

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Жданов Алексей Евгеньевич

**Разработка и исследование алгоритмов анализа сигналов
электроретинограмм для поддержки принятия решения врачом**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в департаменте радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий - РТФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Доросинский Леонид Григорьевич
Официальные оппоненты: **Гольдштейн Сергей Людвигович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры технической физики Физико-технологического института;

Тельшев Дмитрий Викторович, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет)», директор Института бионических технологий и инжиниринга;

Подгорнова Юлия Анатольевна, кандидат технических наук, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», доцент кафедры информационных систем.

Защита состоится 04 июня 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.3.12.13 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=5817>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сафиуллин Николай Тахирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема сохранения зрительных функций является чрезвычайно актуальной во всем мире. По оценкам Всемирной организации здравоохранения в мире около 1,3 миллиарда человек живут с той или иной формой нарушения рефракции (М. С. Медведев, Н. П. Сетко). В связи с ростом численности и популяционным старением населения неминуемо будет возрастать риск того, что нарушения зрительных функций будут развиваться у все большего числа людей. Медицинская статистика за последние 10 лет показала, что заболевания, сопровождающиеся нарушениями сосудистых структур сетчатки зрительного анализатора, входят в первую тройку болезней, ответственных за снижение зрения и слепоту у пациентов, чей возраст превышает 50–55 лет.

Сегодня одним из наиболее информативных методов диагностики гетерогенных заболеваний, связанных с нарушениями сосудистых структур сетчатки, является электроретинография. Электроретинография представляет собой метод электрофизиологического тестирования, при котором регистрируется электрический отклик сетчатки при её стимуляции коротким импульсом света или изменением пространственной организации яркости (паттернами) (N. H. Van Schijndel). В отличие от хорошо изученных сигналов электрокардиограммы, представляющих собой продолжающуюся активность миокарда, для снятия электроретинограммы необходимо стимулировать сетчатку светом, чтобы вызвать синхронизированную активность ретинальных клеток, ведущую, таким образом, к генерации ответа электроретинограммы (M. Arai).

Степень разработанности темы. Известно большое число работ, авторы которых предпринимали попытки реализации алгоритмов анализа сигналов электроретинограмм с использованием:

- преобразования Фурье (С. W. Breslin);
- спектральной плотности мощности (К. Van der Torren);
- линейного предсказания (С. Pahl);
- оконного преобразования Фурье (Р. J. Durka);
- вейвлет-анализа (Н. Ahmadiéh);
- разреженной аппроксимации (К. Penkala);
- энтропии подобия (Т. Heunis);
- показателя Хёрста (D. W. Crevier);
- показателя Ляпунова (J. R. Etter);
- фрактальной размерности Хигучи (N. S. Sefandarmaz);

- рекуррентного анализа (S. S. Nair);
- углового преобразования Фишера (M. Molaie).

Следует также отметить работы (S. Behbahani, M. Gauvin), в которых приведены обзоры наиболее значимых результатов в области алгоритмизации обработки и анализа электроретинограмм. Однако универсальных алгоритмов, пригодных к различным наборам сигналов электроретинограмм, не существует. В этой ситуации разработка алгоритмов поддержки принятия решения врачом при заболеваниях, сопровождающихся нарушениями сосудистых структур сетчатки зрительного анализатора, является актуальной.

Целью данной работы является научно обоснованная разработка и исследование алгоритмов анализа сигналов электроретинограмм для поддержки принятия решения врачом при заболеваниях, сопровождающихся нарушениями сосудистых структур сетчатки зрительного анализатора.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Анализ состояния предметной области, связанной с исследованиями сигналов электроретинограмм.

2. Сбор и статистический анализ существующего набора данных сигналов электроретинограмм, а также определение норм всех типов сигналов электроретинограмм в соответствии с рекомендациями международного общества клинической электрофизиологии зрения.

3. Исследование возможностей извлечения информативных параметров из сигналов электроретинограмм, а также формирование комплексов информативных параметров.

4. Сравнительный анализ информативности отдельных параметров сигналов электроретинограмм.

5. Разработка эффективных алгоритмов поддержки принятия решения врачом на основании анализа вышеназванных информативных параметров с учётом традиционно используемых комплексов параметров, а также сравнительный анализ разработанных и используемых в амбулаторной практике алгоритмов.

Объектом исследования являются: алгоритмы поддержки принятия решения врачом на основе анализа сигналов электроретинограмм для диагностики глазных заболеваний.

Предметом исследования являются: методы обработки сигналов электроретинограмм.

Научная новизна:

1. Впервые получен набор данных сигналов электроретинограмм, который является наиболее обширным с точки зрения количества представленной информации (425 сигналов), а также определены нормы сигналов электроретинограмм, позволяющие дифференцировать педиатрических и взрослых пациентов (соответствует п. 13 паспорта специальности).

2. Разработан новый алгоритм извлечения параметров из вейвлет-скалограмм сигналов электроретинограмм, который в дополнение к известным 4 параметрам позволяет получить 52 дополнительных параметра, позволяющих сформировать комплексы информативных параметров (соответствует п. 12 паспорта специальности).

3. Разработаны и исследованы новые алгоритмы поддержки принятия решения врачом на основе ранее сформированных комплексов информативных параметров, которые позволяют классифицировать сигналы электроретинограмм взрослых (педиатрических) пациентов на 19% (20%) эффективнее чем алгоритм, принятый в амбулаторной практике (соответствует п. 4 паспорта специальности).

Теоретическая значимость работы заключается в следующем.

1. Обосновано использование вейвлет-анализа для исследования сигналов электроретинограмм, в частности извлечения полезных, информативных параметров из вейвлет-скалограмм сигналов.

2. Выполнен научно-обоснованный выбор информативных параметров электроретинограмм с использованием методов машинного обучения, обеспечивающих наилучшее качество классификации сигналов.

Практическая значимость работы заключается в разработке алгоритмов анализа сигналов электроретинограмм, готовых к использованию врачами-офтальмологами.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы цифровой обработки сигналов, спектрального анализа, вейвлет-анализа, прикладной математической статистики и методы поддержки принятия решений.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Вычисленные нормы сигналов электроретинограмм на основе статистического анализа существующего набора данных позволяют идентифицировать различия между педиатрической и взрослой группами пациентов.

2. Разработанный алгоритм извлечения информативных параметров из сигналов электроретинограмм реализует формирование 52 дополнительных параметров при помощи процедуры обработки вейвлет-скалограммы, что позволяет решать задачу формирования комплексов информативных параметров.

