

 МИНСК

Часть 2

# BIG DATA

and Advanced Analytics

VI

МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ

2020



Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»  
Национальная академия наук Беларуси  
Объединенный институт проблем информатики  
DHTechnologies & Data Nubes (Austin, USA)  
University of Technology (Kielce, Poland)  
ActiveCloud (Москва, Россия)  
BEZNext (Chicago, USA)  
IBM (NY, USA)  
Ташкентский университет информационных технологий  
(Ташкент, Узбекистан)  
ИООО «ЭПАМ Системз»  
ИЧПУП «Годел Текнолоджис Юроп»

## **BIG DATA AND ADVANCED ANALYTICS**

## **BIG DATA И АНАЛИЗ ВЫСОКОГО УРОВНЯ**

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ  
VI МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Республика Беларусь, Минск, 20-21 мая 2020 года)

В трех частях

Часть 2

Минск  
«Бестпринт»  
2020

УДК 004.6(082)

ББК 32.97.3

Б59

Редакционная коллегия:

**В.А. Богуш**, доктор физико-математических наук, профессор, ректор учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» Республики Беларусь;

**Boris Zibitsker**, MS, PhD and Honorable Doctor at BSUIR, President and CEO BEZNext, Professor DePaul University in Chicago, USA;

**С.К. Дик**, кандидат физико-математических наук, доцент, депутат Палаты представителей Национального собрания Республики Беларусь седьмого созыва;

**Д.В. Лихачевский**, кандидат технических наук, доцент, декан факультета компьютерного проектирования учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» Республики Беларусь;

**К.Д. Яшин**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» Республики Беларусь

Рецензенты:

**Boris Zibitsker**, MS, PhD and Honorable Doctor at BSUIR, President and CEO BEZNext, Professor DePaul University in Chicago, USA;

**А.В. Тузиков**, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, генеральный директор государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» Республики Беларусь;

**Domonique A. Heger**, PhD, President and CEO  
DHTechnologies & Data Nubes, Austin, USA

**Alain Biem**, PhD, Opera Systems, formerly at IBM Watson  
Research – Big Data, NY, USA;

**Н. Успенский**, руководитель направления Big Data & Analytics (Беларусь, Украина, Чехия) в корпорации Oracle.

**BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 20-21 мая 2020 года): в 3 ч. Ч. 2 / редкол. : В.А. Богуш [и др.]. – Минск : Бестпринт, 2020. – 419 с.**  
ISBN 978-985-90533-8-2.

В сборнике опубликованы результаты научных исследований и разработок в области BIG DATA and Advanced Analytics для оптимизации IT-решений и бизнес-решений, а также тематических исследований в области медицины, образования и экологии.

УДК 004.6(082)

ББК 32.97.3

ISBN 978-985-90533-8-2 (ч. 2)

ISBN 978-985-90533-2-0

© УО «Белорусский государственный

университет информатики и радиоэлектроники», 2020

© Оформление. УП «Бестпринт», 2020

УДК 004.934.2+534.784

## АНАЛИЗ СТЕПЕНИ НАРУШЕНИЯ ГОЛОСОВОЙ ФУНКЦИИ У ПАЦИЕНТОВ С БОКОВЫМ АМИОТРОФИЧЕСКИМ СКЛЕРОЗОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ



**Д.С. Лихачев,**  
Доцент кафедры  
ЭВС БГУИР, к.т.н.,  
доцент



**Е.С. Наркевич**  
Студентка 4 курса  
специальности  
«ЭВС», ФКСиС,  
БГУИР



**Ю.Н. Рушкевич**  
Главный научный  
сотрудник  
неврологического  
отдела РНПЦ  
неврологии и  
нейрохирургии,  
д.м.н., доцент



**М.И. Вашкевич,**  
Доцент кафедры  
ЭВС БГУИР, к.т.н.,  
доцент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь  
Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии  
E-mail: vashkevich@bsuir.by

### **Д.С. Лихачев**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР) по специальности «Электронные вычислительные средства». Кандидат технических наук. Работает доцентом кафедры ЭВС в БГУИР. Научное направление: методы обработки речевых сигналов.

### **Е.С. Наркевич**

Студентка 4-го курса БГУИР специальности «Электронные вычислительные средства».

### **Ю.Н. Рушкевич**

Окончила Минский государственный медицинский институт, педиатрический факультет. Доктор медицинских наук, защитила докторскую диссертацию на тему «Болезнь двигательного нейрона: эпидемиология, патофизиологические характеристики, клиника, диагностика, организация системы медицинской помощи». Работает главным научным сотрудником неврологического отдела РНПЦ неврологии и нейрохирургии. Научное направление: диагностика и лечение нервно-мышечных заболеваний, болезни двигательного нейрона, нарушения речи и глотания при заболеваниях нервной системы.

### **М.И. Вашкевич**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР) по специальности «Электронные вычислительные средства». Кандидат технических наук. Работает доцентом кафедры ЭВС в БГУИР. Является докторантом БГУИР. Проводит научные исследования, связанные с анализом речевых сигналов для выявления патологии.

