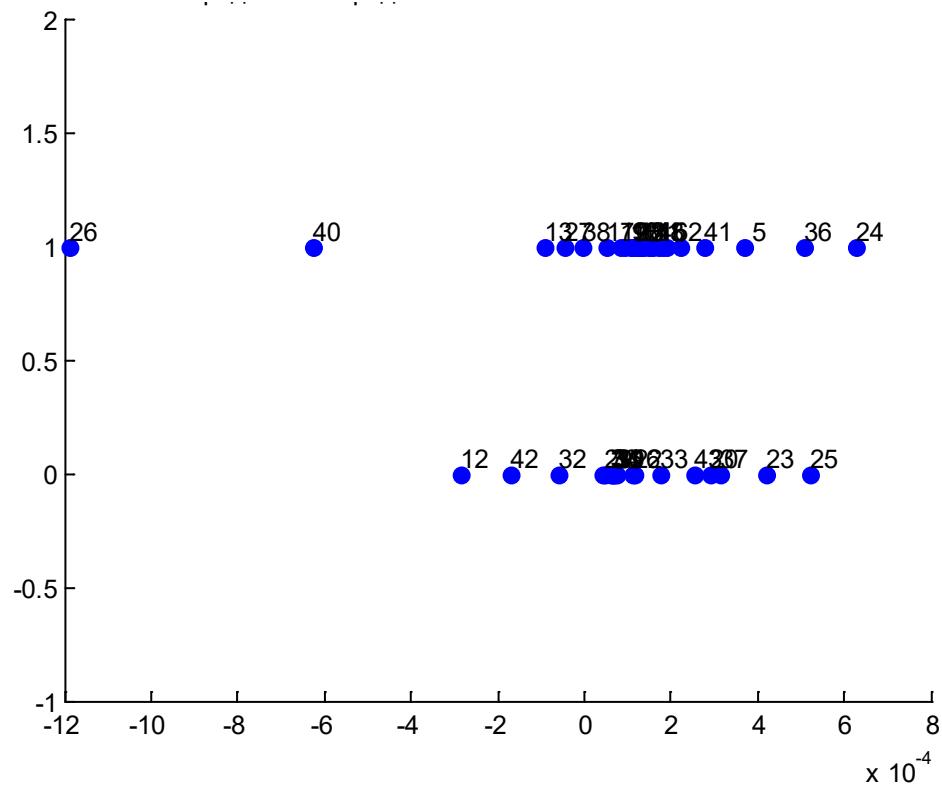
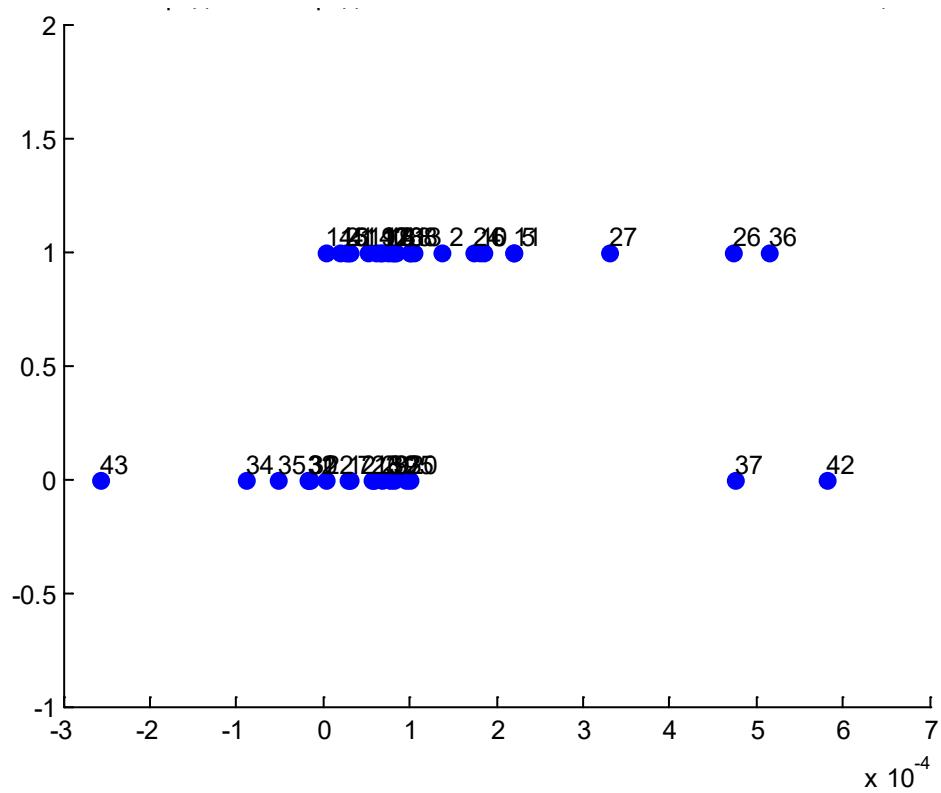


Рис. 35. Распределение средних по диагнозам на основе данных ЭРГ



**Рис. 36. Распределение средних по диагнозам на основе данных ЭРГ (частота 30 Гц)**

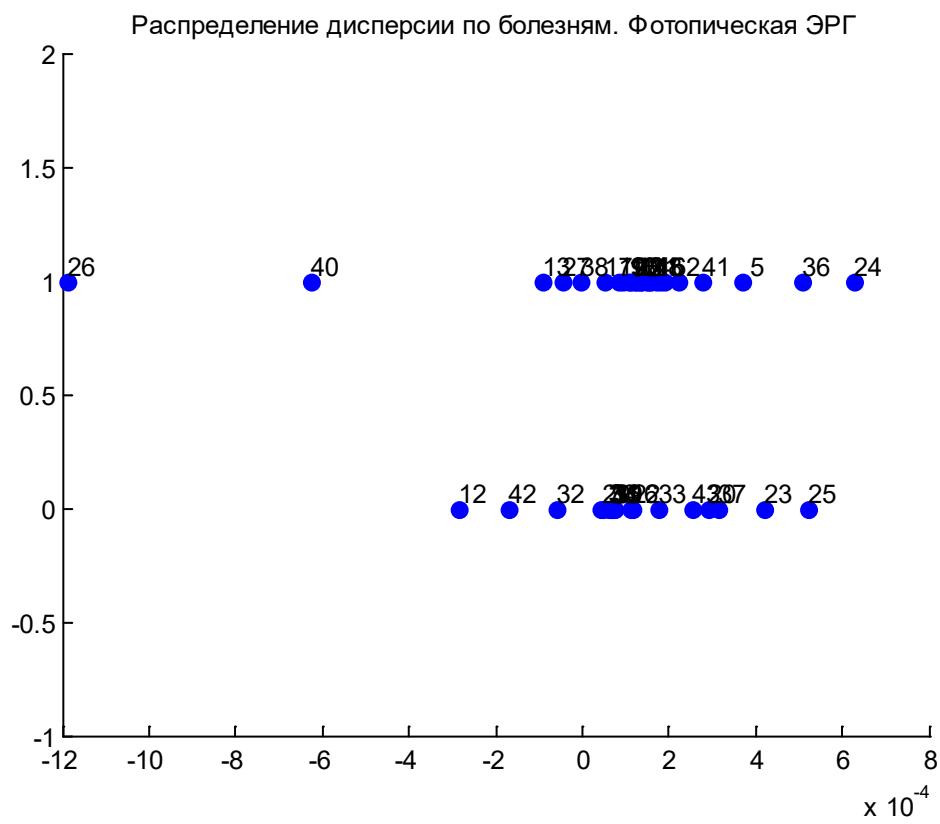
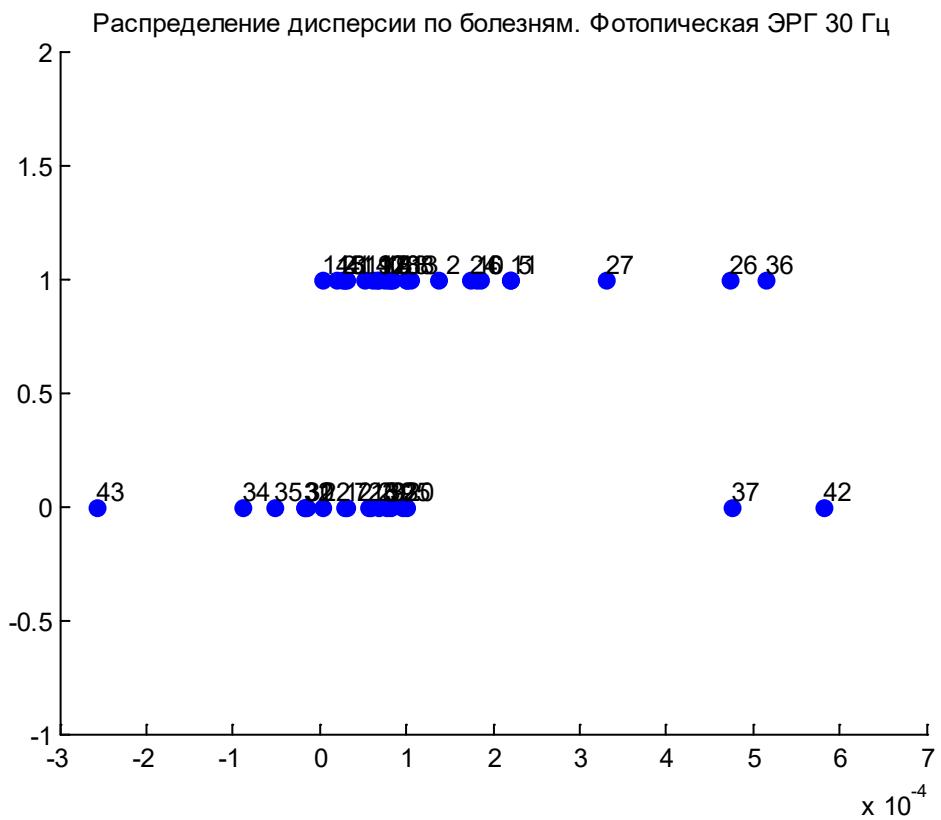


Рис. 37. Распределение дисперсии по диагнозам на основе данных ЭРГ



**Рис. 38. Распределение дисперсии по диагнозам на основе данных ЭРГ (частота 30 Гц)**

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что на основе минимумов и максимумов получаем достаточно хорошую диагностику, а на основе средних и дисперсии – получаем существенное пересечение значений (неоднозначность) при постановке диагноза.

#### **Анализ нестационарных сигналов вейвлет-преобразованием**

Вейвлет-преобразования – теория и ее приложения, оформившиеся в начале 90-х годов и получившая широкое практическое применение при анализе функций, как и классическое преобразование Фурье [76-78]. Фундаментальный принцип ортогонального разложения по компактным волнам состоит в возможности независимого анализа функции при разных масштабах ее изменения. Вейвлет-представление сигналов (как функций времени) является промежуточным между полностью спектральным и полностью временным представлениями [150].

Первоначально вейвлет-преобразования использовались в квантовой физике, физике электромагнитных явлений, математике, электронике, сейсмогеологии, но развитие междисциплинарных исследований расширили сферу применения данного метода на такие приложения, как сжатие образов для архивов и телекоммуникаций, исследования турбулентности, физиологии зрительной системы, в анализе радарных сигналов и предсказании землетрясений и в других приложениях.

В контексте диссертационной работы для сжатия информации будут использованы непрерывные (НВП) и дискретные (ДВП) вейвлет-преобразования.

### **Непрерывное вейвлет-преобразование**

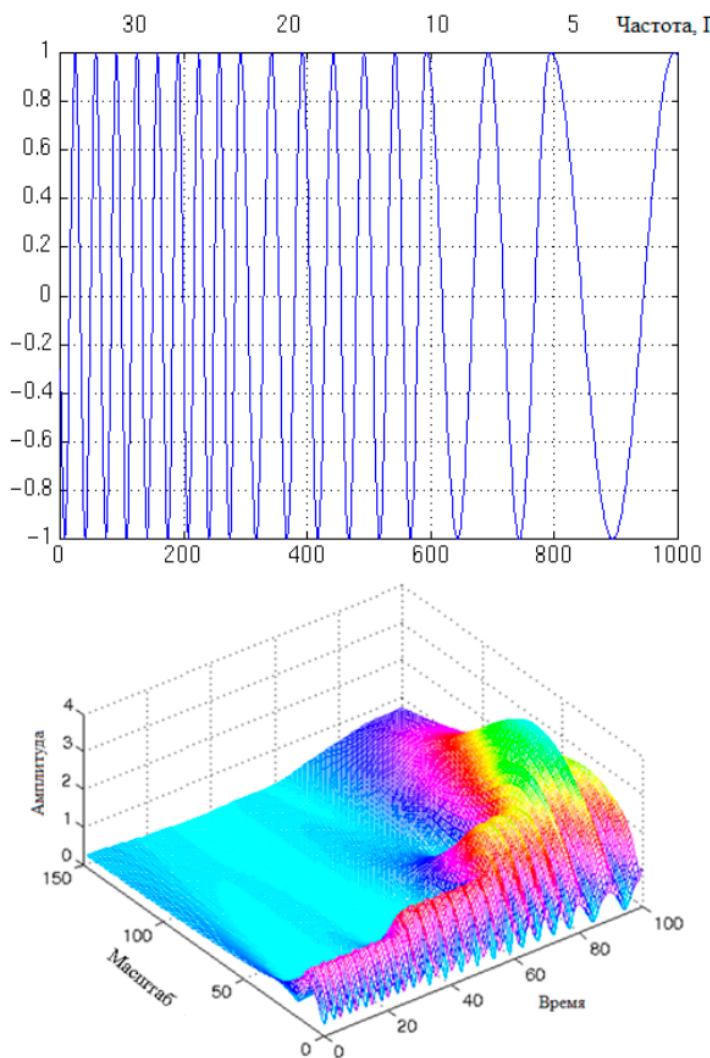
НВП сигнала  $f(t)$  имеет вид:

$$\widehat{\Psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} * \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right) dt$$

где  $\tau$  – сдвиг по времени,  $S$  – масштаб, а  $\psi^*$  – материнский вейвлет времени

В результате получаем трехмерное представление сигнала с компонентами: масштаб, время и амплитуда.

В качестве примера рассмотрим нестационарный сигнал и его НВП, представленные на рис. 63.

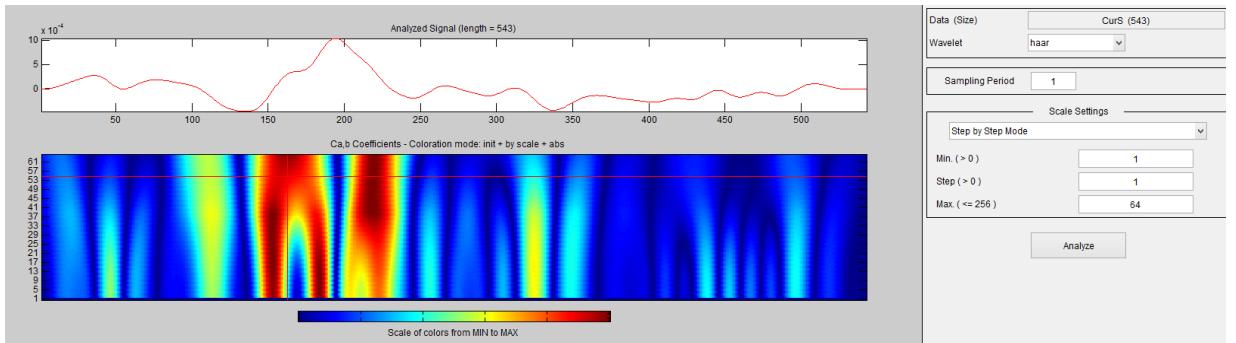


**Рис. 39. Нестационарный сигнал и его вейвлет-преобразование**

Отметим, что НВП в отличии от преобразования Фурье (которое имеет постоянный масштаб в любой момент времени для всех частот), имеет лучшее представление времени, худшее представление частоты на низких частотах сигнала и лучшее представление частоты с худшим представлением времени на высоких частотах сигнала. Таким образом, важным достоинством НВП является то, что с его помощью низкие частоты имеют более детальное представление относительно времени, а высокие — относительно частоты.

Получаемая диаграмма НВП нестационарного сигнала оказывается не только более информативной, чем применение разложения (коэффициентов) Фурье, но и является компактной и наглядной формой описания сигнала (сжатого до

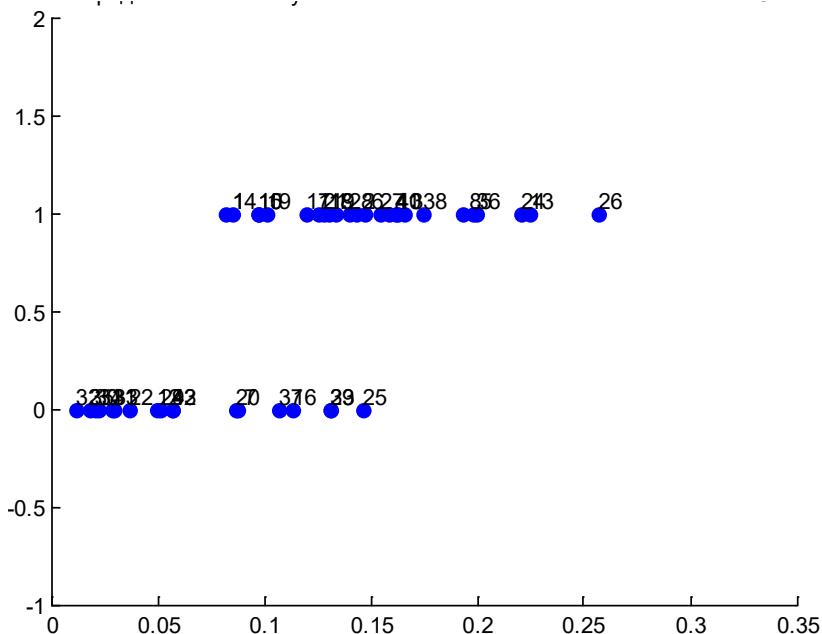
последовательности координат максимумов), его графической (образной) иллюстрацией. На рис. 64 проиллюстрирован пример НВП для ЭРГ.



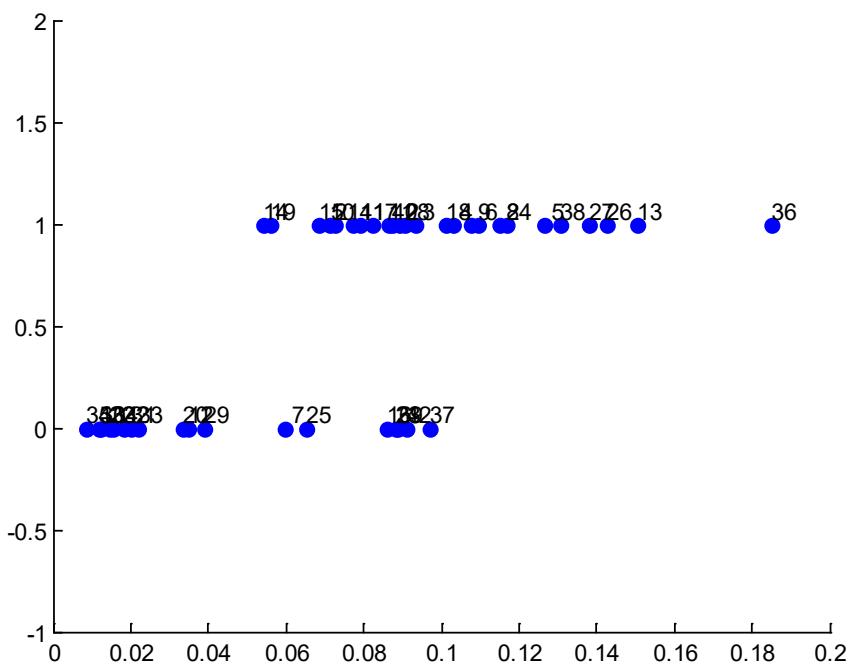
**Рис. 40. Вейвлет преобразование ЭРГ**

Для того, чтобы представить результаты НВП в форме, подходящей для использования в ИНС, следует применить к матрице, получаемой в результате НВП последовательно операции нахождения максимумов по столбцам и последующего их суммирования, что позволит получить численную характеристику крутизны изгиба графика функции.

На рис. 65-66 дано графическое представление распределения максимумов вейвлетов для примеров на диагностику глазных болезней на основе ЭРГ для разных типов ЭРГ (см. рис. 50-57).



**Рис. 41. Распределение максимумов по диагнозам на основе данных ЭРГ после применения НВП. По оси X –вольты, по оси Y – номера диагнозов (0 или 1)**



**Рис. 42. Распределение максимумов по диагнозам на основе данных ЭРГ после применения НВП (ЭРГ с частотой 30 Гц). По оси X – вольты, по оси Y – номера диагнозов (0 или 1)**

Установлено, что после применения НВП изменился характер распределения диагнозов относительно друг друга и что добавление полученного значения к обучающей выборке ИНС позволит более точно определять диагноз.

### Дискретное вейвлет-преобразование

НВП в силу вычислительной сложности соответствующих алгоритмов может быть применено лишь для простых функций, поэтому в практических приложениях обычно используется ДВП, которое при специальном выборе базисных функций может быть выполнено достаточно эффективно и без дополнительных затрат памяти (вектор коэффициентов рекурсивно замещает вектор исходных значений) [79]. Кроме того, ДВП может быть реализовано непосредственно в процессорах (микропроцессорах), как и быстрое преобразование Фурье.

Для целого  $m$  под волной класса  $m$  понимается функция  $s(x)$  одного действительного переменного, такая, что:

- функция  $s(x)$  имеет  $m$  ограниченных производных, определенных почти везде;
- функция  $s(x)$  равна нулю вне некоторого интервала  $(a,b)$ ;
- первые  $m$  моментов интеграла  $\int x^\alpha s(x)dx$  функции  $s(x)$  равны нулю;
- семейство  $e_{jk}(x) = 2^{j/2}s(2^j x - k)$ , где  $j, k$  – целые, образует ортонормированный базис для функций, интегрируемых с квадратом на действительной оси.

Рассмотрим ДВП Хаара на примере компактной волны – данное ДВП будет применено для ЭРГ с целью сокращения размерности данных. Пусть некоторый сигнал задан дискретной последовательностью отсчетов  $S_n$ . Выберем два последовательных отсчета,  $a = S_k$  и  $b = S_{k+1}$ , и возьмем их среднее и разность:

$$p = \frac{a + b}{2}, q = b - a$$

Достоинством данного ДВП является то, что если в сигнале присутствуют значительные корреляции между последовательными отсчетами, то величина разности  $q$  мала (в пределе:  $a=b, q=0$ ) и последовательность может быть представлена меньшим числом бит. При этом не происходит потери информации, поскольку имеется обратное преобразование:

$$a = p - \frac{q}{2}, b = p + \frac{q}{2}$$

Если выполнить описанное преобразование для всех последовательных пар отсчетов сигнала  $S_n = \{S_{n,m} \mid m < 2^n\}$  длины  $2^n$ , то исходный сигнал распадается на два сигнала половинной длины:

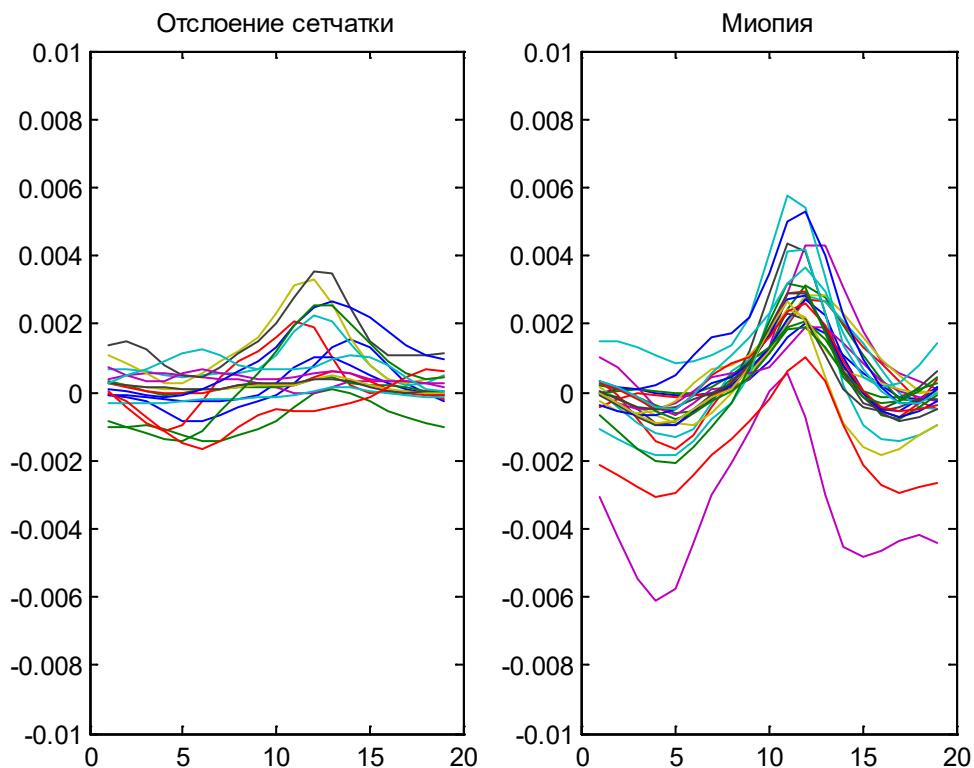
$$S_{n-1,m} = \frac{S_{n,2m} + S_{n,2m+1}}{2};$$

$$D_{n-1,m} = S_{n,2m+1} - S_{n,2m}$$

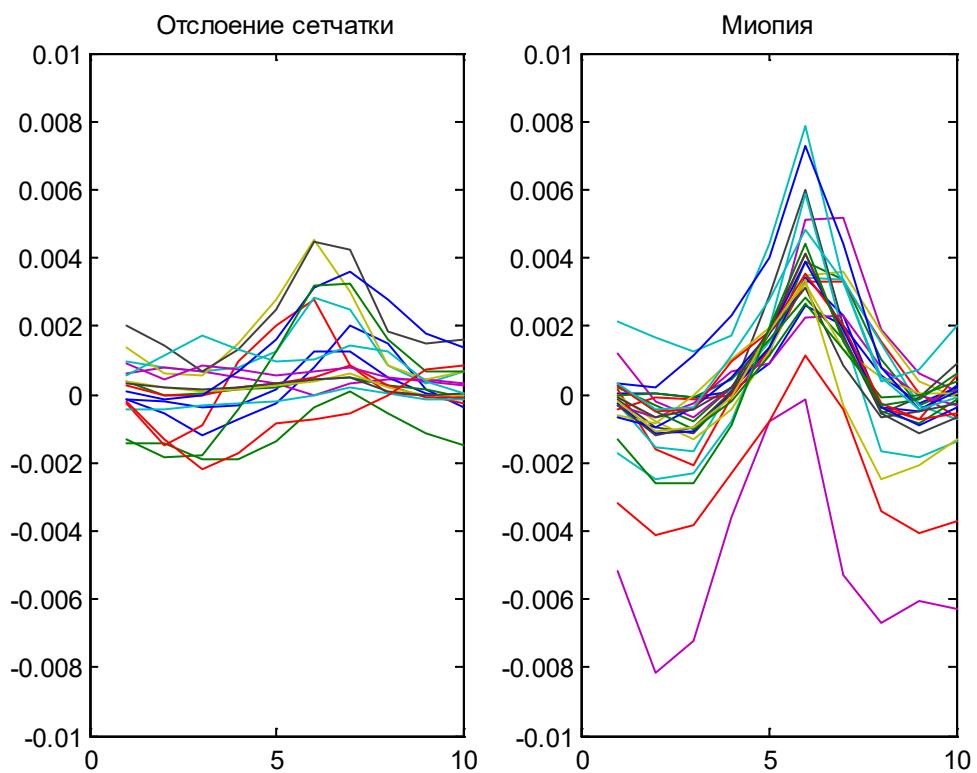
Вектор средних значений  $S_{n-1,m}$  можно рассматривать, как огрубленное представление исходного вектора  $S_{n,m}$ , а вектор разностей  $D_{n-1,m}$  – как детализирующую информацию, необходимую для перехода из сжатого представления к исходному.

