

На правах рукописи



ТЫЧКОВА Анна Николаевна

**МЕТОДИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АНАЛИЗА РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ЛИЦ
С УМСТВЕННОЙ ОТСТАЛОСТЬЮ**

**Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения
(технические науки)**

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

ПЕНЗА – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Алимурадов Алан Казанферович

Официальные оппоненты: **Иващенко Антон Владимирович,**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
медицинский университет» Министерства
здравоохранения Российской Федерации,
директор Передовой медицинской инженерной
школы;

Петрунина Елена Валерьевна,
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский политехнический
университет», заведующий кафедрой
«СМАРТ-технологии»

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Юго-Западный государственный
университет» (г. Курск)

Защита диссертации состоится 19 декабря 2024 г. в «___» часов на заседании диссертационного совета 24.2.357.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет» и на сайте:
https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/tuychkova

Автореферат разослан «___»_____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Светлов Анатолий Вильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. По данным министерств и ведомств, как в России, так и за рубежом, около 3 % людей имеют диагноз «умственная отсталость (УО)». УО представляет собой группу состояний, обусловленных врожденным или рано приобретенным недоразвитием психики с выраженной недостаточностью интеллекта. Ранняя диагностика и эффективная реабилитация лиц с УО являются принципиально важными задачами на пути повышения качества жизни человека. Кроме того, согласно стратегии РФ в области развития производства промышленной продукции реабилитационной направленности создание технологий объективной оценки реабилитационного эффекта приобретает все большее значение. Особое внимание в этом случае уделяется междисциплинарному подходу на стыке медицинских и инженерных наук.

В настоящее время диагностика УО осуществляется посредством психологических и психиатрических методик, а также инструментальных методов, обеспечивающих первичную диагностику и оценку состояния пациента в процессе реабилитации. К основным методам диагностики УО относятся ультразвуковое исследование, электроэнцефалография, компьютерная томография и др. Среди многообразия различных инструментальных методов особое внимание в работе уделено методам мониторинга характеристик УО по речи. Мониторинг характеристик УО по речи является наиболее доступным, простым и оперативным методом, так как результаты исследования оцениваются в реальном времени при свободной двигательной активности пациента и не требуют дополнительного инвазивного или неинвазивного вмешательства. Мониторинг характеристик УО по речи осуществляется посредством анализа коммуникативных навыков, просодических и лексико-грамматических особенностей, а также фонетико-фонематического построения речи пациента. В то же время одной из нерешенных задач в области изучения речи лиц с УО и перспективным направлением исследования является анализ речевого сигнала и измерение его информативных параметров в процессе проведения реабилитационных мероприятий. Таким образом, недостаточная изученность и необходимость поиска новых вспомогательных индикаторов оценки результативности процесса реабилитации лиц с УО для улучшения качества жизни обуславливают актуальность и значимость диссертационного исследования.

В области обработки, анализа и синтеза речи в России ведут разработки такие организации, как Яндекс, Сбер, Центр речевых технологий, Нейроботикс и др. Данные компании создают различные программно-аппаратные и методические решения в области распознавания речи, биометрической идентификации, анализа эмоций и т.д. В свою очередь значительный вклад в становление фундаментальных основ цифровой обработки и анализа речевых сигналов внесли такие ученые, как О. С. Агашин, М. В. Назаров, Ю. Н. Прохоров, Ю. А. Степченков, А. Л. Приоров, А. И. Топников, В. В. Хрящев, Lawrence R. Rabiner, Ronald W. Schafer и др. Однако, несмотря на достижения выдающихся ученых и значительный практический вклад лидирующих организаций

отрасли, до сих пор остаются нерешенными проблемы, связанные с отсутствием специализированного методического и программного обеспечения для обработки и анализа речевых сигналов с целью обнаружения их значимых параметров у лиц с УО в период проведения реабилитационных мероприятий, в частности аудио- и визуального стимулирования.

Целью диссертационного исследования является обнаружение и систематизация по значимости информативных параметров речевых сигналов, зарегистрированных до и после аудио- и визуального стимулирования в ходе реабилитационных мероприятий у лиц с умственной отсталостью.

Задачи исследования:

1. Разработать дизайн исследования и сформировать информационную систему хранения и представления записей и информативных параметров речевых сигналов, зарегистрированных у лиц с умственной отсталостью до и после аудио- и визуального стимулирования в условиях свободной двигательной активности.

2. Разработать методику анализа речевых сигналов лиц с умственной отсталостью, направленную на совершенствование технологий и средств проведения реабилитационных мероприятий.

3. Разработать и исследовать алгоритмы:

- обработки и сравнительного анализа амплитудных, частотных и временных информативных параметров речевых сигналов;
- обнаружения значимых параметров речевых сигналов лиц с умственной отсталостью.

4. Разработать информационно-измерительную систему и программы анализа речевых сигналов для использования в качестве дополнительных средств оценки проведения реабилитационных мероприятий в системе поддержки принятия врачебных решений.

Научная новизна:

1. Создана информационная система хранения и представления данных, отличающаяся наличием:

- записей речевых сигналов лиц с умственной отсталостью, зарегистрированных у лиц основной и контрольных групп, в условиях свободной двигательной активности;
- систематизированных информативных параметров речевых сигналов по их значимости в сравнении с данными речевых сигналов лиц нормотипичного развития (п. 20, 2.2.12).

2. Предложена методика анализа речевых сигналов лиц с умственной отсталостью, отличающаяся этапами предварительной обработки, обнаружения информативных параметров речевых сигналов и систематизации их по значимости (п. 14, 2.2.12).

3. Разработаны алгоритмы (п. 14, 2.2.12):

- предварительной обработки речевых сигналов, отличающийся наличием этапа коррекции естественных искажений спектра;

- сегментации на информативные участки речевых сигналов, отличающийся наличием этапа адаптивной пороговой обработки;
- вычисления частотных, временных и амплитудных параметров речевых сигналов, отличающийся наличием этапа обнаружения их значимости.

4. Предложена структура информационно-измерительной системы для использования в системе поддержки принятия врачебных решений на этапе оценки проведения реабилитационных мероприятий у лиц с умственной отсталостью, отличающаяся наличием локальной речевой базы сигналов, программ обработки и представления результатов обнаружения значимых параметров речевых сигналов в сравнении с данными речевых сигналов лиц нормотипичного развития (п. 2, 2.2.12).

Практическая значимость исследования:

1. Сформирована информационная система хранения и представления записей речевых сигналов, зарегистрированных у 120 лиц с умственной отсталостью до и после аудио- и визуального стимулирования, у 80 лиц с умственной отсталостью без стимулирования и у 40 лиц нормотипичного развития; информативных параметров, систематизированных по степени значимости, предназначенная для исследования алгоритмов и программ обработки и анализа речевых сигналов и принятия решения.