**Аннотация.** В работе предлагается специализированное программное средство ALS Expert для диагностики и оценки состояния голосовой функции у больных БАС. ALS Expert представляет собой мобильное приложение для операционной системы Android с возможностью записи, обработки голосовых тестов и вывода результатов анализа голоса. Результат работы приложения может быть представлен либо в виде набора параметров, которые далее анализируются врачом для профессиональной оценки состояния пациента, либо в виде автоматически формируемого отчёта для предварительной диагностической оценки. Для обработки голосового сигнала используется математическая модель на базе линейного дискриминантного анализа (ЛДА). Согласно модели ЛДА записанный голос относится либо к группе здоровых, либо к группе больных БАС. В

последнем случае для голоса внутренняя оценка, полученная в модели ЛДА, отображается в степень нарушения голосовой функции, которая измеряется от 0 до 100%. Для обучения и верификации предложенного способа использовалась база из 63 голосов (38 здоровых, 25 пациентов с БАС), записанная в Республиканском научно-клиническом центре неврологии и нейрохирургии (Минск, Беларусь).

**Ключевые слова:** обработка речи, детектирование патологии в голосе, оценка речевого сигнала, боковой амиотрофический склероз, БАС.

*Введение.* Самая распространенная разновидность болезни двигательного нейрона (БДН) – боковой амиотрофический склероз (БАС), который характеризуется поражением мотонейронов головного и спинного мозга, проводящих кортикоспинальных путей с развитием мышечных атрофий, бульбарных и дыхательных нарушений. Быстрое прогрессирование заболевания приводит к нарушению функций дыхания и глотания, способности самостоятельно передвигаться. Продолжительность жизни пациентов с БАС составляет 3-5 лет. По данным проведенных исследований установлено, что годовая выживаемость пациентов с БАС составляет 80,3% [95%ДИ 76,6-84,1], 2-х летняя снижается до 51% [95%ДИ 46,3-55,8], 3-х летняя снижается до 30,9% [95%ДИ 26,2-35,5]. Установлен рост показателей заболеваемости, распространенности и смертности в нашей стране, что отражает улучшение ситуации с диагностикой болезни и обращаемостью пациентов за медицинской помощью [1]. Ранняя диагностика БАС позволяет активнее воздействовать на течение болезни, сохраняя качество жизни пациента.

Нарушения речи и глотания развиваются либо в дебюте заболевания, либо присоединяются в процессе прогрессирования болезни, наблюдаясь более чем в 80% всех случаев БАС. На ранних этапах нарушения речи просматриваются врачами из-за редкости патологии, следствием чего являются неправильные диагнозы и соответственно лечение, с применением ненужных, а иногда и опасных при БАС видов терапии или даже хирургического лечения.

Поэтому главными задачами врача являются быстрая и объективная постановка диагноза, мониторинг состояния пациента в динамике для своевременной коррекции изменений состояния пациента, особенно речи и глотания [2]. Разработка и тестирование инструментов для диагностики, мониторинга и оценки состояния пациентов является необходимым критерием для осуществления эффективных действия со стороны врача.

Процесс речеобразования задействует корковые и подкорковые структуры, и поэтому особенно чувствителен к гибели двигательных нейронов. Это означает, что анализ речи для ранней диагностики БАС может быть полезным для выявления людей с бульбарной формой заболевания (первые проблемы в данном случае возникают с речью, дыханием и глотанием), а также людей с другими формами БАС, у которых, также могут выявляться бульбарные нарушения.

В настоящее время ведутся активные исследования, нацеленные на разработку системы детектирования речевых нарушений, обусловленных БАС. Об этом свидетельствует факт, что на крупнейшей мировой конференции, посвященной обработке речи, – Interspeech 2019 – пять докладов было посвящено теме обработки и оценке качества речи людей с БАС [3,4,5,6,7].

В данной работе ставилась задача разработки мобильного приложения для диагностики и отслеживания речевых нарушений у людей с БАС. Главными преимуществами построения системы диагностики заболевания, его мониторинга и оценки в виде мобильного приложения является простота его использования, отсутствие необходимости использовать сложное техническое оборудование, повсеместность использования смартфонов. Также следует отметить, что мобильное приложение не накладывает жестких ограничений на место проведения тестирования и не требует его проведения в специально оборудованном помещении. Это позволяет проводить тестирование как непосредственно врачом, так и пациентом самостоятельно.

*Речевые задания, используемые в системах детектирования БАС. Существующие*

исследовательские системы детектирования речевых нарушений, связанных с БАС отличаются по используемым в них речевым заданиям. Так в [8, 9] в качестве речевого задания использовался счет от одного до десяти. В [10-12] предложено использовать несколько речевых тестов состоящих в произнесении односложных слов, нот и длительного звука [и]. В работе [13] тестовый сигнал содержал короткую фразу «один, два, три». Фразы общего содержания (как, например, «Мне нужны помощь», «позвони мне, когда у тебя получится») использовались в качестве речевого задания в работах [14, 15].

В [5] участников эксперимента просили прочитать специально разработанный короткий отрывок текста («Bamboo passage») следующего содержания [16]: «Bamboo walls are getting to be very popular. They are strong, easy to use, and good looking. They provide a good background and create the mood in Japanese gardens. Bamboo is a grass, and is one of the most rapidly growing grasses in the world. Many varieties of bamboo are grown in Asia, although it is also grown in America. Last year we bought a new home and have been working on the flower gardens. In a few more days, we will be done with the bamboo wall in one of our gardens. We have really enjoyed the project». Данный отрывок разработан с целью облегчить автоматический поиск в нем пауз между словами. Для этого звонкие согласные в нем поставлены на границах слов, поскольку они лучше подчеркивают границу между словом и паузой, чем глухие согласные.