Данную операцию можно применять рекурсивно к каждому из наборов вектора  $S_{n-1,m}$ .

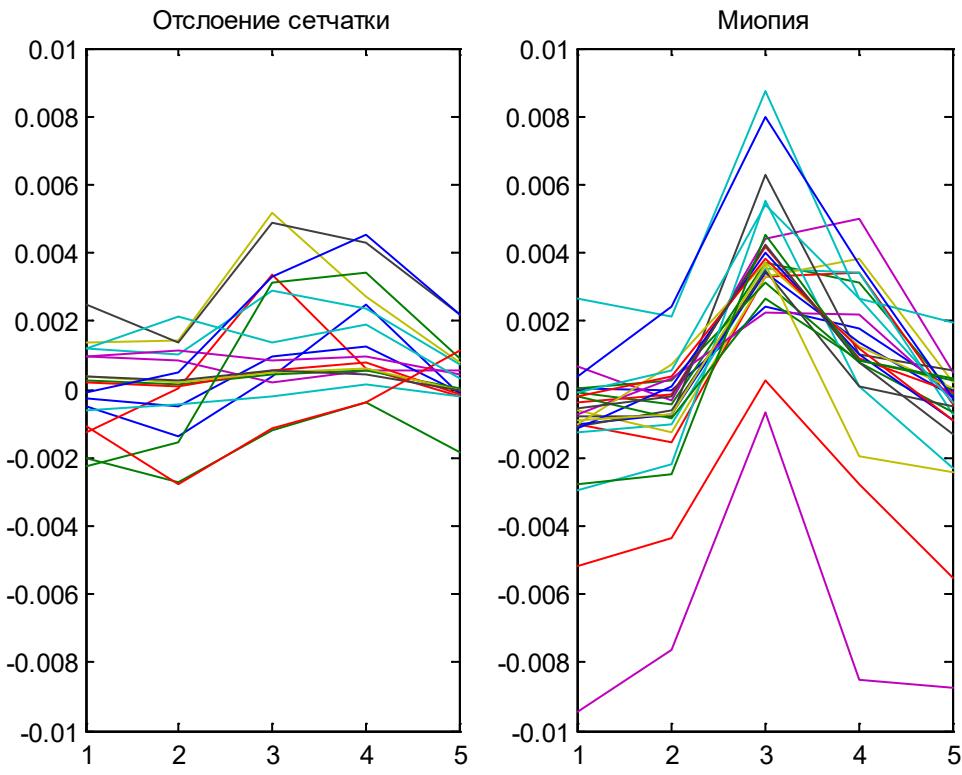
Для обработки ЭРГ было выбрано ДВП (вейвлет) Хаара, разложение проводилось до уровней 3, 4 и 5 для наиболее значимых областей (около перегиба) ЭРГ (рис. 67-69).



**Рис. 43. Разложение ЭРГ до уровня 3. По оси X – номера семплов, по оси Y – вольты**



**Рис. 44. Разложение ЭРГ до уровня 4. По оси  $X$  – номера семплов, по оси  $Y$  – вольты**



**Рис. 45. Разложение ЭРГ до уровня 5. По оси X – номера семплов, по оси Y – вольты**

Установлено, что оптимальным (что иллюстрируется приведенными графиками) при диагностике патологий зрения вида «отслоение сетчатки» и «миопия» является разложение ЭРГ с применением ДВП до уровня 4. При этом сохраняются общие характеристики кривой и сокращается общее количество данных для анализа до 10 значений для каждого типа ЭРГ, что, как следствие, позволяет сократить размерность входных данных для ИАД (классификации патологий) на основе ИНС [80].

## 2.5 Искусственные нейронные сети и другие методы машинного обучения

В области компьютерного анализа ЭРГ с применением методов ИАД на основе машинного обучения на данный момент существует сравнительно мало публикаций. Одной из причин этого является отсутствие больших БД для исследования эффективности предлагаемых методов (в отличие, например, от имеющейся большой БД по аритмии [81]). Поэтому было решено для поиска эффективных методов анализа ЭРГ с применением ИНС исследовать в

определенной степени подобную задачу анализа электрических потенциалов для ЭКГ и ЭЭГ.

Сначала рассмотрим некоторые из известных работ по анализу ЭРГ. Так в работе [67] предложен анализ ЭРГ с применением подхода на основе разделения входных параметров. В качестве параметров для решения задачи классификации использованы значения максимумов и минимумов ЭРГ, а также абсциссы этих точек:

$$U_a = \min U_{\text{ЭРГ}}(t);$$

$$t_a = \arg \min U_{\text{ЭРГ}}(t);$$

$$U_b = \max U_{\text{ЭРГ}}(t);$$

$$t_b = \arg \max U_{\text{ЭРГ}}(t).$$

На основании данной выборки получено следующее распределение значений временных параметров ЭРГ по диагнозам (классам) (рис. 76).

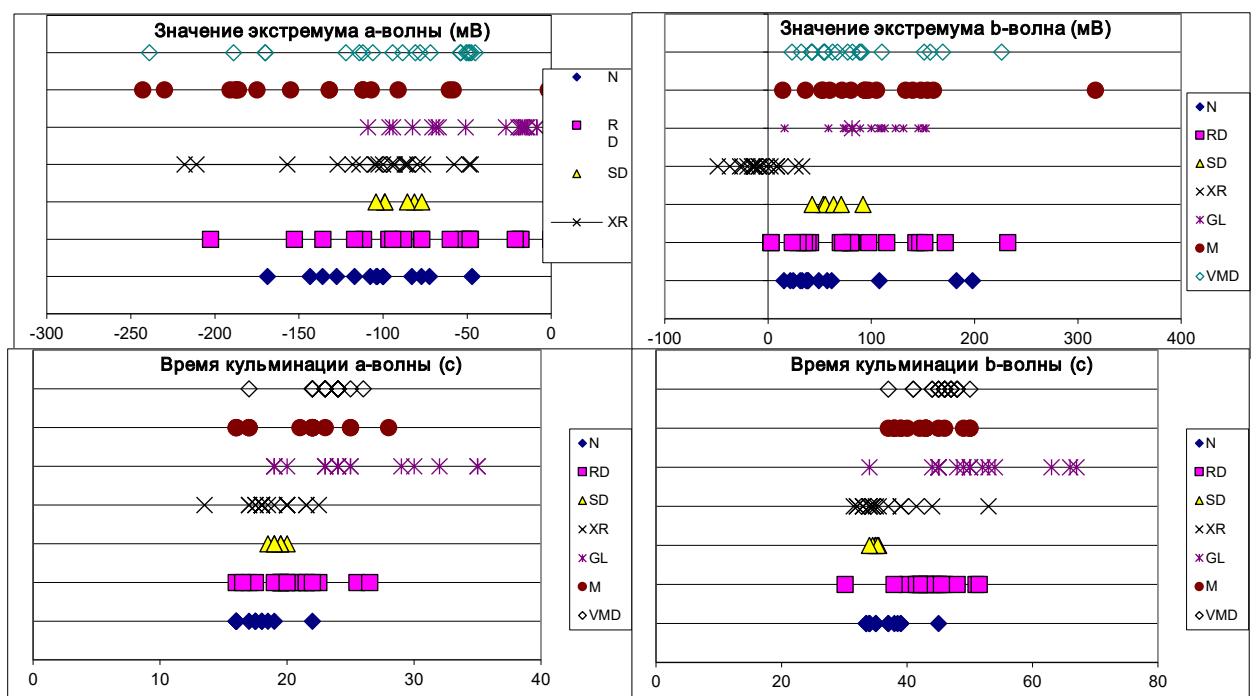


Рис. 46. Распределение значений временных параметров ЭРГ по диагнозам (классам): N - норма, GL – глаукома, DRP – диабетическая ретинопатия, RD – отслойка сетчатки, RP – пигментный ретинит, SD – рассеянный склероз, XR-R – X-хромосомный ретинонозис

Как видно из представленных диаграмм, данные во многом пересекаются. Некоторые диагнозы можно выделить достаточно точно, а некоторые практически сливаются по всем параметрам, т.е. имеет место противоречивость (неоднозначность) в диагностике.

Для решения задачи классификации в [67] была предложена нечёткая логика со следующими лингвистическими переменными:

- <«Минимум ЭРГ»,  $A$ , [-140; 0]>,
- <«Время минимума»,  $T_a$ , [0;44]>,
- <«Максимум ЭРГ».  $B$ , [-5; 215]>,
- <«Время максимума»,  $T_b$ , [0; 75]>,

С применением этих переменных формируются правила, которые позволяют отнести результаты диагностики к одному из классов заболеваний. Было показано, что для повышения качества диагностики в качестве используемых факторов целесообразно брать не только значения максимумов и минимумов ЭРГ, а и их отношения.

Далее в [67] описана попытка разложения ЭРГ на разные составляющие посредством построения имитационной модели и эмпирической подгонки её параметров. В результате экспериментов было выделено ещё 5 признаков, которые могут быть использованы для анализа. Однако, как отмечают авторы статьи, предложенный подход не позволяет с требуемой для практического применения точностью различить (классифицировать) патологии среди достаточно большого количества заболеваний зрения. То есть требовались дополнительные исследования для повышения качества анализа данных и постановки диагноза.

В работе [82] предлагается использовать разные методы для дифференциальной диагностики при наличии ряда заболеваниями на основе малого количества признаков. Данный подход может быть применен в ситуациях, когда потребуется не определять единственный диагноз (что практически невозможно при малом количестве признаков), а рассматривать возможность наличия разных патологий с соответствующими коэффициентами уверенности.

В работе [83] представлены разработки по классификации ЭРГ-сигналов и оцениваются возможности различных методов по выделению признаков для проведения классификации. Проанализированы методы на основе главных компонент и на основе преобразования Фурье. Показана недостаточная эффективность этих методов для анализа ЭРГ из-за отмеченной ранее нестационарности сигналов. Было предложено использовать НВП на основе вейвлета «мексиканская шляпа» с нормализацией данных по пиковому значению каждой строки вейвлет-преобразования. Показана перспективность использования НВП (что подтверждается и другими источниками), однако полученные результаты позволяют лишь отличать здоровых людей от больных, но не позволяет эффективно различать диагностировать патологии.

В работе [84] рассмотрена схожая с задачей анализа ЭРГ задача анализа ЭКГ. Применена методика, основанная на комбинации методов нечёткого  $k$ -среднего с ДВП для сокращения пространства входных данных.

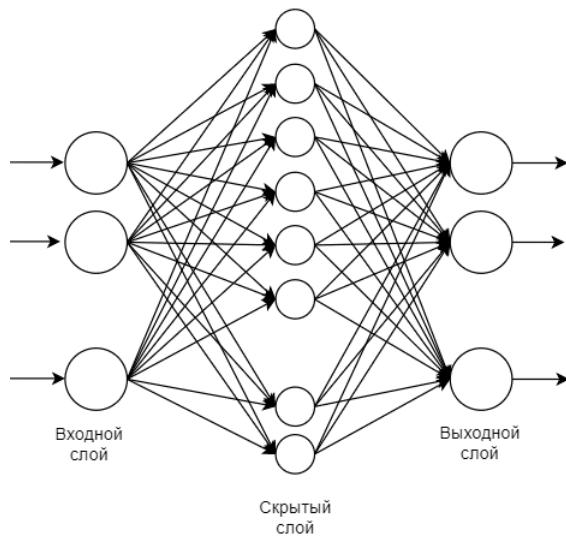
Метод на основе  $k$ -средних будет рассмотрен далее, так как позволяет избавится от артефактов при снятии данных и более точно выделить аспекты, соответствующие разным патологиям (заболеваниям), однако при этом потребуется рассмотреть вопрос о наличии атипичных случаев и их влияния на результаты [85].

ДВП в работе [84], как и в ряде других работах, используется исключительно для сокращения выборки входных данных за счёт выделения основного несущего сигнала и отбрасывания аппроксимирующих компонент при многоуровневом разложении сигнала. Поскольку данный метод встречается достаточно часто для анализа ЭКГ, то было решено проверить его эффективность и для анализа ЭРГ.

## **2.6 Применение персептрона с одним скрытым слоем для решения задачи дифференциальной диагностики**

Рассмотрим ИНС типа персептрона с одним скрытым слоем (рис. 84) [86]. В качестве функции активации возьмем сигмоиду. Данная ИНС применима для

дифференциальной диагностики на основе анализа двух соседних состояний для некоторого события и уточнения его характеристик.

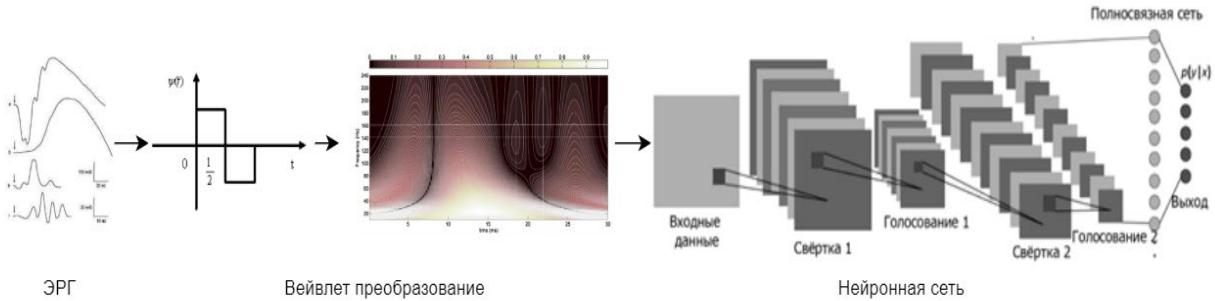


**Рис. 47. ИНС типа персептрана с одним скрытым слоем**

Данная ИНС способна точно решать задачу бинарной классификации [87,88], что позволяет использовать её для такого типа дифференциальной диагностики.

## 2.7 Классификация сигналов на основе интеграции вейвлет-преобразований и ИНС

Далее рассмотрим задачу классификации временных рядов с применением интеграции НВП и свёрточных ИНС (CNN, Convolution Neural Network) [89]. Такой интегрированный подход с использованием различных типов ИНС и реализованная на его основе программная система позволяют успешно обрабатывать данные, преобразованные с помощью НВП (рис 85). Это переводит задачу из анализа сигналов в задачу анализа и распознавания (классификации) образов [90-93].



**Рис. 48. Обработка сигнала при помощи ИНС типа CNN и НВП**

Для НВП используется отмеченное ранее вейвлет-преобразование Хаара [94], позволяющее учитывать перепады графика, которые часто представляют наиболее важную информацию.

Опишем содержательно предложенный в диссертационной работе алгоритм ИАД на основе интеграции НВП и сверточной ИНС для диагностики патологий по данным анализа ЭРГ.

*Исходные данные алгоритма:* выборка сигналов, размеченная по классам, и тестовая выборка для проверки корректности работы ИНС.

1. Для каждого результата исследования производится НВП с получением матрицы 250x250.
2. Выполняется итерационное обучения ИНС (размеры сети – 3 слоя, на первом свёртке 50x50, на втором - 25x25, на третьем – 10x10) с вычислением значения отклонения ожидаемого результата от полученного.
3. Финальный слой ИНС выбирает один из возможных диагнозов.

*Результат:* Обученная ИНС, проверенная на тестовой выборке, которая позволяет оценить качество обучения.

В структуру ИНС типа CNN входят следующие компоненты (см. рис. 85):

*слой свёртки* – обрабатывает образ по фрагментам, проводя операцию свёртки при помощи ядра свёртки (матрицы, коэффициенты которой подбираются в процессе обучения);

*слой голосования* – реализует вычисление одного значения от нескольких результатов свёртки предыдущего слоя с целью сокращения размерности исходной выборки, при этом чаще всего используется функция взятия максимума (т.е. фактически выбираются наиболее проявленные признаки);

*полносвязная сеть* на выходе – служит для построения отображения из пространства выделенных признаков в пространство определённых классов (т.е осуществляет классификацию, необходимую для постановки диагноза).

Предложенная ИНС позволяет учитывать временные характеристики сигналов. Кроме того, формируется некоторый набор признаков, которые изначально не были предложены экспертом, но проявились в процессе обучения и являются важными для постановки и уточнения диагноза.

Для повышения эффективности ИАД при решении задачи диагностики предложено использовать ансамбль из нескольких CNN, на вход которых подаётся временной ряд, преобразованный предварительно с применением различных типов НВП [95-97] (рис. 86), что позволяет улучшить качество получаемого на выходе результата.

Конечный результат больше, чем случайное угадывание, т.е. тут будет справедлива теорема Кондорсе о жюри присяжных (Condorcet's jury theorem) [98, 99].

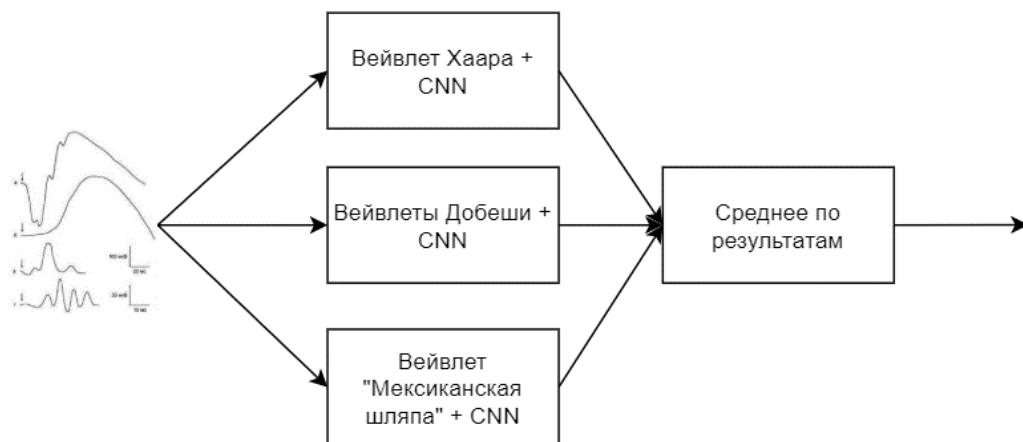
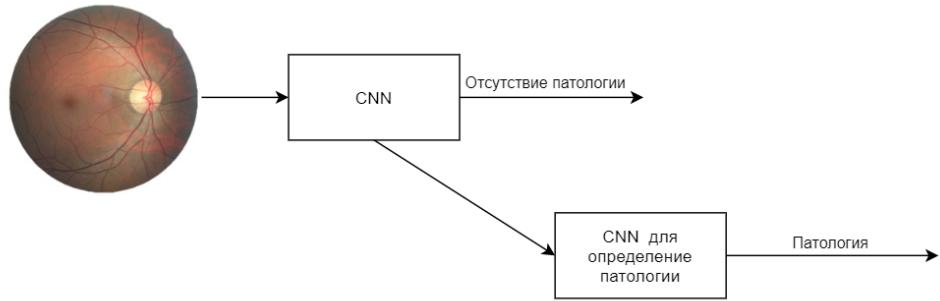


Рис. 49. Ансамбль из ИНС с применением разных типов НВП

## 2.8 Анализ образов при помощи свёрточных нейронных сетей

При анализе образов (изображений) в виде фотографий можно использовать каскад из двух ИНС типа CNN (рис. 87): первая сеть определяла сам факт наличия патологии, вторая используется для классификации (диагностики) патологии [100].

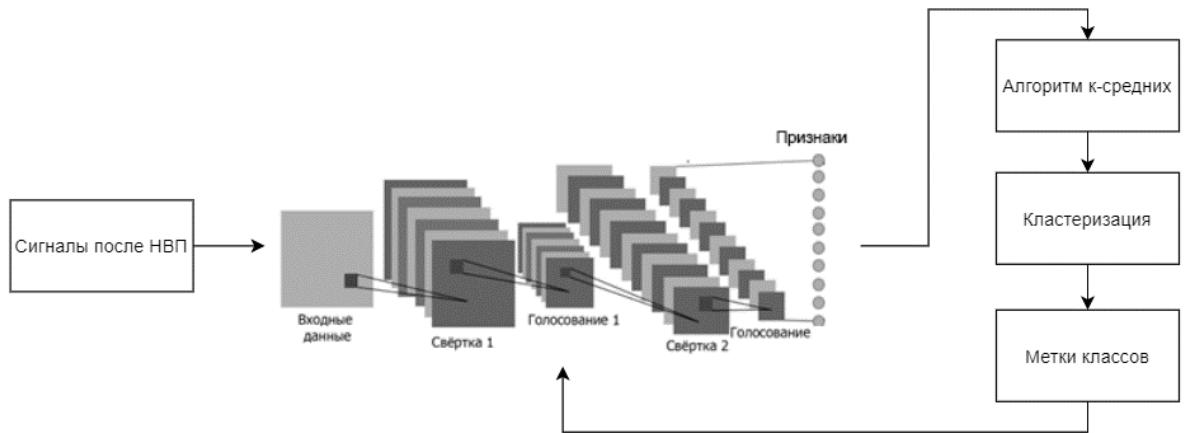


**Рис. 50. Каскад из двух ИНС для определения наличия патологии и её классификации (диагноза)**

В диссертации предлагается использовать в каскаде CNN, аналогичные ранее рассмотренным (см. рис. 85), но с большей глубиной (с большим количеством слоёв).

## 2.9 Обобщенный алгоритм классификация на основе интеграции НВП и свёрточных ИНС

Одной из проблем, как было отмечено ранее, является отсутствие размеченной выборки, поэтому предложено выполнить предварительную классификацию. Кроме того, даже при наличии такой выборки, в ней есть ошибки и неточности (шум, НЕ-факторы), поэтому было предложено решать задачу классификации с применением интеграции НВП и ИНС типа CNN, архитектура которой приведена на рис. 88.



**Рис. 51. Интегрированная среда для классификации на основе НВП и CNN**

Алгоритм обучения ИНС аналогичен описанному ранее (п. 2.7), за исключением того, что ошибка определяется относительно класса (кластера), в который попал объект выборки. То есть слой с односвязной ИНС исключен, а результат выделения признаков напрямую попадает в алгоритм классификации на основе метода k-средних.

Предложенный в работе обобщенный алгоритм классификации с предварительной обработкой исходной выборки на основе интеграции НВП и свёрточных ИНС (с включением ранее рассмотренного алгоритма в п. 2.7) состоит из следующих этапов.

*Исходные данные:* выборка сигналов, и тестовая выборка размеченная по классам для проверки корректности работы ИНС.

1. Для каждого результата исследования ЭРГ проводится НВП. Размер матрицы, получаемый в результате преобразования: 250x250.
2. Каждой полученной матрице присваивается случайное значение для вектора признаков.
3. Производится итерация обучения CNN (размеры сети – 3 слоя, на первом свёртка 50x50, на втором - 25x25, на третьем – 10x10). В качестве значения отклонения ожидаемого результата от полученного используется ошибка алгоритма k-средних.
4. Проводится итерация алгоритма k-средних на основе выделенных признаков. Выделяются новые метки классов для входных данных.

5. Если изменение ошибки работы сети больше, чем некоторая константа (по сравнению с прошлой итерацией), то возврат к шагу 3.

*Результат:* классификация по заранее определенным классам (например, типам патологий).

## **2.9. Выводы по главе 2**

Основными результатами второй главы являются сравнительный анализ, выбор и разработка методов сбора, предварительной обработки закрытых и зашумленных данных (закрытых БД) и перевод их в открытые данные (открытые БД) с сокращением размерности за счет использования НВП с целью последующего ИАД с использованием ИНС.

Получены следующие результаты.

1. Исследованы современные методы сбора и предварительной обработки данных, получаемых из различных и разнородных источников и при наличии «зашумленности» (НЕ-факторов) в имеющейся информации (исходных данных). Предложены подходы и методы сбора данных из разных источников, их обработка и фильтрация.
2. Проанализированы современные методы анализа данных, включая ИАД (в том числе больших данных) с применением ИНС в плане выявления наиболее предпочтительных ИНС для решения поставленных в работе задач по анализу данных и диагностике проблемных ситуаций. В результате предложены два алгоритма ИАД на основе интеграции НВП и каскада ИНС для разных типов задач, которые могут возникнуть при анализе сложных проблемных ситуаций.
3. На основе анализа исходной информации (типа и структуры данных) предложена онтология предметной области с определением всех возможных источников информации для анализа и более точной диагностики сложных патологий. Определены статистические характеристики данных, которые могут использованы для ИАД.

Новизна предложенных методов сбора данных (в том числе зашумленных) из различных и разнородных источников и их предварительной обработки с

применением НВП заключается в том, что они позволяют сокращать размерность массивов данных, а также приводить данные к виду, необходимому для последующего ИАД с применением каскада ИНС. Отметим также в контексте практической значимости, что разработанная онтология и методы (алгоритмы) классификации на основе ИНС ориентированы на применение в ЭС (ИСППР) для помощи прикладному пользователю (ЛПР) при диагностике сложных проблемных ситуаций.