2. Разработана методика анализа речевых сигналов, предназначенная для совершенствования информационно-измерительной системы оценки процесса реабилитационных мероприятий у лиц с умственной отсталостью посредством получения систематизированной цифровой информации об изменении речи пациента до и после аудио- и визуального стимулирования.

3. Разработаны программы обработки речевых сигналов лиц с умственной отсталостью в условиях свободной двигательной активности и обнаружения амплитудных, частотных и временных значимых параметров в среде математического моделирования *Matlab* и статистического анализа *RStudio*, предназначенные для использования при решении задач цифровой обработки сигналов.

4. Разработана структура информационно-измерительной системы на основе алгоритмов и программ анализа речевых сигналов, предназначенная для совершенствования технологий и средств оценки проведения реабилитационных мероприятий.

Методы исследования. В работе использованы методы частотно-временной обработки речевых сигналов, программирование в среде математического моделирования *Matlab* и статистический анализ в среде программирования *RStudio*.

Объект исследования: речевые сигналы, зарегистрированные у лиц с умственной отсталостью.

Предмет исследования: информативные параметры речевых сигналов до и после применения аудио- и визуальных средств стимулирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. База данных, содержащая более 1000 записей речевых сигналов лиц с умственной отсталостью, размеченных на тональные, нетональные участки

и участки пауз; информативные параметры речевых сигналов, систематизированные по значимости в сравнении с данными речевых сигналов лиц нормотипичного развития.

2. Методика, обеспечивающая предварительную обработку, выявление информативных участков, определение информативных параметров речевых сигналов, обнаружение значимых параметров и их систематизацию для использования в информационно-измерительной системе совместно с микрофоном, диктофоном и персональным компьютером в качестве дополнительного средства оценки проведения реабилитационных мероприятий в системе поддержки принятия врачебных решений.

3. Алгоритмы, обеспечивающие обработку речевых сигналов и обнаружение значимости информативных параметров на основе анализа процентного отношения межквартильного размаха значений до и после аудио- и визуального стимулирования лиц с умственной отсталостью и нормотипичного развития.

4. Программы, обеспечивающие представление результатов приращения информативных значений параметров речевых сигналов после аудио- и визуального стимулирования: отношение скорости тональных к нетональным участкам речи на 42 %; отношение ускорения тональных к нетональным участкам речи на 36 %; энтропии распределения временных интервалов на 15 %; стандартного отклонения частоты основного тона на 28 %; энергии участков пауз речевого сигнала на 66 %; среднего значения амплитуды тональных участков речевого сигнала на 40 %; средней частоты речевого сигнала на 40 % для оценки проведения реабилитационных мероприятий.

Обоснованность и достоверность положений, выносимых на защиту, подтверждаются тем, что в теоретических построениях диссертационной работы использовались законы и положения, справедливость которых общепризнанна. Основные результаты диссертационной работы получены при выполнении следующих НИОКР:

1. Социально-средовая, социально-педагогическая и социально-психологическая реабилитация лиц-инвалидов с психическими расстройствами и расстройствами поведения (Государственное задание РФ). № FSGE-2023-0006, 2023–2025 гг.

2. Поиск скрытых паттернов пограничных психических расстройств и разработка системы экспресс-оценки состояния психического здоровья человека (Российский научный фонд). № 17-71-20029, 2017–2019 гг.

Реализация результатов исследования. Результаты диссертационного исследования использованы и внедрены в виде:

1) цифровой базы размеченных потоковых данных речевых сигналов лиц с умственной отсталостью для практического использования неврологами и психиатрами ООО «Лечебно-диагностический центр "Губернский доктор"», г. Заречный;

2) программ цифровой обработки речевых сигналов для использования в системе управления интеллектуальной платформой реабилитации пациентов ООО «Центр экспозиционной медицины», г. Пенза;

3) программно-аппаратных средств и алгоритмов цифровой обработки и анализа речевых сигналов для практического использования Нижегородским областным центром реабилитации инвалидов по зрению «Камерата», г. Нижний Новгород;

4) методики оценки комплексной реабилитации лиц с умственной отсталостью для применения специалистами (психологами, неврологами, логопедами) с целью улучшения качества жизни МБОУ СОШ № 30, г. Пенза;

5) теоретических и практических результатов при подготовке студентов технических специальностей Пензенского государственного университета по направлениям 12.03.01, 12.04.01 «Приборостроение», 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», 30.05.03 «Медицинская кибернетика»; магистрантов, аспирантов и научных работников.

Документы о внедрении представлены в приложении Г диссертации.

Апробация работы. Основные положения работы были представлены на международных и всероссийских конференциях, выставках: IX Национальном форуме реабилитационной индустрии и универсального дизайна «Надежда на технологии» (г. Москва, 2024); Всероссийском научно-практическом семинаре «Сопровождаемое взросление лиц с особыми потребностями: исследования и инклюзивные практики» (г. Москва, 2024); Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения "Энергетика и цифровая трансформация"» (г. Казань, 2024); XIX Международной научно-практической конференции «Актуальные научные исследования» (г. Пенза, 2024); «*Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics*» (г. Калининград, 2020); «*XXVI International Conference Digital Signal Processing and Its Applications*» (г. Москва, 2024); «*2024 IEEE 25 th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials*» (Республика Алтай, 2024); XVI Всероссийской конференции «Распределенные информационно-вычислительные ресурсы. Наука – цифровой экономике» (г. Новосибирск, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных трудов, из них 4 статьи – в журналах ВАК при Минобрнауки России, 5 статей – в журналах и материалах конференций (из них 2 единолично), 4 статьи – в индексируемых базах данных *Scopus* и *Web of Science*, 5 свидетельств на программы для ЭВМ и баз данных.

Личный вклад. Все теоретические и практические результаты, основанные на разработанных средствах анализа информативных параметров речевых сигналов для систем поддержки принятия врачебных решений, выполнены непосредственно автором или в соавторстве с научным руководителем. Автору принадлежат содержащиеся в диссертационной работе результаты исследования методики анализа речевых сигналов лиц с умственной отсталостью [4], в том числе в условиях применения средств аудио- и визуального стимулирования [2, 3, 6, 12]; результаты обнаружения значимых параметров речевых сигналов у лиц с УО [1, 6, 15, 18]; структурная реализация системы регистрации [9, 11], хранения [14, 17] и обработки [5, 7, 8] речевых сигналов лиц с УО,

в том числе для возможного использования в системах поддержки принятия врачебных решений [10, 13, 17].

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов, библиографического списка из 212 наименований и 4 приложений. Общий объем работы без приложений – 151 страница, включая 28 рисунков и 15 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы; сформулированы цель и основные задачи исследования; показаны научная новизна и практическая ценность работы; приведены основные положения, выносимые на защиту; представлены сведения об апробации и внедрении результатов.