Иногда исследователи используют более короткие специально подобранные предложения. Так в [6] использовалось только первое предложение из «бамбукового пассажа». Другой пример можно найти в [17], где речевое задание состояло в десятикратном повторении предложения «Buy Bobby a puppy». Можно заметить, что в предложении используются взрывные согласные [р] и [b], произнесение которых требует скоординированной работы артикуляционных органов. Другие примеры специально разработанных предложений можно найти в работе [18].

В ряде работ по детектированию речевых нарушений при БАС используется специальный вид речевого задания – диадохокинетический (ДДК) тест [15, 19]. ДДК тест заключается в быстром произнесении слогов (например, «па-/та/-ка» или «бу-/тер/-кап») с максимальной быстротой и точностью на одном дыхании. Данный тест широко применяется в дифференциальной диагностике и для выявления нарушений в мышечном аппарате речи [20].

Реже всех прочих используется речевое задание на протяжное произнесение гласного звука. Иногда его включают в состав теста из нескольких речевых заданий [19, 20]. Однако в некоторых случаях может выступать в качестве единственного источника информации [21, 22].

Обобщая приведенные данные можно сказать, что речевые задания, используемые в системах детектирования речевых нарушений вследствие БАС, разделяются на следующие группы:

- 1) простые короткие фразы общего значения [13-15];
- 2) короткие специально разработанные предложения [6, 17];
- 3) специально разработанные отрывки текста [5];
- 4) диадохокинетический (ДДК) тест [4, 15, 19];
- 5) протяжное произнесение гласного звука [23, 24];
- 6) комплексный тест, состоящий из нескольких видов речевых заданий [10-12, 21, 22];

В литературе встречаются и другие виды речевых заданий. Так в [14] участников эксперимента просили повторять прослушанные фразы, а также в качестве теста записывали спонтанную речь.

*Акустические характеристики голоса и речи, используемые в системах детектирования БАС.* Вопрос выбора акустических признаков для детектирования речевых нарушений при БАС является открытым, и исследователи решают его по-разному. Рассмотрим несколько характерных примеров, чтобы показать отличия в подходах к выбору акустических

признаков.

В работе [6] с целью ранней диагностики БАС использовался набор из очень большого количества акустических признаков (6861 признак), которые извлекались из анализируемого сигнала с помощью специального инструментария OpenSMILE. Для классификации все признаки группировались по семи категориям: кепстральные коэффициенты, форманты, энергетические параметры, частота основного тона, спектральные параметры, временные параметры и параметры, оценивающие качество речевого сигнала. Библиотека OpenSMILE также использовалась в работах [25, 15]

В работе [5] для дифференциации людей с симптомами заболевания и без использовались такие параметры, как скорость речи (количество слов в минуту), скорость артикуляции (количество слогов в секунду) и отношение длительности пауз к длительности речевого задания. Экспериментально было показано, что использование показателей скорости речи и артикуляции является достаточно перспективным подходом для диагностики БАС.

Для выявления изменений речевой моторики, которые можно ассоциировать с БАС, в работе [4] было предложено использовать четыре основных речевых признака: 1) координация; 2) согласованность; 3) скорость; 4) точность. Координация и согласованность речи при многократном повторении определенных слогов оценивались с помощью коэффициента вариации времени начала озвончения (англ. VOT – voice onset time) – интервала между началом размыкания смычки взрывного согласного и моментом начала колебания голосовых связок. Скорость и точность оценивались путём анализа частотной характеристики второй форманты (F2). Экспериментальная проверка предложенного в [4] подхода проводилась путём анализа речевых записей от двух групп: контрольной (18 человек) и с симптомами БАС (14 человек). Анализ полученных данных производился с помощью линейной смешанной модели (LMM, linear mixed model). Было показано, что координацию, скорость и точность речи можно с достаточной степенью достоверности связать с ухудшением речевой функции у больных БАС.

*Методы классификации, используемые в системах детектирования речевых нарушений при БАС.* Говоря о методах классификации важно понимать, что не существует единственно правильной модели классификатора [26]. Тот либо иной метод оказывается лучше или хуже в зависимости от особенностей, структуры и закономерностей, которые присутствуют в анализируемых данных. Анализ существующих работ показал, что для задачи детектирования речевых нарушений при БАС чаще всего используется классификация на основе машины опорных векторов (англ. SVM – support vector machine) [6,7,15,17,25]. Иногда исследователи используют глубокие нейронные сети (англ. DNN – deep neural network) и сверточные нейронные сети (англ. CNN – convolutional neural network) [7,14,15]. В [19] для классификации использовался метод XGBoost (англ. Extreme Gradient Boosting). В работах [9,13,23,24] классификация производилась на основе метода линейного дискриминантного анализа (ЛДА).

Несмотря на нарастающую популярность сверточных нейронных сетей и методов глубокого обучения, применение этих подходов к рассматриваемой задаче пока не показало существенного преимущества над другими методами классификации. Так, например, в [14] использование сверточных нейронных сетей позволило получить точность детектирования на уровне 75–77 %. Популярность классификации на основе метода опорных векторов можно объяснить его относительно низкой вычислительной сложностью (по сравнению с нейронной сетью) и свободно распространяемой программной реализацией в виде библиотеки libSVM. К сильным сторонам метода относится и его устойчивость к переобучению и высокая эффективность. Например, в работе [6] использовался классификатор на основе метода опорных векторов с линейной функцией ядра. При обучении классификатора использовались речевые записи от 123 человек, разделённых на три группы: контрольная, с выраженными симптомами и с начальными симптомами заболевания. Для выявления больных с

выраженными симптомами БАС был получен высокий показатель точности классификации ( $AUC = 0,91 - 0,99$ ). Тем не менее, в контексте рассматриваемой в данной работе задачи метод опорных вектор имеет серьезный недостаток. Результат его работы почти совсем не интерпретируется [26]. Для врача-специалиста недостаточно лишь знать, какой результат выдала система детектирования в результате анализа голоса, но важно понимать на основании чего принято решение. В этом отношении в лучшем положении оказывается подход к классификации на основе ЛДА. Данный метод близок к модели линейной регрессии и его результат можно легко интерпретировать.