3. Разработанный на основе метода «дерево решений» (процедура машинного обучения) алгоритм поддержки принятия решения врачом позволяет реализовать классификацию взрослых (педиатрических) сигналов на 19% (20%) эффективнее чем алгоритм, принятый в амбулаторной практике.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных математических методов, адекватных задачам исследования, а также их согласованностью с результатами, полученными другими авторами и с экспертными оценками врачей-офтальмологов качества диагностирования заболеваний, сопровождающихся нарушениями сосудистых структур сетчатки зрительного анализатора, по сигналам электроретинограмм.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертационного исследования используются в Екатеринбургском центре МНТК «Микрохирургия глаза» (акт об использовании результатов) и Акционерном обществе «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова» (акт об использовании результатов №232002/01/1870).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях: 8th International Conference on e-Health and Bioengineering (ЕНВ 2020), Яссы, Румыния, 29-30 ноября 2020 г.; 2021 IEEE Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Round Table «Ophthalmic Bioengineering», Екатеринбург, Россия, 13 мая 2021 г.; IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM 2021), Алтай, Россия, 30 июня - 4 июля 2021 г.; Baltic Forum: Neuroscience, AI and Complex Systems (BF-NAICS 2021), Калининград, Россия, 13 сентября – 15 сентября 2021 г.; 2022 IEEE Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), 2nd Round Table «Ophthalmic Bioengineering», Екатеринбург, Россия, 21 сентября 2022 г.; Всероссийский саммит с международным участием «Искусственный интеллект в офтальмологии» (АИО 2022), Сочи, Россия, 3 ноября 2022 г.; V Международный форум «COGNITIVE NEUROSCIENCE – 2022»,

Екатеринбург, Россия, 9-10 декабря 2022 г.; MaD Conference 2023, Эрланген, Федеративная Республика Германия, 21 февраля – 22 февраля 2023 г.

Личный вклад. Все результаты исследований, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Вклад в совместных публикациях соавтора Доросинского Л.Г., являвшегося руководителем во время обучения в аспирантуре, заключается в постановке задач исследования. В работах, выполненных вместе с Пономаревым В.О., Казайкиным В.Н., Лизуновым А.В. и Ивлиевым С.А., соавторами выполнен сбор первичных данных, на основе которых было выполнено исследование, а также клиническая интерпретация полученных результатов. Соавторами Долгановым А.Ю., Борисовым В.И., Бао С. и Лучианом Е. в работах диссертанта предоставлены исходные размеченные данные исследования и пояснения к ним. Во всех работах в соавторстве диссертантом внесен основной вклад по предобработке данных исследования, статистической обработке и анализу данных исследования, включая все результаты, связанные с применением машинного обучения к данным и разработкой алгоритмов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 9 научных статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, включая 7 статей в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах Scopus и WoS; имеется 3 свидетельства о государственной регистрации программы/базы данных для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 193 страницы, включая 42 рисунка и 20 таблиц. Список литературы содержит 154 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования; сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования; показана научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов исследования.

В первой главе содержится анализ текущего состояния современных исследований в области анализа сигналов электроретинограмм, который показывает превосходство частотных и частотно-временных методов над классическим анализом во временной области. Несмотря на то, что электроретинограмма является коротким сигналом, методы параметрической

спектральной оценки не получили широкого распространения. Учитывая сложные характеристики сигналов электроретинограмм, нелинейные методы, которые иллюстрируют сложность системы, подходят для тщательного анализа и дифференциации характеристик слоев сетчатки. Из-за разнообразия слоев сетчатки (с точки зрения клеток и клеточных структур) и различий в функциях клеток использование единого универсального метода извлечения параметров из сигналов электроретинограмм нецелесообразно.

Также показано, что используемое электрофизиологическое оборудование предоставляет врачам-офтальмологам возможность проведения только полуавтоматического анализа сигналов электроретинограмм.

В заключении сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе выполнено описание системы извлечения данных при диагностических исследованиях с применением компьютеризированных систем. Продемонстрирована практическая работа аппарата EP-1000 в области диагностики зрения, включая подробное объяснение функционала его программного обеспечения, способности к записи данных о пациентах и результатов исследований в единую базу данных. Изложены принципы визуализации сигналов электроретинограмм, раскрыта структура базы данных, представлены образцы главного окна и интерфейсов для редактирования и просмотра результатов исследования. Отмечена закрытая природа программы, акцентированы ограничения интерфейсов для извлечения данных из программы. Извлечение электрофизиологических данных в настоящей диссертации реализовано с помощью программного обеспечения, разработанного НИУ «Московский энергетический институт».

Выполнено описание извлеченного набора данных, применяемого в клинической электрофизиологии. В состав набора данных входят 6 видов педиатрических и взрослых сигналов электроретинограмм, включая скотопическую, максимальную, фотопическую, а также фликеры 30 Гц и 60 Гц, и осцилляторные потенциалы.

На рисунке 1 показан сигнал максимальной электроретинограммы. Амплитуда а-волны a максимальной электроретинограммы измеряется от средней базовой линии до минимума а-волны. Амплитуда б-волны b максимальной электроретинограммы измеряется от минимума а-волны до пика б-волны. Латентность а-волны l_a максимальной электроретинограммы измеряется от средней базовой линии сигнала до минимума а-волны. Латентность б-волны l_b максимальной электроретинограммы измеряется от средней базовой линии сигнала до пика б-волны.

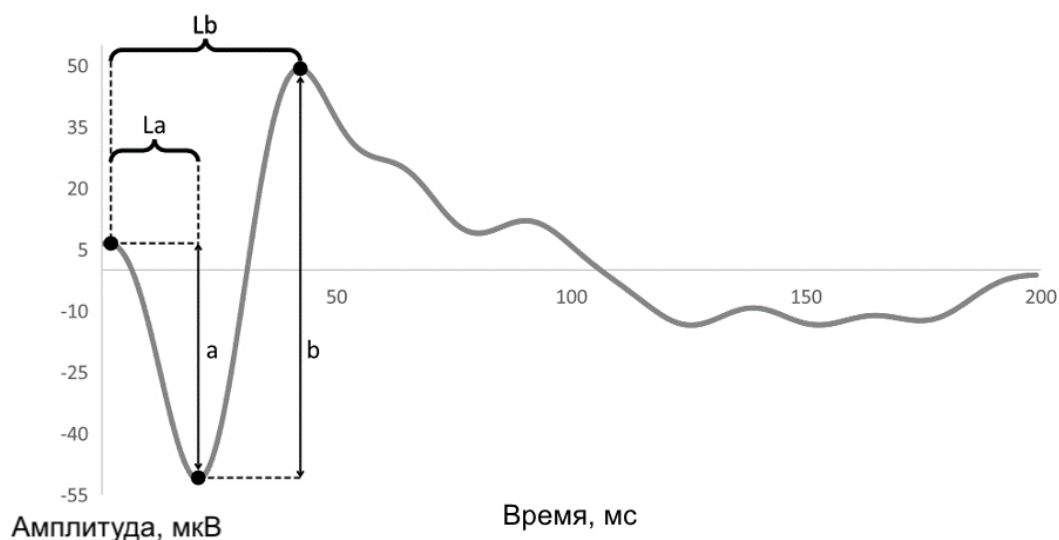


Рисунок 1 Максимальная электроретинограмма

Набор данных содержит 425 сигналов, полученных с использованием электрофизиологической рабочей станции EP-1000. Определены параметры регистрации сигналов и методы их обработки, включая измерения амплитуд и латентностей различных волн. Представлены наглядные примеры разных типов сигналов с детальным анализом характеристик, обеспечивающим лучшее понимание методологии и результатов электрофизиологических исследований.

Проведена статистическая обработка набора данных трех типов сигналов электроретинограмм (максимальная, фотопическая, скотопическая). В ходе анализа были определены следующие статистические характеристики: медиана, среднее квадратичное отклонение, 5-й и 95-й процентиля, а также диаграммы размаха. В таблице 1 и на рисунке 2 показаны статистические данные и диаграмма размаха максимальной электроретинограммы, где группа 1 - взрослые сигналы с патологиями, группа 2 - педиатрические сигналы с патологиями, группа 3 - педиатрические сигналы без патологий.

Особое внимание было уделено различиям в амплитуде и латентности волн для разных групп пациентов. Отметим, что группа взрослых сигналов электроретинограмм без патологий была определена производителем электрофизиологического оборудования. Также были выявлены значимые возрастные особенности, влияющие на характеристики сигналов электроретинограмм. Проведенный анализ позволил определить нормативные значения максимальной электроретинограммы и разделить набор данных на педиатрические и взрослые сигналы электроретинограмм с патологией и без патологий.

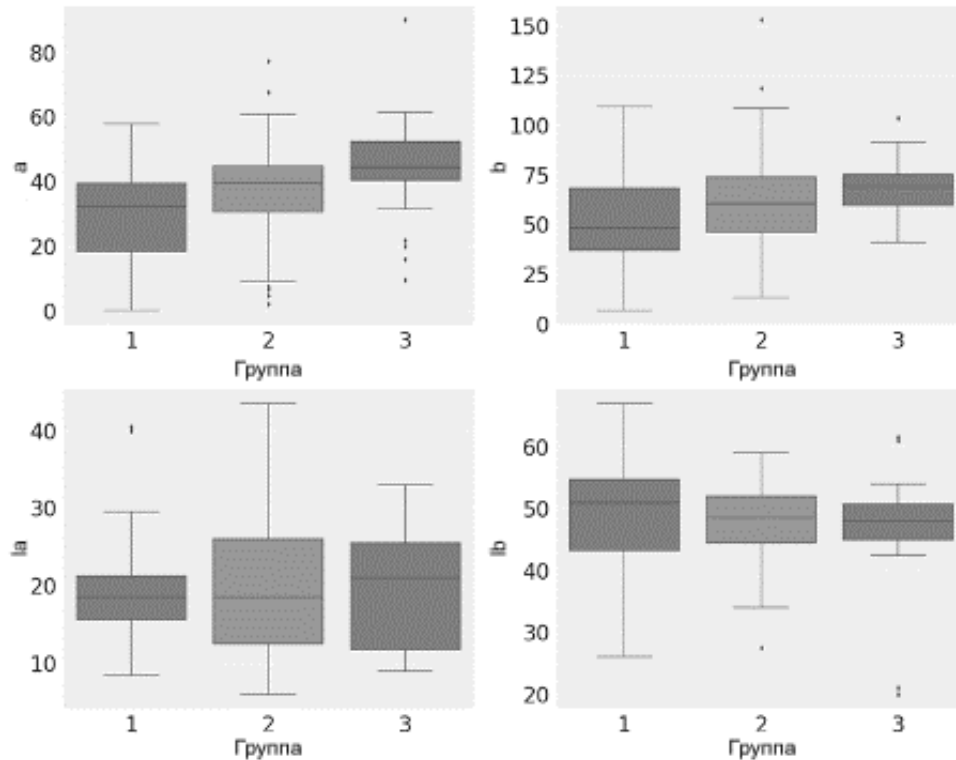


Рисунок 2 Диаграмма размаха максимальной электроретинограммы

Таблица 1 Статистические данные максимальной электроретинограммы

Амплитуда а-волны (а), мкВ					
Группа	n	Медианное значение	Среднее квадратичное отклонение	5-й процентиль	95-й процентиль
1	42	32.47	15.04	4.60	52.20
2	53	39.52	16.21	7.23	59.98
3	27	44.46	15.83	17.30	60.34
Латентность а-волны (I _a), мс					
1	42	18.50	6.84	10.50	29.38
2	53	18.50	8.44	8.80	35.10
3	27	21.00	7.71	9.45	32.25
Амплитуда b-волны (b), мкВ					
1	42	48.57	25.43	13.15	91.97
2	53	60.51	25.53	20.72	100.46
3	27	69.44	13.75	48.11	88.55
Латентность b-волны (I _b), мс					
1	42	51.00	8.46	39.00	63.98
2	53	48.50	6.86	36.30	58.70
3	27	48.00	8.92	27.45	58.90

В третьей главе описана процедура формирования вейвлет-скалограмм с использованием функции `cwt` библиотеки `PyWT`, где в качестве базисной функции был выбран вейвлет Гаусса 8-го порядка. В верхней части рисунка 3 показан сигнал электроретинограммы в амплитудно-временном представлении с указанием параметров сигнала, оцениваемых в амбулаторной практике. В нижней части рисунка 3 показано частотно-временное представление сигнала электроретинограммы, полученное с использованием непрерывного вейвлет-преобразования, где сегменты вейвлет-скалограммы обозначены номерами от 1 до 6.

Обработка скалограмм с помощью `connectedComponents` выделяет индивидуальные сегменты. Для каждого сегмента создается маска, применяемая к скалограмме, образуя новую матрицу. Для получения значений отдельных сегментов используется маскирование вейвлет-скалограммы с использованием результатов применения функции `connectedComponents`. Для каждого уникального значения номера сегмента n из диапазона возможных значений сегмента происходит следующее:

1. Создаётся матрица `Mask` из нулей с размерами, равными размерности вейвлет-скалограммы.

2. Элементы матрицы `Mask`, индексы которых соответствуют текущему анализируемому сегменту n , приравниваются к единице.

3. Матрица `Mask` поэлементно перемножается с вейвлет-скалограммой.

Таким образом получается новая матрица, в которой все элементы равны нулю за исключением значений, которые относятся к сегменту n . Эта матрица затем подвергается обработке с целью получения значимых параметров.

Для поэлементного анализа вейвлет-скалограммы в совокупности со связанными компонентами сигналов электроретинограмм были использованы нижеописанные параметры, показанные на рисунке 4: максимальная яркость по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы L_{max} , частота f_{max} и время t_{max} максимальной области по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы, медианное значение яркости по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы A_{median} , среднее значение яркости по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы A_{mean} , крайние значения частоты f_1, f_2 и времени t_1, t_2 по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы, а также крайние значения частоты и времени $t_{190}, t_{290}, f_{190}, f_{290}$, где максимальная яркость по всей площади сегмента составляет 90% от максимальной мощности.