В первой главе рассмотрены проблематика диагностики и реабилитации лиц с УО и ее клинические проявления. Особенности психического развития лиц с УО в большинстве своем обусловлены нарушениями в работе центральной нервной системы, которые влияют на когнитивные способности, адаптивные навыки, социальное взаимодействие и обучаемость. Оперативная и эффективная диагностика и реабилитация УО являются важными задачами на пути повышения качества жизни пациентов.

В работе проведен анализ известных методик и инструментальных средств диагностики УО, среди многообразия которых мониторинг характеристик УО по речи говорящего является наиболее перспективным направлением исследования в силу ряда причин. Во-первых, речевой сигнал является измерительным и может быть зарегистрирован в режиме реального времени и свободной двигательной активности. Во-вторых, речевой сигнал представляет собой набор временных, амплитудных и частотных составляющих, особым образом структурирующих данные об изменениях речи пациента. Все это и многое другое положительным образом влияет на выбор в пользу метода мониторинга характеристик УО по речи в процессе реабилитации.

Следует отметить, что уровень развития способов и средств, методов и программ обработки и анализа речевых сигналов достиг высокого уровня. Создается специализированное оборудование для обработки речевых сигналов (например, *DSP* и *FPGA*), разрабатываются различные методы машинного обучения и искусственного интеллекта для распознавания и синтеза речи, библиотеки и фреймворки для обработки и анализа речевых сигналов (например, *librosa*, *scikit-learn*, *tensorflow*). Однако для решения задач анализа речевых сигналов лиц с УО до сих пор отсутствуют методические и программные решения, направленные на повышение оценки результативности процесса проведения реабилитационных мероприятий.

По результатам анализа проблем диагностики и реабилитации лиц с УО сформулированы основные задачи исследования. Выявлена необходимость совершенствования и разработки алгоритмов, программ и систем регистрации,

обработки и сравнительного анализа речевых сигналов лиц с УО для совершенствования технологий и средств оценки проведения реабилитационных мероприятий.

Во второй главе для решения поставленных задач разработаны дизайн и структура исследования, включающая два основных этапа:

– регистрация и обработка речевых сигналов у 120 лиц с УО до и после проведения реабилитационных мероприятий (экспериментальная группа), у 80 лиц с УО в отсутствии реабилитационных мероприятий (первая контрольная группа) и у 40 лиц с нормотипичным развитием (вторая контрольная группа);

– сравнительный анализ речевых сигналов различных групп пациентов и обнаружение значимых параметров.

Регистрация речевых сигналов у лиц с УО осуществлялась специалистами в период непринужденной беседы и ответов на заранее подготовленные вопросы на базе реабилитационного центра и центра инклюзивного образования. Регистрация речевых сигналов у лиц с нормотипичным развитием осуществлялась на базе средней общеобразовательной школы.

В качестве реабилитационных мероприятий у лиц с УО использовано аудио- и визуальное стимулирование как наиболее распространенное и доступное средство воздействия на центральную нервную, зрительную и слуховую системы, участвующие в обработке сенсорной информации. Исходя из особенностей психического развития лиц с УО специалистами осуществлялся индивидуальный подбор схемы реабилитации с использованием аудио- или визуального контента.

Для реализации дизайна исследования сформированы экспериментальная и две контрольные группы лиц в возрасте от 8 до 15 лет в период с 2019 по 2024 г. Критериями отбора лиц с УО стали наличие легкой (по МКБ-10 F70) и умеренной (по МКБ-10 F71) степени УО; возраст от 8 до 15 лет; информированное согласие родителей или законных представителей. Критериями исключения были наличие тяжелой и глубокой степени УО, сенсорные нарушения (слабовидящие, слабослышащие). В таблице 1 представлено распределение лиц основной и контрольных групп.

Таблица 1 – Распределение лиц основной и контрольных групп

Пол / Группа	Экспериментальная группа, N = 120	Первая контрольная группа, N = 80	Вторая контрольная группа, N = 40
Мужской	72 (60 %)	56 (70 %)	26 (65 %)
Женский	48 (40 %)	24 (30 %)	14 (35 %)

Для обоснования необходимости регистрации речевых сигналов у основной и контрольных групп в работе проведены обзор и анализ существующих баз сигналов детей до 18 лет. Известны коммерческие и исследовательские

базы сигналов здоровых детей (зарегистрированных в детском саду или в начальной школе), детей с недоразвитой речью, возникающей при поражении речеслухового или речедвигательного анализатора: *Child Language Data Exchange System*, *Child Language Consortium*, *Speech Accent Archive*, *Russian Corpus of Children's Speech*. Однако ни одна из известных баз не отвечает требованиям к исследуемой выборке: лица в возрасте от 8 до 15 лет; наличие у лиц диагноза УО; наличие речевых сигналов, зарегистрированных в период проведения реабилитационных мероприятий.

Таким образом, в работе впервые предложено создать информационную систему хранения и представления записей речевых сигналов лиц с УО, зарегистрированных до и после аудио- и визуального стимулирования в условиях свободной двигательной активности, предназначенную для исследования алгоритмов и программ обработки и анализа речевых сигналов на предмет обнаружения значимых параметров и принятия решения. Предложенная база данных содержит более 1000 записей речевых сигналов лиц с УО и нормотипичным развитием. Длительность каждого сигнала, размеченного на тональные, нетональные участки и участки пауз, составляет 360 с. Регистрация речевых сигналов осуществлялась с помощью двух микрофонов миниатюрной двухканальной беспроводной микрофонной системы: один был прикреплен на груди у пациента, второй – на груди у специалиста на расстоянии не более 15 см ото рта. Запись осуществлялась с помощью цифрового диктофона высокого качества.

На основании дизайна исследования и базы данных разработана методика анализа речевых сигналов лиц с УО (рисунок 1), обеспечивающая предварительную обработку, выявление информативных участков, определение информативных параметров речевых сигналов, обнаружение значимых параметров и систематизацию их по значимости для использования в информационной системе хранения и представления речевых сигналов, а также в информационно-измерительной системе совместно с микрофоном, диктофоном и персональным компьютером в качестве дополнительных средств оценки проведения реабилитационных мероприятий в системе поддержки принятия врачебных решений.

Для реализации предложенной методики анализа речевых сигналов в работе проведен обзор и обоснован выбор методов и программ определения информативных параметров речевых сигналов. В силу индивидуальных особенностей психического развития лиц с УО сделан вывод о необходимости совершенствования алгоритмов предварительной обработки, сегментации и обнаружения значимых параметров речевых сигналов путем вычисления коэффициентов нормализации данных и компенсации индивидуальных различий в темпе, ритме, интонации и голосе.