*Обзор мобильных приложений, разработанных для анализа/оценки голоса/речи пациентов с БАС.* В [10-12] описано мобильное приложение для регистрации и обработки речевых сигналов с целью диагностики неврологических заболеваний. В качестве речевых тестов используются односложные слова, ноты, счет от одного до десяти и произношение звука [и]. Приложение используется для визуализации речевых тестов и записи речевых отрывков. Недостатком приложения является его ограниченная функциональность. Для обработки полученных в приложении данных необходимо использование персонального компьютера и программного обеспечения в среде Matlab.

В работе [4] используется мобильное приложение, которое является частью исследовательской платформы *Weiwe*. Данное приложение используется для записи речевых отрывков и сбора данных. Для обработки данных используется сервис облачных вычислений *Amazon Web Services*. Используемая платформа *Weiwe* удобна для регулярного сбора речевых тестов у исследуемой группы и для выявления различий между здоровыми людьми и больными БАС. На данный момент приложение не позиционируется, как инструмент диагностики БАС.

Приложение *ALS Mobile Analyzer* [25] предназначено для мониторинга прогрессирования заболевания, включает в себя как речевые тесты, так и опросники состояния пациента. Недостатком приложения является несовершенство используемого метода классификации, на данный момент результат классификации зависит от половой принадлежности пациента, возрастных особенностей, наличия шума на фоне. Авторы приложения разработали инструментарий для постановки диагноза с точностью до 83% для женщин и 79% для мужчин, однако данное приложение не дает оценку состояния больного.

Проведенный анализ известных программных средств в области диагностики БАС показывает, что на данный момент наиболее актуальной задачей является разработка доступного и простого в использовании приложения не только для ранней диагностики, но и для отслеживания состояния пациента в динамике.

*Предлагаемая система оценки степени нарушения голосовой функции у пациентов с БАС.* Данная работа основывается на результатах, полученных ранее в [23, 24]. В приведенных работах описаны системы детектирования речевых нарушений у пациентов с БАС на основе линейного дискриминантного анализа (ЛДА). В качестве речевого задания использовался наиболее простой тест на длительную фонацию звука /а/. Из записи фонации извлекались следующие акустические признаки:

1) джиттер – мера изменения частоты основного тона. является показателем стабильности работы фонаторной системы подсистемы речеобразования (при нарушении нейромоторной функции данный показатель растет);

2) шиммер – мера вариативности амплитуды акустической волны во время фонации. Увеличение данного параметра с учетом естественного спада интенсивности голоса свидетельствуют о наличии речевых нарушений. Для оценки шиммера используется коэффициент амплитудных возмущений, который учитывает эффект "дрейфа" амплитуды сигнала;

3) энтропия периодов основного тона. Данный параметр используется для оценки нарушения способности контролировать стабильность частоты основного тона при

протяжном произнесении звуков. Увеличение данного параметра говорит о превышении естественного уровня вариации основного тона;

4) степень патологии вибрато. Вибрато – это быстрое и регулярное колебание частоты основного тона во время длительной фонации. У больных БАС данный параметр характеризуется высокочастотными составляющими (около 9-14 Гц) [23].

5) среднеквадратичное отклонения частоты основного тона;

6) частотный диапазон фонации – параметр, характеризующий максимальное отношение частоты основного тона к минимальному.

7) направленный коэффициент возмущений.

Было принято решение преобразовать систему детектирования из работы [24] в систему, позволяющую оценить степень нарушения голосовой функции у пациентов с БАС.

В [24] для классификации использовался линейный дискриминантный анализ (ЛДА). В результате ЛДА анализа вектор входных параметров преобразуется в одно единственное значение  $z$  на основании которого принимается решение о том относится ли голос к группе здоровых или к группе пациентов с БАС. Идея оценки степени нарушения заключается в том, чтобы найти отображение:

$$G: z \rightarrow g, \quad (1)$$

где  $g$  – степень речевого нарушения, измеряемая в процентах. Далее приводится описание метода ЛДА и показывается, как формируется отображение (1).

*Линейный дискриминантный анализ (ЛДА).* Рассмотрим более подробно идею используемого в [23,24] линейного дискриминантного анализа с критерием Фишера.

Пусть имеется обучающий набор данных  $\{(x^{(i)}, y_i)\}, i = 1, 2, \dots, m$ . В данном случае  $x^{(i)}$  –  $d$ -мерный вектор акустических признаков, получаемый в результате анализа записи  $i$ -го голоса из базы,  $y_i$  – соответствующая метка класса (для здорового голоса используется метка «-1», для голоса пациента с БАС «1»).