### **3 Методы и программные средства сбора, хранения, отображения и интеллектуального анализа данных**

#### ***3.1 Выделение основных статистических характеристик сигнала***

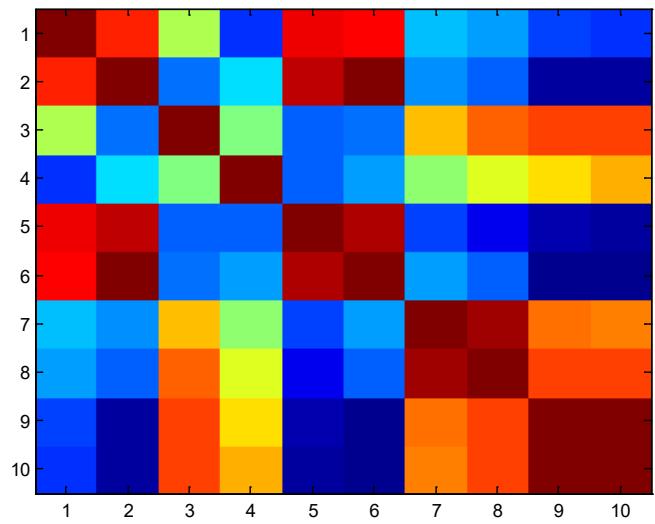
Ранее были определены следующие параметры сигнала: минимальное значение; максимальное значение; среднее значение; среднеквадратичное отклонение; крутость прыжка в сигнале (получено при помощи НВП); значение ДВП (сжатие сигнала при его помощи); минимум разницы между средним для диагноза и сигналом.

Анализируются два типа ЭРГ – обычная и фликер-ЭРГ (повторяющая ЭРГ с частотой 30 Гц). Были построены матрицы, содержащие следующие наборы:

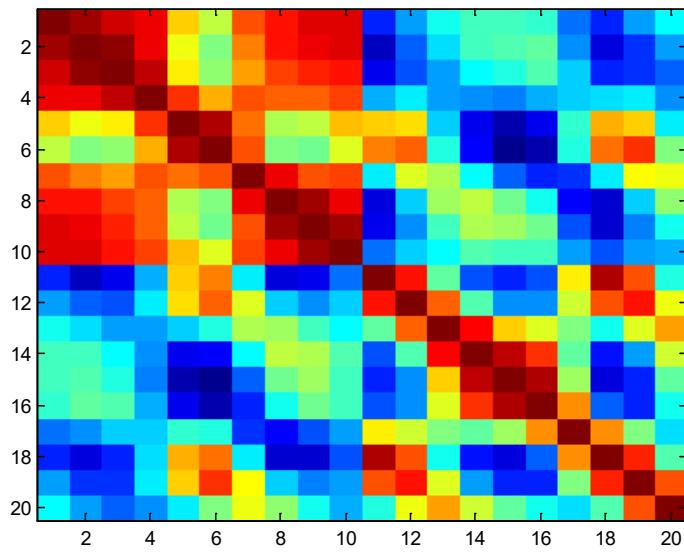
- 1) минимальное значение, максимальное значение, крутость прыжка в сигнале, минимум разницы между средним для диагноза и сигналом (10 параметров);
- 2) данные от ДВП (20 параметров);
- 3) все параметры (30 параметров параметров).

Далее данных матриц построены соответствующие оригинальные корреляционные матрицы с применением когнитивных образов, представленные на рис. 89-91. На рисунках холодные цвета (голубые, синие) показывают слабую корреляцию параметров, а тёплые (коричневые, красные) – более сильную корреляцию.

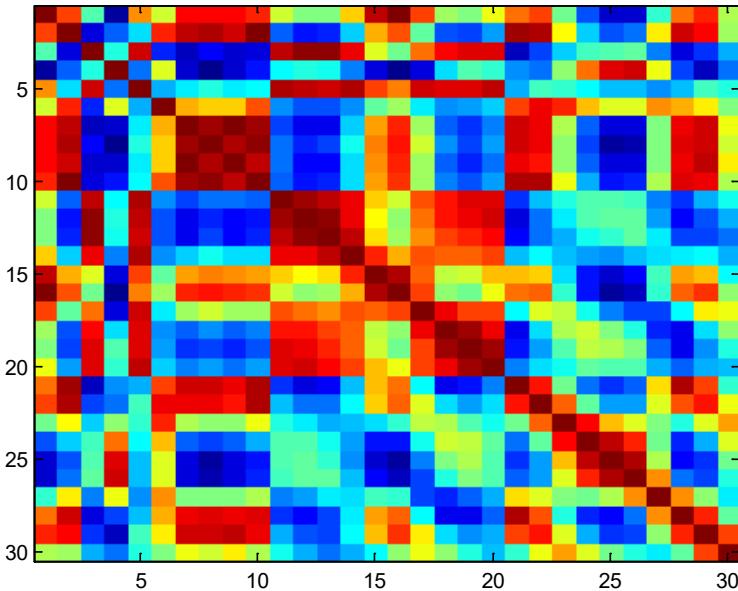
В результате анализа с участием экспертов предложенных корреляционных матриц было принято решение использовать для обучения ИНС все значения параметров.



**Рис. 52. Корреляционная матрица для набора 1)**



**Рис. 53. Корреляционная матрица для набора 2)**



**Рис. 54. Корреляционная матрица для набора 3)**

### 3.2 Формальная модель когнитивного образа

Известно, что *формальная система (модель)*, используемая в основе многих математических (логических) конструкций, представляет собой четверку: множество базовых элементов (алфавит), используемых для построения формул; правила синтаксиса, применяемые для построения правильно построенных формул (ППФ); аксиомы – некоторые ППФ, объявляемые истинными; правила семантики (вывода), позволяющие выводить истинные ППФ из аксиом и уже выведенных ППФ [102,103].

Для построения КО для образного представления глаза (в частности, сетчатки) была предложена следующая формальная модель:

$$K = (X, R, F),$$

где  $X = \{C_i \mid i=1, 2, \dots, n\}$  – непустое множество концептов (объектов предметной области),

-  $R = \{R_j \mid j=1, 2, \dots, m\}$  – множество отношений на множестве  $X$ ,

-  $F$  – множество функций интерпретации.

Каждый концепт  $C_i$  определяется следующим образом:

$$C_i = (N_i, T_i, P_i, Ch_i, A_i),$$

где  $N_i$  – имя концепта  $C_i$ ,

-  $P_i = \{C_i^k \mid k=1, 2, \dots, x\}$  – множество предков концепта  $C_i$ ,

-  $Ch_i = \{C_s \mid s=1, 2, \dots, y\}$  – множество потомков концепта  $C_i$ ,

-  $A_i = \{A_i^u \mid u=1, 2, \dots, q\}$  – список атрибутов концепта  $C_i$ .

Каждый атрибут  $A_i^u$  концепта  $C_i$  определяется следующим образом:

$A_i^u = (Na_i^u, Ta_i^u, Va_i^u)$ ,

где  $Na_i^u$  – имя атрибута  $A_i^u$ ,

-  $Ta_i^u$  – тип атрибута  $A_i^u$ ,

-  $Va_i^u$  – значение атрибута  $A_i^u$ .

$T_i$  – тип концепта  $C_i$  определяется следующим образом:

$T_i = (Nq_i, Aq_i, Mq_i, Pq_i)$ ,

где  $Nq_i$  – имя типа концепта  $C_i$ ;

-  $Aq_i = \{Aq_i^h \mid h=1, 2, \dots, r\}$  – список атрибутов типа концепта  $C_i$ ;

-  $Mq_i = \{Mq_i^d \mid d=1, 2, \dots, f\}$  – список действий (методов) типа концепта  $C_i$ ;

-  $Pq_i$  – имя родительского типа концепта  $C_i$ .

*Алфавит* в модели КО сетчатки образуют элементы множества геометрических примитивов (точка, сплайн, эллипс, прямоугольник) -  $Aq_i = \{Aq_i^h \mid h=1, 2, \dots, r\}$ , а *формула* – некоторый элемент слоя в виде последовательности символов алфавита.

В качестве аксиом (элементарных КО) для построения КО выбраны следующие:

- образ «Палочка», состоящий из двух эллипсов и находящийся в первом слое;
- образ «Колбочка», состоящий из трех эллипсов и находящийся в первом слое;
- образ «Биполяр», состоящий из прямоугольника и эллипса, занимающего 0.3 части от всего элемента, и находящийся во втором слое;
- образ «Ганглиозная клетка», состоящий из прямоугольника и эллипса, занимающего 0.8 части от всего элемента, и находящийся в третьем слое;
- образ «Горизонтальная клетка», состоящий из эллипса и сплайна и находящийся во втором слое;

- образ «Амакриновая клетка», состоящий из эллипса и находящийся во втором слое;
- образ «Клетка Мюллера», состоящий из прямоугольника и множества эллипсов двух видов и находящийся сбоку от всех других слоев.

*Правила вывода* определяют связи между элементами различных слоев:

- образы «Палочка» и «Колбочка» могут быть связаны с элементами «Биполяр» и «Горизонтальная клетка»;
- образы «Биполяр» и «Амакриновая клетка» могут быть связаны с элементом «Ганглиозная клетка»;
- образ «Ганглиозная клетка» имеет связь, называемую «Аксон».

*Множество концептов:*

$C_1 = (\text{Палочка}, 0, \text{Биполяр(палочковый)}, A_1);$

$C_2 = (\text{Колбочка}, 0, \text{Биполяр(колбочковый)}, A_2);$

$C_3 = (\text{Биполяр(палочковый)}, \text{Палочка}, \text{Ганглиозная клетка}, A_3);$

$C_4 = (\text{Биполяр(колбочковый)}, \text{Колбочка}, \text{Ганглиозная клетка}, A_4);$

$C_5 = (\text{Ганглиозная клетка}, \text{Биполяр(палочковый)}, \text{Аксон}, A_5);$

$C_6 = (\text{Ганглиозная клетка}, \text{Биполяр(колбочковый)}, \text{Аксон}, A_6);$

$C_7 = (\text{Аксон}, \text{Ганглиозная клетка}, 0, A_7);$

$C_8 = (\text{Горизонтальная клетка}, \text{Палочка}, \text{Биполяр(палочковый)}, A_8);$

$C_9 = (\text{Горизонтальная клетка}, \text{Колбочка}, \text{Биполяр(колбочковый)}, A_9);$

$C_{10} = (\text{Амакриновая клетка}, \text{Биполяр}, \text{Горизонтальная клетка}, A_{10});$

Для каждого концепта определяются список из трех атрибутов  $A_i = \{A_i^u \mid u=1,2,3\}$

$A_i^1 = (\text{Цвет, число, } 0-255);$

$A_i^2 = (\text{Ширина, число, } W_i);$

$A_i^3 = (\text{Высота, число, } H_i);$

Также введем множество наборов показателей:

$P = \{P_i^h \mid h=1, 2, \dots, r\}$

$P_i^h = (\text{Вид исследования, показатель, значение});$

$P_i^1$  = (*Максимальная ЭРГ, Aa, 155-290*) – показывает изменение в фоторецепторах (палочки и колбочки);

$P_i^2$  = (*Максимальная ЭРГ, Ta, 14-22*) – показывает время процессов фототрансдукции в фоторецепторах;

$P_i^3$  = (*Максимальная ЭРГ, Ab, 290-350*) – оценивает функциональную активность биполярных клеток и клеток Мюллера;

$P_i^4$  = (*Максимальная ЭРГ, Tb, 33-46*) – показывает время проведения импульса от фоторецепторов к биполярным клеткам сетчатки;

$P_i^5$  = (*Скотопическая ЭРГ, Ab, 90-120*) – оценивает функциональную активность палочковых биполярных клеток;

$P_i^6$  = (*Скотопическая ЭРГ, Tb, 67-90*) – показывает время проведения информации от палочек к палочковым биполярам;

$P_i^7$  = (*Фотопическая ЭРГ, Aa, 26-36*) – показывает изменение в колбочках;

$P_i^8$  = (*Фотопическая ЭРГ, Ta, 10-16*) – показывает изменение в связях между колбочками и колбочковыми биполярами;

$P_i^9$  = (*Фотопическая ЭРГ, Ab, 90-120*) – оценивает функциональную активность колбочковых биполяров и клеток Мюллера;

$P_i^{10}$  = (*Фотопическая ЭРГ, Tb, 29-33*) – показывает время проведения сигнала от колбочек к колбочковым биполярам;

$P_i^{11}$  = (*ФЭРГ 30 Гц, амплитуда A ответа от негативного до позитивного отклонения peak-to-peak*) – показывает изменение в колбочковых биполярах без вклада активности клеток Мюллера;

$P_i^{12}$  = (*Оцилляторные потенциалы, O2*) – отражают функциональное состояние амакриновых клеток сетчатки и тормозных обратных связей от ганглиозных клеток к амакринам;

$P_i^{16}$  = (*Паттерн ЭРГ stade-state – устойчивого состояния, A - амплитуда ответа от негативного до позитивного отклонения peak to peak*) – показывает изменение в ганглиозных клетках и их аксонах;

$P_i^{17}$  = (*Паттерн ЭРГ, P50-компонент, амплитуда P50*) – отражает функцию колбочек и колбочковых биполяров центральной области сетчатки;

$P_i^{18}$  = (Паттерн ЭРГ, N95- компонент) – отражает функцию ганглиозных клеток и их аксонов (больше в макуле);

$P_i^{19}$  = (РЭРГ, амплитуда фотопической ритмической ЭРГ) – отражает активность колбочковой системы сетчатки.

Для реализации КО, отображающих проблемные ситуации (патологии зрения) предложена *база знаний* (*база правил*) в виде набора производственных правил. Левая и правая части продукции – подсети семантической сети (универсума). Левая часть (условие, посылка) – набор показателей, правая (заключение, результат) – набор концептов с означенными атрибутами.

Приведем примеры производственных правил для КО сетчатки:

Если  $P^1$ (Максимальная ЭРГ,  $Aa$ , 60), то  $A_1^1(100.100.70)$  (цвет тусклый);

Если  $P^1$ (Максимальная ЭРГ,  $Aa$ , 100), то  $A_1^1(150.150.79)$  (цвет умеренный);

Если  $P^1$ (Максимальная ЭРГ,  $Aa$ , 150), то  $A_1^1(200.220.100)$  (цвет яркий);

...

Если  $P^{13}$ (Фотопическая ЭРГ,  $Aa$ , 15), то  $A_2^2(10)$  (ширина маленькая);

Если  $P^{13}$ (Фотопическая ЭРГ,  $Aa$ , 30), то  $A_1^1(20)$  (ширина средняя);

Если  $P^{13}$ (Фотопическая ЭРГ,  $Aa$ , 45), то  $A_1^1(30)$  (ширина большая);

Если  $P^{14}$ (Фотопическая ЭРГ,  $Ab$ , 50), то  $A_3^1(30.200.70)$  (цвет тусклый);

Если  $P^{14}$ (Фотопическая ЭРГ,  $Ab$ , 100), то  $A_3^1(100.100.150)$  (цвет умеренный);

Если  $P^{14}$ (Фотопическая ЭРГ,  $Ab$ , 150), то  $A_3^1(200.220.130)$  (цвет яркий);

... и т.д.

Если выполняется одно из условий правила, то заключение правила используется при построении КО сетчатки.

При анализе состояния глаза и диагностике возможной патологии рекомендовано использовать ориентированный на прикладного пользователя (ЛПР) комбинированный метод визуализации, заключающийся в анализе динамики изменения КО (его размера и его цвета) в зависимости от выбранных показателей.

### *3.3 Проектирование системы хранения данных*

Разработка и реализация таких сложных и комплексных систем как ЭС и ИСППР производится, как правило, в гетерогенной среде, поскольку постоянно происходит взаимодействие разработчиков (инженеров знаний, программистов) и экспертов (ЛПР) [104]. Более того, сама предметная область (исследуемый объект, используемая аппаратура) является динамической и может меняться как в результате технического и научного прогресса, так и по причине простой замены оборудования, которое может привести к изменению формата данных, с которыми работает система. Так же отметим, что в разных медицинских учреждениях может быть принят разный формат отчёtnости, разный уровень подготовки специалистов и другие особенности. В результате может возникнуть ситуация, когда уже разработанная система не будет обладать достаточной гибкостью, чтобы своевременно и адекватно реагировать на изменения. Возможным решением данной проблемы может быть создание достаточно универсальных и гибких (настраиваемых) онтологий предметной области, что, однако, повышает накладные расходы и приводит к усложнению создаваемых ЭС и ИСППР.

Стоит отметить, что примерно с 2007 г., когда объёмы данных и их сложность стали достаточно высоки и применение традиционных БД и соответствующих СУБД стало неэффективным, началось активное развитие технологии хранения данных в нереляционном формате на основе нереляционных баз данных (НБД), которые предоставляют большую гибкость при работе в [64,105].

Другой важной задачей при создании современных ЭС и ИСППР, как отмечалось ранее, является необходимость обработки данных, поступающих из различных источников и представленных в разных форматах (в том числе зашумленных данных), что требует применения и интеграции различных подходов и методов (алгоритмов), как для извлечения необходимых данных (Data mining), так и их ИАД (Knowledge discovery) с получением знаний, позволяющих классифицировать и диагностировать проблемную ситуацию и найти решения по

ее нормализации. Большая роль при этом отводится онтологиям, для создания, хранение и оперирование которыми также перспективнее использовать НБД, о чем будет сказано далее.

Также отметим, что организация НБД более подходит для хранения и зашумленных данных и ИАД с применением методов и алгоритмов на основе ИНС, эволюционных (генетических) алгоритмов, опорных векторов, теоретико-вероятностных методов, методов теории свидетельств Демпстера-Шеффера и др.

### **Выбор типа БД для хранения медицинских данных**

Для любой системы, связанной с обработкой данных, требуется организация их хранения [106]. Поскольку рассматриваемые ЭС (ИСППР) ориентированы на сложные и динамические ПО, то следует ожидать высокой гетерогенности в поступающей информации (данных из различных и разнородных источников). Для обоснования целесообразности применения НБД проведем сравнительный анализ обычной реляционной модели (базы) данных (РБД) и нереляционной модели (НБД).

В качестве примера используем информацию по истории болезни пациентов, содержащих следующие данные:

- 1) результаты обследований специалистами (врачами), представленные в виде записей на естественном языке;
- 2) результаты анализов, которые могут представлять:
  - ряды данных;
  - кортежи (наименование, значение);
  - фотоматериалы;
- 3) результаты обследований, представленные в виде опросников;
- 4) рекомендации по назначению препаратов и процедур.

Помимо распределённости данных во времени (что сложно учесть в РБД и требует реализации дополнительных структур для работы с такими (temporalными) данными [107,108], имеются разнотипные данные,

представленные на естественном языке, в виде временных рядов, изображений (образов) и в других форматах, например, используемых в истории болезни.

В рамках РБД потребуется реализация дополнительных средств в виде набора таблиц и связей между ними, причём по мере приближения форматов исходных данных к уровню хранения данных будет теряться гибкость, а по мере отдаления будет усложняться работа на уровне представления данных.

Проиллюстрируем сказанное следующими примерами.

1. Пусть БД должна содержать следующие таблицы: Пациенты, Обследования, Данные (результаты) Обследований. В первой таблице хранится общая информация о пациентах, во второй связи пациентов и обследований, а также данные о проведение обследования (время, место, тип), в третьей хранятся собственно результаты обследований. Нетрудно установить, что третья таблица будет перегружена данными вне зависимости от способа размещения их, при этом, помимо деградации скорости работы ввиду большого количества записей, будет требоваться создание промежуточных таблиц и сущностей для постоянного извлечения знаний из данных, что будет приводить, в свою очередь, к медленной скорости работы системы в целом. На рис. 92 и 93 приведено схематичное сравнение подходов с применением классической РБД и НБД документно-ориентированного типа.

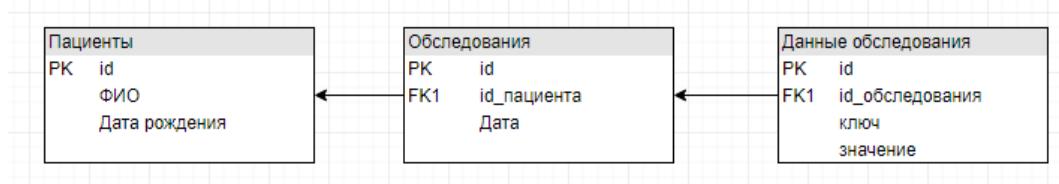
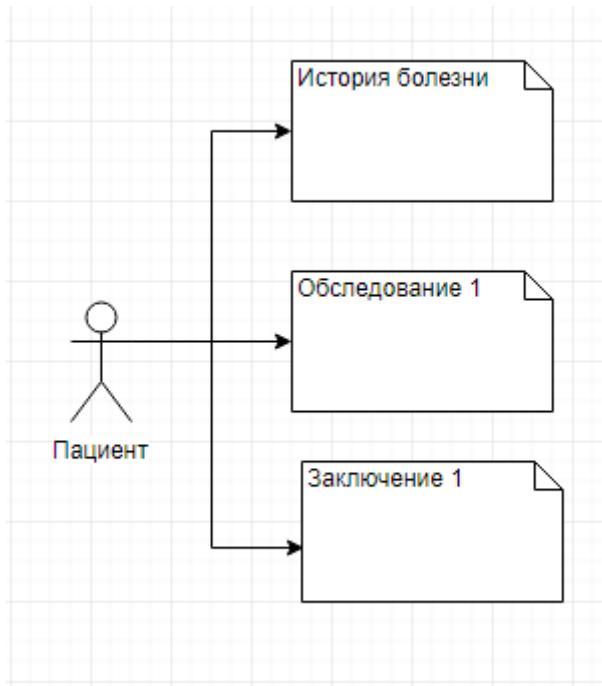


Рис. 55. Классическая организация данных на основе РБД



**Рис. 56. Хранение данных на основе документно-ориентированной НБД**

2. Пусть в БД (БЗ) хранятся знания, полученных в результате анализа данных. В случае применения РБД теряется возможность повторного исследования данных при получении каких-либо новых сведений, так как собственно данные не обрабатываются для постоянного использования. Если БД (БЗ) хранит в себе как данные, так и получаемые из них знания, то количество таблиц для РБД будет расти по мере использования новых форм знаний. При этом качество доступа к сырым и зашумленным данным будет по-прежнему низким, поскольку будет проводиться деление изначальной понятной сущности (данных обследования) на искусственные подсущности.

В качестве альтернативы традиционным РБД предлагается использование НБД. В отличии от концепции ACID (Atomicity (атомарность), Consistency (согласованность), Isolation (изолированность), Durability (надёжность)), используемых в РБД, в НБД используется концепция BASE [110], под которой понимается:

- BA (Basic Availability) – базовая доступность, т.е. любой запрос к БД будет завершён (успешно или безуспешно);

- S (Soft state) – гибкое состояние, т.е. состояние БД может изменяться со временем даже без внесения новых данных для достижения согласованности данных;
- E (Eventual consistency) – конечная согласованность данных, т.е. данные могут быть несогласованными некоторое время, но при этом стремятся и в итоге приходят к согласованному состоянию.

Следует отметить также известные проблемы традиционных РБД, связанные со сложностью масштабируемости, переносимости и обработки больших массивов (больших и зашумленных) данных [105,109].

В частности, из-за требований к атомарности и согласованности РБД не позволяют постоянную внутреннюю обработку данных, тогда как НБД могут в онлайн режиме проводить анализ данных, обеспечивая лишь конечную согласованность. Также поскольку на НБД не налагаются ограничения на успешность запроса – данные в ней могут быть просто в процессе подготовки.

Даже перечисленных свойств НБД достаточно, чтобы обосновать предпочтительность использования НБД случае гетерогенных данных, получаемых из различных источников, поскольку для НБД нет необходимости хранения чётких схем данных.

Важным преимуществом НБД является возможность хранить документы как единые сущности, что позволяет эффективно организовывать разные виды обработки и анализа данных (включая ИАД) и поиска знаний (например, используя алгоритм MapReduce [111], заключающийся в последовательном сжатии данных и применении к ним некоторой функции отображения, а также создавать новые формы хранения данных и знаний с целью получения (вывода) новой информации (данных и знаний) из имеющихся документов, а также установления связей между ними.

Используя подход на основе НБД, связанные данные, например, из истории болезни, можно интерпретировать как некоторые документы и формировать на их основе новые производные документы, проводить выборки и анализ среди них для

отбора тех, которые лучше всего подходят для формирования онтологии ПО и последующего ИАД с применением ИНС.

### **3.4 Выбор программных средств для реализации НБД**

Для организации БД (БЗ) на основе НБД и выполнения ИАД в ЭС (ИСПР) предлагается использовать СУБД MongoDB [112], которая была выбрана с учетом ее следующих основных достоинств.

*Документоориентированность* - отсутствие строгой структуры, что существенно по сравнению с РБД упрощает процесс добавления новых атрибутов для сущностей. Применительно к рассматриваемой ПО это важно, так как требования к хранению и представлению данных менялись в процессе разработки прототипа.

*Бесплатная лицензия* – СУБД MongoDB доступна бесплатно по лицензии GNU Affero General Public, версия 3 [113];

*Доступность языка программирования* - для MongoDB имеются официальные драйверы для основных языков программирования и существует множество открытых библиотек для работы с этой СУБД;

*Типы данных* - в документах этой СУБД можно хранить практически любые типы данных (любые, представимые в текстовой форме, либо бинарные).

#### **Основные элементы MongoDB**

MongoDB [114] это NoSQL база данных (т.е. НБД), поэтому к ней не применимы стандартные понятия SQL БД, но она поддерживает понятия (сущности) во многом аналогичные SQL, а именно:

- *документ* - объект, хранящий некоторую информацию и представляющий из себя наборы «ключ: значение» (похож на строку в таблице SQL, но не имеет ограничений при добавлении данных);

- *коллекция* – документы объединяются в коллекции, являющиеся в определенной степени аналогом таблиц в SQL;

- *вложенный документ* - документ, хранящийся в другом документе, а не в отдельной коллекции, и обычно используемый для представления отношений в формате один ко многим.

Далее приведем примеры основных предложенных в диссертационной работе документов и коллекций в контексте решения поставленных задач.

### **Коллекции для авторизации пользователей**

Коллекция Role {name – string, description – string} предназначена для хранения информации о роли пользователя (администратора, тестировщика, эксперта, инженера знаний, ЛПР).

Коллекция User {username – string, password - string active – Boolean, roles - list of Role} предназначена для авторизации на портале и содержит информацию о том, активна ли учетная запись пользователя и какие роли ему доступны.

### **Коллекции для хранения данных**

Коллекция Diagnosis {name – string} содержит данные о возможных диагнозах пациентов.

Вложенный документ DiagnosisValue {ou – Diagnosis, os – Diagnosis, od – Diagnosis} содержит информацию о диагнозе для одного пациента.

Коллекция ClinicalData {name – string, values\_set - list of string, is\_numerical – Boolean} содержит информацию о разных типах клинических данных (название и возможные значения для данного типа клинических данных).