В третьей главе разработаны алгоритмы обработки и сравнительного анализа речевых сигналов лиц с УО. Разработка алгоритмов осуществлялась в среде математического моделирования *Matlab*.

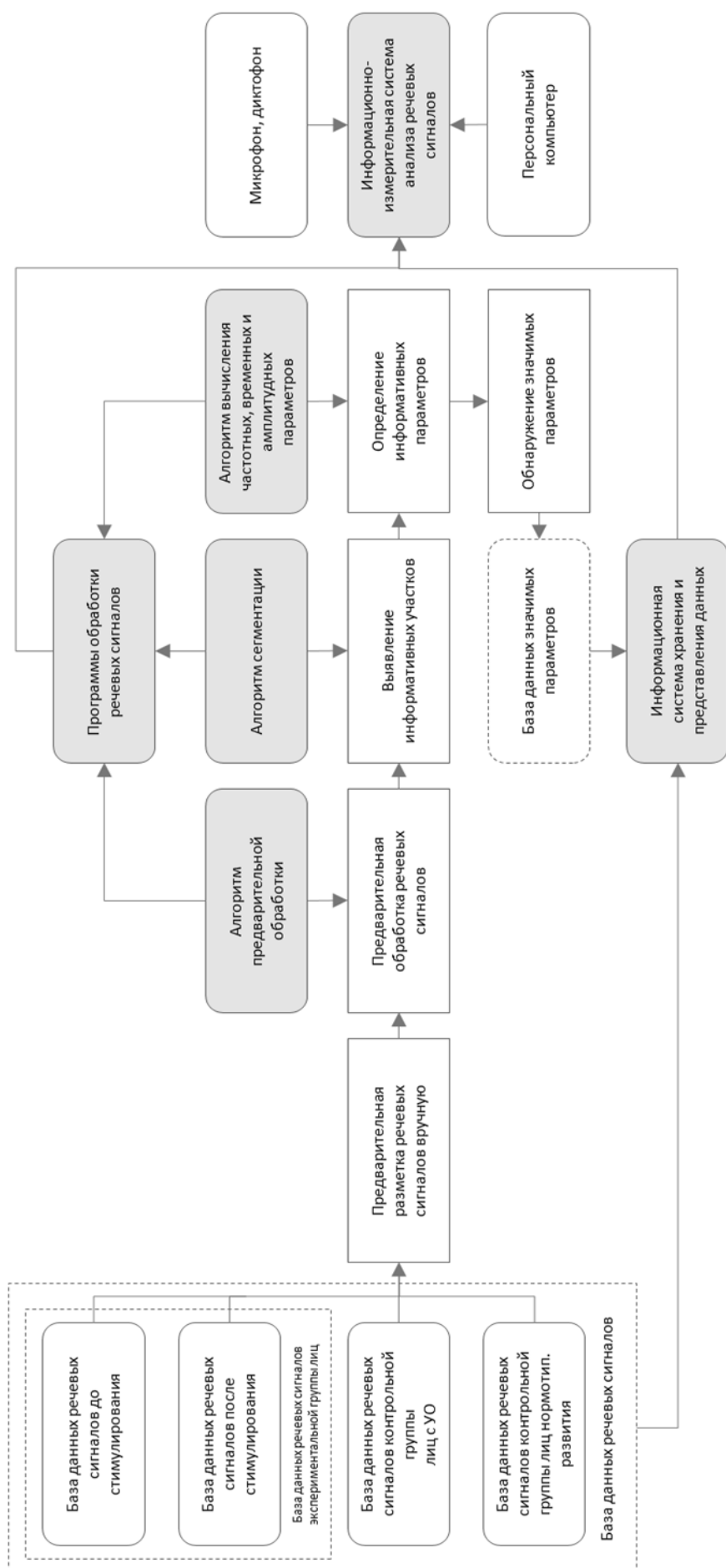


Рисунок 1 – Методика анализа речевых сигналов лиц с умственной отсталостью

Алгоритм предварительной обработки речевых сигналов лиц с УО приведен на рисунке 2 и состоит из следующих основных этапов: ввод речевого сигнала, сегментация сигнала на фрагменты, удаление постоянной составляющей, полосовая фильтрация, коррекция естественных искажений и вывод отфильтрованного сигнала. Отличительной особенностью данного алгоритма от известных аналогов является наличие этапа коррекции естественных искажений спектра.

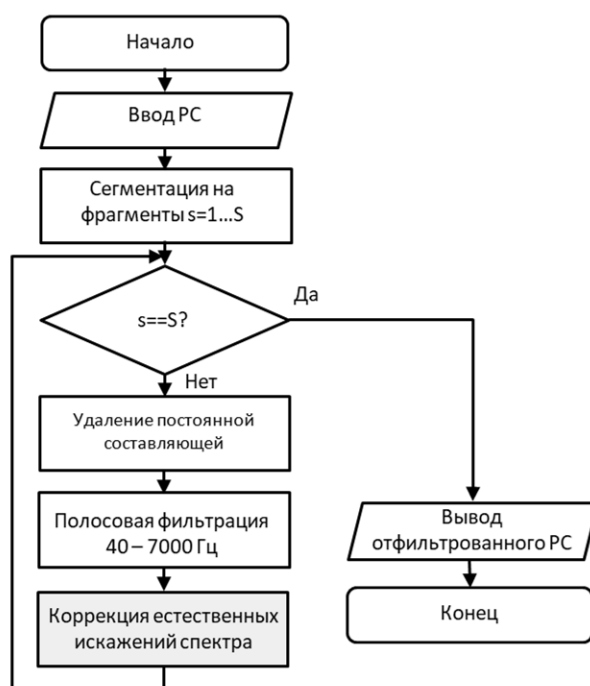


Рисунок 2 – Алгоритм предварительной обработки речевого сигнала

Использование коррекции позволяет осуществить нормализацию энергии речи в частотном спектре. Естественные искажения спектра (обычно минус 6 дБ на октаву) возникают у каждого человека в речевом аппарате при произнесении речи. Однако у лиц с УО искажения спектра составляют более 6 дБ, и для их коррекции осуществляется адаптивный подбор коэффициентов.

Алгоритм сегментации на информативные участки речевых сигналов лиц с УО приведен на рисунке 3 и состоит из следующих основных этапов: ввод отфильтрованного речевого сигнала; сегментация сигнала на фрагменты; адаптивное вычисление значений пороговых параметров; сравнение параметров с заданными значениями; присвоение фрагменту статуса «пауза», «нетональная речь» и «тональная речь»; вывод участков паузы, тональных и нетональных участков. Отличительной особенностью данного алгоритма от известных аналогов является адаптивное вычисление пороговых значений параметров.