В методе ЛДА данные интерпретируются, как точки в  $d$ -мерном пространстве, которые для которых ищется проекция в одномерное:

$$z = w^T x, \quad (2)$$

где  $w$  – вектор, определяющий нормаль к гиперплоскости, на которую выполняется проецирование. Обычно при проецировании в одномерное пространство теряется значительная часть информации и классы, которые могли бы быть разделены в  $d$ -мерном пространстве, могут иметь значительное перекрытие при переходе к одномерному представлению. Идея метода ЛДА состоит в поиске такой гиперплоскости, для которой в результате проецирования на неё обучающего набора, внутриклассовая дисперсия была бы минимальной, а межклассовое различие была бы максимальным. Это так называемый критерий Фишера [27].

На начальном этапе метода ЛДА выполняется расчет центроидов для класса здоровых голосов (класс  $C_H$ ) и голосов с патологией (класс  $C_P$ ):

$$m_H = \frac{1}{N_H} \sum_{i \in C_H} x^{(i)}, \quad m_P = \frac{1}{N_P} \sum_{i \in C_P} x^{(i)}, \quad (3)$$

где  $N_H$  и  $N_P$  – количество здоровых голосов и голосов с патологией, содержащихся в базе.

Формула проекции (2) переводит набор размеченных данных в размеченный набор в

одномерном пространстве  $z$ . Внутрикласовые дисперсия преобразованных данных задается выражением:

$$s_H^2 = \sum_{i \in C_H} (z^{(i)} - m_H)^2, \quad s_P^2 = \sum_{i \in C_P} (z^{(i)} - m_P)^2, \quad (4)$$

где  $z^{(i)} = w^T x^{(i)}$ ,  $m_H = w^T x_H$ ,  $m_P = w^T x_P$ . Для рассматриваемого случая бинарной классификации можно определить общую внутрикласовую дисперсию, как сумму

$$s_H^2 + s_P^2, \quad (5)$$

где  $s_H^2$  дисперсия для класса здоровых голосов, а  $s_P^2$  – дисперсия для класса голосов с патологией. Критерий Фишера определяется как отношение межклассовой дисперсии к внутрикласовой дисперсии:

$$J(w) = \frac{(m_H - m_P)^2}{s_H^2 + s_P^2}. \quad (6)$$

Используя выражения (2)–(5) можно переписать критерий Фишера так, чтобы сделать зависимость от  $w$  явной:

$$J(w) = \frac{w^T S_B w}{w^T S_W w}, \quad (7)$$

где  $S_B$  – межклассовая ковариационная матрица, задающаяся выражением:

$$S_B = (m_P - m_H)(m_P - m_H)^T, \quad (8)$$

а  $S_W$  – общая внутрикласовая ковариационная матрица, задающаяся выражением:

$$S_B = \sum_{i \in C_H} (x^{(i)} - m_H)(x^{(i)} - m_H)^T + \sum_{i \in C_P} (x^{(i)} - m_P)(x^{(i)} - m_P)^T. \quad (9)$$

В соответствии с идеей метода ЛДА необходимо решить задачу поиска максимума выражения (7):

$$\frac{w^T S_B w}{w^T S_W w}, \quad (10)$$

что эквивалентно следующей задаче

$$w^T S_B w, \text{ при условии } w^T S_W w = 1. \quad (11)$$

Данная задача сводится к обобщенной проблеме вычисления собственных значений матрицы, где  $w$  – собственный вектор соответствующий максимальному собственному значению матрицы  $S_W^{-1} S_B$ .

Классификационная функция в методе ЛДА имеет следующий вид:

$$f(x) = \text{sign}(w^T x - b),$$

где  $x$  – вектор акустических признаков,  $b$  – смещение,  $sign(a)$  – функция возвращающая знак числа  $a$ . Если  $f(x) = 1$ , то вектор  $x$  относят к классу больных БАС, а при  $f(x) = -1$  к классу здоровых. Смещение  $b$  является пороговым значением, так что для входного  $x$  вектора, если  $w^T x > b$ , то он классифицируется, как относящийся к классу больных БАС, иначе к классу здоровых.

Выбор смещения  $b$  может быть выполнен следующим образом. На первом этапе находится проекция всех векторов из обучающего набора данных в одномерное пространство при помощи выражения (2). На рисунке 1 показан пример распределения плотности вероятности проекций векторов в одномерном пространстве. На втором этапе производится такого значения  $b$ , которое позволило бы оптимальным образом согласно заранее оговоренному критерию разделить помеченные данные в одномерном пространстве (критерием может быть получением максимальной чувствительности, специфичности и проч.).