Вложенный документ ClinicalDataValue {clinical – ClinicalData, ou – string, os – string, od – string} предназначен для сохранения значений клинических данных (тип клинических данных и значение этих данных).

Вложенный документ Exam {date – date, name – string, type – string, result\_path – string} используется для сохранения результатов исследований (содержит название, дату, тип и результаты исследования).

Вложенный документ Visit { date – date, supposed\_diagnosis – Diagnosis, final\_diagnosis – Diagnosis, exams - list of Exam, clinical\_data\_set - list of

ClinicalDataValue, notes – string, complaints - list of string, recommendations – string} используется для сохранения данных о визите (содержит поставленные диагнозы, список исследований, жалобы пациента и рекомендации врача).

Коллекция Patient {card\_id – string, full\_name – string, birthday – date, visits - list of Visit} используется для сохранения данных о пациентах (содержит номер карты пациента, личные данные и информацию о визитах).

Схема описанной НБД для хранения данных о пациенте представлена на рис. 94.

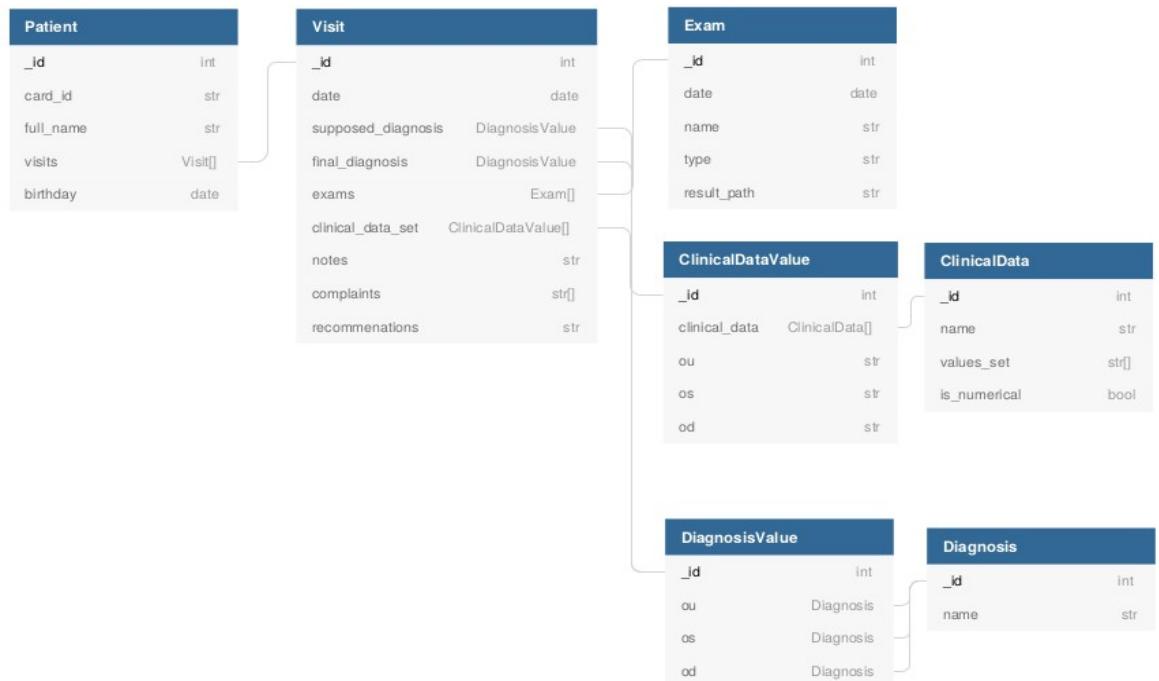


Рис. 57. Схема НБД для хранения данных о пациенте

## Организации интерфейса

Для реализации интерфейсов (с ЛПР и для загрузки данных) системы был выбран css-фреймворк bootstrap 4 [115] – свободный набор инструментов для создания сайтов и веб-приложений, включающий HTML- и CSS-шаблоны оформления для типографики, вебформ, кнопок, меток, блоков навигации и прочих компонентов веб-интерфейса, а также JavaScript-расширения.

Причины (достоинства), по которым был выбран bootstrap, следующие:

- подробная документация;

- свободная лицензия;
- простота использования;
- адаптированность под все современные браузеры (в том числе мобильные).

Для построения графиков на странице (экране) пациента используется библиотека Google Charts [116].

Выбор Google Charts обоснован следующими причинами:

- быстрая скорость работы библиотеки;
- разные типы графиков;
- обширная документация и подробные примеры.

В интерфейсе приложения используются как стандартные формы, взятые из bootstrap, так и оригинальные предложенные в работе формы представления информации, которые были закодированы отдельно.

Далее рассмотрим организацию предложенных специальных форм для интерфейса.

### *3.5 Система сбора данных о пациентах*

Прототип создаваемой ЭС (ИСППР на основе экспертных знаний) должен поддерживать следующие функции, связанные со сбором и организацией данных [117]:

- создание БД;
- возможность заносить, изменять или удалять неправильно введенные данные;
- возможность просматривать и редактировать БД.

В задачи прототипа ЭС (ИСППР) в целом входит предварительная предобработка данных, получаемых из различных и разнородных источников, создание онтологии ПО (офтальмология), последующий ИАД с применением ИНС и выдача рекомендаций ЛПР (практикующему врачу или молодым специалистам при обучении) по проведению лечения или дополнительному обследованию.

Программной компонентой для работы с данными предлагается использовать web-приложение, позволяющее в удобной форме добавлять и

просматривать данные о пациентах. Это приложение можно использовать и в качестве аналитической платформы, агрегируя и визуализируя данные.

На основе web-приложение разработаны следующие компоненты БД в виде страниц-экранов (рис. 95)

- страница авторизации;
- список пациентов;
- добавление посещения;
- страница пациента (отображение информации о пациенте).

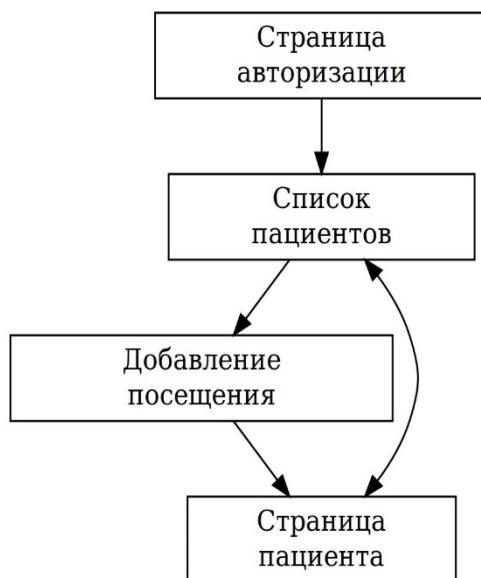


Рис. 58. Основные блоки (страницы-экраны)

### Форма авторизации

Была разработана форма авторизации, необходимая для ограничения открытого доступа к данным. Так как доступ к этой платформе нужен малому количеству пользователей (только участвующим в тестировании), в предлагаемой форме нет опции регистрации или восстановления пароля. Подразумевается, что новые аккаунты для пользователей (эксперта, ЛПР, инженера знаний, при необходимости) будет создавать системный администратор. Использованы стандартные поля для авторизации - форма для ввода логина и пароля (рис 96).

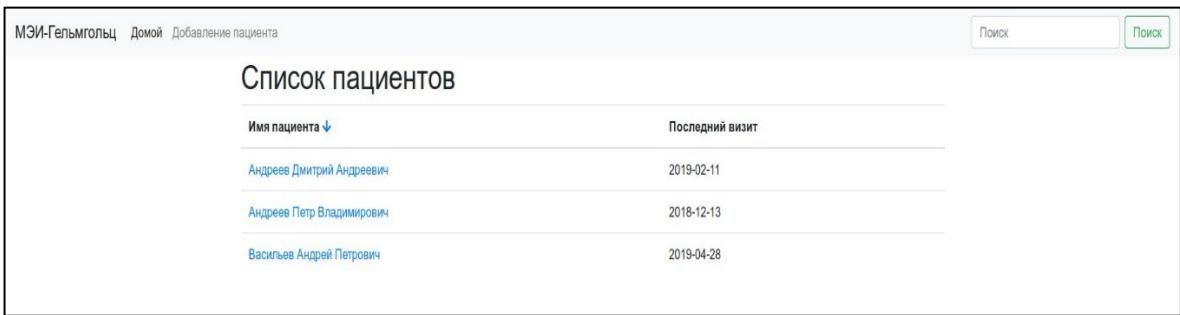


Рис. 59. Форма авторизации

### Организация страниц (экранов)

После успешной авторизации пользователь попадает на домашнюю страницу - главный экран со списком пациентов - и ему доступны следующие функции (рис. 97,98):

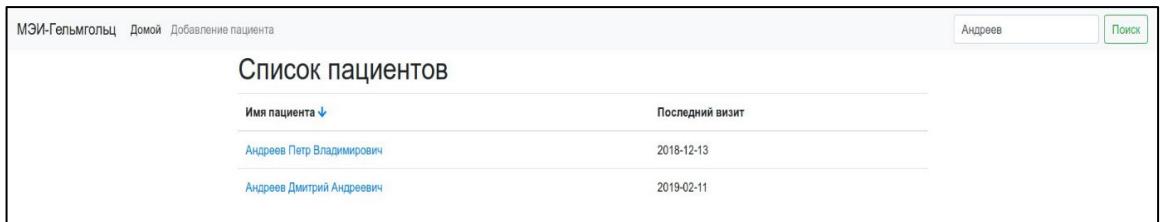
- поиск пациентов по имени;
- сортировка списка пациентов (например, в алфавитном порядке);
- добавление нового пациента;
- переход к карточке пациента.



The screenshot shows a web-based application for managing patients. At the top, there is a navigation bar with links: "МЭИ-Гельмгольц", "Домой", and "Добавление пациента". On the right side of the header is a search bar with a placeholder "Поиск" and a green "Поиск" button. The main content area is titled "Список пациентов". Below the title, there are two columns: "Имя пациента" (with a downward arrow indicating it's a dropdown or sortable field) and "Последний визит". Three patient entries are listed:

Имя пациента	Последний визит
Андреев Дмитрий Андреевич	2019-02-11
Андреев Петр Владимирович	2018-12-13
Васильев Андрей Петрович	2019-04-28

Рис. 60. Экран с домашней страницей



This screenshot shows the same application interface as Figure 60, but with a search filter applied. In the top right corner of the header, there is a dropdown menu set to "Андреев" and a green "Поиск" button. The main content area, titled "Список пациентов", displays the same three patient entries as Figure 60, but only the row for "Андреев Петр Владимирович" is visible, indicating that the search has filtered the results.

Рис. 61. Пример экрана для поиска пациентов и сортировки по фамилиям

При выборе в меню “Добавление пациента” пользователь попадает на страницу с добавлением пациента. Она состоит из различных форм, предназначенных для добавления информации о пациенте и текущем обследовании (рис. 99-195):

- информация о пациенте (имя, год рождения);
- информация о визите (дата посещения);
- неподтвержденный (изначально предполагаемым) и заключительный диагнозы;
- жалобы пациента;
- информация об исследования (можно выбрать тип файла, дату исследования и название);
- клинические данные;
- рекомендации и заметки врача.

Иванов Петр Николаевич
Дата рождения пациента
07/18/1986

**Рис. 62. Экран с информацией о пациенте**

Дата посещения
05/18/2019

**Рис. 63. Экран с информацией о визите**

Диагнозы			
<b>Неподтвержденный диагноз</b>			
OU:	▼	Введите новый диагноз	<input type="button" value="Добавить"/>
OS:	▼	Введите новый диагноз	<input type="button" value="Добавить"/>
OD:	▼	Введите новый диагноз	<input type="button" value="Добавить"/>
<b>Заключительный диагноз</b>			
OU:	▼	Введите новый диагноз	<input type="button" value="Добавить"/>
OS:	▼	Введите новый диагноз	<input type="button" value="Добавить"/>
OD:	▼	Введите новый диагноз	<input type="button" value="Добавить"/>

**Рис. 64. Экран с информацией о неподтвержденном и заключительном диагнозах**

Жалобы пациента	
Усталость в глазах	
Чешутся глаза	<input type="button" value="Добавить жалобу"/>

**Рис. 65. Экран с жалобами пациента**

Исследования	
ЭРГ	<input type="button" value="x"/>
05 / 18 / 2019	<input type="button" value="x"/>
Browse... convAbessonov_VV_20130828_1201 ISCEV ERG.csv	<input type="button" value="x"/>
ЭРГ	<input type="button" value="▼"/>
Снимок глаз	<input type="button" value="x"/>
05 / 18 / 2019	<input type="button" value="x"/>
Browse... снимок глаз.png	<input type="button" value="x"/>
Изображение	<input type="button" value="▼"/>
<input type="button" value="Добавить исследование"/>	

**Рис. 66. Экран с информацией об исследованиях**

Клинические данные			
Острота зрения			
OS:	1	<input type="button" value="▼"/> 1.1 <input type="button" value="▼"/>	<input type="button" value="Добавить"/>
OD:	0.9	<input type="button" value="▼"/> 1.1 <input type="button" value="▼"/>	<input type="button" value="Добавить"/>
Цвет ДЗН			
OS:	бледный	<input type="button" value="▼"/> Новое значение	<input type="button" value="Добавить"/>
OD:	побледнение с темпоральной стој	<input type="button" value="▼"/> Новое значение	<input type="button" value="Добавить"/>
Границы ДЗН			
OS:	границы четкие	<input type="button" value="▼"/> Новое значение	<input type="button" value="Добавить"/>
OD:	границы нечеткие	<input type="button" value="▼"/> границы нечеткие	<input type="button" value="Добавить"/>
Макула			
OS:	без очаговых изменений	<input type="button" value="▼"/> Новое значение	<input type="button" value="Добавить"/>
OD:	отек	<input type="button" value="▼"/> Новое значение	<input type="button" value="Добавить"/>
Периферия			
OS:	без особенностей	<input type="button" value="▼"/> Новое значение	<input type="button" value="Добавить"/>
OD:	без особенностей	<input type="button" value="▼"/> Новое значение	<input type="button" value="Добавить"/>

**Рис. 67. Экран с клиническими данными**

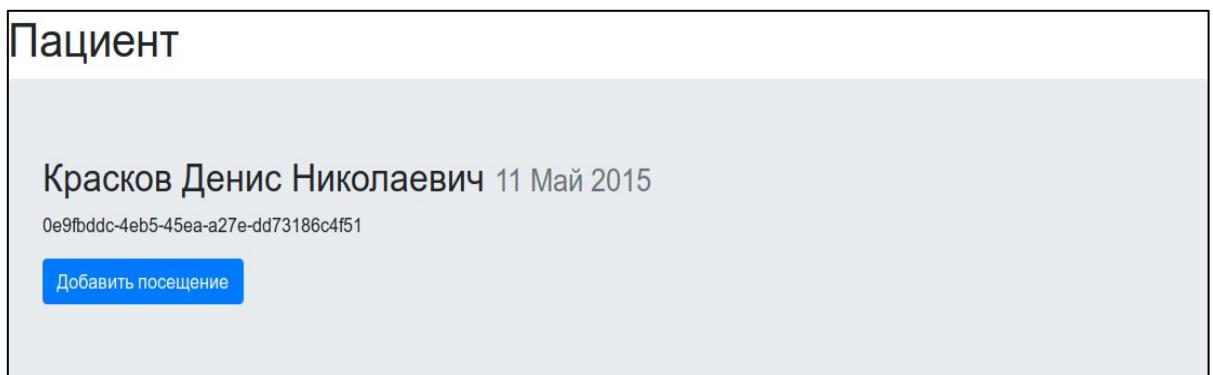


**Рис. 68. Экран с рекомендациями и заметками врача**

### Страница пациента

После добавления записи о посещении ЛПР (врач) попадает на страницу пациента. На ней представлена информация про пациента и про его посещения врачей, исследований и т.д. Можно запросить сводную информацию по всем посещениям.

На экране (в окне) информации о пациенте (рис. 106) представлены: ФИО пациента, его год рождения и уникальный номер карты. Здесь же можно начать добавление информации про его новое посещение.

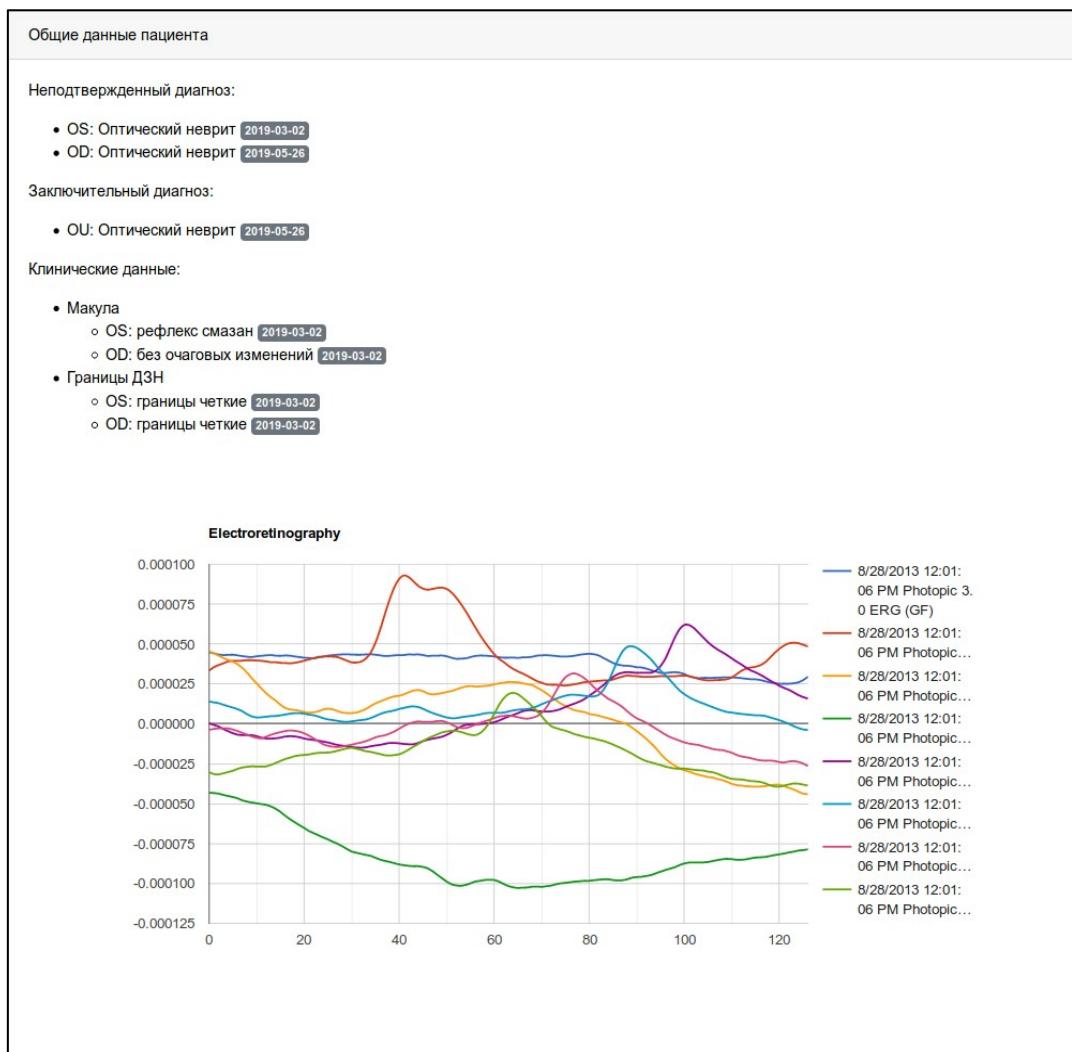


**Рис. 69. Экран с информацией о пациенте**

На экране Общие данные пациента (выводятся актуальные данные по диагнозу и клиническим данным) представлены обобщенные данные по всем визитам пациента (рис. 107). Так же там отображается график исследований, если ЛПР (эксперту) необходим его проанализировать (рис. 108).

Общие данные пациента
<p><b>Неподтвержденный диагноз:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• OS: Оптический неврит [2019-03-02]</li> <li>• OD: Оптический неврит [2019-05-26]</li> </ul> <p><b>Заключительный диагноз:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• OU: Оптический неврит [2019-05-26]</li> </ul> <p><b>Клинические данные:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Макула           <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ OS: рефлекс смазан [2019-03-02]</li> <li>◦ OD: без очаговых изменений [2019-03-02]</li> </ul> </li> <li>• Границы ДЗН           <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ OS: границы четкие [2019-03-02]</li> <li>◦ OD: границы четкие [2019-03-02]</li> </ul> </li> </ul>

**Рис. 70. Экран с общими данными о пациенте**



**Рис. 71. Экран с общими данными о пациенте с графиками ЭРГ**

Далее выводится экран со списком посещений пациента (рис. 109) и данными, добавленными в результате посещения. Дополнительно можно запросить информацию по интересующему исследованию (анализу) и построить соответствующий график.

The screenshot displays a medical application interface for managing patient visits. It shows two distinct sections for different visits:

- Визит от 2019-03-02**
  - Неподтвержденный диагноз:**
    - OS: Оптический неврит
    - OD: Оптическая нейропатия
  - Заключительный диагноз:**
    - Жалобы: отсутствуют.
  - Исследования:**
    - 2019-05-26 [Скачать](#)
  - Клинические данные:**
    - Границы ДЗН
      - OS: границы четкие
      - OD: границы четкие
    - Макула
      - OS: рефлекс смазан
      - OD: без очаговых изменений
- Визит от 2019-05-26**
  - Неподтвержденный диагноз:**
    - OD: Оптический неврит
  - Заключительный диагноз:**
    - OU: Оптический неврит
  - Жалобы:** отсутствуют.
  - Исследования:**
    - 2019-05-26 [Скачать](#)

**Рис. 72 Список визитов пациента**

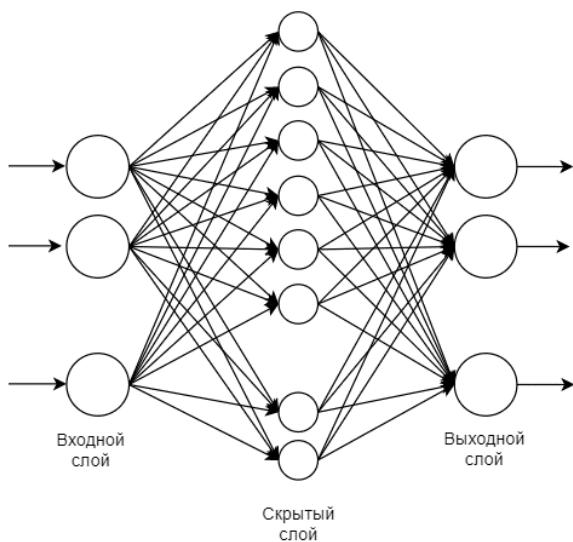
Данные экраны были разработаны при взаимодействии со специалистами-экспертами лаборатории Физиологии зрения МНИИ глазных болезней им. Гельмгольца для представления данных, из сбора и проведения последующего анализа.

### **3.6 Описание используемых ИНС**

#### **ИНС с одним скрытым слоем**

ИНС с одним скрытым слоем типа перцептрана могут быть организованы следующим образом (рис. 110). Данная ИНС обучается с учителем с применением

метода обратного распространения ошибки, используя сигмоиду в качестве функции активации [118,119,120].



**Рис. 73. Структура персептрона с одним скрытым слоем.**

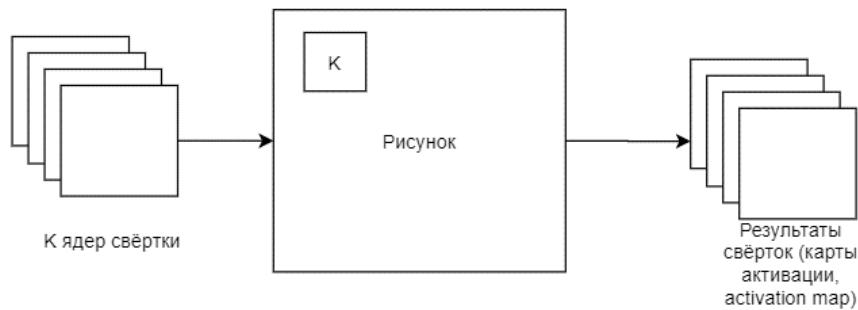
Персептрон с одним скрытым слоем обучается по методу обратного распространения ошибки, его модификаций не требуется для использования с имеющимися данными. Научная новизна заключается в применении данного метода ИАД к выборкам, описанным начале главы 3, с целью построения системы для дифференциальной диагностики патологий зрения.

### Глубинная (свёрточная) ИНС с использованием нескольких типов НВП

Предлагаемая ИНС базируется на концепции глубинных (свёрточных) нейронных сетей, реализованной в фреймворке Tensorflow [121,122], которая предусматривает наличие следующих слоев.

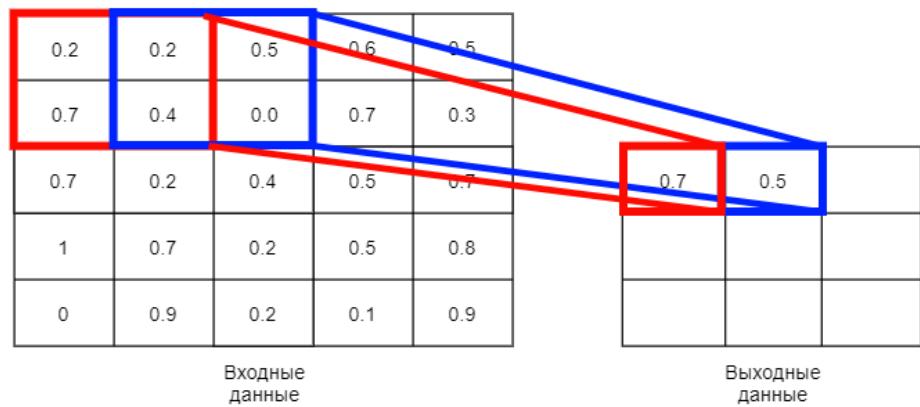
1. Свёрточный слой, обозначаемый как **Conv2D**, включает для цветового канала отдельный фильтр, в случае работы с обычными изображениями. Однако, поскольку у нас используется перед этим непрерывное вейвлет преобразование, то свёртка по факту производится над матрицей, аналогичный изображению в градациях серого, в результате чего используется только один фильтр. Ядро свёртки данного фильтра обрабатывает предыдущий слой по фрагментам,

суммируя результаты поэлементного произведения для каждого фрагмента. Весовые коэффициенты ядра свёртки (небольшой матрицы) неизвестны и устанавливаются в процессе обучения. Сверточный слой (рис. 111) нужен для того, чтобы ИНС выделяла какие-то локальные признаки во входных данных.