Для вычисления пороговых значений параметров используется участок вынужденной начальной паузы длительностью не более 200 мс, соответствующий тишине с фоновым шумом. Учитывая, что у лиц с УО речь содержит шумы, связанные с нарушениями работы органов речевого аппарата, адаптив-

ное вычисления пороговых значений осуществляется для каждой записи речевого сигнала в отдельности.

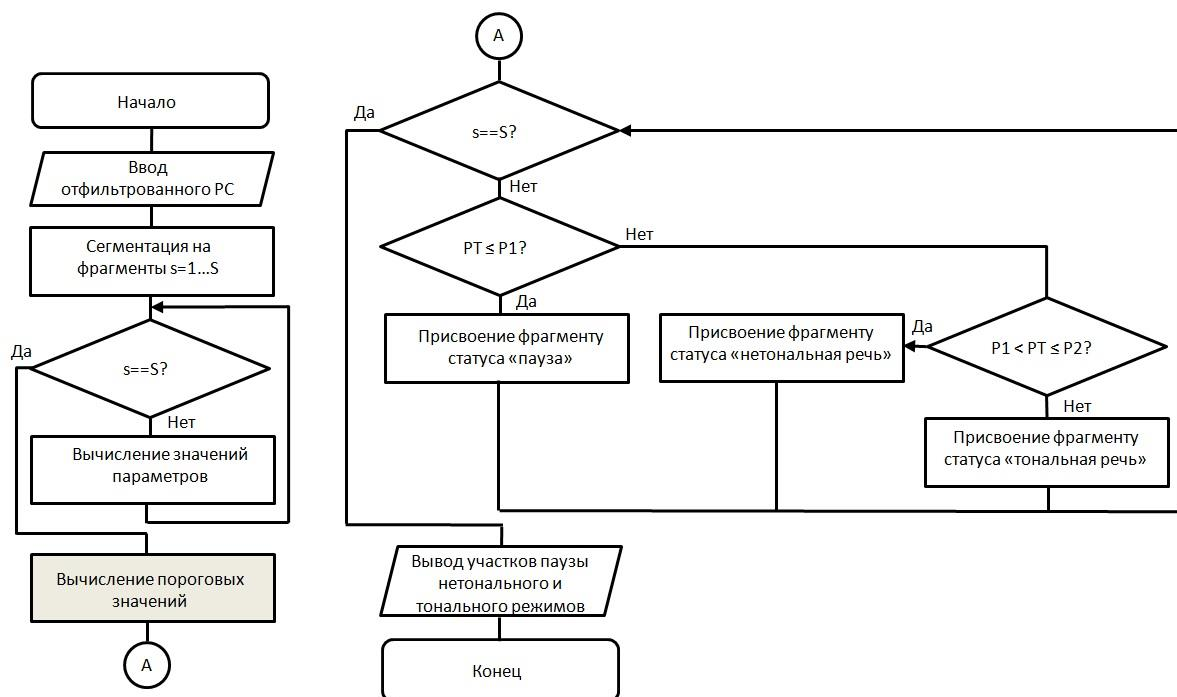


Рисунок 3 – Алгоритм сегментации на информативные участки речевых сигналов

Алгоритм обнаружения значимых параметров речевых сигналов лиц с УО приведен на рисунке 4 и состоит из следующих основных этапов: ввод информативных участков, вычисление временных параметров темпа и ритма, вычисление частотных параметров голоса и интонации, вычисление амплитудных параметров голоса, сравнительный анализ речевых сигналов лиц с УО до и после аудио- и визуального стимулирования, сравнительный анализ речевых сигналов с сигналами лиц с УО без стимулирования и лиц нормотипичного развития, вывод значений информативных параметров и систематизация их по степени значимости.

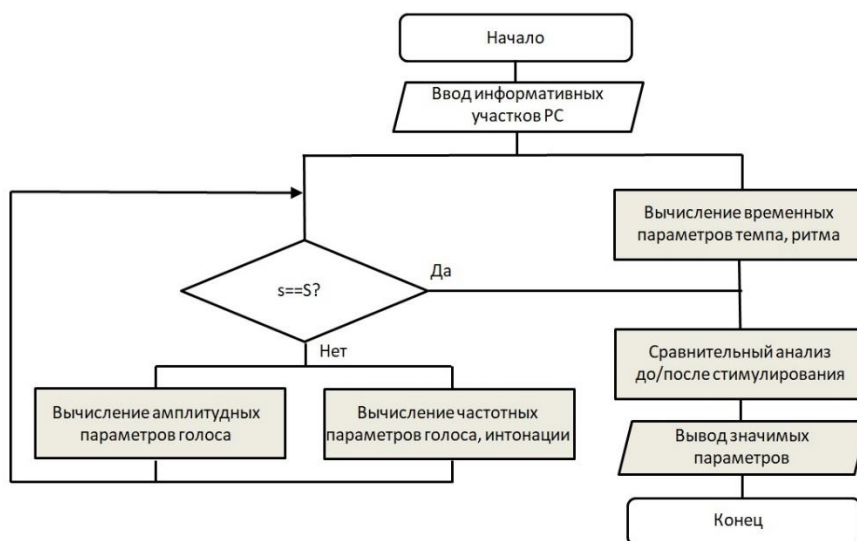


Рисунок 4 – Алгоритм обнаружения значимых параметров речевых сигналов

Для реализации алгоритма обнаружения значимых параметров речевых сигналов проведен обзорный анализ известных информативных параметров, используемых для решения широкого круга задач в области речевых технологий. Основываясь на эмпирических исследованиях и экспертных знаниях, сформирован набор из 15 информативных параметров, максимально отражающих связь различных характеристик с уровнем стабильности моторики речевого аппарата лиц с УО.

В диссертационной работе приведены вычисления выбранных параметров речевых сигналов:

- темпа (отношение скорости речи тональных к нетональным участкам; отношение ускорения речи тональных к нетональным участкам; продолжительность участков пауз);
- ритма (энтропия распределения временных интервалов; среднее значение продолжительности тональных участков; зияние тональных участков);
- интонации (среднее значение частоты основного тона; стандартное отклонение частоты основного тона; минимальное значение частоты основного тона; энергия участков пауз);
- голоса (среднее значение амплитуды тональных участков; стандартное отклонение амплитуды тональных участков; среднее относительное возмущение частоты основного тона; коэффициент возмущения частоты основного тона; средняя частота).

Среди представленных информативных параметров в работе модифицированы некоторые из них с учетом особенностей формирования речи у лиц с УО.

Расчет отношения скорости тональных к нетональным участкам (*speed of speech for mental disorders, SSmd*):

$$SSmd = \frac{\frac{t_i}{M_t}}{\frac{k_i}{M_k}} = \frac{t_i M_k}{k_i M_t},$$

где t_i – длительность тональных участков; k_i – длительность нетональных участков; M_t – среднее значение длительности тональных участков; M_k – среднее значение длительности нетональных участков; i изменяется в пределах от 1 до N_t – количество тональных и N_k – количество нетональных участков.