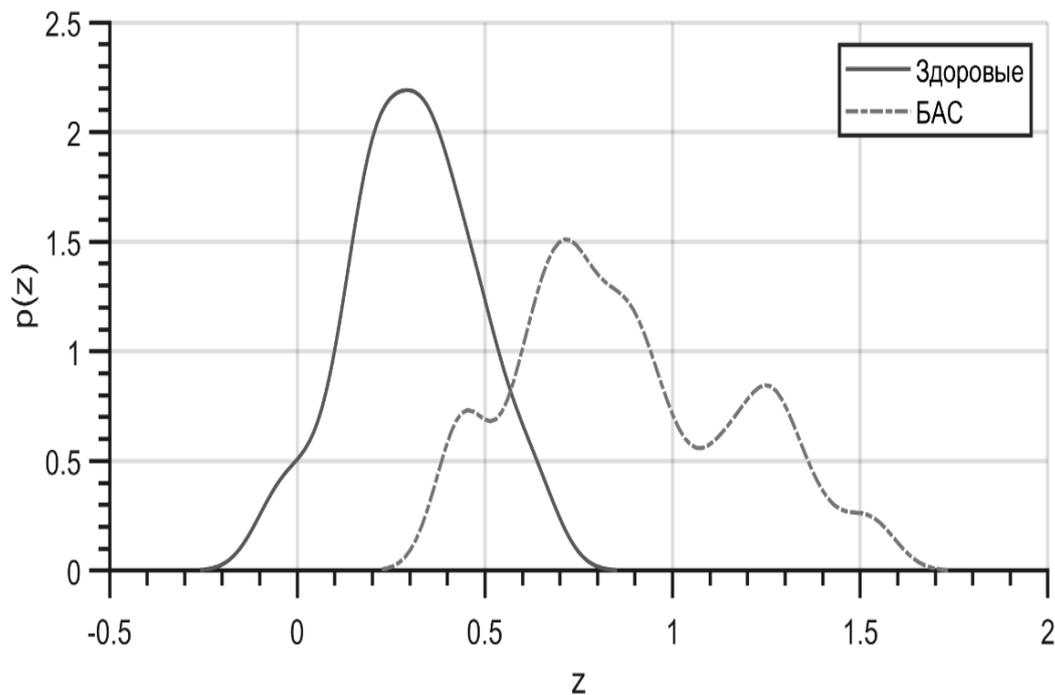


Рисунок 1. – Плотность распределения вероятности проекций векторов  $x^{(i)}$  из обучающей базы в одномерное пространство, полученное в методе ЛДА

Оценка  $G$  степени нарушения голосовой функции на основе результатов ЛДА выполнялась следующим образом:

$$G(x) = \begin{cases} \frac{w^T x - b}{z_{max}} \times 100, & \text{если } f(x) \\ = 1; & 0, & \text{если } f(x) = -1, \end{cases} \quad (12)$$

где  $z_{max}$  – максимальное значение проекции в одномерном пространстве.

**База голосов.** Для обучения модели ЛДА на основании которой производится оценка степени речевых нарушений была собрана база голосов в Республиканском научно-клиническом центре неврологии и нейрохирургии (Минск, Беларусь). Произведена запись 63 человек, из которых 38 здоровые (20 мужчины, 18 женщин) и 25 пациентов с БАС, имеющие признаки бульбарных нарушений (8 мужчин, 17 женщин). Средний возраст в здоровой группе

составил 42,0 лет (СКО 16,6), а средний возраст в группе БАС 59,0 лет (СКО 8,1). Каждому участнику предлагалось произнести на одном дыхании протяжный гласный звук /a/ как можно дольше с комфортной высотой и громкостью. Голос записывался с помощью смартфона с гарнитурой (частота дискретизации 44,1 кГц) и сохранялись в виде несжатых 16-битных wav-файлов. Средняя продолжительность записей составила 4,1 с. Matlab-функции, используемые для анализа голоса, размещены в общедоступном репозитории.

*Обучение и тестирование ЛДА модели.* Важной задачей в процессе статистического обучения является определение оптимального набора информационных признаков. В рассматриваемой задаче каждая запись голоса представлялась в виде 14 акустических параметров (4 вида джиттера, 5 видов шиммера, степень патологии вибрато, энтропия периодов основного тона, СКО частоты основного тона, частотный диапазон фонации, направленный коэффициент возмущений). Таким образом, число различных вариантов наборов информационных признаков равняется  $2^{14} - 1 = 16383$ . Для каждого возможного набора признаков производилась оценка точности работы ЛДА модели методом кросс-проверки по k-блокам [28] (для  $k = 7$ ). Таким образом, путем полного перебора был найден оптимальный набор акустических признаков для модели ЛДА, в который вошли: джиттер (Jitter::RAP), три параметра шиммера (Shimmer::APQ3, Shimmer::APQ5, Shimmer::APQ55) и степень патологии вибрато (PVI). При этом была достигнута точность детектирования речевых нарушений 90,3% (при чувствительности 87,2% и специфичности 92,3%).

Для некоторых пациентов с БАС, участвовавших в записи базы голосов имелись данные о их состоянии, оцененные в по шкале нарушений функции при боковом амиотрофическом склерозе (ALSFRSR). В следующей таблице для этих пациентов приведены данные о том, какую оценку их голосу позволила получить описанная ЛДА модель с использованием выражения (12).

Таблица 1. – Сопоставление объективной оценки ALSFRSR по разделу речь и глотание с оценкой бульбарных нарушений, полученной в системе ALS Expert

ID пациента	Пол	Возраст	ALSFRSR (речь и глотание)	Оценка ALS Expert
020	женский	57	7	8.6 %
022	женский	70	9	17,0 %
023	женский	70	9	11,0 %
029	женский	46	10	12,8 %
031	мужской	67	10	43,9 %

Полученный результат показывает, что результаты объективной оценки нарушений коррелируют с оценкой, получаемой в предлагаемой системе. Нужно особо указать, что в процессе обучения модели не предъявлялось никакой информации о степени нарушений функций по шкале ALSFRSR по разделу речь и глотание.

*Описание приложения ALS expert.* Предлагаемое в данной работе приложение ALS Expert ориентировано на выполнение двух основных функций: ранняя диагностика БАС и отслеживание состояния речевого аппарата пациентов с БАС в динамике.

ALS Expert является приложением для операционной системы Android версии 7 и выше. Вычислительное ядро приложения, выполняющее анализ оцифрованного голосового сигнала в соответствии с описанной выше математической моделью, реализовано на языке программирования C++. Пользовательский интерфейс и логика работы приложения реализованы с помощью Flutter, специального набора средств разработки мобильных приложений с открытым исходным кодом от компании Google.