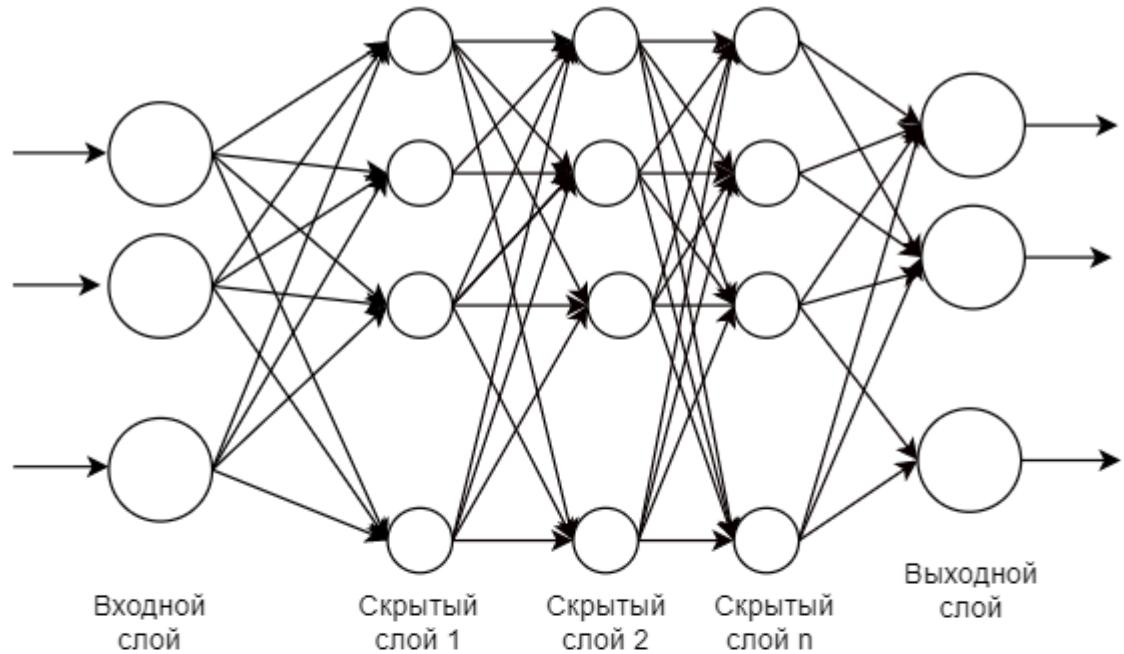
**Рис. 74. Структура свёрточного слоя ИНС**

Слой голосования, обозначаемый **MaxPooling2D** и называемый также слоем подвыборки или субдискретизации, пулинга, представляет собой нелинейное уплотнение карты признаков. При этом группа пикселей (обычно размера  $2 \times 2$ ) уплотняется до одного пикселя, проходя нелинейное преобразование. MaxPooling означает то, что для из каждой группы пикселей берется максимальное значение. Слой голосования нужен для регуляризации и мешает переобучению ИНС. Пример его работы представлен на рисунке 112. Существуют разные реализации слоёв пулинга, в зависимости от решаемых задач [123]. В диссертации предлагается с учетом специфики обрабатываемой информации использовать выбор максимального значения, так как (было показано при изучении отдельных параметров выборки) максимальное значение вейвлета является одним из значащих признаков.



**Рис. 75. Пример работы слоя голосования**

Слой отсева, обозначаемый Dropout, обеспечивает просеивание. Нужен для регуляризации и препятствует переобучению ИНС. Пример его работы представлен на рис. 113 [124]. Он работает аналогично многослойному персепtronу, где отброшена часть связей и промежуточных нейронов.



Полносвязный  
персепtron

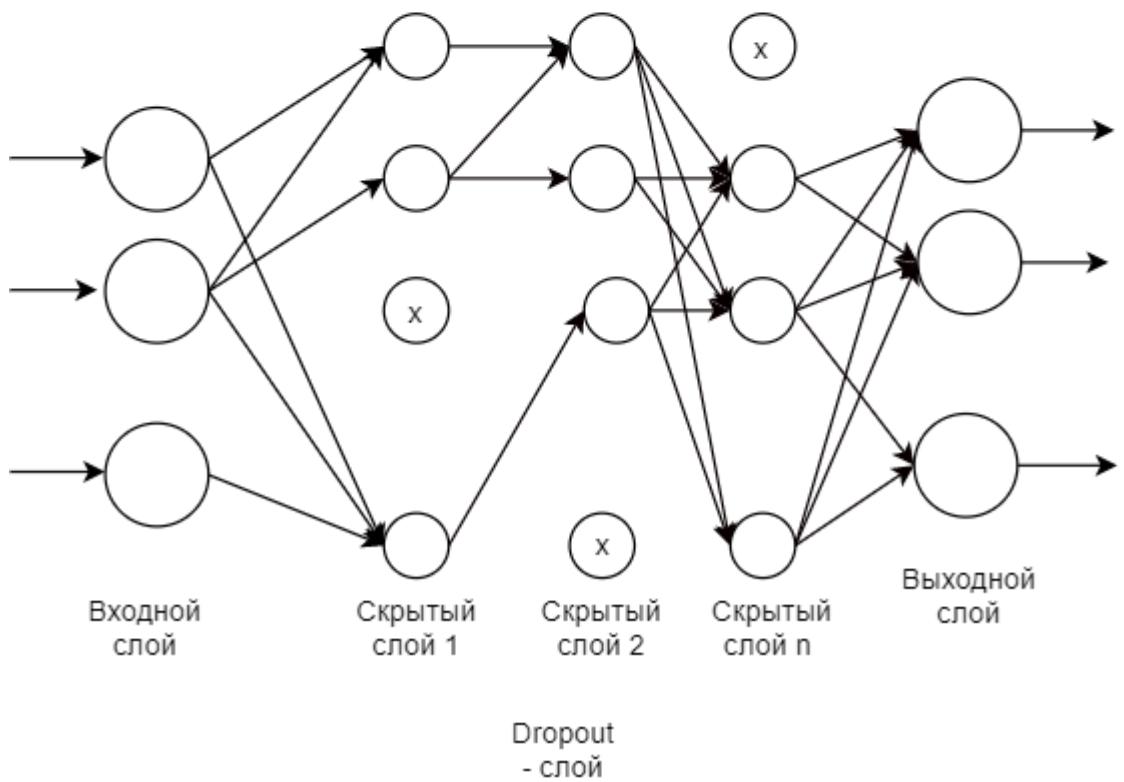


Рис. 76. Пример построения слоя отсева (Dropout).

Полносвязный слой - **Dense**. В нем выходные значения вычисляются по формуле [125, 126]:

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta) \quad (14)$$

Структура (диаграмма переходов) предложенной свёрточной ИНС может быть представлена следующей диаграммой (рис 114):

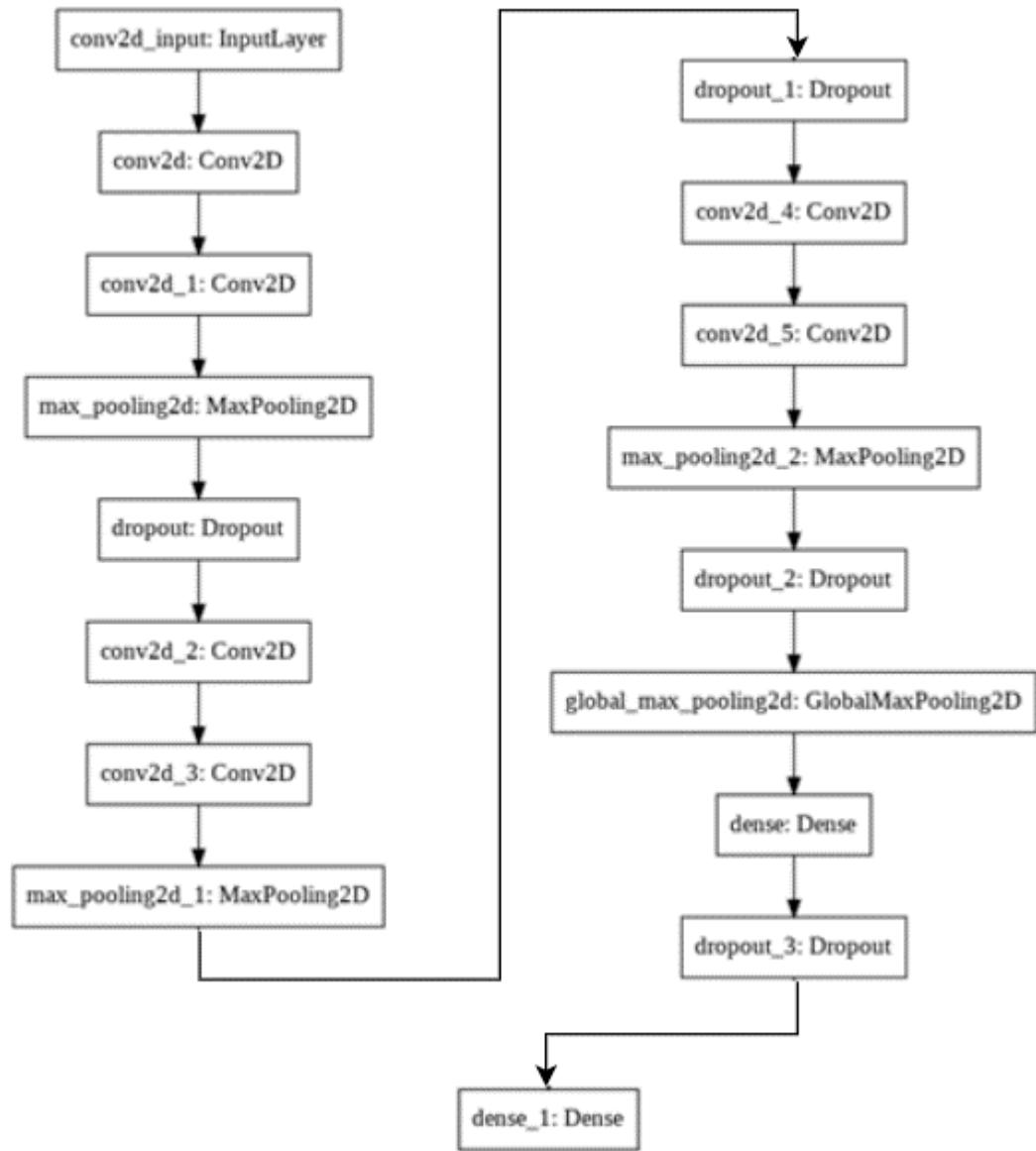


Рис. 77. Структура свёрточной ИНС

Объединение нескольких таких сетей ИНС в ансамбль и обоснование использована ансамбля дано в главе 2.7.

## **Свёрточная ИНС для решения задачи классификации**

Для решения задачи кластеризации используется аналогичная рассмотренной свёрточной ИНС, где слой Dense отсутствует, вместо этого данные обрабатываются алгоритмом k-средних с целью проведения классификации и последующей постановки диагноза. Это оригинальное нововведение используется для изучения неразмеченной выборки. В качестве результатов слоя Dense, используемых для обучения нейронной сети, берутся метки, полученные по алгоритму алгоритма k-средних. Алгоритм k-средних в работе используется без модификаций.

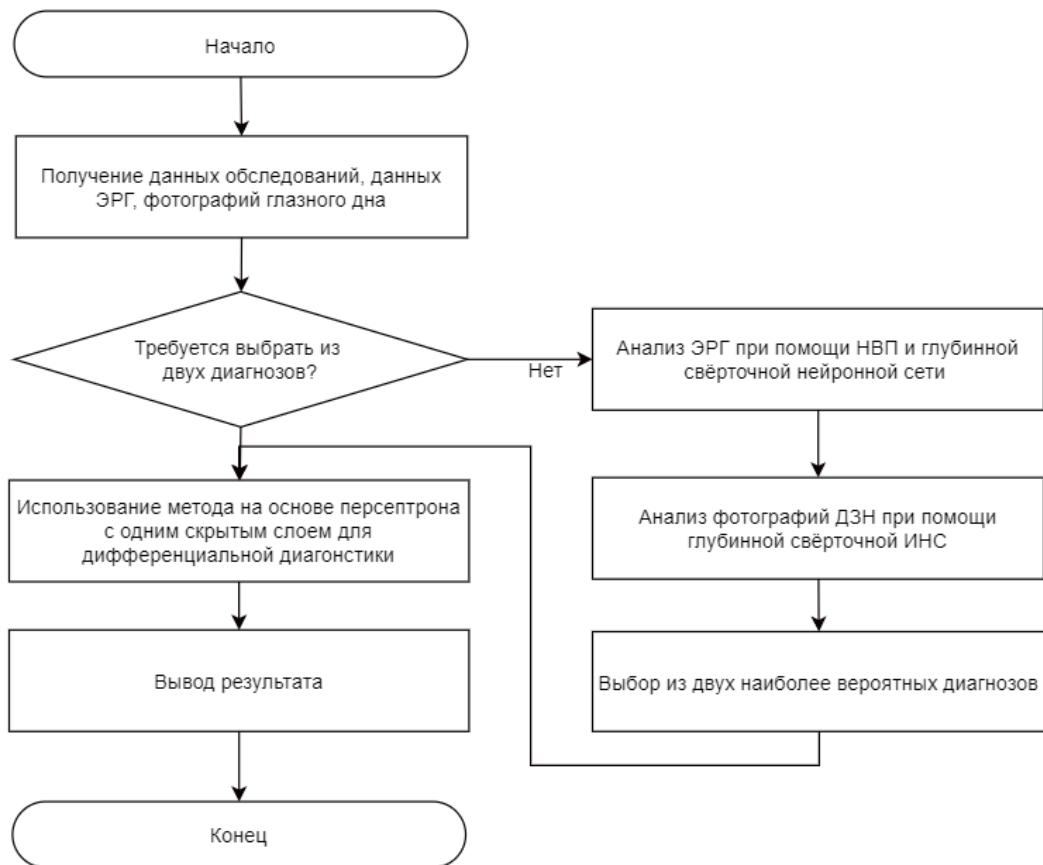
Общая структура предложенного метода классификации с использованием алгоритма k-средних описана в главе 2.9.

## **Свёрточная ИНС для диагностики по фотографиям**

Для возможности диагностики заболеваний по образам (фотографиям) [127, 128] может использоваться ИНС, представленная выше (см. рис. 114). В случае с описанным в главе 2.8 методом требуются две таких сети. Новизна заключается в интеграции анализа фотографий с другими методами ИАД в рамках единой системы применительно к диагностике патологий зрения.

## **Алгоритм анализа данных о сложных проблемных ситуациях с использованием нескольких источников и методов ИАД**

Для решения прикладной задачи диагностики патологий зрения приведённые выше методы могут быть объединены в один. Анализ данных тогда будет проводиться по следующему алгоритму (рис. 115).



**Рис. 115. Алгоритм анализа данных о сложных проблемных ситуациях на примере диагностики патологий зрения с использованием разработанных методов**

### 3.7. Вывод по главе 3

Результатами третьей главы являются разработка методов и средств ИАД на основе ИНС и вейвлет-преобразований, формальный аппарат когнитивной графики, методы и средства предварительной обработки данных.

Решены следующие задачи:

- разработка системы (базы) для хранения данных с учётом специфики предметной области и обрабатываемой информации; подготовка обучающей выборки для ИНС;
- разработка средств визуализации (образного представления) данных в понятной эксперту и ЛПР форме с применением КГ (КО).

Научная новизна полученных результатов:

- разработаны методы и алгоритмы анализа зашумленных (с различными НЕ-факторами) данных о сложных проблемных ситуациях при помощи глубинных ИНС, отличающиеся от известных тем, что позволяют делать заключения,

оперируя информацией от различных источников (результатами разных исследований);

- разработан формальный аппарат КГ (создания КО) для помощи эксперту и ЛПР в анализе и диагностике сложных проблемных ситуаций (на примере патологий зрения).

## **4 Тестирование и аprobация полученных результатов и прототипа интеллектуальной (экспертной) системы поддержки принятия решений**

### ***4.1 Сеть прямого распространения сигнала для дифференциальной диагностики***

#### **Выборка данных**

На момент исследования было представлено всего около 100 примеров ЭРГ для двух заболеваний (миопия и отслоение сетчатки), однако, проведённая на основе предложенных выше методов предобработка исходных данных показала хорошую разделимость данных даже при их ограниченном количестве. Поскольку предоставленные данные ЭРГ давали недостаточно образов для ИАД с целью обоснования эффективности предложенных методов, было решено использовать эти методы при анализе других нестационарных сигналов, получаемых при снятии биопотенциалов с человека. Поскольку самыми большими БД являются БД по электрокардиограммам, было решено использовать их для тестирования и оценки предложенных решений.

Была сформулирована дополнительная задача – проведение ИАД и дифференциальной диагностики заболеваний по результатам ЭКГ. Исходные данные для анализа были взяты из специальной БД Российского общества холтеровского мониторирования и неинвазивной электрофизиологии (РОХМиНЭ) [130]. В качестве наборов для классификации были выбраны «Синусовая тахикардия. Одна желудочковая экстрасистола» и «Синусовый ритм. Желудочковые экстрасистолы. Желудочковая тригеминия», что соответствует случаю, когда одно заболевание является прогрессирующей формой другого. Обычно для анализа и диагностики используются методы на основе преобразований Фурье [131,132], но получаемые при этом результаты диагноза часто не устраивают экспертов.

## Параметры обучения ИНС

Данные на входе нормируются в промежуток от 0 до 1. Для обучения предложенной глубинной (сверточной) ИНС использовано 60% входных векторов, 20% векторов использовано для валидации и 20% для тестирования, что является одним из стандартных разделений данных. В скрытом слое было задано 100 нейронов. Обучение проводилось на выборках данных, описанных в главе 3.

## Результаты

В табл. 1 приведена структура матрицы неточностей, используемая для оценки эффективности разработанных методов [133].

После обучения ИНС были получены данные, представленные на рис 115-118 и в табл. 2. Заключение характеризует наличие или отсутствие отслоения сетчатки.

Таблица 1. Матрица неточностей

		Истинное заключение		
		Положительное	Отрицательное	
Выход	Пол.	Истинное положительное	Ложное положительное (Ошибка первого рода)	Точность положительных
	Отриц.	Истинное отрицательное (Ошибка второго рода)	Истинное отрицательное	Точность отрицательных
		Чувствительность	Специфичность	Общая точность



**Рис. 78. Результаты обучения на наборе 1**



**Рис. 79. Результаты обучения на наборе 2**



**Рис. 80. Результаты обучения на наборе 3**

*Таблица 2. Обобщение результатов обучения на ЭРГ*

Номер выборки	Точность обучения	Точность валидации	Точность проверки	Общая точность
1	88,5%	100%	90,9%	93%
2	96%	88,9%	88,9%	93%
3	100%	100%	88,9%	97,7%

Установлено, что комбинация разных наборов данных позволяет повысить точность обучения.

Для ЭКГ были проведены аналогичные исследования. В результате проведённых предобработки, ИАД для формирования обучающих выборок и последующего обучения ИАД с аналогичными параметрами были получены сравнительные данные, представленные в табл. 3.

*Таблица 3. Обобщение результатов обучения на ЭКГ*

Номер выборки	Точность обучения	Точность валидации	Точность проверки	Общая точность
1	90%	100%	85%	88,9%
2	92%	100%	87,4%	92,5%
3	88,6%	90%	86,9%	90,1%

Из результатов тестирования можно сделать следующие выводы

- предложенные методы выделения признаков для ЭКГ показывают лучшие результаты, чем при использовании методов на основе преобразований Фурье, что выражается в увеличении точности классификации на выборках, с данными ДВП;
- так как сигналы ЭКГ более длительны, чем сигналы ЭРГ, то для выделения максимумом и минимумов потребовалось применить НВП (что также подтверждает эффективность использования НВП).
- падение точности обучения на выборке 3 обусловлено большой размерностью выходных векторов (120 значений).

Последний этап работы заключается в собственно обучении ИНС и проведения на ее основе ИАД.

#### **4.2 Свёрточные ИНС для дифференциальной диагностики с кластеризацией**

##### **Выборка данных**

Выборка данных, как отмечено ранее, для проведения ИАД и применения ИНС представляет собой данные ЭРГ. При проведении исследований при помощи ЭРГ, к глазам человека крепятся электроды, которые считывают появление электрических импульсов в сетчатке глаза при подаче светового стимула. Обычно анализируются ЭРГ типа ПЭРГ, которые более точно позволяют выявить наличие заболевания. Для обучения ИНС использованы 1500 примеров.

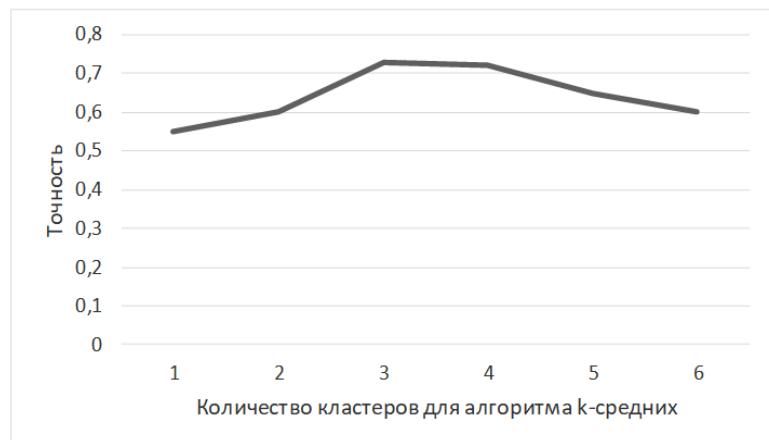
Каждый пример состоит из результатов снятия сигнала с какого-либо глаза (может использоваться любой глаз). Сигнал является оцифрованным с частотой дискретизации 125 Гц, амплитуда сигнала вычисляется как разность потенциалов, возникающую при подаче светового стимула.

## Параметры обучения

Тестовая выборка из 1500 ПЭРГ была разбита на части: 800 ПЭРГ для обучения, 200 для валидации и 500 для определения качества обучения ИНС.

## Результаты

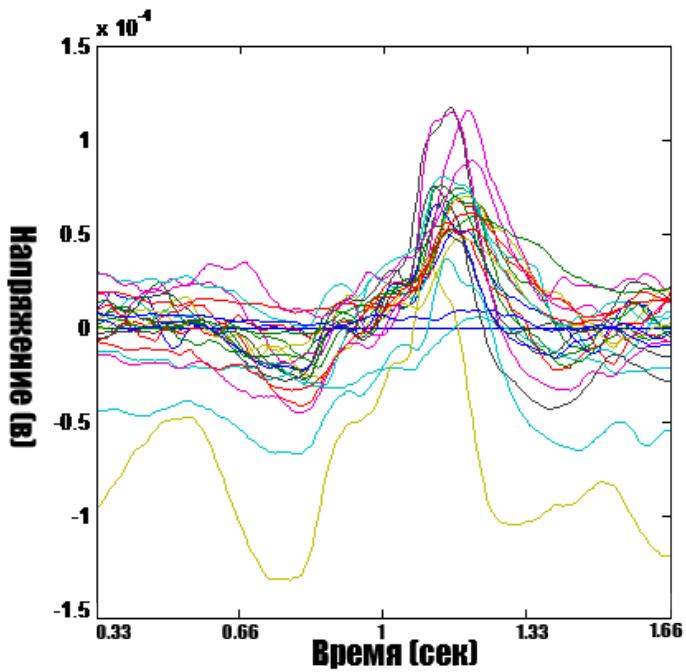
При разном количестве классов, используемых при обучении глубинной свёрточной ИНС с использованием алгоритма  $k$ -средних, была выявлена наилучшая сходимость результатов для значений  $N$  в заданном экспертами (физиологами) диапазоне [3;5], что обусловлено тем, что чаще всего ПЭРГ использовались для диагностики только самых распространённых патологий, что отмечено максимумом кривой на рис. 118



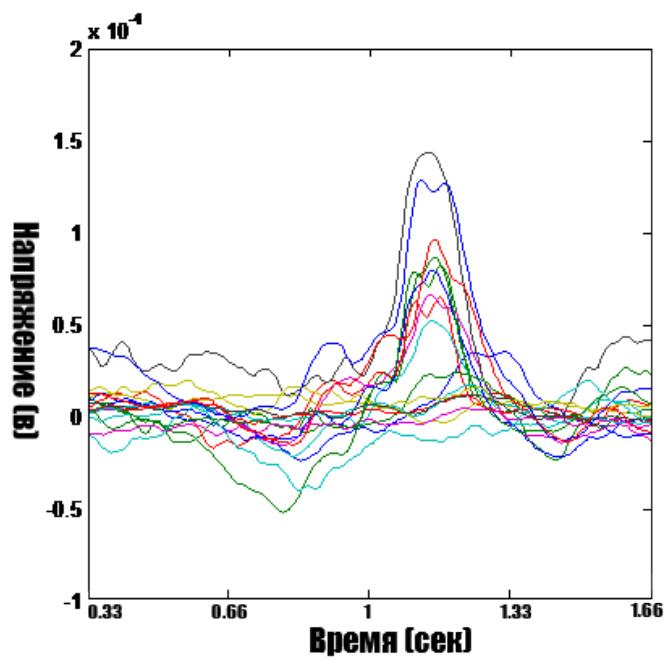
**Рис. 81. Точность классификации по сгенерированным классам в зависимости от их количества**

При анализе полученных после обучения ИНС результатов установлено что для случая  $N=3$ , графики, попавшие в отдельные классы, соответствуют таким заболеваниям как миопия, отслоение сетчатки и глаукома (что было подтверждено экспертами).

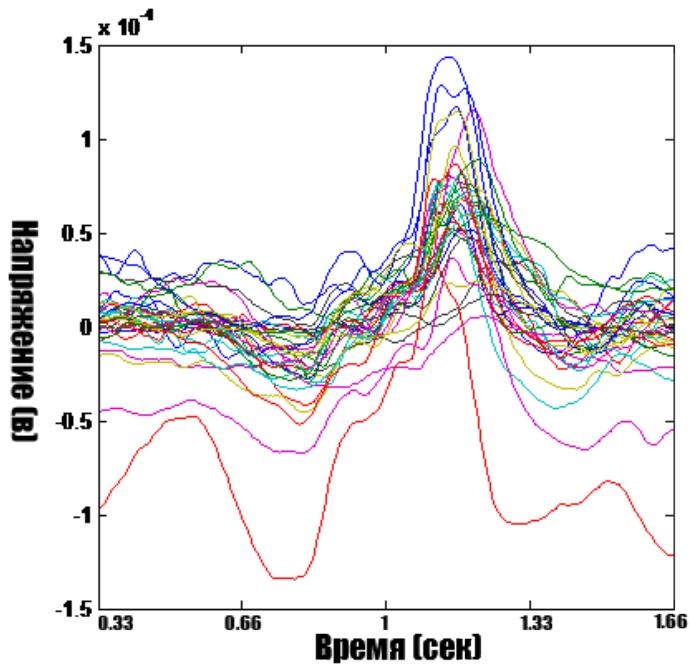
На рис. 119-121 приведены результаты применения обученной ИНС, в результате чего установлено и подтверждено экспертами, что имеет место наложение графиков для различных классов (патологий), соответствующих миопии, отслоению сетчатки и глаукоме.



**Рис. 82. Класс 1 – Миопия (наблюдаются сокращение ответа глаза по всем параметрам)**



**Рис. 83. Класс 2 - Отслоение сетчатки (наблюдаются резкое сокращение ответа глаза по всем параметрам)**



**Рис. 84. Класс 3 – Глаукома (наблюдаются сокращение ответа глаза в диапазоне 1,1-1,4 сек)**

Таким образом в результате ИАД с применением предложенных сверточных ИНС удалось выделить три класса (кластера), которые хорошо показывают

изменения ЭРГ (ПЭРГ) в случаях определённых заболеваний. Следует отметить, что точность получаемых результатов (и расширение сферы применения методов на другие патологии зрения) увеличивается с увеличением размера исходной БД, предоставляемой экспертами.

#### **4.3 Использование свёрточных ИНС для дифференциальной диагностики в области кардиологии**

Как отмечалось ранее, разработанные в диссертационной работе методы и алгоритмы ИАД о сложных проблемных ситуациях с применением ИНС, а также реализованные на их основе базовые программные средства, достаточно универсальны и могут быть использованы в различных предметных/проблемных областях, где требуется обработка и анализ зашумленных данных, получаемых из различных и разнородных источников (специализированной аппаратуры, экспертов, врачей и т.д.). Рассмотрим применение разработанного аппарата в кардиологии при анализе ЭКГ.

##### **Выборка данных**

В качестве данных для исследования был взят набор (БД) датасет ECG Heartbeat Categorization Dataset [134], содержащий 109446 записей ЭКГ, отнесенных к одному из 5 классов:

N – Non-ecotic beats (normal beat) – нормальные ритмы;

S – Supraventricular ectopic beats – наджелудочковые эктопические сокращения;

V – Ventricular ectopic beats - желудочковые эктопические сокращения;

F – Fusion Beats – желудочковые и наджелудочковые эктопические сокращения одновременно;

Q – Unknown Beats – биения неизвестного типа.

Каждая запись произведена с частотой 125Hz и приведена к фиксированной длине в 188 измерений.

## **Параметры обучения**

Для обучения ИНС использовано 60% входных векторов, 20% использовано для валидации и 20% для тестирования.

## **Результаты**

ИАД на основе предложенной ИНС с предварительной предобработкой данных посредством НВП дал следующие результаты:

- итоговая точность классификации при применении НВП на основе вейвлета Хаара: 92.2%;
- итоговая точность при применении НВП на основе вейвлета Добеши: 91.0%;
- итоговая точность при применении НВП на основе вейвлета Мексиканская шляпа: 89.9%.

Интеграция описанных в главе 2 трёх классификаторов дала точность 93.2%.

## ***4.4 Использование свёрточных ИНС для анализа фотографий глазного дна***

### **Выборка данных**

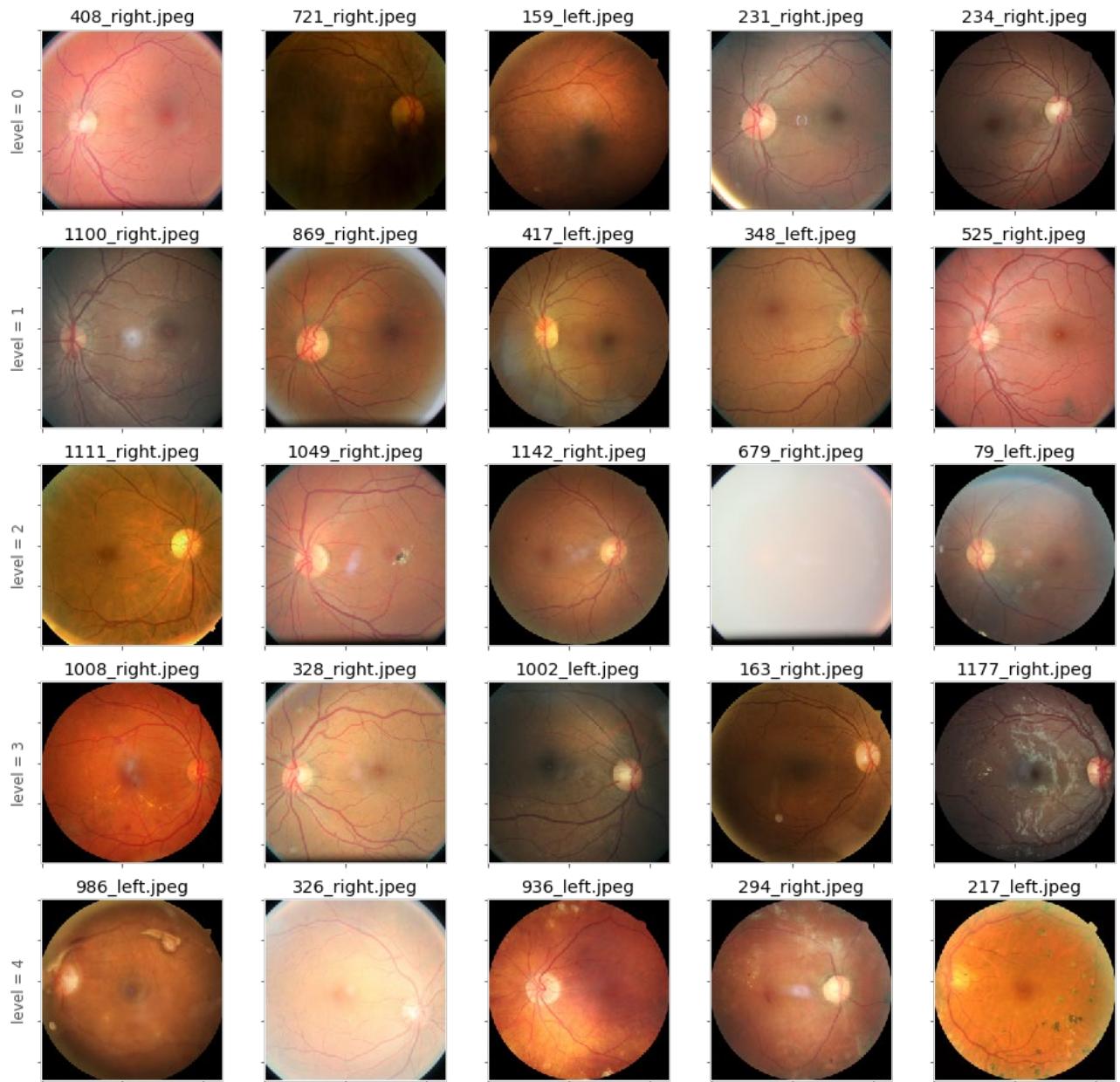
Для ИАД был взят рекомендованный экспертами большой набор фотографий (изображений) глазного дна с высоким разрешением, снятых при различных условиях [135]. Фотографии левой и правой областей предусмотрены для каждого объекта. Эксперт дал оценку степени уверенности в наличии диабетической ретинопатии (ДР) на каждом изображении по шкале от 0 до 4:

- 0 – ДР отсутствует;
- 1 – слабо выраженная ДР;
- 2 – умеренная ДР;
- 3 – тяжелый случай ДР;
- 4 - пролиферативная (разрастающаяся) ДР

Изображения в исходном наборе данных поступают с разных моделей и типов камер, которые могут влиять на внешний вид образа (слева или справа). Кроме того, образы разнотипны, в частности: некоторые дают анатомический образ сетчатки (макула слева, зрительный нерв справа для правого глаза и т.д.); другие – вид сетчатки через микроскопическую сгущающую линзу (то есть с инверсией, как при обычном исследовании живого глаза). Тип образа необходимо предварительно выявить, например, для определения инверсии используются следующие правила:

- инверсия имеет место, если макула (маленькая темная центральная область) немного выше средней линии образа, проведенной через зрительный нерв, иначе (макула ниже средней линии зрительного нерва), изображение не инвертировано;
- инверсии нет, если на стороне изображения есть метка (квадрат, треугольник или круг), иначе имеет место инверсия.

Данный набор не является идеальным и может иметь неопределенности (содержать шум) как на изображениях, так и в оценках степени заболевания, а также содержать артефакты, быть не в фокусе и т.п. Примеры исследуемых изображений (образов) из анализируемого набора данных, разбитые на классы, характеризующие степень заболевания, приведены на рис 122. Сверху вниз на рисунке показаны разные типы ДР: от отсутствует ( $level = 0$ ) до пролиферативный ДР ( $level = 4$ ).



**Рис. 85. Набор изображений глазного дна**

## Параметры обучения

Для обучения, как и ранее, использовано 60% входных изображений, 20% использовано для валидации и 20% для тестирования на каждом этапе каскада ИНС, предложенного в главе 2.

## Результаты

В результате применения ИАД получена точность классификации (диагностики) 70%. Такая невысокая точность связана с тем, что исходный набор данных сильно не сбалансирован.

Для возможности проведения более качественного ИАД предварительно была сформирована матрица ошибок, элементы которой представляют (рис. 123).

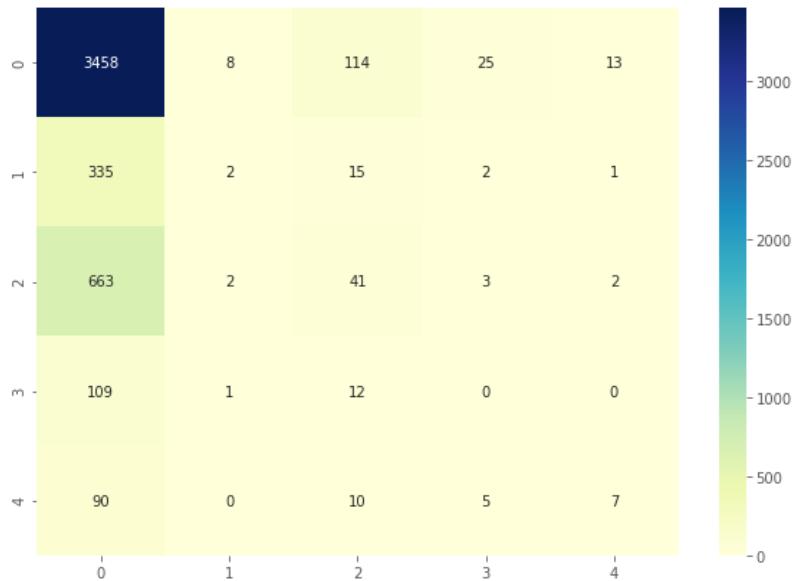


Рис. 123. Матрица ошибок

В результате была выбрана и реализована ИНС для задачи распознавания и диагностирования проблемных ситуаций на примере диабетической ретинопатии, проанализированы полученные результаты и показана успешность ее применения при различных метриках.

#### 4.5 Применение когнитивной графики

Для демонстрации возможностей когнитивной графики выбрано несколько примеров графических представлений сетчатки (КО сетчатки) в нормальном состоянии и при возможных изменениях, реализованных программно (рис. 123, 124). Данные образы сгенерированы на основе правил, предложенных в главе 3.

По краям картинки мы можем наблюдать сетчатку в норме. Чем ближе элемент находится к центру, тем виднее, что с ним будет происходить при ухудшении показателей.

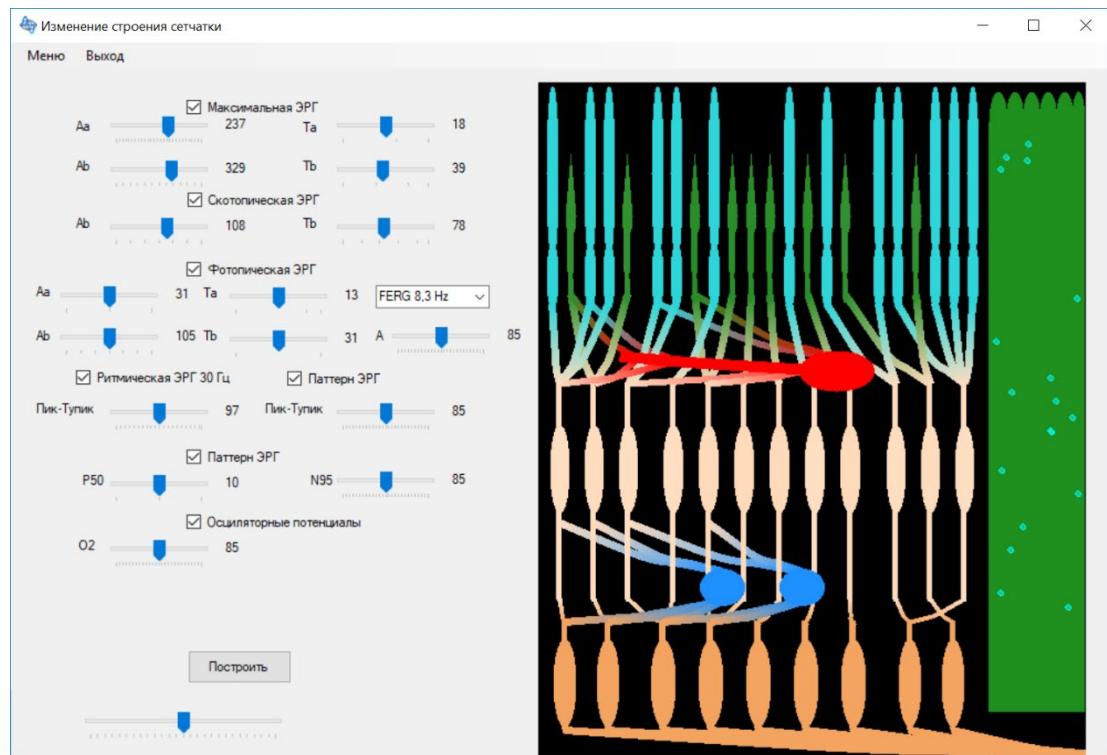


Рис. 86. КО сетчатки в норме

Теперь приведем КО сетчатки при усиленном метаболизме клеток и ускоренной передаче данных через связи (рис. 124). Заметно увеличение размеров элементов, утолщение связей между элементами и изменение яркости цвета.

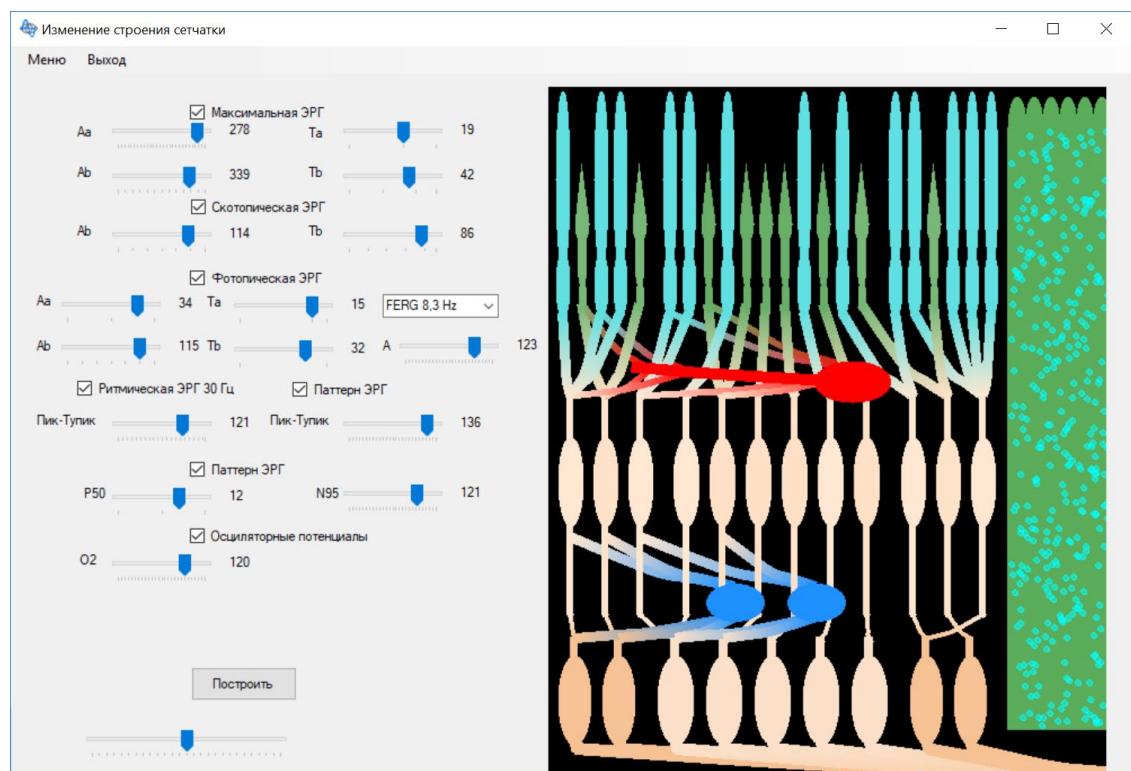


Рис. 87. КО сетчатки при усиленном метаболизме

Точность построения КО подтверждена экспертами-офтальмологами.

#### 4.6 Реализация прототипа ИСППР на основе разработанных методов

На основе полученных в работе результатов был разработан демонстрационный прототип ЭС (ИСППР на основе экспертных знаний), интегрирующий предложенные подходы, методы и алгоритмы и предназначенный для ИАД о сложных проблемных ситуациях и помощи ЛПР при диагностике проблемных ситуаций (на примере патологий зрения), а также обучения молодых специалистов. Архитектура прототипа приведена на рис. 125.

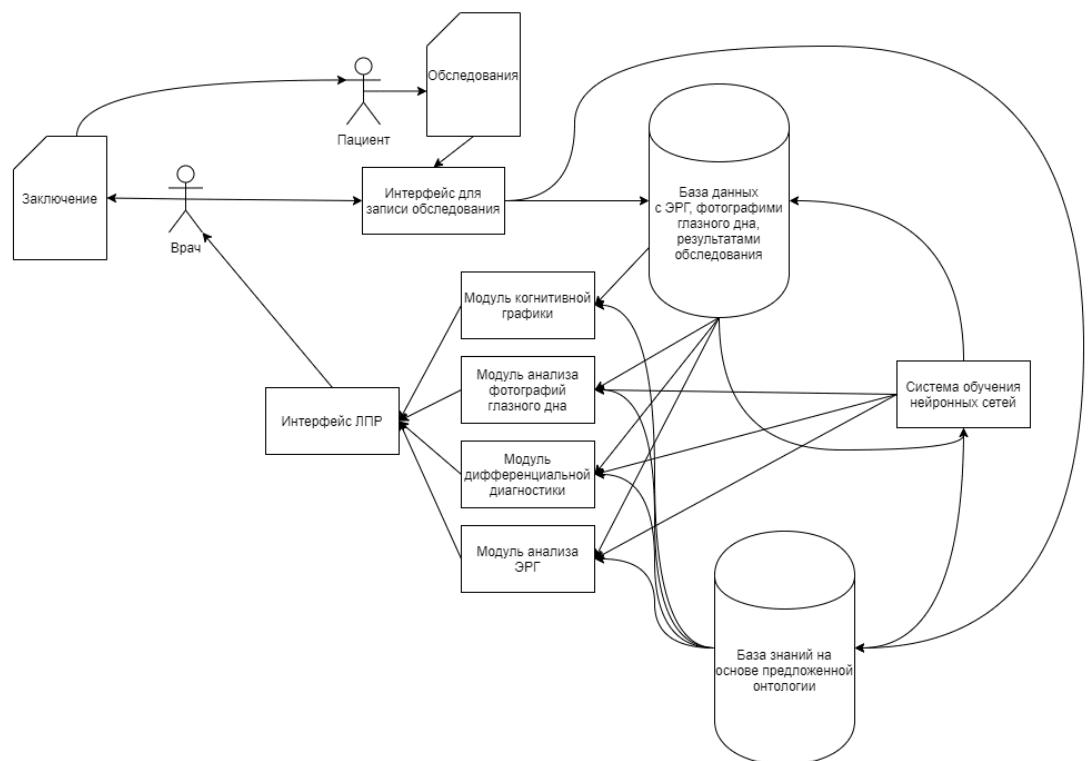


Рис. 88. Архитектура прототипа ИСППР для анализа проблемных ситуаций

Данная ИСППР позволяет накапливать информацию, проводить сбор и предварительную обработку зашумленных разнородных данных, получаемых из разных источников, формировать БД и БЗ, используемые для ИАД о сложных проблемных ситуациях, проводить ИАД с применением глубинных (сверточных) ИНС, и в результате диагностировать (классифицировать) проблемные ситуации с последующей выдачей рекомендаций для их нормализации (рекомендаций по лечению) с целью повышения качества принимаемых решений, а также для

обучения начинающих специалистов. Результаты работы апробированы в НИИ им. Гельмгольца, что подтверждает акт о внедрении.

Разработанные программные средства «Программный комплекс с интеллектуальной поддержкой принятия решений и когнитивной графикой» и «Программа для преобразования закрытого формата данных в базе данных в открытый формат с возможностью экспорта в другие программные продукты» прошли государственную регистрацию (свидетельства №2019660564 от 07.08.2019, №2019660567 от 07.08.2019 соответственно).

#### **4.7 Выводы по главе 4**

В четвёртой главе описано тестирование с применением различных наборов данных и примеры практического применения предложенных в работе решений. Показана эффективность предложенных методов в плане предварительной обработки зашумленных данных, формирования обучающей выборки и последующего ИАД и классификации (диагностирования) патологий на примере офтальмологии и кардиологии, что подтверждает достаточную универсальность предложенного в работе аппарата.

Описана реализация демонстрационного прототипа ИСППР экспертного типа, предназначенного для помощи врачам офтальмологам и обучения молодых специалистов, базовые модули которого апробированы в МНИИ им. Гельмгольца, о чём имеется соответствующий акт.

### **Заключение**

В плане достижения главной цели исследования, направленной на повышение качества представления и анализа информации за счет разрабатываемых методов и алгоритмов ИАД о сложных проблемных ситуациях с использованием онтологии, нейросетевого подхода и когнитивной графики и создания на основе полученных результатов прототипа ИСППР экспертного типа для поддержки ЛПР при обнаружении, диагностике проблемных ситуаций и поиске эффективных решений

по их устраниению (нормализации), а также для обучения начинающих специалистов, получены следующие основные результаты.

1. Проведено исследование современных методов сбора и предварительной обработки данных, методов для подготовки данных к формированию онтологии и последующему анализу при помощи ИНС с использованием ДВП и НВП, а также для выделения основных характеристик сигналов.

2. Предложены оригинальные методы для получения данных из закрытых БД и их объединение в единую информационную открытую БД с учётом наличия зашумлённости и других НЕ-факторов на основе разработанной онтологии.

3. Предложена интеграция трех разных методов ИАД (анализ сигналов с выделением характеристик, анализ сигналов при помощи глубинных (сверточных) ИНС, анализ изображений) для данных разного формата, получаемых из различных источников, с целью получения единого и более качественного заключения по диагностированию патологии.

4. Разработан формальный аппарат когнитивной графики (создания КО) в виде набора специальных продукционных правил для помощи эксперту и ЛПР при анализе и диагностике сложных проблемных ситуаций (на примере патологий зрения).

5. Разработана обобщенная архитектура и базовые программные средства прототипа ИСППР для анализа проблемных ситуаций на основе полученных в работе результатов – методов и алгоритмов препроцессорной обработки закрытых данных, формирования онтологии, БД, ИАД с применением ИНС, КО и экспертных знаний.

6. Полученные результаты используются в учебном процессе кафедры Прикладной математики и искусственного интеллекта (ПМИИ) при обучении студентов по направлению «Прикладная математика и информатика», а также в научных исследованиях, выполняемых кафедрами ПМИИ, Управления и интеллектуальных технологий (УИТ) НИУ «МЭИ» совместно с отделом клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова «НМИЦ ГБ им. Гельмгольца» в плане создания ЭС (ИСППР экспертного типа) для обучения молодых

специалистов и помочи врачам-офтальмологам в обнаружении, анализе и диагностике сложных патологий зрения (особенно на ранних стадиях заболевания) и нахождении эффективных методов лечения, и в НИР выполняемых на кафедре ПМИИ по грантам РФФИ: проект РФФИ № 17-07-00553\_а (НИР МЭИ № 3016170), проект РФФИ № 18-29-03088 \_мк (НИР МЭИ № 3026180), проект РФФИ № 14-01-00427\_а (НИР МЭИ № 3027140).

7. Разработанные программные средства «Программный комплекс с интеллектуальной поддержкой принятия решений и когнитивной графикой» и «Программа для преобразования закрытого формата данных в базе данных в открытый формат с возможностью экспорта в другие программные продукты» зарегистрированы и получены свидетельства о регистрации.

## **Список литературы**

1. Пospelov D.A.. Ситуационное управление. Теория и практика. М.: Наука, 2006. 220 с.
2. О. И. Ларичев, А. И. Мечитов, Е. М. Мошкович, Е. М. Фуремс; Под ред. С. В. Емельянова. Выявление экспертных знаний. М.: Наука, 1989. 128 с.
3. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект: Стратегии и методы решения сложных проблем. М.: Вильямс, 2003. 863 pp.
4. Lindsay, Robert K and Buchanan, Bruce G and Feigenbaum, Edward A and Lederberg, Joshua. DENDRAL: a case study of the first expert system for scientific hypothesis formation // Artificial intelligence. 1993. Vol. 61. No. 2. pp. 209-261.
5. Еремеев, АП и Голенков, ВВ. РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ // ГИБРИДНЫЕ И СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, 2018. С. 10-17.
6. Ткачёва Т.В. Разработка программно-информационного комплекса ведения больного с травматической отслойкой сетчатки: диссертация кандидата медицинских наук. Москва: Место защиты: ФГУ "Московский научно-исследовательский институт глазных болезней", 2011. 119 с.
7. Кански Д. Клиническая офтальмология: систематизированный подход. Москва: Логосфера, 2006. 744 с.
8. Chen, Zhiqiang and Deng, Shengcai and Chen, Xudong and Li, Chuan and Sanchez, Rene-Vinicio and Qin, Huafeng. Deep neural networks-based rolling bearing fault diagnosis // Microelectronics Reliability, No. 75, 2017. pp. 327-333.
9. Zikopoulos, Paul and Eaton, Chris and others. Understanding big data: Analytics for enterprise class hadoop and streaming data. McGraw-Hill Osborne Media, 2011.

10. Von Ahn, Luis and Maurer, Benjamin and McMillen, Colin and Abraham, David and Blum, Manuel. *recaptcha: Human-based character recognition via web security measures* // *Science*, Vol. 321, No. 5895, 2008. pp. 1465-1468.
11. Колосов, ОС, Еремеев, АП, Пронин, АД, Антохин, СН, Антохина, ЕС, Короленкова, ВА, Титова, ОД, Зуева, МВ, Цапенко, ИВ. Пополнение базы признаков патологий сетчатки глаза путем обработки ритмических электроретинограмм для диагностики методами искусственного интеллекта // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации, 2017. С. 192-193.
12. Ройзензон Г. В.. Способы снижения размерности признакового пространства для описания сложных систем в задачах принятия решений // Новости искусственного интеллекта, № 1, 2005. С. 18–28.
13. Sauvola, Jaakko and Pietikainen, Matti. Adaptive document image binarization // *Pattern recognition*, Vol. 33, No. 2, 2000. pp. 225-236.
14. Perez, Luis and Wang, Jason. The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning // Perez, Luis and Wang, Jason, 2017.
15. Xiaodong Cui ; Vaibhava Goel ; Brian Kingsbury. Data Augmentation for Deep Neural Network Acoustic Modeling // *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, T. 23, № 9, Sep. 2015. С. 1469 - 1477.
16. Wang, Jason and Perez, Luis and others. The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning // *Convolutional Neural Networks Vis. Recognit*, No. 11, 2017.
17. Рыбина Г.В., Дейнеко А.О. Распределенное приобретение знаний для автоматизированного построения интегрированных экспертных систем // Искусственный интеллект и принятие решений, № 4, 2010. С. 55-62.
18. Chandola, V., Banerjee, A., and Kumar, V. Anomaly detection: A survey // *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Vol. 41, No. 3, July 2009. P. 58.
19. Обзор методов классификации в машинном обучении с помощью Scikit-Learn [Электронный ресурс] // TProger: [сайт]. [2019]. URL: <https://>

20. Осипов Г.С. Методы искусственного интеллекта. 2-е-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 296 с.
21. Weinberger, K. Q., Blitzer, J., & Saul, L. K.. Distance metric learning for large margin nearest neighbor classification // Advances in neural information processing systems, 2006. pp. 1473-1480.
22. Schlkopf B, Smola AJ, Bach F. Learning with kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond // The MIT Press, No. 5, Jun 2018.
23. Safavian SR, Landgrebe D. A survey of decision tree classifier methodology // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 21, No. 3, May 1991. P. 74.
24. Breiman L. Random forests // Machine learning, Vol. 45, No. 1, Oct 2001. pp. 5-32.
25. Rish I. An empirical study of the naive Bayes classifier // InIJCAI 2001 workshop on empirical methods in artificial intelligence, Vol. 3, No. 22, Aug 2001. pp. 41-46.
26. Ye J, Janardan R, Li Q. Two-dimensional linear discriminant analysis // Advances in neural information processing systems, 2005. pp. 1569-1576.
27. Kleinbaum, David G., et al. Logistic regression. New York: Springer-Verlag, 2002.
28. Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, and Geoffrey E Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks // In Advances in neural information processing systems, 2012. pp. 1097–1105.
29. Goodfellow, Ian, Yoshua Bengio, and Aaron Courville. Deep learning. MIT press, 2016.
30. Открытый курс машинного обучения. Тема 7. Обучение без учителя: PCA и кластеризация [Электронный ресурс] // Хабр: [сайт]. [2017]. URL:

31. Arora, Preeti, and Shipra Varshney. Analysis of k-means and k-medoids algorithm for big data // Procedia Computer Science, № 78 , 2016. C. 507-512.
32. Dueck, Delbert, and Brendan J. Frey. Non-metric affinity propagation for unsupervised image categorization. // IEEE 11th International Conference on Computer Vision, 2007.
33. Демидова, Л. А., Р. В. Тишкин, и А. А. Юдаков. Разработка ансамбля алгоритмов кластеризации на основе матриц подобия меток кластеров и алгоритма спектральной факторизации // ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, No. 9, 2013.
34. Yang, Jianwei, Devi Parikh, and Dhruv Batra. Joint unsupervised learning of deep representations and image clusters // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.
35. Сост. Е. С. Панкратова, В. К. Финн. Автоматическое порождение гипотез в интеллектуальных системах. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 528 с.
36. Редько, Владимир Георгиевич. Модели адаптивного поведения-биологически инспирированный подход к искусственному интеллекту // Искусственный интеллект и принятие решений, № 2, 2008. С. 11-23.
37. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В.. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. 2-е изд., испр. и доп.-е изд. ФИЗМАТЛИТ, 2008. 712 с.
38. Вагин В.Н.. Знания и убеждения в интеллектуальном анализе данных. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 536 с.
39. Аверкин, АН и Аграфонова, ТВ и Титова, НВ. Системы поддержки принятия решений на основе нечетких моделей // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2009. № 1. С. 89-100.
40. Афанасьева, АО и Варшавский, ПР. Методы когнитивной графики как средство образного представления информации для систем поддержки

принятия решений // Организационный комитет конференции: Сопредседатели оргкомитета, 2018. С. 39.

41. Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика. Москва: Наука, 1991.
42. Markov K, Bakoev V., Mitov L. Information interaction with multi-dimensional text information objects. София: Математика и математическое образование, 1988. 465-469 pp.
43. Варга Б., Димель Ю., Лопариц Э. Язык, музыка, математика. Москва: Мир, 1981.
44. Вертгеймер М. Продуктивное мышление. Москва: Прогресс, 1987.
45. Боумен У. Графическое представление информации. Москва: Мир, 1971.
46. Поспелов Д.А. Десять «горячих точек» в исследованиях по искусственному интеллекту // Интеллектуальные системы, №. 1-4, 1996. pp. 47-56.
47. Перцова Н.Н., Зенкин А.А. Когнитивная визуализация идеи времени Велимира Хлебникова // Сборник Национальной конференции международным участием "Искусственный интеллект-94" (КИИ-94). Рыбинск. 1994. pp. 112-418.
48. Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика: некоторые вопросы методологии применения в интеллектуальных системах // Сборник национальной конференции с международным участием "Искусственный интеллект-94" (КИИ-94). Рыбинск. 1994. pp. 100-105.
49. Башлыков А.А., Еремеев А.П. Основы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений в атомной энергетике: учебник. Москва: ИНФРА-М, 2017. 351 pp.
50. Инфоурок. Процесс появления яблока. // <https://infourok.ru>. 2020. URL: <https://infourok.ru> (дата обращения: 17.Мая.2020).
51. Набор геометрических фигур // <http://www.litceysel.ru/amdb.html>. 2020. URL: <http://www.litceysel.ru/amdb.html> (дата обращения: 15.Май.2020).
52. Man5ON. Создание материалов для стула Барселона // Рендер.py. 2015. URL: <http://render.ru/book/3467> (дата обращения: 17.Май.2020).

53. Heidelberg Engineering. The Core DNA of SPECTRALIS: Precisely Segment and Visualize the Retinal Layers // Heidelberg Engineering. 2015. URL: <https://business-lounge.heidelbergengineering.com/jp/en/news/news/the-core-dna-of-spectralis-precisely-segment-and-visualize-the-retinal-layers-19330566> (дата обращения: 17.Май.2020).
54. Аверкин, АН, Кузнецов, ОП, Кулинич, АА, Титова, НВ. Поддержка принятия решений в слабо структурированных предметных областях. Анализ ситуаций и оценка альтернатив // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2006. № 3. С. 139-149.
55. Анисимов Д.Н., Вершинин Д.В., Колосов О.С., Хрипков А.В., Зуева М.В., Цапенко И.В. Использование подстраиваемой динамической модели сетчатки глаза в компонентном анализе для диагностики патологий методами искусственного интеллекта // Вестник МЭИ. 2008., № 5, 2008. С. 70-74.
56. Гаврилова Т. А., Кудрявцев Д. В., Муромцев Д. И.. Инженерия знаний. Модели и методы: Учебник. СПб.: Лань, 2016. 324 с.
57. TOMEY GmbH TECHNOLOGY AND VISION. Tomey GmbH - EP-1000 PRO // Tomey GmbH. URL: <https://tomey.de/en/ep-1000-pro> (дата обращения: 22.июнь.2020).
58. David E. Sanger. NEW ANSA PROGRAM STIRS HIGH HOPES // The New York Times. September 23 1985,. pp. Section D, Page 4.
59. Corel WordPerfect Office X4 Service Pack Now Available // PRWeb. 2005. URL: <https://www.prweb.com/releases/wordperfectofficex4/servicepack1/prweb1703464.htm> (дата обращения: 22.июнь.2020).
60. leonhad/paradoxdriver: Paradox JDBC type 4 Driver [Электронный ресурс] // GitHub: [сайт]. [2019]. URL: <https://github.com/leonhad/paradoxdriver> (дата обращения: 22.июнь.2020).

61. A. Netz ; S. Chaudhuri ; U. Fayyad ; J. Bernhardt. Proceedings 17th International Conference on Data Engineering // Integrating data mining with SQL databases: OLE DB for data mining. 2001. pp. 379-387.
62. Ghanem, Thanaa M., and Walid G. Aref. Databases deepen the web // Computer. 2004. Vol. 37. No. 1. pp. 116-117.
63. SweetScape Software. 010 Editor - Pro Text/Hex Editor | Edit 80+ Formats | Fast & Powerful // SweetScape Software. 2020. URL: <https://www.sweetscape.com/010editor/> (дата обращения: 2020.июнь.2020).
64. Naresh Kumar Gundla, Zhengxin Chen. Creating NoSQL Biological Databases with Ontologies for Query Relaxation // Procedia Computer Science, Vol. 91, 2016. pp. 460-469.
65. Еремеев А.П., Хазиев Р.Р., Зуева М.В., Цапенко И.В. Прототип диагностической системы поддержки принятия решений на основе интеграции байесовских сетей доверия и метода Демпстера-Шефера // Программные продукты и системы, № 1, 2013. С. 11-16.
66. Еремеев А.П., Ивлиев С.А. Анализ и диагностика сложных патологий зрения на основе вейвлет-преобразований и нейросетевого подхода // Сборник научных трудов VIII Международной научно-технической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» (Коломна, 18-20 мая 2015 г.). Москва. 589-595. Vol. 2. P. 2015.
67. Анисимов Д.Н., Вершинин Д.В., Колосов О.С., Зуева М.В., Цапенко И.В. Диагностика текущего состояния динамических объектов и систем сложной структуры методами нечеткой логики с использованием имитационных моделей // Искусственный интеллект и принятие решений, № 3, 2012. С. 39-50.
68. Ясницкий Л.Н., Думлер А.А., Богданов К.В., Полещук А.Н., Черепанов Ф.М., Макурина Т.В., Чугайнов С.В. Диагностика и прогнозирование

течения заболеваний сердечно-сосудистой системы на основе нейронных сетей // Медицинская техника, № 3, 2013. С. 42-44.

69. Ioannis Kavakiotis, Olga Tsave, Athanasios Salifoglou, Nicos Maglaveras, Ioannis Vlahavas, Ioanna Chouvarda. Machine Learning and Data Mining Methods in Diabetes Research // Computational and Structural Biotechnology Journal, Vol. 15, 2017. pp. 104-116.
70. Jay Urbain. Mining heart disease risk factors in clinical text with named entity recognition and distributional semantic models // Journal of Biomedical Informatics, Vol. 58, December 2015. pp. 143-149.
71. Podder P.A.K.T.Z.A.K.M.H.A.R.M.M. Comparative performance analysis of hamming, hanning and blackman window // International Journal of Computer Applications, Vol. 96, No. 18, 2014.
72. Selesnick, Ivan W and Burrus, C Sidney. Generalized digital Butterworth filter design // Selesnick, Ivan W and Burrus, C Sidney, Vol. 46, No. 6, 1998. pp. 1688-1694.
73. Li, Hongqiang and Yuan, Danyang and Ma, Xiangdong and Cui, Dianyin and Cao, Lu. Genetic algorithm for the optimization of features and neural networks in ECG signals classification // Scientific reports, Vol. 7, 2017. P. 41011.
74. Automated seizure detection using limited-channel EEG and non-linear dimension reduction. Automated seizure detection using limited-channel EEG and non-linear dimension reduction // Computers in biology and medicine, No. 82, 2017. pp. 49-58.
75. Wen, Tingxi and Zhang, Zhongnan. Deep convolution neural network and autoencoders-based unsupervised feature learning of EEG signals // IEEE Access, Vol. 6, 2018. pp. 25399-25410.
76. Daubechies I. Orthogonal bases of compactly supported wavelets // Communications in Pure and Applied Mathematics, Vol. 61, No. 7, 1988. pp. 909-996.

77. Donoho D.L. Nonlinear wavelet methods for recovery of signals, densities, and spectra from indirect and noisy data // Proceedings of Symposia in Applied Mathematics, 1993. pp. 173–205.
78. Daubechies I. Where do wavelets come from? – A personal point of view. // Proceedings of the IEEE, Special Issue on Wavelets , Vol. 84, No. 4, April 1996. pp. 510–513.
79. Sundararajan, D. Discrete wavelet transform: a signal processing approach. John Wiley & Sons, 2016.
80. A new optimal feature selection algorithm for classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and probabilistic neural network. Khokhar, Suhail and Zin, Abdullah Asuhaimi Mohd and Memon, Aslam Pervez and Mokhtar, Ahmad Safawi // Measurement, Vol. 95, 2017. pp. 246-259.
81. Goldberger AL, Amaral LAN, Glass L, Hausdorff JM, Ivanov PCh, Mark RG, Mietus JE, Moody GB, Peng C-K, Stanley HE. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals // Circulation, No. 101(23), 2003. pp. 215-220.
82. Антохин С.Н., Горбикова Е.С., Еремеев А.П., Колосов О.С. Специфика обработки ритмических электроретинограмм для использования в системах диагностики патологий сетчатки глаза // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика, 2017. С. 293.
83. R. Barraco, D. Persano Adorno, M. Brai, L. Tranchina. A comparison among different techniques for human ERG signals // Physica Medica, No. 30, 2014. pp. 86-95.
84. Yüksel Özbaya, Rahime Ceylanb, Bekir Karlikc. Integration of type-2 fuzzy clustering and wavelet transform in a neural network based ECG classifier // Expert Systems with Applications, T. 38, № 1, Январь 2011. С. 1004-1010.
85. Борисов, Вадим Владимирович, Круглов, ВВ, Федулов, АС. Нечеткие модели и сети. Монография. Горячая линия-Телеком, 2012.

86. Редько, Владимир Георгиевич. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюц. кибернетики. М.: УРСС, 2005.
87. Pal, SK and Mitra, S. Multilayer perceptron, fuzzy sets, and classification // IEEE transactions on neural networks, Vol. 3, No. 5, 1992. P. 683.
88. Круглов, Владимир Васильевич и Борисов, ВВ. Искусственные нейронные сети. Теория и практика // Горячая линия--Телеком. 2001. No. 382.
89. Guo, Mou-Fa and Zeng, Xiao-Dan and Chen, Duan-Yu and Yang, Nien-Che. Deep-learning-based earth fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems // IEEE Sensors Journal, Vol. 18, No. 3, 2017. pp. 1291-1300.
90. Bishop, Christopher M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006.
91. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов. М.: Наука, 1974.
92. Liefeng Bo, Xiaofeng Ren, and Dieter Fox. Unsupervised feature learning for rgb-d based object recognition // Experimental Robotics, 2013. pp. 387–402.
93. E.R. Davies. Computer Vision (Fifth Edition) Principles, Algorithms, Applications, Learning. 2018. 453–493 pp.
94. Alwakeel, Mohammed and Shaaban, Zyad. Face recognition based on Haar wavelet transform and principal component analysis via Levenberg-Marquardt backpropagation neural network // European Journal of Scientific Research, Vol. 42, No. 1, 2010. pp. 25-31.
95. Tsareva, Anna V and Alekseev, Vladimir V and Pimenov, Dmitriy V and Tokareva, Irina A. The Choice of the Wavelet Filter Parameters in Tasks of Determining Characteristics of a Signal // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICONRUS), 2020. pp. 917-920.
96. Zhang, Dengsheng. Wavelet transform // In: Fundamentals of Image Data Mining. Springer. pp. 35-44.

97. Pathak, RS and Singh, Abhishek. Mexican hat wavelet transform of distributions // Integral Transforms and Special Functions, Vol. 27, No. 6, 2016. pp. 468-483.
98. Austen-Smith, David and Banks, Jeffrey S. Information aggregation, rationality, and the Condorcet jury theorem // American political science review, Vol. 90, No. 1, 1996. pp. 34-45.
99. Jain, Brijnesh. Condorcet's jury theorem for consensus clustering // In: Joint German/Austrian Conference on Artificial Intelligence (Kunstliche Intelligenz). 2018. pp. 155-168.
100. Schlemper, Jo and Caballero, Jose and Hajnal, Joseph V and Price, Anthony N and Rueckert, Daniel. A deep cascade of convolutional neural networks for dynamic MR image reconstruction // IEEE transactions on Medical Imaging, Vol. 37, No. 2, 2017. pp. 491-503.
101. Hsu, Chih-Chung and Lin, Chia-Wen. Cnn-based joint clustering and representation learning with feature drift compensation for large-scale image data // IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 20, No. 2, 2017. pp. 421-429.
102. А.Н. Аверкин, М.Г. Гаазе-Рапопорт, Д.А. Поспелов. Толковый словарь по искусственному интеллекту. Москва: Радио и связь, 1992. 256 с.
103. Стюарт Рассел, Питер Норвиг. Искусственный интеллект. Современный подход. 2nd ed. Москва: Изд. Дом «Вильямс», 2006. 1408 pp.
104. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2000.
105. Zohreh Goli-malekabady, Mohammad kazem Akbari-fatidahi, Morteza Sargozaei-javan. An effective model for store and retrieve big health data in cloud computing // Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 132, 2016. pp. 75-82.
106. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: прин-ципы разработки и программирование. Москва: Вильямс, 2007.
107. Еремеев А.П., Куриленко И.Е., Смирнова А.Е. Разработка темпорального расширения методов рассуждений на основе прецедентов // Труды

- конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS&IT'11). Москва. 2011. Vol. 1. pp. 50–59.
108. Еремеев А.П. Логика ветвящегося времени и ее применение в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Сб. тр. 10-й Нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. уч. КИИ-2006. В 3-х т.. Москва. 2006. Т. 3. С. 746–754.
  109. Ken Ka-Yin Leea, Wai-Choi Tangb,1, Kup-Sze Choia. Alternatives to relational database: Comparison of NoSQL and XML approaches for clinical data storage // Computer methods and programs in biomedicine, No. 110 (1), April 2013. pp. 99-109.
  110. Козлов И. А. Анализ и классификация нереляционных баз данных // Молодежный научно-технический вестник, No. 2, февраль 2013. pp. 23-30.
  111. Ralf Lämmel. Google's MapReduce programming model — Revisited // Science of Computer Programming, Vol. 70, No. 1, January 2008. pp. 1-30.
  112. Mongo Inc. The most popular databse for modern apps [Электронный ресурс] // Mongo DB official site: [сайт]. [2020]. URL: <https://www.mongodb.com/> (дата обращения: 17.Май.2020).
  113. Free Software Foundation. GNU Affero General Public License // GNU Project - Free Software Foundation. 2007. URL: <https://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.en.html> (дата обращения: 23.Июнь.2020).
  114. Bradshaw, Shannon and Brazil, Eoin and Chodorow, Kristina. MongoDB: The Definitive Guide: Powerful and Scalable Data Storage. O'Reilly Media, 2019.
  115. Bootstrap. The most popular HTML, CSS, and JS library in the world. [Электронный ресурс] // Bootstrap official site: [сайт]. [2020]. URL: <https://getbootstrap.com/> (дата обращения: 17.Май.2020).
  116. Google. Charts | Google Developers // Google Developers. 2020. URL: <https://developers.google.com/chart> (дата обращения: 23.Июнь.2020).
  117. Dove, Graham and Halskov, Kim and Forlizzi, Jodi and Zimmerman, John. UX design innovation: Challenges for working with machine learning as a design

- material // Proceedings of the 2017 chi conference on human factors in computing systems, 2017. pp. 278-288.
118. MathWorks. Neural Net Pattern Recognition tool - MATLAB nprtool // MATLAB nprtool. 2020. URL: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/nprtool.html;jsessionid=0d440c9375dcad3ce5f8e61ab7f7> (дата обращения: 23.Июнь.2020).
  119. Taud, H and Mas, JF. Multilayer perceptron (MLP) // Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios, 2018. pp. 451-455.
  120. Mirjalili, Seyedali. Evolutionary multi-layer perceptron. Springer, 2019. 87-104 pp.
  121. TensorFlow MainPage [Электронный ресурс] // TensorFlow: [сайт]. [2020]. URL: <https://www.tensorflow.org/> (дата обращения: 23.июнь.2020).
  122. Google. tf.keras.layers.Conv2D // TensorFlow Core v2.2.0. 2020. URL: [https://www.tensorflow.org/api\\_docs/python/tf/keras/layers/Conv2D](https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/layers/Conv2D) (дата обращения: 23.Июнь.2020).
  123. Keras Community. Pooling layers // Keras. 2020. URL: [https://keras.io/api/layers/pooling\\_layers/](https://keras.io/api/layers/pooling_layers/) (дата обращения: 23.Июнь.2020).
  124. Keras Community. Dropout layer // Keras. 2020. URL: [https://keras.io/api/layers/regularization\\_layers/dropout/](https://keras.io/api/layers/regularization_layers/dropout/) (дата обращения: 23.Июнь.2020).
  125. Keras Community. Dense // Keras. 2020. URL: [https://keras.io/api/layers/core\\_layers/dense/](https://keras.io/api/layers/core_layers/dense/) (дата обращения: 23.Июнь.2020).
  126. Chen, Zhuo and Luo, Yi and Mesgarani, Nima. Deep attractor network for single-microphone speaker separation // 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2017. pp. 246-250.
  127. Choi, Joon Yul and Yoo, Tae Keun and Seo, Jeong Gi and Kwak, Jiyong and Um, Terry Taewoong and Rim, Tyler Hyungtaek. Multi-categorical deep learning neural network to classify retinal images: A pilot study employing small database // PloS one, Vol. 12, No. 11, 2017. P. e0187336.

128. Fu, Huazhu and Xu, Yanwu and Wong, Damon Wing Kee and Liu, Jiang. Retinal vessel segmentation via deep learning network and fully-connected conditional random field // 2016 IEEE 13th international symposium on biomedical imaging (ISBI), 2016. pp. 698-701.
129. Петер Флах. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК, 2015. 400 с.
130. База данных РОХМиНЭ [Электронный ресурс] // Российское общество холтеровского мониторирования и неинвазивной электрофизиологии: [сайт]. [2020]. URL: <http://rohmine.org/baza-dannykh-rohmine/> (дата обращения: 17.май.2020).
131. Acharya, U Rajendra and Fujita, Hamido and Lih, Oh Shu and Hagiwara, Yuki and Tan, Jen Hong and Adam, Muhammad. Automated detection of arrhythmias using different intervals of tachycardia ECG segments with convolutional neural network // Information sciences, Vol. 405, 2017. pp. 81-90.
132. Lu W.A.X.J.A.G.S.A.S.J.A.H.L. SYSTEM AND METHOD FOR IDENTIFYING CARDIAC ARRHYTHMIAS WITH DEEP NEURAL NETWORKS, US Patent App. 16/210,688, 2020.
133. Visa, Sofia and Ramsay, Brian and Ralescu, Anca L and Van Der Knaap, Esther. Confusion Matrix-based Feature Selection // MAICS, Vol. 710. pp. 120-127.
134. PhysioNet. MIT-BIH Arrhythmia Database // PhysioNet. 2005. URL: <https://www.physionet.org/content/mitdb/1.0.0/> (дата обращения: 23.Июнь.2020).
135. Kaggle. Kaggle Diabetic Retinopathy Detection Training Dataset (DRD) // AcademicTorrents. 2020. URL: <http://academictorrents.com/details/08c244595c6cc4ec403b21023cf99c2b085cbc72> (дата обращения: 2020.Июнь.2020).
136. Encyclopædia Britannica, Inc. Differential diagnosis | medicine | Britannica // Encyclopedia Britannica. 2020. URL: <https://www.britannica.com/science/differential-diagnosis> (дата обращения: 2020.Май.15).

137. Цапенко И.В.. Электрофизиологические исследования в диагностике заболеваний сетчатки и зрительного нерва (I). Москва: ФГУ «МНИИ глазных болезней им. Г. Гельмгольца Минздрава России», 2017.
138. Егоров Е.А., Епифанова Л.М. Глазные болезни. Учебник. Москва: Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2012.
139. Зуева М.В., Цапенко И.В., Колосов О.С., Вершинин Д.В., Короленкова В.А., Пронин А.Д. Амплитудно-частотные характеристики сетчатки при диффузной и паттерн-стимуляции и новые формализованные признаки ритмической и паттерн-электроретинограмм // Вестник офтальмологии, № 135 (6), 2019. С. 17-26.
140. М. В. Зуева. Фундаментальная офтальмология: роль электрофизиологических исследований // Вестник офтальмологии, № 130 (6), 2014. С. 28-36.
141. Шамшинова, А. М. Электроретинография в офтальмологии. Москва: Медика, 2009. 309 с.
142. С.Э. Аветисов, Т.П. Кащенко, А.М. Шамшинова. Зрительные функции и их коррекция у детей. Москва: Медицина, 2005. 873 с.
143. Хусейнович Д.А. Миопия глаза - лечение и степени (слабая, средняя и высокая) // Сайт про глаза и их заболевания: про диагностику, лечение и профилактику. 2015. URL: <http://proglaza.ru/bolezniglaz/miopiya-glaza-lechenie-stepeni-slabaya-srednaya-visokaya.html> (дата обращения: 15.Май.2020).
144. H Kawabata, E Adachi-Usami. Multifocal electroretinogram in myopia. // Investigative Ophthalmology & Visual Science, No. 38, December 1997. pp. 2844-2851.
145. Hidehito Kawabata, Emiko Adachi-Usami. Electrophysiological Changes in Photopic Function in Myopia // Myopia Updates; Proceedings of the 6th International Conference on Myopia. Tokyo. 1998. pp. 388-393.

146. Encyclopædia Britannica, Inc. Detached retina | eye disorder | Britannica // Encyclopedia Britannica. 2020. URL: <https://www.britannica.com/science/detached-retina> (дата обращения: 15.Май.2020).
147. Шадричев, Ф. Е.. Диабетическая ретинопатия (взгляд офтальмолога) // Сахарный диабет, № 3, 2008.
148. Шадричев, Ф. Е., Астахов, Ю. С., Крянева, О. Я., & Лисочкина, А. Б. Диабетическая ретинопатия. Современная оптометрия // Современная оптометрия, Apr 2008. C. 36.
149. Дедов ИИ, Смирнова ОМ.. Диабетическая ретинопатия: современные проблемы (взгляд диабетолога) // Сахарный диабет, No. 3, 2008.
150. Borisagar, Komal R and Thanki, Rohit M and Sedani, Bhavin S. Fourier Transform, Short-Time Fourier Transform, and Wavelet Transform // Speech Enhancement Techniques for Digital Hearing Aids, 2019. pp. 63-74.

## Приложения

*Приложение 1. Свидетельства о регистрации программного продукта и акты о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы.*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2019660564**

### Программный комплекс с интеллектуальной поддержкой принятия решений и когнитивной графикой

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
(ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ») (RU)*

Авторы: *Ивлиев Сергей Андреевич (RU),  
Еремеев Александр Павлович (RU)*

Заявка № 2019619218

Дата поступления 24 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 августа 2019 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





14.09.2020 № 1450/2020

**УТВЕРЖДАЮ**

Зам. директора по научной работе  
ФГБУ «НМИЦ ГБ им. Гельмгольца»  
проф. д.м.н. Катарина Л.А.



2020

**МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
ГЛАЗНЫХ БОЛЕЗНЕЙ  
ИМЕНИ ГЕЛЬМГОЛЬЦА»  
(ФГБУ «НМИЦ ГБ им. Гельмгольца»  
Минздрава России)**

Ул. Садовая-Черногрязская, д. 14/19,  
г. Москва, 105062  
Телефон: +7 (495) 623-41-61  
Факс: (495) 632-95-89  
e-mail: info@igb.ru  
<http://www.igb.ru>

ОГРН 1037739298167 ИНН 7701031585

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

**результатов научной и инновационной деятельности**

- Автор внедрения: Ивлиев Сергей Андреевич, ассистент кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта ФБГОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ».
- Источник предложения: диссертационная работа Ивлиева С.А. «Методы и алгоритмы интеллектуального анализа данных о сложных проблемных ситуациях с использованием нейросетевого подхода» на соискание ученой степени кандидата технических наук.
- Объект внедрения: методы, алгоритмы и базовые программные средства для формализации предметной области, предварительной обработки поступающей из различных источников информации с ее последующим интеллектуальным анализом с применением онтологии, глубинных искусственных нейронных сетей и когнитивной графики, использованные в разработках, выполняемых совместно отделом клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова ФГБУ «НМИЦ ГБ им. Гельмгольца» МЗ РФ и кафедрами Прикладной математики и искусственного интеллекта и Управления и интеллектуальных технологий ФБГОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФБГОУ ВО «НИУ «МЭИ») по созданию прототипа интеллектуальной (экспертной) системы поддержки принятия решений для помощи врачам-офтальмологам.
- Наименование организации, где используются материалы: ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца» МЗ РФ (105062, Москва, Садовая-Черногрязская д. 14/19, e-mail: [info@igb.ru](mailto:info@igb.ru), тел./факс: +7(495)632-95-89)
- Дата начала внедрения: 28 февраля 2020 года
- Заключение: Прототип интеллектуальной системы поддержки принятия решений предназначен для помощи врачам-офтальмологам в ранней и дифференциальной диагностике заболеваний сетчатки. Экспертная система повышает эффективность обнаружения патологии, имеет значение для обоснования новых методов лечения и обучения молодых специалистов.

Начальник отдела клинической  
физиологии зрения им. С.В. Кравкова

проф., д.б.н. Зуева М.В.

Ответственный за внедрение:  
ст. научный сотрудник отдела

к.б.н. Цапенко И.В.

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор –

проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

В.Н. Замолодчиков

2020 г.

**А К Т**

об использовании результатов диссертационной работы Ивлиева С.А. на тему «МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ О СЛОЖНЫХ ПРОБЛЕМНЫХ СИТУАЦИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационной работы Ивлиева С.А. «Методы и алгоритмы интеллектуального анализа данных о сложных проблемных ситуациях с использованием нейросетевого подхода» в учебно-научном процессе кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта (ПМИИ) НИУ «МЭИ» по направлению «Прикладная математика и информатика» (программа «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей») в рамках подготовки бакалавров (01.03.02) и магистров (01.04.02) при проведении учебных занятий по дисциплинам «Основы искусственного интеллекта», «Теория принятия решений», «Экспертные системы», «Методы и программные средства поддержки принятия решений», а также в НИР, выполняемых на кафедре ПМИИ по разработке методов, алгоритмов и программных средств для интеллектуального анализа данных и поиска решения с применением нейронных сетей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений.

Заведующий кафедрой ПМИИ  
к.т.н., доцент

Варшавский П.Р.

Зам. заведующего кафедрой ПМИИ по учебной работе  
к.т.н., доцент

Маран М.М.

Зам. заведующего кафедрой ПМИИ по научной работе  
к.т.н., доцент

Чернецов А.М.

## **Приложение 2. Дополнительный анализ области диагностики патологий зрения**

### **1. Анализ состояния предметной области и процессов в ней**

Дифференциальная диагностика в медицине [136] — способ диагностики, исключающий не подходящие по каким-либо фактам или симптомам заболевания, возможные у больного, что в конечном счёте должно свести диагноз к единственному вероятной болезни.

Дифференциальную диагностику в медицине можно разделить на три этапа:

- **на первом этапе** производится сбор анамнеза заболевания, то есть тщательное изучение истории данного заболевания у больного, выяснения причин его появления. Причины, как правило, у каждого заболевания свои, но у различных болезней причины могут быть одни и те же.
- **на втором этапе** проводится осмотр больного и выявляется симптоматика. Это самый главный этап дифференциальной диагностики.
- **третий этап** дифференциальной диагностики является заключительным. Сюда входит лабораторные и инструментальные исследования для подтверждения правильности поставленного диагноза.

Применительно к проблеме диагностики патологий зрения задача дифференциальной диагностики глазных болезней при помощи нейросетевого подхода заключается в исполнении третьего этапа, то есть проведение лабораторных и инструментальных исследований для точного установления заболевания.

#### ***Выделение основных сущностей предметной области на основе консультации с экспертами***

*Человеческий глаз (oculus) - парный орган зрения, состоящий из глазного яблока и вспомогательного аппарата. Глазное яблоко - часть глаза, представляющая собой сферическое образование, расположенное в глазнице и состоящее из трех оболочек: фиброзной, сосудистой и сетчатки; внутри глазного яблока находится*

водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело. Для анализа патологий зрения будет рассматриваться именно последняя оболочка.

*Сетчатка* – внутренняя чувствительная оболочка глаза, толщиной около 0,4 мм. В структуре сетчатки выделяют десять слоев, в которых располагаются нейроны и глиальные клетки сетчатки. Сосуды обеспечивают обменные процессы между слоями и функционирование различных клеток сетчатки. Палочки и колбочки, или как их еще называют фоторецепторы, трансформируют свет в электрический импульс. Кроме того, наличие трех видов колбочек, воспринимающих световые волны различной длины волны (красной, синей, зеленой), позволяет различать цвета и их оттенки.

Больше всего времени при осмотре пациента врач-офтальмолог уделяет обследованию сетчатой оболочки глаза. В ней содержится наиболее ценная и важная информация, с помощью которой возможно поставить диагноз. При проведении исследований всегда проверяют оба глаза, поскольку клиническая картина исследований может быть различна (при записи правый глаз принято обозначать OD, а левый – OS).

Рассмотрим подробнее именно те данные, на которые обращают внимание врачи-офтальмологи МНИИ имени Гельмгольца, поскольку разрабатываемый прототип ЭС (ИСППР экспертного типа) будет применяться в одной из лабораторий этого института. Специалистами-экспертами в области офтальмологии было дано описание необходимых данных, их возможные критерии и, самое главное, как эти критерии влияют на постановку диагноза (рис. 1).



**Рис. 89 Данные, собираемые врачами-офтальмологами отдела клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова**

### Диск зрительного нерва

Аксоны ганглиозных клеток сетчатки и сопровождающие их ткани, выходя из глаза, формируют зрительный нерв. Часть нерва, находящуюся внутри глаза, диском зрительного нерва (ДЗН) [137].

По данным экспертов при рассмотрении ДЗН врач в первую очередь обращает внимание на два фактора: цвет и границы. На рис. 2. приведены основные критерии, выделяемые врачами-офтальмологами.



**Рис. 2. Основные критерии ДЗН.**

Если ДЗН имеет четкие границы и бледно-розовый цвет, то значит с данным отделом нерва все хорошо, любые другие показатели не являются нормой.

### Макула

Макула глаза – анатомическая структура сетчатки, которая обеспечивает четкое зрение и цветовое восприятие зрительного образа. Макулу также называют желтым пятном, за счет наличия пигментов [138].

На рис. 3. показаны основные критерии, которые может выделить врач-офтальмолог при осмотре пациента. По данным экспертов нормой считается значение – без очажковых изменений, любые другие показатели указывают на какое-либо заболевание.



**Рис. 3. Основные критерии макулы.**

### Острота зрения

Острота зрения – это возможность глаза видеть раздельно две точки при максимальном их сближении. Размер изображения зависит от угла зрения, который

образуется между узловой точкой глаза и 2-мя крайними точками рассматриваемого предмета [139].

Для выявления остроты зрения применяются специальные таблицы, которые состоят из отдельного ряда символов, различных по размерам, напротив каждого ряда стоят цифры.

Острота зрения принимает значения от 0.0 до 1.0, где 0.0 – это минимально возможное значение, обозначающее полное отсутствие светоощущения, а 1.0 – нормальный показатель для среднестатистического человека.

## Периферия

Периферическое зрение (боковое) – зрительное восприятие, за которое отвечают периферические отделы сетчатки. Оно помогает человеку находить нужное положение (направление) в окружающем мире, видеть в сумерках и темноте. Острота бокового обзора меньше, чем острота центрального зрения. Боковой обзор не всегда имеет определенный уровень, который дан человеку от рождения. Это восприятие можно тренировать и развивать с помощью некоторых упражнений [140].

Экспертами-офтальмологами были выделены следующие критерии, характеризующие периферию: без особенностей, дистрофические изменения, отложение пигмента (рис. 4).



Рис. 4. Основные критерии, характеризующие периферию

Кроме того, экспертами была дана краткая характеристика каждого критерия. Периферия без особенностей – норма, дистрофические изменения – это генетическая мутация, при которой с рождения у человека ограничено боковое зрение с какой-либо стороны, следовательно, проблемы со зрением у пациента

будут от рождения, а отложение пигмента – это прогрессирующее течение, влекущее за собой снижение бокового зрения, то есть болезнь развивается постепенно.

### **Поле зрения**

Поле зрения (ПЗ) — угловое пространство, видимое глазом при фиксированном взгляде и неподвижной голове.

Исследования ПЗ проводятся для оценки состояния сетчатки, зрительного нерва, диагностики глаукомы, прочих опасных заболеваний, контроля за патологическими процессами и ходом их лечения. Патологические изменения ПЗ могут быть вызваны самыми разными причинами. Эксперт-офтальмолог, несмотря на многообразие подобных изменений, условно разделил их на две большие группы: 1) очаговые дефекты поля зрения (скотомы), среди которых в свою очередь можно выделить: центральную, абсолютную и относительную; 2) сужения границ поля зрения. Изменения полей зрения при различных патологиях центральной нервной системы весьма характерны и являются важнейшими симптомами для топической диагностики заболеваний головного мозга.

### **Оптическая когерентная томография**

Метод оптической когерентной томографии (ОКТ) позволяет визуализировать структуры глаза в поперечном срезе. Разрешение этой методики очень высокое, поэтому ее сравнивают по информативности с морфологическим исследованием (при помощи микроскопа). Также механизм действия ОКТ сходен с принципом получения информации при УЗИ.

ОКТ показывает величину и глубину проникновения светового сигнала, который отражается от тканей организма, отличающихся по оптическим свойствам [140]. С помощью ОКТ метода можно определить:

- снижена или увеличена толщина слоя глиальных клеток (ТСГК);
- нарушен ли контур сетчатки или нет;
- толщину сетчатки на уровне фоторецепторов.

## **Оптическая когерентная томография диска зрительного нерва (ОКТ ДЗН)**

Физиологи при необходимости рассматривают отдельно от ОКТ сетчатки также и ОКТ ДЗН. Чаще всего это происходит при подозрении на такие патологии зрения, как: глаукома, неврит зрительного нерва и др. На рис. 5. показаны основные критерии, выделенные экспертом-офтальмологом.



**Рис. 5. Основные критерии ОКТ ДЗН**

## **2. Диагностика при помощи электроретинографии**

Дополнительно к информации, представленной в основном тексте, отметим, что различные типы ЭРГ [141,142] отражают все многообразие структуры сетчатки, а анализ ее компонентов, генерация которых связана с активностью клеточных элементов, является диагностическим инструментом, позволяющим количественно оценить степень нарушений, локализацию, глубину и распространенность патологических процессов.

Международным обществом клинических электрофизиологов зрения (ISCEV) предложены стандарты регистрации ЭРГ, рекомендуемые для исследования зрительных функций у пациентов с различными нарушениями в зрительной системе:

- максимальной ЭРГ в условиях темновой адаптации;
- палочковой ЭРГ в условиях темновой адаптации;
- простой колбочковой ЭРГ в условиях световой адаптации;
- осцилляторных биопотенциалов;
- фликер-ЭРГ при быстро повторяющемся стимуле 30 Гц в условиях световой адаптации.

**Палочковый (скотопический) ответ** — это первый сигнал, регистрируемый после завершения темновой адаптации. Если в первые минуты темновой адаптации более чувствительна колбочковая система (фотопическая ЭРГ), то после 15-й минуты темновой адаптации в ЭРГ преобладает биоэлектрическая активность палочковой системы (скотопическая ЭРГ). Поскольку палочки очень чувствительны к свету и дезадаптация происходит немедленно после освещения, в отличие от первого ответа на вспышку света последующие ответы имеют другую форму, латентность и амплитуду. Для регистрации ответа палочковой системы (скотопический ответ) ISCEV рекомендует предварительную темновую адаптацию пациента продолжительностью не менее 20 мин с целью создания стабильных условий для исследования и получения максимального скотопического ответа. Запись производят на слабую голубую или белую вспышку с энергией ниже колбочкового порога (стандартный стимул ослабляют на 2,5 лог. ед.). Минимальный интервал между стимулами 2 с. Скотопическая ЭРГ практически не имеет *a*-волны, а амплитуда *b*-волн в 2—3 раза больше, чем в фотопическом ответе сетчатки (рис 6).

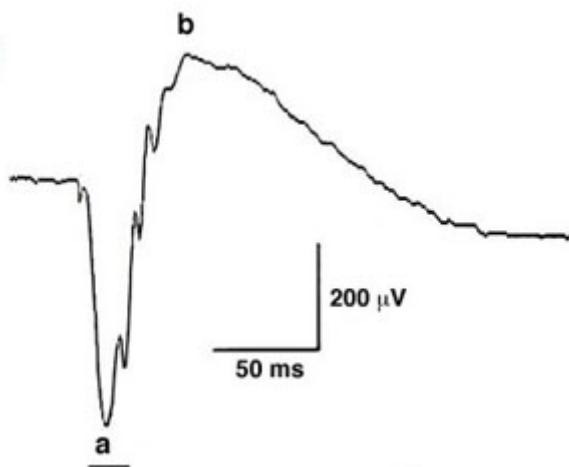


Рис. 6. *a*-волны и *b*-волны скотопической ЭРГ

**Максимальный, или смешанный, ответ**, состоящий из комбинации ответов палочковой и колбочковой систем, регистрируют при расширенном зрачке, используя стандартные стимулы интенсивностью 1,5—4 с, с интервалом 5—10 с.

ЭРГ на яркие вспышки, регистрируемая в условиях темновой адаптации, имеет большие *a*- и *b*-волны, чем скотопическая и фотопическая ЭРГ. И хотя в этих условиях участие колбочек достаточно велико, доминирует ответ палочковой системы. Ведущим компонентом максимального ответа является *a*-волна, которая отражает главным образом гиперполяризацию палочковых фоторецепторов, а склон кривой *a*-волны — кинетику фото-трансдукции. Позитивная *b*-волна генерируется после фоторецепторов, она связана с деполяризацией *on*-биполярных клеток и клеток Мюллера.

**Колбочковый, или фотопический,** ответ рекомендуется регистрировать при использовании белого стандартного стимула интенсивностью 1,5—3,0 kd x c/m<sup>2</sup> с интервалом не менее 0,5 с в фотопических условиях на светлом фоне 17—34kd c/m<sup>2</sup>, измеренном на поверхности шара. Белый или цветной фон используют для подавления активности палочковой системы. В этих условиях колбочковый ответ достаточно стабилен и может быть воспроизведен с одними и теми же параметрами. Регистрация колбочкового ответа на единичный стимул усреднения множества или нескольких ответов для улучшения соотношения полезный сигнал/шум.

Колбочковую ЭРГ регистрируют после предварительной световой адаптации не менее 10 мин, так как колбочковый ответ может увеличиваться в течение этого периода. Фотопическая колбочковая ЭРГ характеризуется низкой амплитудой волн и более быстрой латентностью, чем скотопическая. Она отражает участие гиперполяризующихся *off*-биполярных клеток в форме фотопической *a*-волны.

**Осцилляторные биопотенциалы** (ОП) представлены на ЭРГ серией волн на восходящей части *b*-волн (5-7 волночек), появляющихся после стимуляции светом большой интенсивности. Эти потенциалы низкой амплитуды возникают с частотой 100-160 Гц. В происхождении ОП принимают участие палочковые и колбочковые пути.

Представляя собой радиальный ток в сетчатке, ОП генерируются биполярными, амакриновыми (интерплексиформными) клетками и отражают взаимодействие клеточных элементов во внутренних слоях

сетчатки. В зависимости от задач исследования регистрируют ОП от темно - или светоадаптированных глаз при использовании белого стандартного стимула. Полоса пропускания должна иметь нижнюю границу 75—100 Гц и верхнюю 300 Гц. После предъявления первого стимула ОП изменяются, поэтому стимулы подаются с интервалом 15 с в условиях темновой адаптации и 1,5 с при световой адаптации. Первый сигнал удаляют, сигнал, регистрируемый после предъявления второго стимула, анализируют.

**Флиker** (мелькающая, ритмическая)-ЭРГ регистрируется после фотопической ЭРГ на белый стандартный стимул постоянной интенсивности с предъявляемой частотой 30 Гц, в фотопических условиях на светлом фоне, подавляющем палочковую активность. Флиker-ответ отражает функцию колбочковой системы сетчатки. Регистрация флиker-ЭРГ при световой адаптации уменьшает дискомфорт и позволяет стандартизировать условия фотопической адаптации. Первые ответы по форме представляют собой колбочковую ЭРГ и регистрируются в нестабильных условиях, поэтому несколько первых ответов должны быть уничтожены. Если используют нестандартные стимулы, то необходимы точные измерения, которые позволили бы приблизить используемый стимул к стандартным.

Выделение фотопической и скотопической активности в мелькающей ЭРГ основано на различной способности нейронов сетчатки воспроизводить световой ритм. Максимально возможная частота мельканий, воспроизводимая колбочками, — 50-100 Гц, палочками — 10-20 Гц. Для патологии палочковой системы характерно отсутствие ритмического ответа ЭРГ на низкие частоты при сохранности ответов на высокие частоты в фотопических условиях регистрации. При дистрофических изменениях в макулярной области мелькающая ЭРГ при предъявлении стимула с частотой 30 Гц не регистрируется.

### **Заболевания (патологии) глаза**

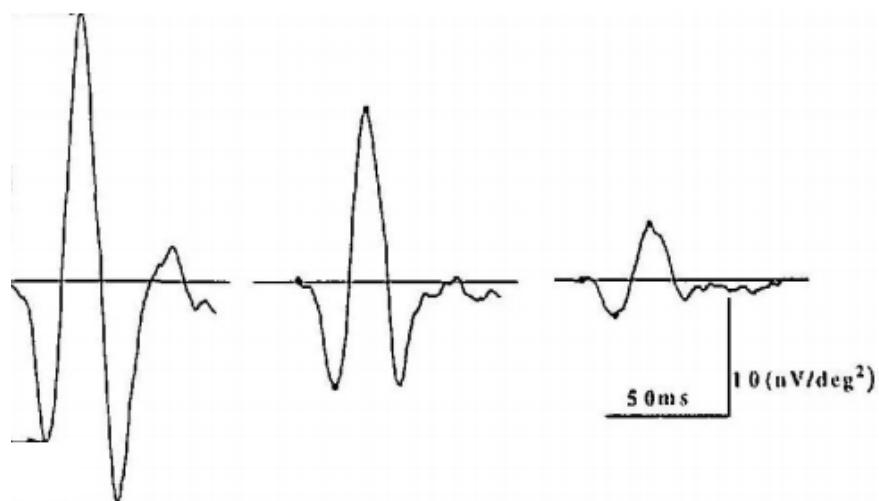
В качестве болезней для проведения дифференциальной диагностики выбраны миопия и отслоение сетчатки, так как они, как правило, имеют схожую

клиническую картину и прогрессирование миопии может привести к отслоению сетчатки. Также рассмотрены разные виды диабетической ретинопатии, диагностика которых проводится по фотографии ДЗН.

**Миопия** (близорукость) [143] – заболевание глаз, для которого характерна фокусировка изображения не на сетчатке, а перед ней. Данная патология приводит к появлению размытости и нечеткости изображения тех предметов, которые находятся вдали от человека. Данное заболевание появляется вследствие изменения размеров и формы глазного яблока. Больной глаз становится более овальным и втянутым. Сегодня миопия – достаточно распространенное заболевание, так как процент близоруких школьников составляет не менее 20%. В студенческие годы этот показатель возрастает, достигая 40%.

Симптоматика миопии выражается в снижении зрения вдали, когда все предметы кажутся расплывчатыми и нечеткими. Человек, пытаясь улучшить четкость картинки, начинает щуриться, при этом предметы, расположенные вблизи, он видит четко. Также симптомами миопии являются головные боли и зрительная утомляемость.

Согласно [144,145] главным признаком миопии является снижение амплитуды волн фотопической ЭРГ при прогрессировании болезни (рис. 7).



**Рис. 7. Изменения фотопической ЭРГ при миопии разной степени (слева направо – увеличение степени миопии)**

**Отслоение сетчатки** [146] - это процесс отделения сетчатой оболочки глаза от сосудистой оболочки. В здоровом глазу сетчатка тесно прилегает к сосудистой оболочке, от которой она получает питание. Отслойка сетчатки без своевременного хирургического лечения приводит к слепоте. Чаще всего она возникает при травмах и близорукости, а также при диабетической ретинопатии, внутриглазных опухолях, дистрофиях сетчатой оболочки и т.д.

Основная причина этого заболевания - разрывы сетчатой оболочки. Через образовавшийся разрыв жидкость из стекловидного тела проникает под сетчатку и отслаивает ее от сосудистой оболочки.

Поскольку отслоение сетчатки часто является прямым следствием миопии, то больные с миопией входят в группу риска и им требуется постоянно проводить обследование, чтобы как можно быстрее обнаружить возникающую патологию и применить необходимые методы и средства лечения, так как чем позднее будет обнаружено данное заболевание, тем меньше шансов на восстановление нормального зрения, поскольку при отслойке погибают нервные клетки, палочки и колбочки глаза.

При отслоении сетчатки фотопическая ЭРГ падает ещё сильнее и практически исчезает скачок. На рис. 8 слева представлена ЭРГ в нормальном состоянии, справа при отслоении сетчатки.

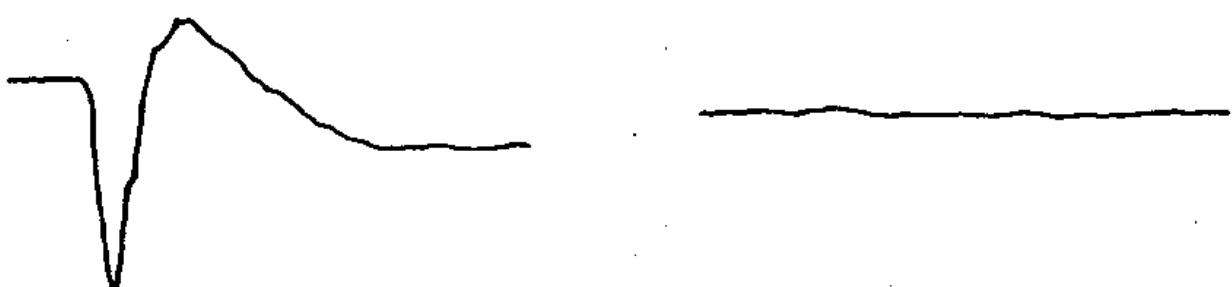


Рис. 8. ЭРГ при нормальном глазе (слева) и отслоении сетчатки (справа)

**Непролиферативная ретинопатия (диабетическая ретинопатия I)** — характеризуется наличием в сетчатой оболочке глаза патологических изменений в виде микроаневризм, кровоизлияний (в виде небольших точек или пятен окружной

формы (встречаются и штрихообразные), темного цвета, локализованные в центральной зоне глазного дна или по ходу крупных вен в глубоких слоях сетчатки), экссудативных очагов (локализующихся в центральной части глазного дна, жёлтого или белого цвета с четкими или расплывчатыми границами) и отека сетчатки. Отёк сетчатки, локализующийся в центральной (макулярной) области или по ходу крупных сосудов — важный элемент непролиферативной диабетической ретинопатии [147].

***Препролиферативная ретинопатия (диабетическая ретинопатия II)*** — характеризуется наличием венозных аномалий (чёткообразность, извитость, наличие петель, удвоение и/или выраженные колебания калибра сосудов), большим количеством твёрдых и «ватных» экссудатов, интрапаринальными микрососудистыми аномалиями (ИРМА), множеством крупных ретинальных геморрагий [148].

***Пролиферативная ретинопатия (диабетическая ретинопатия III)*** — характеризуется неоваскуляризацией диска зрительного нерва и/или других отделов сетчатой оболочки глаза, кровоизлияниями в стекловидное тело, образованием фиброзной ткани в области преретинальных кровоизлияний [149].