Расчет отношения ускорения тональных к нетональным участкам (*acceleration of speech for mental disorders, ASmd*):

$$ASmd = \frac{S_t - S_k}{T},$$

где S_t , S_k – скорости распределения временных интервалов тональных и нетональных участков, с; T – общая длительность анализируемого речевого сигнала, с.

Расчет энергии участков пауз речевого сигнала (*Energy of speech for mental disorders, ESmd*):

$$ESmd = \sum_{p=1}^P x(p)^2,$$

где $x(p)$ – участки пауз речевого сигнала; P – общая длительность анализируемого участка пауз речевого сигнала, с.

Расчет среднего значения амплитуды тональных участков речевого сигнала (*Amplitude of speech for mental disorders, $ASmd^{mean}$*):

$$ASmd^{mean} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x(t),$$

где $x(t)$ – тональные участки речевого сигнала; T – общая длительность анализируемого тонального участка речевого сигнала, с.

Расчет стандартного отклонения амплитуды тональных участков речевого сигнала (*Amplitude of speech for mental disorders, $ASmd^{sd}$*):

$$ASmd^{sd} = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T \left(x(t) - ASmd^{mean} \right)^2.$$

На основании известных и модифицированных параметров анализа речевых сигналов выполнен расчет их значений для лиц с УО до и после аудио- и визуального стимулирования, без стимулирования и лиц с нормотипичным развитием.

В четвертой главе проведены исследования разработанных алгоритмов. В результате вычисления информативных параметров речевых сигналов у основной и контрольных групп испытуемых сформированы и сведены в таблицы 2 и 3 их диапазоны значений, в частности межквартильный размах (минимальное и максимальное значения) и среднее значение.

Процесс обнаружения и сравнительного анализа речевых сигналов построен по следующему принципу. Сначала рассчитываются значения информативных параметров речевых сигналов контрольных групп. Сравнение процентного отношения значений межквартильного размаха распределения указанных групп дает информацию о значимости параметров у лиц с нормотипичным развитием в сравнении с параметрами у лиц с УО без стимулирования. Результаты расчетов показаны в таблице 2, из которой видно, что только три информативных параметра речевых сигналов (выделены) не отнесены к значимым. Данные параметры пересекаются между собой, что не позволяет их достоверно отнести к категории «значимых». Оставшиеся параметры могут быть использованы в качестве нормированных значений для сравнения с показателями информативных параметров основной группы.

Далее выполняется расчет значений информативных параметров речевых сигналов основной группы: лиц с УО до и после аудио- и визуального стимулирования. В результате расчета значений информативных параметров у лиц основной группы (таблица 3) в сравнении с данными речевых сигналов

у лиц с нормотипичным развитием систематизированы параметры речевых сигналов по их значимости.

Таблица 2 – Результаты анализа информативных параметров речевых сигналов контрольных групп

Информативный параметр	Лица с УО без стимуляции			Лица с нормотипичным развитием			Q25 Q75, %
	Q 25 %	μ_{mean}	Q 75 %	Q 25 %	μ_{mean}	Q 75 %	
<i>SSmd</i>	794	829	845	1577	1601	1646	87
<i>ASmd</i>	0,009	0,2	0,8	0,9	1,5	2,6	13
<i>DSPmd</i>	692	869	1031	964	1674	2070	–6
<i>ESDmd</i>	0,4	0,45	0,67	0,9	1,4	1,7	34
<i>MDSmd</i> , с	650	919	1163	1257	1811	2406	8
<i>HSTmd</i> , мс	2667	3366	3411	5079	6994	7029	49
<i>MFSmd^{mean}</i> , Гц	1396	1966	2182	2780	4001	4683	27
<i>MFSmd^{sd}</i> , кГц	0,09	0,2	0,5	0,62	1,75	2,2	24
<i>MFSmd^{min}</i> , Гц	69	78	80	140	158	167	75
<i>ESmd</i> , Вт	0,09	0,2	0,4	0,6	7,3	11,9	50
<i>ASmd^{mean}</i> , В	0,09	0,19	0,3	0,4	0,6	0,7	33
<i>ASmd^{sd}</i> , В	0,009	0,05	0,1	0,13	0,15	0,18	30
<i>MFSmd^{mrdr}</i> , Гц	21	30	39	36	44	56	–8
<i>MFSmd^{dc}</i> , Гц	772	919	1106	1484	1811	2219	34
<i>AFSmd^{mean}</i> , Гц	362	516	601	527	1020	1211	–12

Таблица 3 – Результаты анализа информативных параметров речевых сигналов основной группы

Информативный параметр	Лица с УО ДО стимуляции			Лица с ОУ ПОСЛЕ стимуляции			Q25 Q75, %	<i>Mmean</i> , %
	Q 25 %	μ_{mean}	Q 75 %	Q 25 %	μ_{mean}	Q 75 %		
<i>SSmd</i>	811	846	863	1322	1334	1357	42,01	
<i>ASmd</i>	0,001	0,03	0,09	0,13	0,24	0,3	36,36	
<i>DSPmd</i>	707	887	1053	751	961	1113	– 33,48	8,01
<i>ESDmd</i>	0,41	0,46	0,48	0,56	0,73	0,85	15,38	
<i>MDSmd</i> , с	664	938	1187	645	929	1234	– 59,17	– 0,96
<i>HSTmd</i> , мс	2722	3435	3481	2605	3587	3605	– 28,79	4,33
<i>MFSmd^{mean}</i> , Гц	1425	2007	2227	1426	2052	2402	– 43,85	2,22
<i>MFSmd^{sd}</i> , кГц	0,01	0,03	0,06	0,08	0,26	1,12	28,57	
<i>MFSmd^{min}</i> , Гц	71	80	82	72	81	86	– 12,99	1,24
<i>ESmd</i> , Вт	0,01	0,03	0,05	0,1	1,7	2,5	66,67	
<i>ASmd^{mean}</i> , В	0,01	0,02	0,04	0,06	0,12	0,18	40,00	
<i>ASmd^{sd}</i> , В	0,001	0,0057	0,02	0,03	0,04	0,06	40,00	
<i>MFSmd^{mrdr}</i> , Гц	22	31	37	24	33	39	– 42,62	6,25
<i>MFSmd^{dc}</i> , Гц	788	938	1129	761	929	1138	– 38,94	– 0,96
<i>AFSmd^{mean}</i> , Гц	370	527	614	373	626	775	– 48,83	17,17

В частности, только семь параметров (выделены) подтвердили свою значимость в основной группе. Оставшиеся параметры, исходя из расчетов процентного отношения значения среднего значения плотности распределения параметра

после реабилитации к значению до реабилитации, могут быть отнесены к категории слабо значимых или незначимых. Однако в условиях накопления большей выборки испытуемых и измерительных сигналов данные значения могут быть скорректированы в пользу увеличения числа значимых параметров.