Использование текущей версии приложения для исследования состояния голосовой функции пациентов с БАС предполагает участие врача-специалиста. Процедура исследования

выполняется на основе теста на протяжное произнесение гласного звука /a/. Результат произнесения звука /a/ записывается с помощью приложения с использованием встроенного в смартфон микрофона или микрофона гарнитуры. Далее запускается анализ сделанной записи. По окончании обработки записи на экране смартфона отображаются вычисленные значения акустических параметров, которые в дальнейшем анализируются врачом.

*Заключение.* Анализ текущей ситуации в области лечения и диагностирования быстротекущего неврологического заболевания БАС выявил недостаток средств ранней диагностики и отслеживания развития заболевания. Акустический анализ голоса и получаемые в результате него объективные параметры являются перспективным направлением для решения указанной проблемы. В настоящей работе описан способ оценки степени нарушения голосовой функции у пациентов с БАС, а также особенности реализации данного способа в виде мобильного приложения. В качестве речевого задания используется простой тест на длительное произнесение гласного звука /a/. Из полученной записи фонации извлекаются акустические признаки (джиттер, шиммер, энтропия периодов основного тона, степень патологии вибрато и проч.). Применяя к полученному вектору параметров классификатор на основе метода линейного дискриминантного анализа можно получить решение относится ли предъявленный голос к классу здоровых или больных БАС. В случае, если классификатор отнес голос к категории больных, то внутренняя оценка голоса, полученная классификатором, преобразовывалась в показатель степени голосовых нарушений (от 0 до 100%). Разработанный способ оценки степени речевых нарушений и его программная реализация являются экспериментальными и требуют дальнейшей клинической проверки и верификации.

#### **Список литературы**

- [1] Рушкевич, Ю.Н. Уровень инвалидности вследствие болезни двигательного нейрона в Республике Беларусь / Ю.Н. Рушкевич, А.В. Копыток, С.А. Лихачев // // Неврология и нейрохирургия. Вост. Европа. – 2017. – Т.7, №4. – С. 225–236.
- [2] Рушкевич, Ю.Н. Эпидемиология болезни двигательного нейрона в Республике Беларусь / Ю.Н. Рушкевич, С.А. Лихачев // Неврология и нейрохирургия. Вост. Европа. – 2018. – Т.8, №4. – С. 551–561.
- [3] Eshghi M. et al. Reduced task adaptation in alternating motion rate tasks as an early marker of bulbar involvement in amyotrophic lateral sclerosis // Proceedings of Interspeech. – 2019. – P. 4524–4528.
- [4] Rowe H. P., Green J. R. Profiling speech motor impairments in persons with amyotrophic lateral sclerosis: an acoustic-based approach // Proc. Interspeech 2019. – 2019. – С. 4509–4513.
- [5] Connaghan K. P. et al. Use of Beiwe Smartphone App to Identify and Track Speech Decline in Amyotrophic Lateral Sclerosis // Proc. Interspeech 2019. – 2019. – С. 4504–4508.
- [6] Gutz S. E. et al. Early Identification of Speech Changes Due to Amyotrophic Lateral Sclerosis Using Machine Classification // Proc. Interspeech 2019. – 2019. – С. 604–608.
- [7] Suhas B. N. et al. Comparison of Speech Tasks and Recording Devices for Voice Based Automatic Classification of Healthy Subjects and Patients with Amyotrophic Lateral Sclerosis // Proc. Interspeech 2019. – 2019. – С. 4564–4568.
- [8] Клинический опыт применения частотно-временного анализа речевых сигналов в диагностике и мониторинге бульбарной дисфункции / Ю. Н. Рушкевич и др. // Неврология и нейрохирургия. Восточная Европа. – 2017. – Т.7, №3. – С.429 – 439.
- [9] Гвоздович А. Д., Рушкевич Ю. Н., Вашкевич М. И. Детектирование бульбарных нарушений при боковом амиотрофическом склерозе на основе анализа речевого сигнала // Доклады БГУИР. – 2018. – №. 6 (116) – С. 52–58
- [10] Мобильное приложение для сбора диагностической информации посредством регистрации речевых сигналов / А. Н. Осипов и др. // BIG DATA Advanced Analytics: collection of materials of the fourth international scientific and practical conference, Minsk, Belarus, May 3 – 4, 2018 / editorial board: M. Batura [etc.]. – Minsk, BSUIR, 2018. – P. 343 – 347.
- [11] Куль, Т. П. Адаптация методов цифровой обработки сигналов к задаче анализа речи при неврологических патологиях / Т. П. Куль, Ю. Н. Рушкевич, С. А. Лихачев // Доклады БГУИР. - 2018. - № 7 (117). - С. 128 - 132.
- [12] Методическое и аппаратно-программное обеспечение для регистрации и обработки речевых сигналов с целью диагностики неврологических заболеваний / Т. П. Куль [и др.] // Информатика. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 27 – 39.

- [13] Vashkevich M., Gvozдович A., Rushkevich Y. Detection of Bulbar Dysfunction in ALS Patients Based on Running Speech Test //International Conference on Pattern Recognition and Information Processing. – Springer, Cham, 2019. – P. 192-204.
- [14] An, K. Automatic early detection of amyotrophic lateral sclerosis from intelligible speech using convolutional neural networks/ K. An, M. Kim, K. Teplansky, J. Green, T. Campbell, Y. Yunusova, D. Heitzman, J. Wang // Proceedings of Interspeech 2018 – P. 1913-1917.
- [15] Wang, J., Towards Automatic Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis from Speech Acoustic and Articulatory Samples/ J. Wang, P.V. Kothalkar, B. Cao, D. Heitzman// Proc. Interspeech 2016 – P. 1195-1199.
- [16] Yunusova Y. et al. Profiling speech and pausing in amyotrophic lateral sclerosis (ALS) and frontotemporal dementia (FTD) //PloS one. – 2016. – Т. 11. – №. 1. – P. 1-18.
- [17] Bandini, A., Classification of Bulbar ALS from Kinematic Features of the Jaw and Lips: Towards Computer-Mediated Assessment / A. Bandini, J.R. Green, L. Zinman , Y. Yunusova// Proc. Interspeech 2017 – P.1819-1823.
- [18] Liss, J. M. Discriminating dysarthria type from envelope modulation spectra / J.M. Liss, S. LeGendre, A. J. Lotto // Journal of Speech, Language, and Hearing Research. – 2011. – № 5 (53). – P. 1246-1255.
- [19] Spangler, T. Fractal features for automatic detection of dysarthria / T. Spangler, N. V. Vinodchandran, A. Samal, J. R. Green // IEEE EMBS International Conference on Biomedical Health Informatics (BHI), Orlando, USA, Feb. 16-19, 2017. – Orlando, 2017 – pp. 437–440.
- [20] Wang, Y.-T. Analysis of diadochokinesis in ataxic dysarthria using the motor speech profile programTM/ Y.-T. Wang, R. D. Kent, J. R. Duffy, and J. E. Thomas// Folia phoniatrica et logopaedica: official organ of the International Association of Logopedics and Phoniatrics (IALP). – 2009.– vol. 61, no. 1. – P. 1–11.
- [21] Green, J.R. Bulbar and speech motor assessment in ALS: challenges and future directions / J.R. Green, Y. Yunusova, M.S. Kuruvilla, J. Wang, G.L. Pattee, L. Synhorst, L. Zinman, J.D. Berry // Amyotrophic Lateral Sclerosis and Frontotemporal Degeneration. – 2013. – № 14. –P. 494-500.
- [22] Yunusova, Y. Detection of bulbar ALS using a comprehensive speech assessment battery/ Y. Yunusova, J. S. Rosenthal, J. R. Green, S. Shellikeri, P. Rong, J. Wang, L. H. Zinman // in Proc. of the International Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications, 2013, P. 217-220.
- [23] Vashkevich M., Petrovsky A., Rushkevich Y. Bulbar ALS Detection Based on Analysis of Voice Perturbation and Vibrato // 2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA). – P. 267-272.
- [24] Вашкевич, М. И. Детектирование речевых нарушений у пациентов с БАС на основе анализа голосового сигнала / Вашкевич М. И., Рушкевич Ю. Н. // Цифровая обработка сигналов. – 2019. – №4. – С. 33 – 41.
- [25] Norel, R., Detection of amyotrophic lateral sclerosis (ALS) via acoustic analysis / R. Norel, M. Pietrowicz, C. Agurto , S. Rishoni, G. Cecchi // Proc. Of Interspeech 2018.– P. 377–381.
- [26] Келлехер, Д.Д., Мак-Нейми, Б., д’Арси А. Основы машинного обучения для аналитического прогнозирования: алгоритмы, рабочие примеры и тематические исследования. : Пер. с англ. – СПб.: ООО «Диалектика», 2019. – 656 с. – С.589.
- [27] Bishop, C. M. Pattern recognition and machine learning. – Springer-Verlag. – New York, 2006.
- [28] Флах, П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / П. Флах : пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 400 с.

## **EVALUATION OF THE DEGREE OF IMPAIRED VOICE FUNCTION FOR PATIENTS WITH AMYOTROPHIC LATERAL SCLEROSIS USING A MOBILE APPLICATION**

***D.S.Likhachov,***  
*PhD, assistant professor of the department of Computer Engineering, BSUIRcs*

***E.S.Narkevich***  
*4th year student of the specialty "Electronic computing devices", faculty of computer systems and networks BSUIR*

***Y.N.Rushkevich***  
*PhD, leading researcher of the neurological department, Republican Research and Clinical Center of Neurology and Neurosurgery*

***M.I.Vashkevich,***  
*PhD, assistant professor of the department of Computer Engineering, BSUIR*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus  
Republican Research and Clinical Center of Neurology and Neurosurgery, Republic of Belarus  
E-mail: vashkevich@bsuir.by*

**Abstract.** In this paper, we propose a specialized software tool ALS Expert for diagnosing and evaluating the state of speech function for patients with ALS. ALS Expert is a mobile application for the Android operating system with the functionality of recording speech tests and displaying the results of the speech analysis. The result of the application can be presented either as a set of parameters, that are further analyzed by the doctor for a professional assessment of the patient's condition, or as an automatically generated report for preliminary diagnostic evaluation. A mathematical model based on linear discriminant analysis (LDA) is used to process the speech signal. According to the LDA model, the recorded voice belongs either to the healthy group or to the group with pathology. In the latter case, the internal score for the voice obtained in the LDA model is mapped to the degree of speech impairment, which is measured from 0 to 100%. For training and verification of the proposed method, a database of 63 voices (38 healthy, 25 patients with ALS) recorded at the Republican research and clinical center of neurology and neurosurgery (Minsk, Belarus) was used.

**Keywords:** speech processing, detection of pathology in the voice, evaluation of the speech signal, amyotrophic lateral sclerosis, ALS.