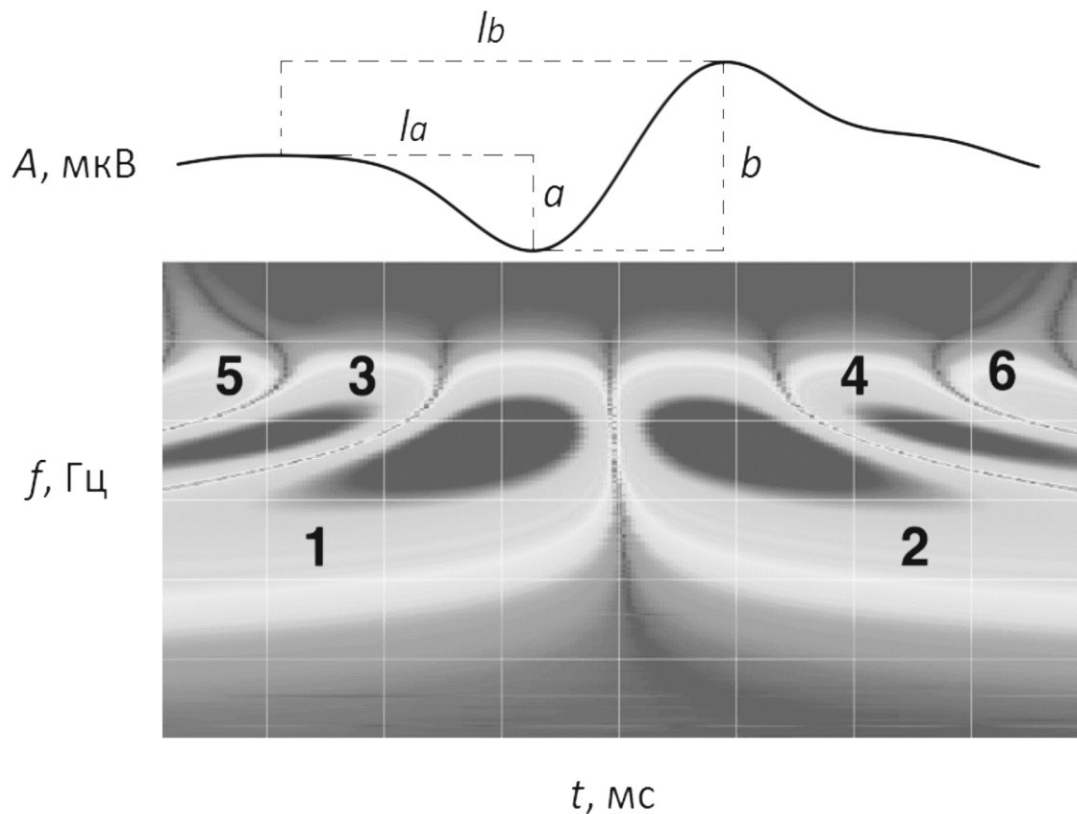


Рисунок 3 Амплитудно-временное и частотно-временное представление сигнала электроретинограммы

Таким образом, сформировано 52 дополнительных параметра с целью создания комплексов информативных параметров для дальнейшей разработки алгоритма поддержки принятия решения врачом. Суммарное число информативных параметров составляет 56 с учетом 4 классических параметров.

Представлен сравнительный анализ воздействия индивидуальных признаков на эффективность классификации сигналов электроретинограмм, построена корреляционная матрица размерности 56 на 56, служащая для оценки взаимосвязей между параметрами в предоставленном наборе данных. Отмечаются параметры с разнообразной степенью корреляции, включающие амплитуду волн, характеристики сегментов и максимальную область сегмента на вейвлет-скалограмме. Для дальнейшей классификации были систематически организованы сильно коррелированные параметры. В процессе анализа использовался метод пошагового удаления параметров с высокой корреляцией, в параллельной связке с методом дерева решений для классификации.

На рисунке 5 на вертикальной оси обозначено значение метрики Ассигасу, демонстрирующей долю сигналов, по которым классификатор

принял правильное решение. На рисунке 5 на горизонтальной оси обозначены индексы информативных параметров. Отметим, что чем ниже числовое значение индекса конкретного параметра, тем более высокий уровень корреляции характерен для данного параметра.

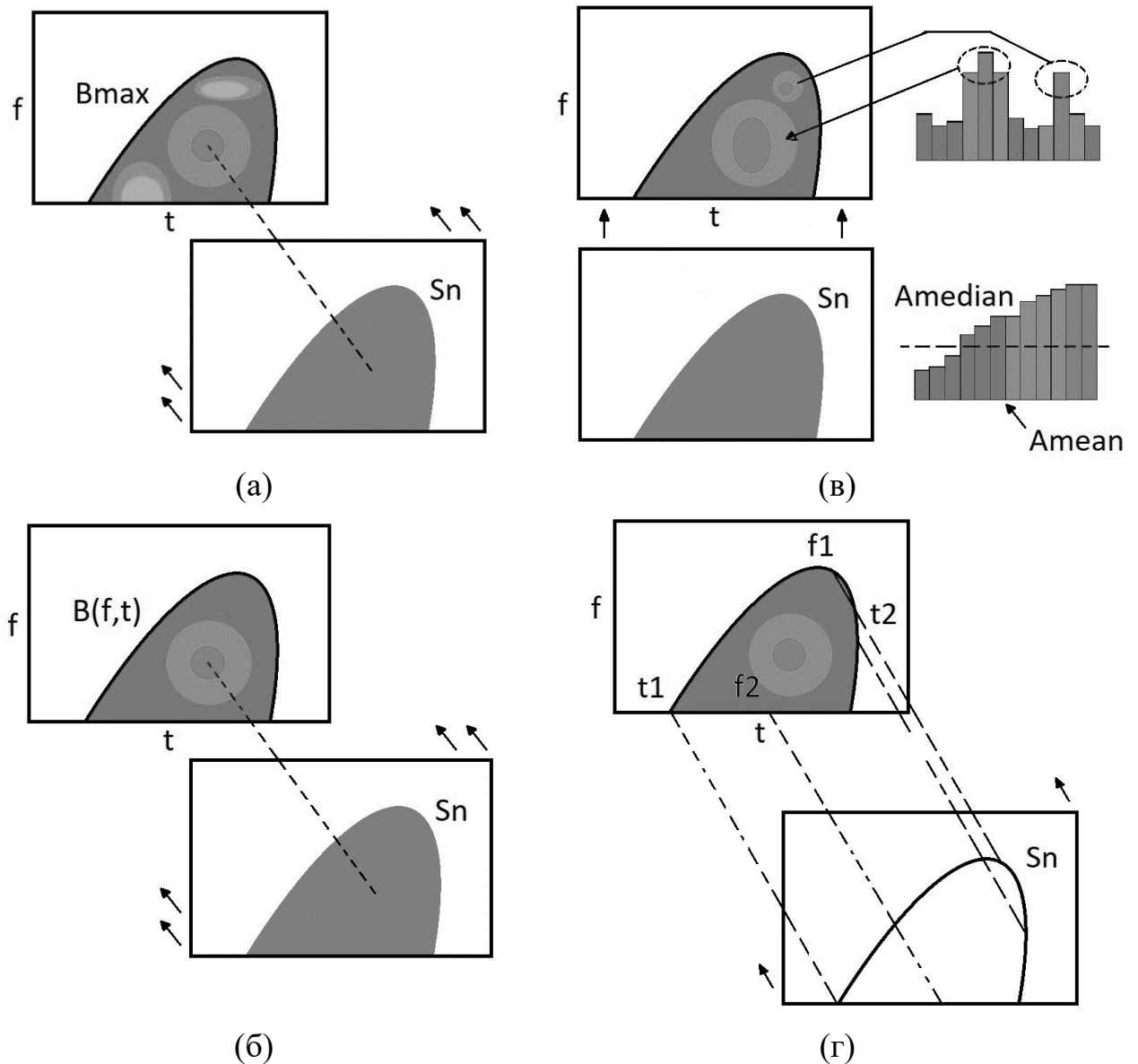
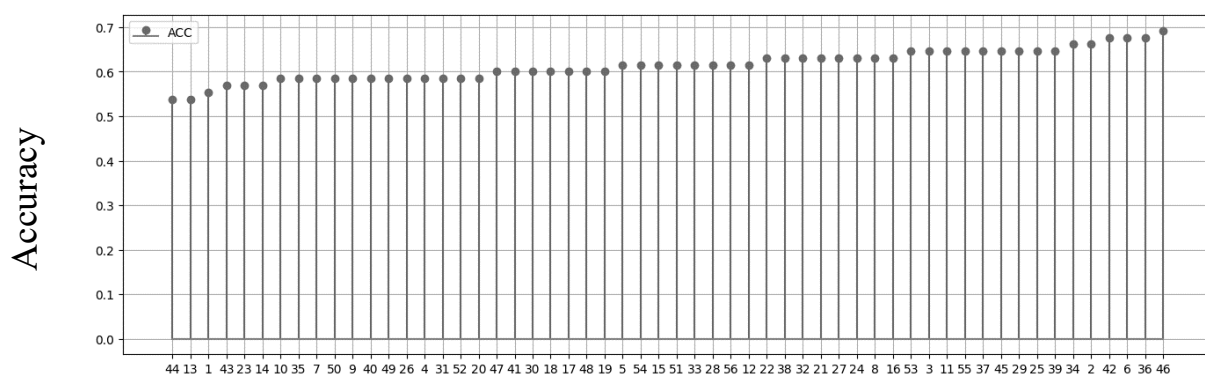


Рисунок 4 Схема определения параметров: (а) максимальной яркости из сегмента вейвлет-скалограммы; (б) частоты и времени максимальной области из сегмента вейвлет-скалограммы; (в) медианного и среднего значения яркости из сегмента вейвлет-скалограммы; (г) крайних значений частоты и времени сегмента вейвлет-скалограммы.

В данном контексте, наиболее значимыми признаками для классификации педиатрических сигналов электроретинограмм являются параметры, обозначенные индексами 44, 13, 1, 43, 23 и 14 (L_{max} 4, t_2 1, a ,

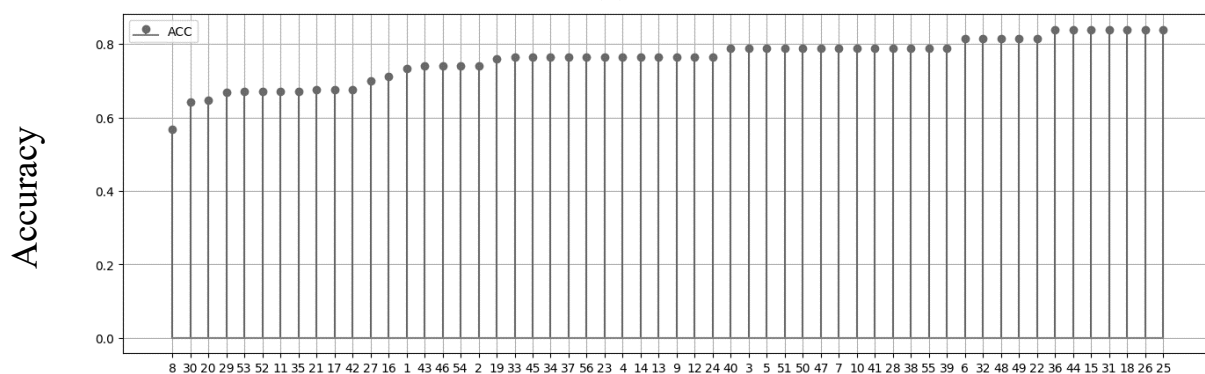
$t_2 90 3$, $f_1 2$ и $f_1 90 1$). Так, например, исключение из набора параметров $L_{max} 4$ приведёт к ухудшению классификации на 15 %, в отличие от исключения признака 46 ($t_{max} 4$) (для педиатрических сигналов). В то же время исключение параметра с индексом 8 ($A_{median} 1$) (для взрослых сигналов) снизит вероятность правильной классификации на 20 %.

Наиболее значимыми признаками для классификации взрослых сигналов электроретинограмм являются параметры, обозначенные индексами 8, 30, 20, 29, 53 и 52 ($A_{median} 1$, $t_2 90 2$, $t_{max} 2$, $t_1 90 2$, $f_1 90 4$, $t_2 4$). Важно отметить, что при изменении состава набора данных сигналов электроретинограмм могут измениться и ранжирование параметров, что подчеркивает сложность этого вопроса.



Индекс параметра

(a)



Индекс параметра

(б)

Рисунок 5 Зависимость метрики Ассигасу от ранжированных параметров при классификации сигналов электроретинограмм (в порядке возрастания метрики Ассигасу): (а) педиатрические сигналы; (б) взрослые сигналы

Представленные результаты демонстрируют, что высокий уровень корреляции не обязательно способствует повышению точности. Значимые параметры для классификации сигналов электроретинограмм выявлены как

для детей, так и для взрослых, подчеркивая сложность влияния параметров на классификацию, особенно в контексте электрофизиологических данных.

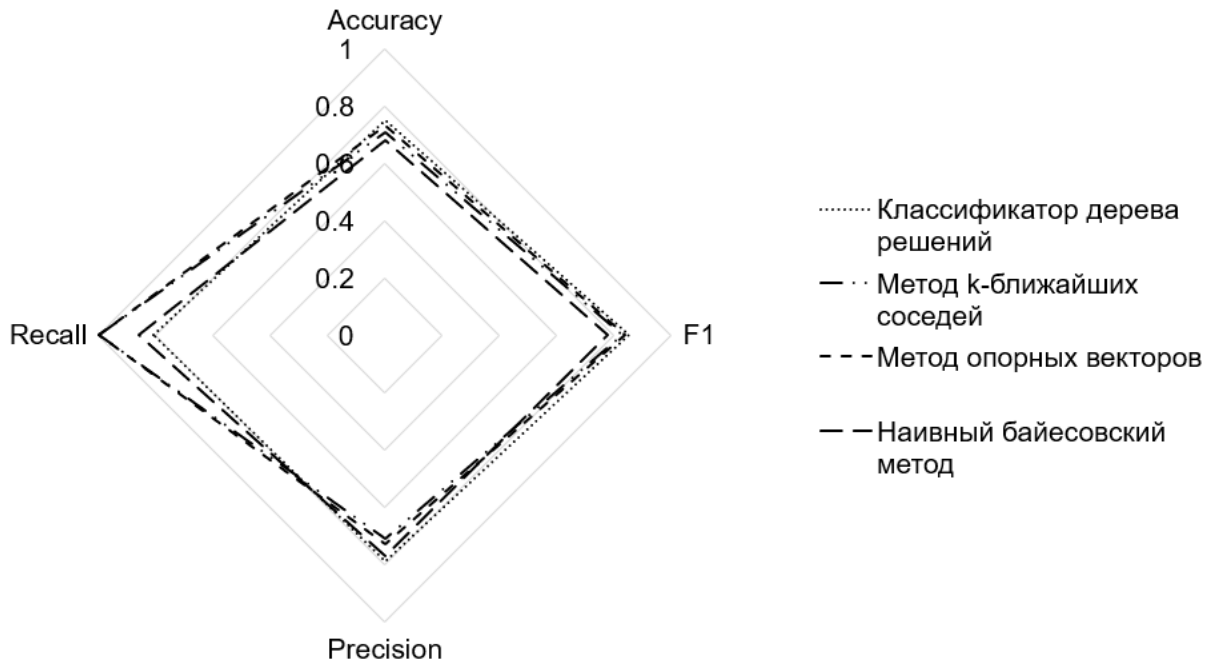
Произведено определение оптимальных методов машинного обучения для классификации сигналов электроретинограмм с учетом определенных комплексов параметров. Для оценки моделей и алгоритмов используются метрики Accuracy, Precision, Recall и F-мера. Представлены результаты сравнительного анализа четырех методов машинного обучения для классификации заболеваний сетчатки на основе сигналов электроретинограмм. Данные представлены в виде таблицы и лепестковой диаграммы на рисунке 6, подчеркивая превосходство метода дерева решений.

Таким образом, предложенный метод извлечения параметров из сигналов электроретинограмм позволяет сформировать 52 дополнительных параметра, решая задачу создания комплексов информативных параметров для дальнейшей разработки алгоритма поддержки принятия решения врачом.

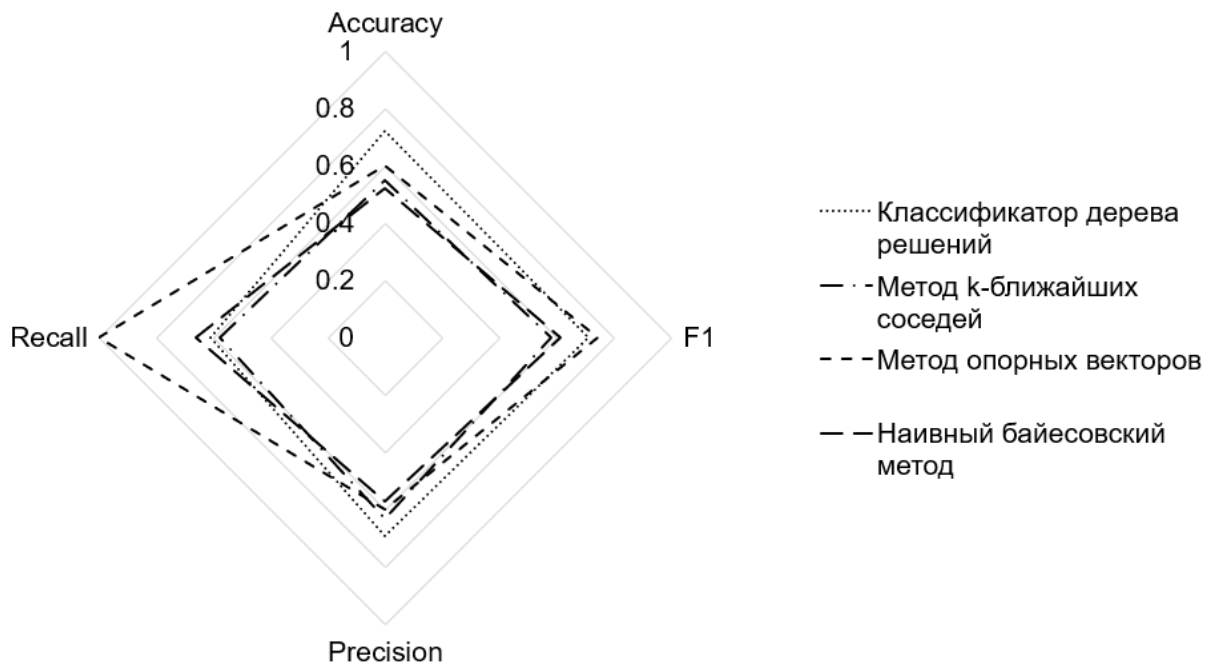
В четвертой главе проведена разработка алгоритмов анализа сигналов электроретинограмм, основанная на последовательной проверке высоко информативных параметров, определенных в третьей главе, на соответствие нормам за которой следует анализ всего комплекса параметров на соответствие нормам, определенным во второй главе.

На рисунке 7 представлена часть алгоритма анализа взрослого сигнала максимальной электроретинограммы на базе информативных параметров, где сплошной линией выделена проверка соответствия значений латентностей и амплитуд волн l_a , l_b , a , b нормам взрослого сигнала. В случае соответствия классических параметров l_a , l_b , a , b нормам реализуется проверка верхней частоты сегмента №2 f_2 , времени сегмента №1 $t_1 90$, времени сегмента №3 $t_2 90$ на соответствие нормам, что выделено штриховой линией. В случае соответствия классических и дополнительных параметров нормам, принимается решение об отсутствии патологий, в противном случае реализуется проверка аналогичных параметров на соответствие значений сигнала с патологиями, в частности связанными с нарушениями сосудистых структур сетчатки зрительного анализатора.

Фрагмент алгоритма анализа взрослого сигнала, где производится проверка соответствия значений сигнала максимальной электроретинограммы сигналам с патологиями, выделен штрихпунктирной линией. В случае соответствия значений наиболее информативных параметров сигнала значениям, указанным в штрихпунктирной части алгоритма, реализуется посегментный анализ сигнала.



(a)



(б)

Рисунок 6 Лепестковая диаграмма сравнительного анализа четырех методов машинного обучения для классификации сигналов электроретинограмм с использованием комплексов посегментных параметров: (а) взрослые сигналы максимальной электроретинограммы; (б) педиатрические сигналы максимальной электроретинограммы

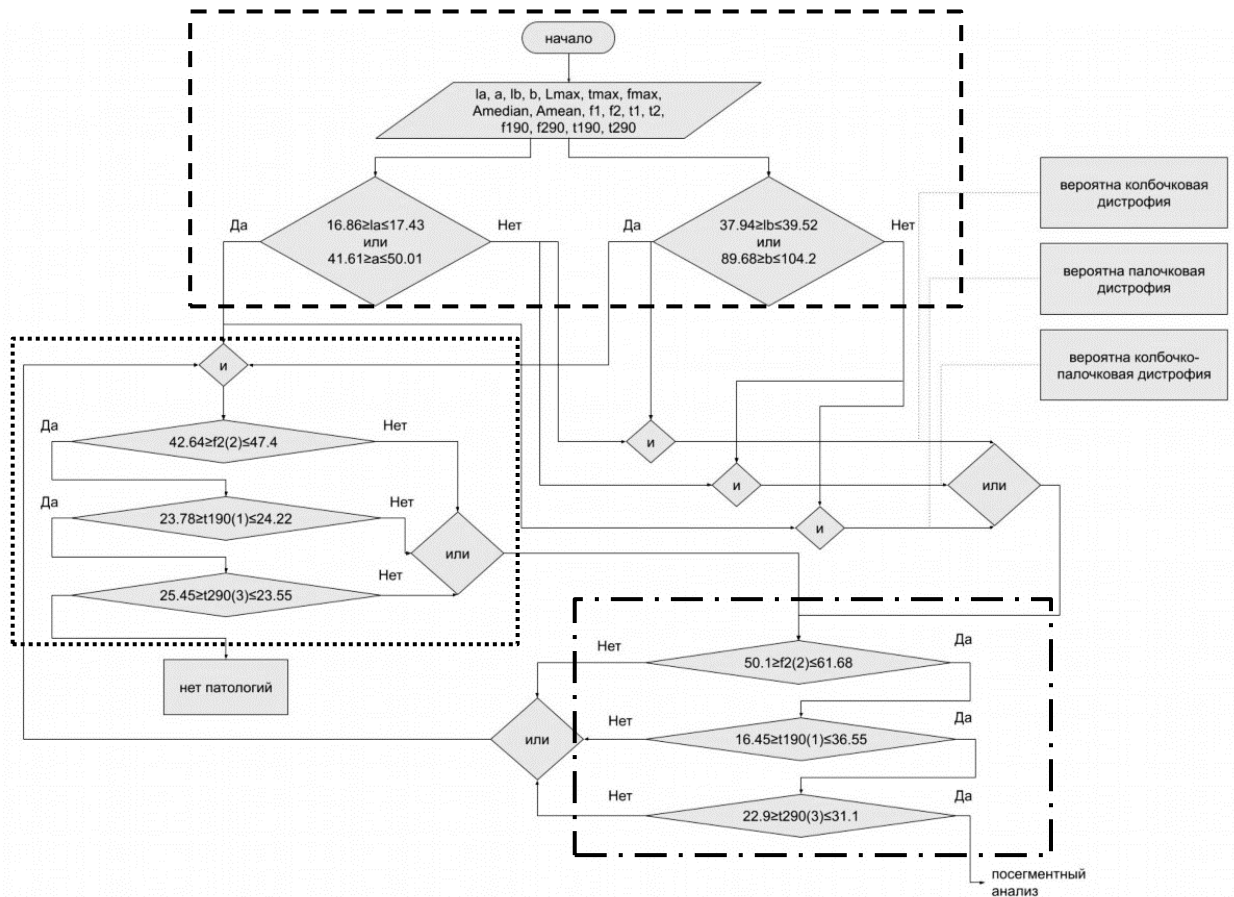


Рисунок 7 Алгоритм анализа взрослого сигнала максимальной электроретинограммы без учета посегментного анализа

Произведено оценивание эффективности созданных алгоритмов анализа сигналов электроретинограмм с использованием метода k-fold кросс-валидации и функции StratifiedKFold для обеспечения сбалансированных пропорций классов. Получены метрики классификации для сравнительного анализа различных алгоритмов, показанные в таблицах 2–3: алгоритма классического анализа – КА, алгоритмов расширенного анализа по сегментам №1-2 и №1-4 – РА 1-2 и РА 1-4, а также комбинации РА 1-4 и КА – РА 1-4 + КА.

Полученные выводы свидетельствуют о том, что алгоритм поддержки принятия решения на основе метода машинного обучения "дерево решений" демонстрирует возможность классификации взрослых (и педиатрических) сигналов с 19% (и 20%) повышенной эффективностью по сравнению с алгоритмом, применяемым в клинической практике (соответствует п. 4 паспорта специальности в части разработки алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации).

Таблица 2 Сравнительные таблицы метрик для алгоритмов анализа взрослых сигналов максимальной электроретинограммы

		Accuracy	F-мера	Precision	Recall
КА	μ	0.54	0.62	0.55	0.73
	σ	0.24	0.35	0.31	0.43
РА 1-2	μ	0.78	0.84	0.86	0.84
	σ	0.23	0.17	0.19	0.16
РА 1-4	μ	0.81	0.86	0.87	0.88
	σ	0.20	0.14	0.17	0.17
РА 1-4 + КА	μ	0.83	0.88	0.89	0.88
	σ	0.10	0.07	0.07	0.10

Таблица 3 Сравнительные таблицы метрик для алгоритмов анализа педиатрических сигналов максимальной электроретинограммы

		Accuracy	F-мера	Precision	Recall
КА	μ	0.52	0.52	0.72	0.52
	σ	0.06	0.18	0.19	0.32
РА 1-2	μ	0.70	0.74	0.78	0.76
	σ	0.18	0.15	0.17	0.24
РА 1-4	μ	0.60	0.64	0.70	0.61
	σ	0.06	0.05	0.08	0.12
РА 1-4 + КА	μ	0.58	0.65	0.66	0.66
	σ	0.10	0.07	0.07	0.10

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках данного диссертационного исследования решены следующие научные задачи:

1) Определены стандартные показатели для сигналов электроретинограмм, вычисленные с использованием статистического анализа доступных данных. Эти показатели демонстрируют способность выявления различий между пациентами: педиатрическими и взрослыми.

2) Разработана методика извлечения значимых параметров из сигналов электроретинограмм, включающая создание 52 дополнительных характеристик через алгоритм обработки вейвлет-скалограммы. Это

предоставляет возможность для формирования наборов информативных параметров.

3) Разработан алгоритм поддержки принятия решений врачом на основе метода машинного обучения «дерево решений», позволяющий классифицировать сигналы взрослых (и педиатрических) с наилучшей эффективностью на 19% (и 20%) по сравнению с алгоритмом, используемым в амбулаторной практике.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в:

1. разработке новых амбулаторных алгоритмов диагностики при заболеваниях, сопровождающихся нарушениями сосудистых структур сетчатки зрительного анализатора;
2. разработке программного обеспечения для полуавтоматического и/или автоматического диагностирования офтальмологических заболеваний на базе анализа биомедицинских сигналов;
3. исследование электрофизиологических сигналов, таких как зрительные вызванные потенциалы, сигналы электроокулограмм, с использованием задела настоящего исследования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Жданов А.Е.** Оценка эффективности алгоритма поддержки принятия решения врачом при дистрофии сетчатки с использованием методов машинного обучения / **А.Е. Жданов**, А.Ю. Долганов, Д. Занка, В.И. Борисов, Е. Лучиан, Л.Г. Доросинский // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 272–277. (0,72 п. л. / 0,58 п. л.)
2. **Жданов А.Е.** Описание и оценка сигналов электроретинограммы для решения задач системного анализа с использованием вейвлет-анализа в офтальмологии / **А.Е. Жданов**, Л.Г. Доросинский, А.Ю. Долганов, В.И. Борисов, Е. Лучиан, В.Н. Казайкин, В.О. Пономарев, А.В. Лизунов // Инженерный вестник Дона. – 2022. – №. 3. – С. 181–190. (0,32 п. л. / 0,25 п. л.)
3. **Zhdanov A.E.** Advanced Analysis of Electroretinograms Based on Wavelet Scalogram Processing / **A. Zhdanov**, A. Dolganov, D. Zanca, V. Borisov, M. Ronkin // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – Vol. 12(23). – No. 12365. (0,93 п. л. / 0,74 п. л.) (Scopus, WoS)

4. **Zhdanov A.E.** OculusGraphy: Description of Electroretinograms Database / **A.E. Zhdanov**, V.I. Borisov, E. Lucian, V.N. Kazajkin, X. Bao, V.O. Ponomarev, A.Y. Dolganov, A.V. Lizunov // 2021 Third International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN). – IEEE. 2021. – pp. 132–135. (0,57 п. л. / 0,45 п. л.) (Scopus)
5. **Zhdanov A.E.** OculusGraphy: Filtering of Pediatric Electroretinogram / **A.E. Zhdanov**, V.I. Borisov, E. Lucian, V.N. Kazajkin, X. Bao, V.O. Ponomarev, A.Y. Dolganov, A.V. Lizunov // 2021 Third International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN). – IEEE. 2021. – pp. 128–131. (0,57 п. л. / 0,45 п. л.) (Scopus)
6. **Zhdanov A.E.** OculusGraphy: Norms for Electroretinogram Signals / **A.E. Zhdanov**, V.I. Borisov, A.Y. Dolganov, E. Lucian, X. Bao, V.N. Kazajkin // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE. 2021. – pp. 399–402. (0,45 п. л. / 0,36 п. л.) (Scopus)
7. **Zhdanov A.E.** OculusGraphy: Filtering of Electroretinography Response in Adults / **A.E. Zhdanov**, V.I. Borisov, A.Y. Dolganov, E. Lucian, X. Bao, V.N. Kazajkin // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE. 2021. – pp. 395-398. (0,63 п. л. / 0,51 п. л.) (Scopus)
8. **Zhdanov A.E.** OculusGraphy: Literature review on electrophysiological research methods in ophthalmology and electroretinograms processing using wavelet transform / **A.E. Zhdanov**, A.Y. Dolganov, V.N. Kazajkin, V.O. Ponomarev, A.V. Lizunov, V.I. Borisov, E. Lucian, X. Bao, L.G. Dorosinskiy // 2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB). – IEEE. 2020. – pp. 1-6. (0,80 п. л. / 0,64 п. л.) (Scopus, WoS)
9. **Zhdanov A.E.** Oculusgraphy: Ocular examination for toxicity evaluation based on biomedical signals / **A.E. Zhdanov**, L. Evdochim, X. Bao, A.Y. Dolganov, V.I. Borisov, V.N. Kazajkin, V.O. Ponomarev, A.V. Lizunov, L.G. Dorosinskiy // 2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB). – IEEE. 2020. – pp. 1-6. (0,85 п. л. / 0,68 п. л.) (Scopus, WoS)

Свидетельство о регистрации программы и баз данных:

10. **Жданов А.Е.** Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программа извлечения параметров из вейвлет-скалограммы сигналов электроретинограмм и их анализа с помощью методов машинного обучения / **Жданов А.Е.**, Долганов А.Ю., Борисов В.И., Ронкин М.В.,

Доросинский Л.Г. — № 2022681547; дата регистрации 01.11.2022; опублик. 15.11.2022 (Российская Федерация).

11. Пономарев В.О. Свидетельство о гос. регистрации базы данных. База данных биомедицинских сигналов электроретинографии / Пономарев В.О., **Жданов А.Е.**, Казайкин В.Н., Долганов А.Ю., Лизунов А.В., Борисов В.И., Ивлиев С.А., Доросинский Л.Г. — № 2022620173; дата регистрации 27.12.2021; опублик. 19.01.2022 (Российская Федерация).
12. **Жданов А.Е.** Свидетельство о гос. регистрации базы данных. База данных сигналов электроретинограмм / **Жданов А.Е.**, Долганов А.Ю., Борисов В.И., Ронкин М.В., Доросинский Л.Г., Ивлиев С.А., Албасу Ф.Б., Дей С. — № 2022623323; дата регистрации 06.12.2022; опублик. 08.12.2022 (Российская Федерация).

Другие публикации:

13. **Жданов А.Е.** Формирование параметров педиатрической базы электроретинограммы для разработки алгоритма поддержки принятия решения врачом / **А.Е. Жданов**, А.Ю. Долганов, В.Н. Казайкин, В.И. Борисов, В.О. Пономарев, Л.Г. Доросинский, А.В. Лизунов, Е. Лучиан, С. Бао // Acta Biomedica Scientifica. – 2022. – Т. 7 №. 2. – С. 190-198. (0,88 п. л. / 0,70 п. л.)
14. Чупов А.А. Обработка сигналов ЭКГ с помощью вейвлет-анализа: диагностические возможности / А.А. Чупов, **А.Е. Жданов**, С.Т. Князев, Ф.К. Рахматуллов, Р.Ф. Рахматуллов, А.Ю. Долганов // Ural Radio Engineering Journal. – 2021. – Т. 5, №. 4. – С. 337-352. (0,99 п. л. / 0,59 п. л.)
15. Казайкин В.Н. Современная роль и перспективы электрофизиологических методов исследования в офтальмологии. Обзор литературы / В.Н. Казайкин, В.О. Пономарев, А.В. Лизунов, **А.Е. Жданов**, А.Ю. Долганов, В.И. Борисов // Офтальмология. – 2020. – Т. 17, №. 4. – С. 669-675. (1,98 п. л. / 0,79 п. л.)