По результатам оценки значимых параметров речевых сигналов сделан вывод, что увеличение значений таких параметров речевых сигналов после аудио- и визуального стимулирования, как отношение скорости тональных к нетональным участкам речи на 42 %; отношение ускорения тональных к нетональным участкам речи на 36 %; энтропии распределения временных интервалов на 15 %; стандартного отклонения частоты основного тона на 28 %; энергии участков пауз речевого сигнала на 66 %; среднего значения амплитуды тональных участков речевого сигнала на 40 %; средней частоты речевого сигнала на 40 %, может быть рекомендовано для использования в системе поддержки принятия врачебных решений на этапе оценки проведения реабилитационных мероприятий лиц с УО. Представленные результаты исследований зарегистрированы в виде программ для ЭВМ.

Для практического представления результатов диссертационного исследования разработана структура информационно-измерительной системы, состоящая из модулей локальных баз речевых сигналов и систематизированных информативных параметров, модулей программ обработки и представления результатов обнаружения значимых параметров речевых сигналов в сравнении с данными речевых сигналов лиц нормотипичного развития. Предложенная система в соответствии с ее техническими характеристиками (таблица 4) может быть предназначена для совершенствования технологий и средств оценки проведения реабилитационных мероприятий.

Таблица 4 – Основные характеристики информационно-измерительной системы

Количество микрофонов, ед.	2 (беспроводные)
Рабочий диапазон микрофонов, Гц	От 40 до 7000
Диаграмма направленности микрофона	Всенаправленная
Рабочий радиус (без препятствий), м	До 100
Время бесперебойной работы, ч	Не менее 8
Частота дискретизации диктофона, Гц	Не менее 16 000
Процессор с тактовой частотой, ГГц	Не менее 2
Объем свободной оперативной памяти, Мб	Не менее 1024
Объем свободной памяти на жестком диске, Гб	Не менее 2

Совокупность представленных в диссертационной работе результатов:

– методика и информационно-измерительная система позволят создать предпосылки для практического внедрения в системы поддержки принятия врачебных решений на этапе оценки проведения реабилитационных мероприятий, в частности аудио- и визуального стимулирования, лиц с УО для задач персонализированной медицины;

– алгоритмы и программы обработки и сравнительного анализа речевых сигналов могут найти широкое применение в системах биометрической идентификации личности; для оценки психоэмоционального состояния человека в условиях реальных или смоделированных (на примере виртуальной реальности) стрессовых ситуаций; для практического использования логопедами или неврологами для диагностики заболеваний, связанных с различными нарушениями речи у лиц разного возраста.

Результаты диссертационного исследования использованы в ряде научно-производственных и медицинских организаций (ООО «Лечебно-диагностический центр "Губернский доктор"», г. Заречный; ООО «Центр экспозиционной медицины», Нижегородский областной центр реабилитации инвалидов по зрению «Камерата», г. Нижний Новгород; МБОУ СОШ № 30, г. Пенза), а также внедрены в учебный процесс Пензенского государственного университета при подготовке студентов технических специальностей.

В приложениях представлены согласие родителей или законных представителей на проведение исследования (приложение А); листинг программы обработки и анализа значимых параметров речевых сигналов у лиц с умственной отсталостью (приложение Б); листинг программы представления и визуализации речевых сигналов (приложение В); документы, подтверждающие использование и внедрение результатов диссертационного исследования (приложение Г).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны дизайн и структура исследования, описывающие процесс формирования основной группы испытуемых лиц с умственной отсталостью до и после аудио- и визуального стимулирования, контрольных групп лиц с умственной отсталостью без стимулирования и лиц с нормотипичным развитием, предназначенные для создания верифицированных баз данных речевых сигналов лиц с умственной отсталостью.

2. Создана информационная система хранения и представления более 1000 записей речевых сигналов, зарегистрированных на основании информационных согласий родителей или законных представителей у 120 лиц с умственной отсталостью до и после аудио- и визуального стимулирования, у 80 лиц с умственной отсталостью без стимулирования и у 40 лиц нормотипичного развития; информативных параметров в условиях свободной двигательной активности и размеченных на тональные, нетональные участки и участки пауз, систематизированные по значимости параметры речевых сигналов, предназначенная для использования на этапах разработки алгоритмов и программ цифровой обработки речевых сигналов, в том числе лиц с умственной отсталостью.

3. Разработана методика анализа речевых сигналов у лиц с умственной отсталостью, обеспечивающая возможность предварительной обработки, сегментации и обнаружения информативных параметров речевых сигналов

и систематизации их по значимости и предназначенная для использования в информационно-измерительных системах оценки проведения реабилитационных мероприятий у лиц с умственной отсталостью.

4. Разработаны в среде математического моделирования *Matlab* и исследованы в среде статистического анализа *RStudio* алгоритмы предварительной обработки, сегментации на информативные участки, вычисления и обнаружения семи значимых частотных, временных и амплитудных параметров речевых сигналов на основе анализа процентного отношения межквартильного размаха плотности распределения значений до и после аудио- и визуального стимулирования лиц с умственной отсталостью в сравнении со значениями у лиц нормотипичного развития, предназначенные для использования в системах поддержки принятия врачебных решений на этапе оценки процесса проведения реабилитационных мероприятий.

5. Предложены модификации формул для расчета следующих параметров речевых сигналов: отношения скорости тональных к нетональным участкам; отношения ускорения тональных к нетональным участкам; энергии участков пауз; среднего значения амплитуды тональных участков; стандартного отклонения амплитуды тональных участков, адаптированные с учетом особенностей формирования речи и позволяющие обнаружить значимые изменения в речи у лиц с умственной отсталостью.

6. Разработаны программы анализа речевых сигналов лиц с умственной отсталостью преимущественно от 12 лет с параметрами активного внимания от 8 до 10 мин, обеспечивающие представление результатов увеличения значений параметров речевых сигналов после аудио- и визуального стимулирования: отношение скорости тональных к нетональным участкам речи на 42 %; отношение ускорения тональных к нетональным участкам речи на 36 %; энтропии распределения временных интервалов на 15 %; стандартного отклонения частоты основного тона на 28 %; энергии участков пауз речевого сигнала на 66 %; среднего значения амплитуды тональных участков речевого сигнала на 40 %; средней частоты речевого сигнала на 40 %, отражающие развитие когнитивных функций, положительное эмоциональное изменение, а также проявление коммуникативных навыков.

7. Предложена структура информационно-измерительной системы для оценки реабилитационного эффекта у лиц с умственной отсталостью на основе анализа речевых сигналов, отличающаяся наличием локальной базы, программ обработки и представления результатов обнаружения значимых параметров речевых сигналов, предназначенная для использования в системах поддержки принятия врачебных решений на этапе оценки проведения реабилитационных мероприятий у лиц с умственной отсталостью с целью повышения качества их жизни.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Тычкова, А. Н. Анализ и оценка сигнальных систем диагностики пограничных психических расстройств / А. Ю. Тычков, А. В. Агейкин, А. К. Алимуратов, П. П. Чураков, А. Н. Тычкова // Биотехносфера. – 2017. – № 1 (49). – С. 35–39.

2. Тычкова, А. Н. Виртуальная реальность на пути повышения качества реабилитации пациентов / А. К. Алимуратов, Д. С. Чернышов, О. С. Симакова, А. Н. Тычкова, Д. Л. Овчинников // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2024. – № 2. – С. 67–72. – doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-8

3. Тычкова, А. Н. Система взаимодействия шлема виртуальной реальности и нейроинтерфейса / А. Д. Иванов, А. Ю. Тычков, О. С. Симакова, А. К. Алимуратов, А. Н. Тычкова, Д. С. Чернышов, Д. Л. Овчинников, З. М. Юлдашев // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27, № 5. – С. 41–45. – doi: 10.18127/j15604136-202405-06

4. Тычкова, А. Н. Методологический подход повышения результативности процесса реабилитации на основе анализа потоковых речевых данных / А. Н. Тычкова, А. К. Алимуратов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2024. – № 3. – С. 119–124. – doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-14

Публикации в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science

5. Tychkova, A. N. Methods and tools for signal biomarkers detection for rapid diagnosis of psychogenic states / A. Yu. Tychkov, A. V. Ageikin, A. K. Alimuradov, Y. S. Kvitka, P. P. Churakov, V. B. Kalistratov, S. Y. Mitroshina, A. N. Tychkova // Information Innovative Technologies. – 2017. – № 1. – P. 136–140.

6. Tychkova, A. N. The effect of virtual reality on mental health in the design of automated control systems / A. Y. Tychkov, A. K. Alimuradov, G. V. Vishnevskaya, P. P. Churakov, A. V. Ageykin, A. N. Tychkova // Conference Proceedings – 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics, DCNAIR 2020. – 2020. – Vol. 4. – P. 248–250. – doi: 10.1109/dcnair50402.2020.9216865

7. Tychkova, A. N. Research into the Influence of Informative Speech Parameters on the Reliability of RNN-based Classification of Human Emotional States / A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, M. A. Tyurin, D. S. Dudnikov, A. N. Tychkova, D. S. Moiseev, M. Myasnikova // XXVI International Conference Digital Signal Processing and Its Applications DSPA. – 2024. – P. 8.

8. Tychkova, A. N. A Method to Recognize Significant Informative Speech Signal Parameters Relevant to Human Emotional States / A. K. Alimuradov,

A. N. Tychkova // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2024. – P. 2030–2035.

Публикации в других изданиях

9. Тычкова, А. Н. Разработка симуляторов медицинского назначения / А. Ю. Тычков, А. К. Алимуратов, П. П. Чураков, А. Н. Тычкова // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – № S2 (129). – С. 131–135.

10. Тычкова, А. Н. Информационно-измерительная система оценки психического здоровья человека / А. Ю. Тычков, А. Н. Тычкова // Распределенные информационно-вычислительные ресурсы. Наука – цифровой экономике (DICR–2017) : сборник трудов XVI Всероссийской конференции / Институт вычислительных технологий СО РАН. – Новосибирск, 2017. – С. 260–266.

11. Тычкова, А. Н. Инструментальные методы и средства исследования умственной отсталости / А. Н. Тычкова // Тинчуринские чтения-2024 «Энергетика и цифровая трансформация» : Международная молодежная научная конференция (г. Казань, 24–26 апреля 2024 г.). – Казань, 2024. – С. 741–744.

12. Тычкова, А. Н. Системный подход для исследования аудиовизуального контакта в системах виртуальной реальности / Д. С. Чернышов, С. Ю. Тверская, А. К. Алимуратов, А. Н. Тычкова // Тинчуринские чтения-2024 «Энергетика и цифровая трансформация» : Международная молодежная научная конференция (г. Казань, 24–26 апреля 2024 г.). – Казань, 2024. – С. 735–738.

13. Тычкова, А. Н. Алгоритм обработки речевых сигналов в СППВР для лиц с умственной отсталостью / А. Н. Тычкова // Актуальные научные исследования : XIX Международная научно-практическая конференция. – Пенза, 2024. – С. 64–69.

Объекты интеллектуальной собственности

14. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2017620266. Верифицированная база медицинских электрических и акустических сигналов / А. Ю. Тычков, А. К. Алимуратов, Ю. С. Квитка, А. В. Агейкин, П. П. Чураков, А. Н. Тычкова, В. Б. Калистратов, С. Ю. Митрошина. – № 2017620022 ; заявл. 09.01.2017 ; опубл. 02.03.2017.

15. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018612760. Программа измерения просодических характеристик речевых сигналов при пограничных психических расстройствах / А. К. Алимуратов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, А. В. Агейкин, А. Н. Тычкова. – № 2018610009 ; заявл. 11.01.2018 ; опубл. 27.02.2018.

16. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018612866. Программа принятия решений о психической активности человека по

конечному числу эмпирических мод / А. Ю. Тычков, А. К. Алимуратов, П. П. Чураков, А. Н. Тычкова. – № 2018610397 ; заявл. 18.01.2018 ; опубл. 01.03.2018.

17. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024669529. Программная реализация системы регистрации и отображения физиологических данных / А. Ю. Тычков, Д. С. Чернышов, О. С. Симакова, А. Д. Иванов, А. К. Алимуратов, Р. В. Золотарев, Д. Л. Овчинников, А. Н. Тычкова. – № 2024667696 ; заявл. 29.07.2024 ; опубл. 19.08.2024.

18. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024681037. Программа обработки и анализа значимых параметров речевых сигналов у людей с умственной отсталостью / А. Н. Тычкова, А. К. Алимуратов, В. Н. Горбунов. – № 2024668520 ; заявл. 08.08.2024 ; опубл. 04.09.2024.

Научное издание

ТЫЧКОВА Анна Николаевна

**МЕТОДИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНАЛИЗА
РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ЛИЦ С УМСТВЕННОЙ ОТСТАЛОСТЬЮ**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения
(технические науки)

Редактор *Н. А. Сидельникова*
Технический редактор *Р. Б. Бердникова*
Компьютерная верстка *Р. Б. Бердниковой*

Подписано в печать 18.10.2024. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,16. Заказ № 502. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru