

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)
УДК 616-009.5; 004.934

Поступила в редакцию 17.10.2018
Received 17.10.2018

Принята к публикации 11.01.2019
Accepted 11.01.2019

Методическое и аппаратно-программное обеспечение для регистрации и обработки речевых сигналов с целью диагностики неврологических заболеваний

Т. П. Куль^{1✉}, М. М. Меженная¹, Ю. Н. Рушкевич², А. Н. Осипов¹, С. А. Лихачев²,
И. В. Рушкевич³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь

²РНПЦ неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь

³Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Предлагается методическое и аппаратно-программное обеспечение на основе цифровой обработки и анализа речевых сигналов для оперативной и объективной диагностики неврологических патологий, сопровождающихся нарушениями речевой функции. Апробация разработанных методических и программных средств была проведена на базе Республиканского научно-практического центра неврологии и нейрохирургии Министерства здравоохранения Республики Беларусь и Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Результаты апробации выявили качественные (на основе полученных графиков спектрограмм, кепстрограмм, гистограмм) и количественные (на основе вычисленных параметров) различия между параметрами речевых сигналов в норме и при бульбарном синдроме. Предварительные результаты исследования подтвердили целесообразность использования разработанного авторами методического и аппаратно-программного обеспечения для регистрации и обработки речевых сигналов в диагностике неврологических заболеваний.

Ключевые слова: речевой сигнал, регистрация и обработка биомедицинских сигналов, неврология, бульбарный синдром, бульбарные нарушения, методическое и аппаратно-программное обеспечение

Для цитирования. 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.

Methodical and hardware-software for recording and processing speech signals for diagnosis of neurological diseases

Tatiana P. Kul^{1✉}, Marina M. Mezhennaya¹, Yulia N. Rushkevich², Anatoly N. Osipov¹,
Sergey A. Likhachev², Irina V. Rushkevich³

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

²The Republican Scientific and Practical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus

³Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus

Abstract. The methodical and hardware-software on the basis of processing and analysis of speech signals for operative and objective diagnostics of neurological pathologies accompanied by speech function disorders are offered. The testing of developed methodological and software tools was carried out on the basis of the Republican Scientific and Practical Center of Neurology and Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of Belarus and the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. The results of testing revealed qualitative (based on the obtained spectrogram, kepstrogram, histogram) and quantitative (based on calculated

parameters) differences between the parameters of speech signals in normal and bulbar syndrome. Preliminary results of the research confirmed the feasibility of using the methodological and hardware-software for registration and processing speech signals for diagnosis of neurological diseases.

Keywords: speech signal, registration and processing of biomedical signals, neurology, bulbar syndrome, bulbar disorders, methodical and hardware-software

For citation. Kul T. P., Mezhenaya M. M., Rushkevich Y. N., Osipov A. N., Likhachev S. A., Rushkevich I. V. Methodical and hardware-software for recording and processing speech signals for diagnosis of neurological diseases. *Informatics*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 27–39 (in Russian).

Введение. Патологии речи являются симптомами целого ряда неврологических заболеваний, в том числе бульбарного синдрома. Одной из частых причин развития бульбарных нарушений является боковой амиотрофический склероз – нейродегенеративное, быстро прогрессирующее заболевание, характеризующееся развитием амиотрофий, мышечной слабости скелетной, дыхательной и бульбарной мускулатуры. У тяжелобольных с бульбарным синдромом, как правило, развиваются расстройства ритма дыхания и сердечной деятельности, что может привести к смерти [1–3].

Эффективная дифференциальная диагностика позволяет своевременно оказать медицинскую помощь пациентам с бульбарными нарушениями. К традиционным методам диагностики бульбарного синдрома относятся данные электромиографии и прямого осмотра ротоглотки [1–5]. Постановка диагноза в таких случаях требует полного неврологического и оториноларингологического обследования, в связи с чем диагностика на ранней стадии оказывается затруднительной.

К ранним проявлениям бульбарного синдрома относятся нарушения речевой функции: голос больных становится слабым, глухим, истощающимся вплоть до полной афонии, возникает гнусавость, звуки произносятся невнятно [4, 5]. В связи с этим перспективным направлением исследований неврологических патологий является анализ речевых сигналов [6–14], параметры которых могут служить диагностическим признаком бульбарного синдрома на ранней стадии.

Анализ речевых сигналов целесообразно выполнять по результатам применения методов цифровой обработки [15, 16]. Способы обработки сигналов на основе численных методов с применением цифровой вычислительной техники предлагается использовать для проведения быстрой и объективной диагностики бульбарных нарушений. С целью идентификации неврологических патологий необходимо разработать методическое и программное обеспечение для регистрации, цифровой обработки и анализа речевых сигналов.

Методика и аппаратно-программное обеспечение для регистрации речевых сигналов. Для идентификации патологических изменений речи при бульбарном синдроме, выражающихся в гнусавости, замедленности, быстрой утомляемости, авторами разработаны следующие речевые тесты:

1. Произнесение односложных слов: *шар, врач, фон, сон, чек, хек, жи, ши*.
2. Произнесение нот: *до, ре, ми, фа, соль, ля, си, до*.
3. Счет от одного до десяти: *раз, два, три, четыре, пять, шесть, семь, восемь, девять, десять*.
4. Длительное произнесение звука [и].

Счет и произнесение слов должны сопровождаться паузами для обеспечения возможности идентификации и анализа речевых фрагментов.

Для унификации условий проведения регистрации звуковых сигналов как для пациентов с бульбарным синдромом, так и для здоровых лиц в статье разработано визуальное сопровождение тестов (видеоряд). Такой подход позволяет выстроить речевые тесты в строго определенную последовательность, при которой сначала выполняется счет от одного до десяти, затем произносятся названия нот и слова и в завершение проводится тест на утомляемость посредством длительного удержания звука [и].

Каждый речевой тест начинается с общего информационного слайда, содержащего формулировку задания для данного теста, после чего на экране визуально отображаются собственно слова, названия нот, цифры по отдельности для произнесения испытуемым, чередующиеся

с паузами в виде пустых экранов. Это гарантирует воспроизведение пауз между речевыми фрагментами, что является обязательным условием последующего корректного выделения данных речевых фрагментов при цифровом анализе.

После каждого текстового сообщения с помощью пустого экрана создается пауза длительностью в 1 с, затем появляется следующий слайд для чтения. Таким образом обеспечивается чередование информационных и пустых экранов. Задержка текста на экране равна 1 с, общее время видеоряда – 2 мин. Цвет фона и текста выбраны по результатам консультаций с врачами и пациентами. Шрифт достаточно крупный и комфортный для восприятия пациентами в возрасте более 50 лет.

На рис. 1 показаны примеры визуального сопровождения тестов на произнесение односложных слов, названий нот, счет от одного до десяти. Следует отметить, что здоровый человек выполняет тесты без затруднений, произнося четко все речевые фонемы, выдерживая заданный ритм чередования речи и пауз. Искажение речевых фонем, пропуск пауз свидетельствуют об отклонении от нормы.

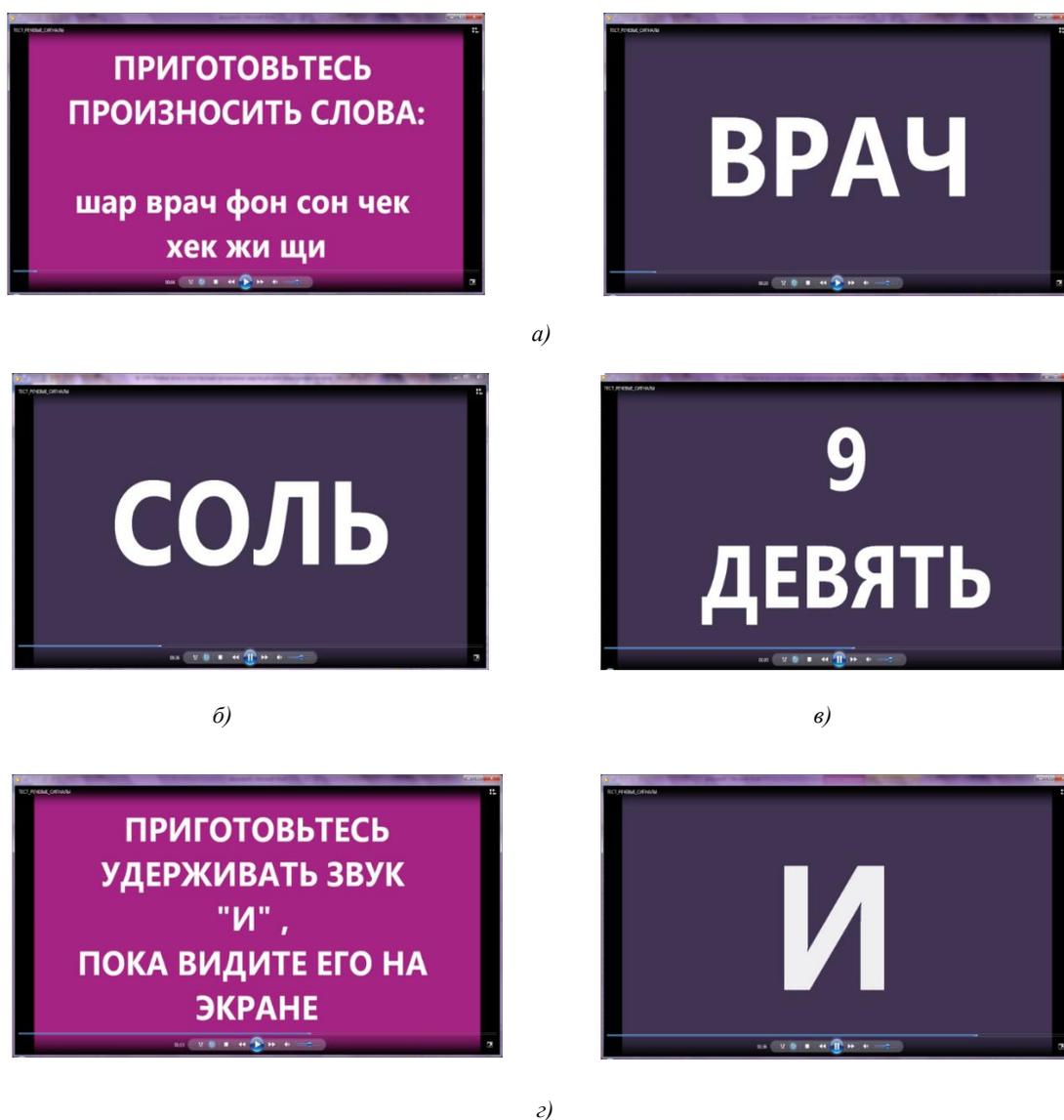


Рис. 1. Видеоряды для тестов: а) «произнесение односложных слов» (информация, предвещающая тест, и пример визуализации слова); б) «произнесение нот»; в) «счет от одного до десяти»; г) «произнесение звука [и]» (информация, предвещающая тест, и появление звука [и] на экране)

Для теста на длительное удержание звука [u] разработана анимация с изображением буквы *и* в течение максимально возможного для здорового человека времени, равного 50 с (установлено экспериментально). На экране (рис. 1, *з*) изображена увеличивающаяся буква *и*, исчезающая с него по истечении максимального времени теста. Следует отметить, что показатели длительности произнесения звука [u] у здоровых людей и пациентов, страдающих бульбарным синдромом, значительно отличаются по времени.

Для регистрации речевых сигналов используется следующее аппаратное обеспечение (рис. 2):

- беспроводная Bluetooth-гарнитура с чувствительным микрофоном для качественной записи речевых тестов;

- мобильное устройство со специально разработанным приложением для воспроизведения испытуемому видеоряда с речевыми тестами и одновременной регистрации данных с микрофона посредством Bluetooth-интерфейса.

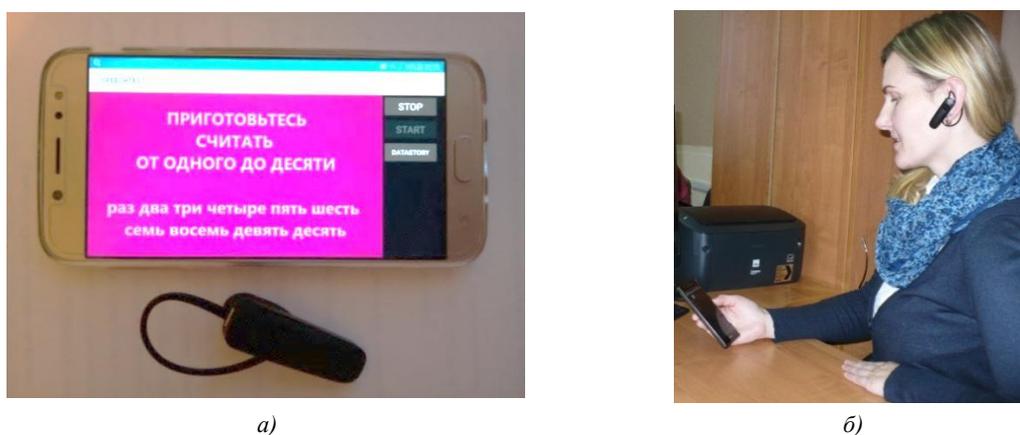


Рис. 2. Аппаратное обеспечение для регистрации речевых тестов при диагностике неврологических заболеваний (*а*) и пример его использования (*б*)

Bluetooth-гарнитура обеспечивает:

- одинаковое расстояние от речевого аппарата всех испытуемых до записывающего устройства (микрофона), что позволяет впоследствии анализировать абсолютные значения амплитуды речевого сигнала, а также его динамику в процессе теста;
- высокое качество записи речи при проведении диагностики;
- комфортные условия для испытуемых.

Разработанное под платформу Android мобильное приложение реализует следующие функции:

- воспроизведение испытуемому видеоряда с речевыми тестами;
- одновременную с воспроизведением видеоряда регистрацию данных с микрофона посредством Bluetooth-интерфейса;
- автоматическое сохранение записанных речевых сигналов в формате .wav;
- воспроизведение записи при необходимости;
- удаление записи при необходимости.

Записанный в единый файл речевой сигнал автоматически разделяется на отдельные временные отрезки, в течение которых выполняются различные речевые тесты. Каждый временной отрезок подвергается цифровой обработке посредством разработанного программного обеспечения в среде MatLab [17, 18].

Методика и программное обеспечение для обработки речевых сигналов. Последующая обработка речевых сигналов выполнялась в среде MatLab с помощью специально разработанного авторами программного обеспечения с графическим интерфейсом.

Предварительный этап обработки предусматривал автоматическое выделение каждого речевого теста из общей записи. Далее каждый речевой тест обрабатывался и анализировался в отдельности.

Обработка каждого речевого теста включала следующие этапы:

- автоматическое выделение в зарегистрированном сигнале речевых фрагментов;
- подсчет количества выделенных речевых фрагментов;
- построение спектрограммы зарегистрированного сигнала и кепстрограмм для выделенных речевых фрагментов;
- определение с помощью кепстральной функции частоты основного тона для каждого речевого фрагмента;
- расчет средней величины частоты основного тона и коэффициента вариации частоты основного тона;
- построение гистограммы для массива, представляющего собой результат «склейки» всех выделенных речевых фрагментов;
- вычисление средней амплитуды и общего времени выделенных речевых фрагментов;
- вычисление коэффициента асимметрии гистограммы и коэффициента эксцесса гистограммы.

Далее приводится подробная методика реализации перечисленных выше этапов.

Исходный зарегистрированный сигнал характеризовался частотой дискретизации 44,1 кГц и разрядностью 16 бит. Предварительно производилось усреднение зарегистрированного сигнала в окне без перекрытия для снижения исходной частоты дискретизации:

$$A[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i \cdot M + j],$$

где $A[i]$ – отсчеты, полученные из исходного сигнала x посредством усреднения; $i = 0 \dots \frac{N}{M} - 1$ –

номер окна; N – число отсчетов исходного речевого сигнала x ; M – длина окна (число усредняемых точек); j – номер временного отсчета внутри окна.

В результате усреднения при $M = 5$ частота дискретизации была понижена до 8,82 кГц. Это позволило впоследствии увеличить скорость обработки данных без потери полезной информации в сигнале.

Речь человека содержит паузы между словами. Традиционно для решения задачи разделения речевого сигнала на голосовые и неголосовые участки исходный сигнал разделяется на фрагменты длиной 5–100 мс. (С точки зрения динамики речи самые быстрые изменения могут происходить всего за несколько миллисекунд, в то время как некоторые гласные звуки остаются относительно стабильными в течение 100–200 мс.) Для классификации принадлежности фрагмента к сигналу или паузе рассчитывалась кратковременная энергия сигнала в данном фрагменте:

$$E_m = \sum_{j=0}^{L_{fr}-1} A[m \cdot L_{fr} + j]^2,$$

где L_{fr} – длина фрагмента; $m = 0 \dots \frac{N}{M \cdot L_{fr}} - 1$ – количество фрагментов; j – номер временного

отсчета усредненного сигнала внутри фрагмента. В качестве L_{fr} выбраны 400 отсчетов, что соответствует временной реализации сигнала в 45,4 мс.

На основе экспериментальных исследований речевых сигналов в норме было сформировано условие, при выполнении которого принималось решение о принадлежности m -го фрагмента к речи:

$$E_m \geq level_E \cdot \langle E \rangle,$$

где $\langle E \rangle$ – средняя кратковременная энергия всех фрагментов, $level_E$ – пороговый уровень кратковременной энергии.

Авторами установлено, что при $level_E = 0,2$ происходит автоматическое выделение слов и (или) отдельных фонем в сигнале.

Далее выполнялось построение спектрограммы сигнала. Для этого речевой сигнал разделялся на временные отрезки, в пределах которых его можно считать стационарным (5–100 мс). Исходный сигнал на выбранном отрезке умножался на оконную функцию и подвергался быстрому преобразованию Фурье в соответствии с выражением

$$STFT_A^w [f_k, \tau] = \sum_{i=0}^{L-1} A[i] \cdot w[i] \cdot e^{-\frac{j2\pi ki}{L}}, \quad f_k = \frac{k \cdot f_d}{L}, \quad k = 0 \dots (L-1)/2,$$

где L – длина окна, τ – величина перекрытия окон, f_d – частота дискретизации.

После данной операции путем возведения в квадрат амплитудной части оконного преобразования Фурье получали спектрограмму мощности для анализируемого окна:

$$\text{Спектрограмма } [f, t] = |STFT_A^w [f_k, \tau]|^2.$$

Далее производилось смещение окна на величину τ и процедура повторялась. Подобным образом анализировались все подынтервалы сигнала и строилась результирующая спектрограмма, представляющая собой двумерную матрицу, строки которой соответствуют временным отсчетам t от 0 с до окончания времени регистрации речевого сигнала, столбцы – частотам f от 0 до 4,41 кГц, а в ячейках рассчитана амплитуда сигнала [17]. В качестве основных параметров частотно-временной обработки выбраны следующие: окно Хэмминга размером $N = 512$ отсчетов, частота дискретизации $f_s = 8,82$ кГц, перекрытие окон 50% . Указанные характеристики обеспечивают качественное частотно-временное представление речевого сигнала, высокое разрешение по частоте $f = 17,2$ Гц и по времени $t = 29,0$ мс:

$$f = \frac{(100 - \Delta f)}{f} \cdot f_d, \quad \Delta t = \frac{f_d}{L}.$$

Для определения частоты основного тона сигнала использовался метод определения кепстра, заключающийся в применении к модулю спектральной плотности исследуемого сигнала обратного преобразования Фурье. При этом в кепстрограмме вокализованного отрезка звука появляется пик на расстоянии основного тона сигнала, что и является основополагающим фактором для последующего вычисления частоты основного тона.

Частота основного тона вычислялась для каждого выделенного вокализованного фрагмента сигнала. По итогам расчетов определяли среднее значение частоты основного тона, а также коэффициент вариации данного параметра – относительную меру разброса значений признака в статистической совокупности. Значения коэффициента вариации менее 10% свидетельствуют о малом рассеянии, от 10 до 20% – о среднем рассеянии, более 20% – о сильном рассеянии относительно средней арифметической величины.

Для расчета статистических показателей выполнялась «склейка» всех выделенных речевых фрагментов в единый массив. Для полученного массива рассчитывалась средняя амплитуда, а также длительность, соответствующая общей продолжительности речи.

С целью визуализации данных на этапе статистической обработки выполнялось построение гистограммы для массива всех речевых фрагментов. Далее для оценки однородности распределения данных в речевых фрагментах рассчитывались показатели асимметрии и эксцесса гистограммы.

Коэффициент асимметрии может быть положительным (для правосторонней асимметрии) и отрицательным (для левосторонней асимметрии). Асимметрия выше $0,5$ (независимо от знака) считается значительной, меньше $0,25$ – незначительной.

Показатель эксцесса отражает, насколько резкий скачок имеет изучаемое явление. Если показатель эксцесса больше нуля, то распределение островершинное и скачок считается значительным; если коэффициент эксцесса меньше нуля, то распределение плосковершинное и скачок считается незначительным.

Разработанное в среде MatLab программное обеспечение имеет пользовательский интерфейс с элементами управления, областями вывода текстовой и графической информации (рис. 3).

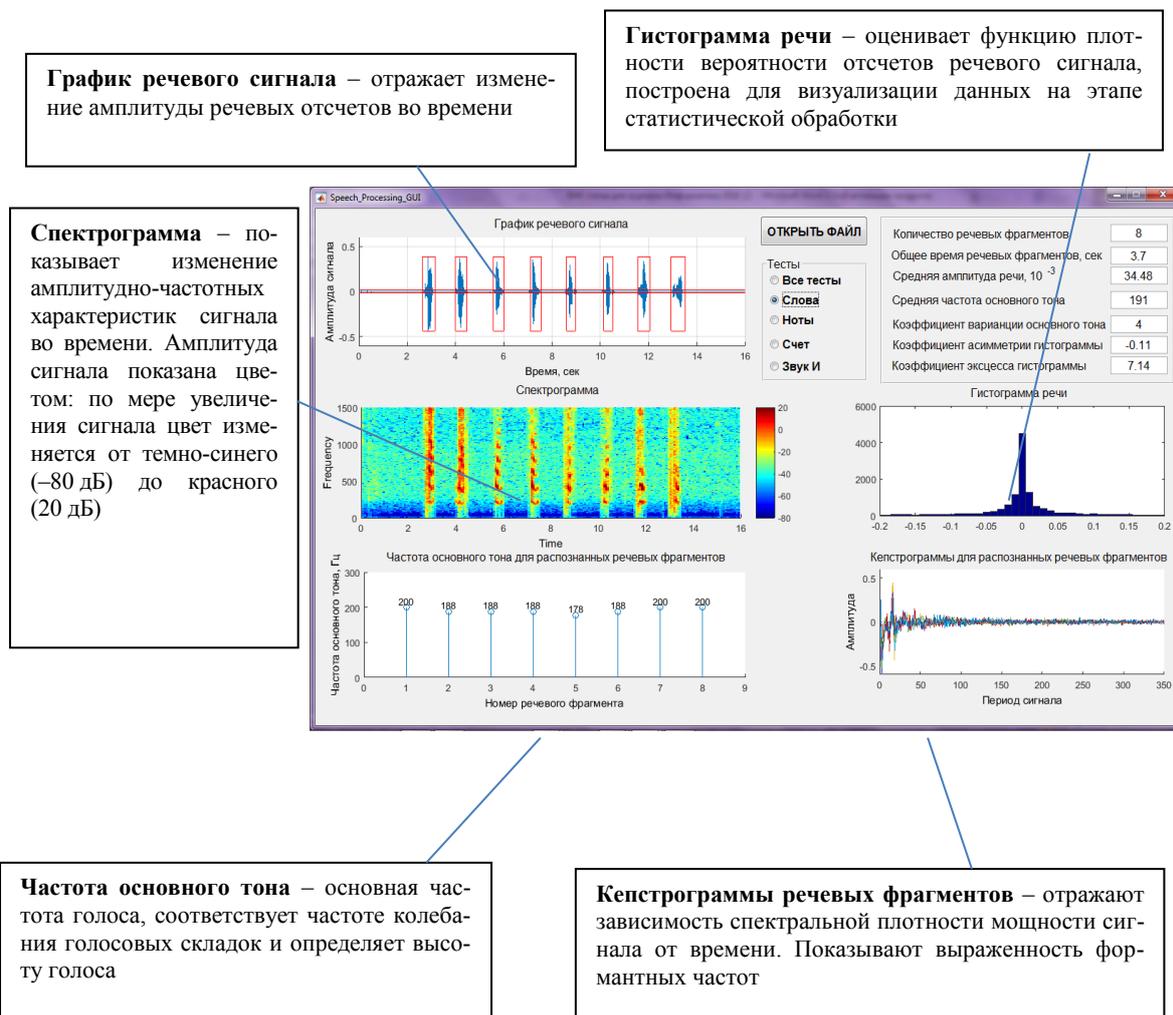


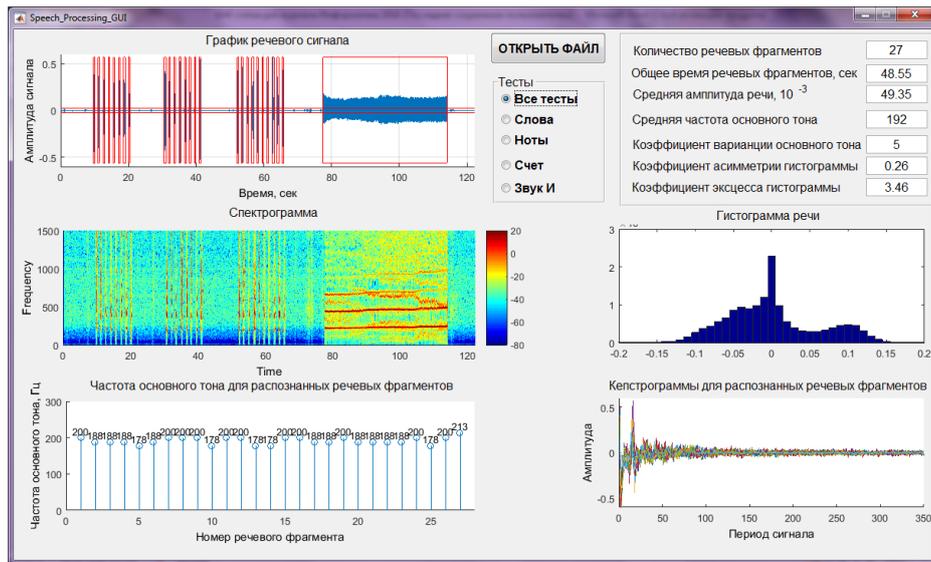
Рис. 3. Разработанное в среде MatLab программное обеспечение для анализа речевых сигналов

В частности, рабочее окно приложения позволяет автоматически выделить интересующий речевой тест из общей записи с последующей его обработкой. Графические результаты обработки включают: изменение амплитуды речевого сигнала во времени с отображением распознанных речевых фрагментов и изменение амплитудно-частотных характеристик сигнала во времени, частоты основного тона для распознанных речевых фрагментов, гистограммы речи и кепстрограмм для распознавания речевых фрагментов. К количественным результатам обработки относят: число распознанных речевых фрагментов, общее время речевых фрагментов, среднюю амплитуду речи, коэффициент вариации основного тона, коэффициент асимметрии гистограммы, коэффициент эксцесса гистограммы.

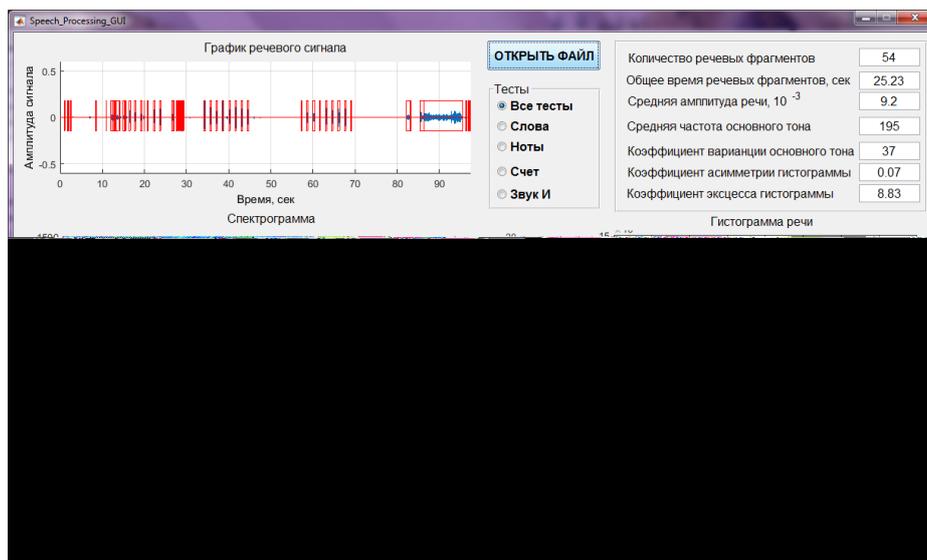
Разработанное в среде MatLab программное обеспечение с графическим интерфейсом реализует качественную и количественную оценки речевых сигналов в норме и при неврологических патологиях.

Апробация разработанных методических и аппаратно-программных средств. На базе РНПЦ неврологии и нейрохирургии проведены экспериментальные исследования речевых сигналов при бульбарном синдроме (24 испытуемых), на базе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники – экспериментальные исследования речевых сигналов в норме (36 испытуемых).

Запись всех четырех тестов здорового испытуемого показана на рис. 4, а, аналогичная запись тестов пациента с бульбарным синдромом – на рис. 4, б. Количество речевых фрагментов в норме равно 27, что соответствует суммарному значению речевых фонем в тестах, в то время как при патологии вследствие нарушений речи число распознанных речевых фрагментов повышается (54). Следует отметить высокую амплитуду речи в норме (среднее значение 49,3) по сравнению с амплитудой речи пациента, страдающего бульбарным синдромом (9,2). Показателем коэффициента вариации основного тона: в норме он низкий (5 %), при бульбарном синдроме степень рассеяния значений основного тона речи высокая (37 %).



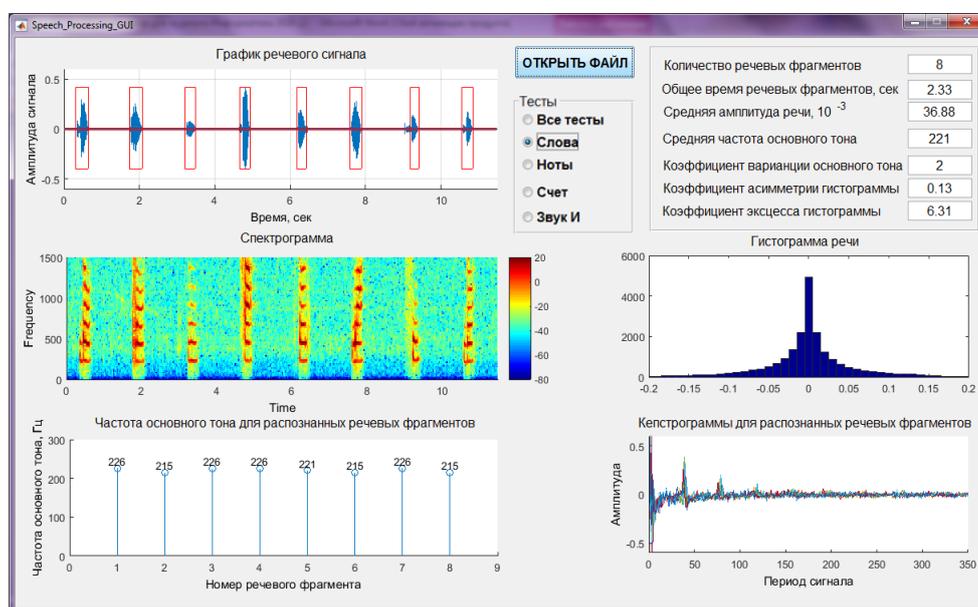
а)



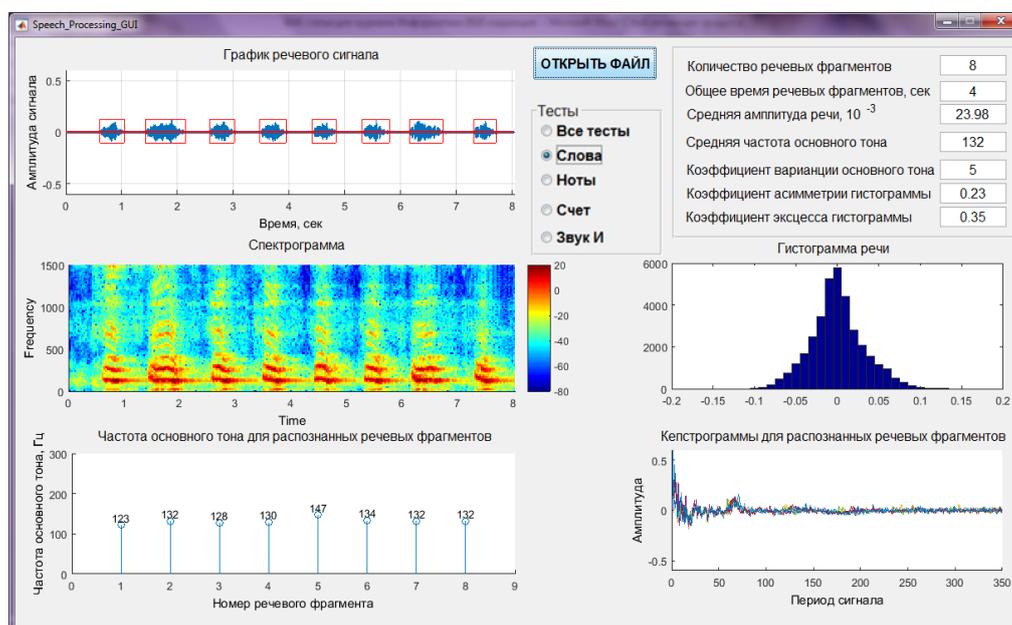
б)

Рис. 4. Результаты применения метода цифровой обработки речевых сигналов в норме (а) и для пациента с бульбарным синдромом (б): полный тестовый ряд

Результаты обработки теста на произнесение односложных слов здоровым испытуемым и пациентом, страдающим бульбарными нарушениями, представлены на рис. 5, *а* и 5, *б* соответственно.



а)



б)

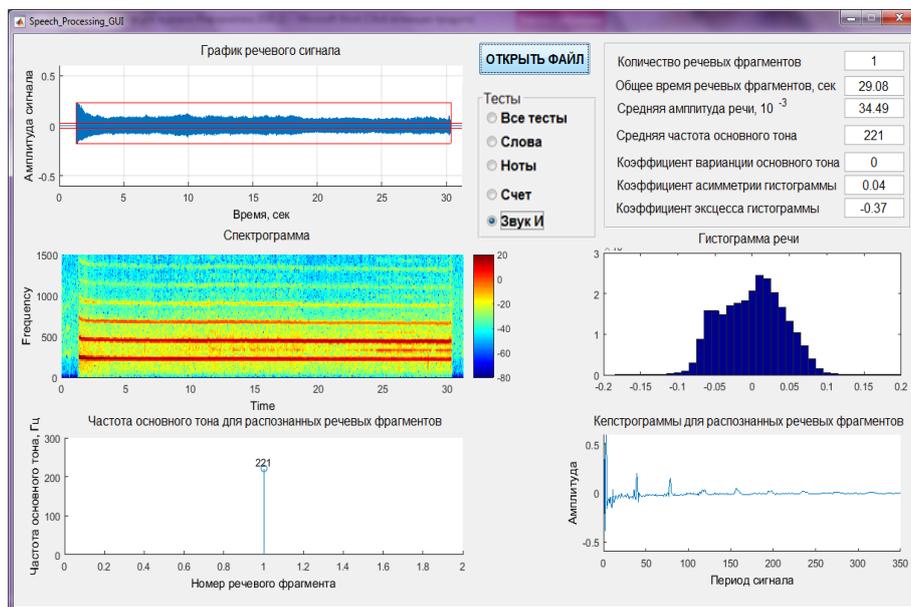
Рис. 5. Результаты применения метода цифровой обработки речевых сигналов в норме (*а*) и для пациента с бульбарным синдромом (*б*): тест на основе произнесения односложных слов

У здорового испытуемого (рис. 5, *а*) количество распознанных речевых фрагментов составляет 8 и однозначно соответствует количеству произносимых фонем (8). На спектрограмме отчетливо выделяются равностоящие друг от друга речевые фрагменты, наблюдаются высокочастотные составляющие в спектре. Кепстрограммы для распознанных речевых фрагментов имеют характерные пики в области основного тона и кратных ему формантных частот. Гистограмма речи характеризуется наличием пикового значения (коэффициент эксцесса равен 6,31).

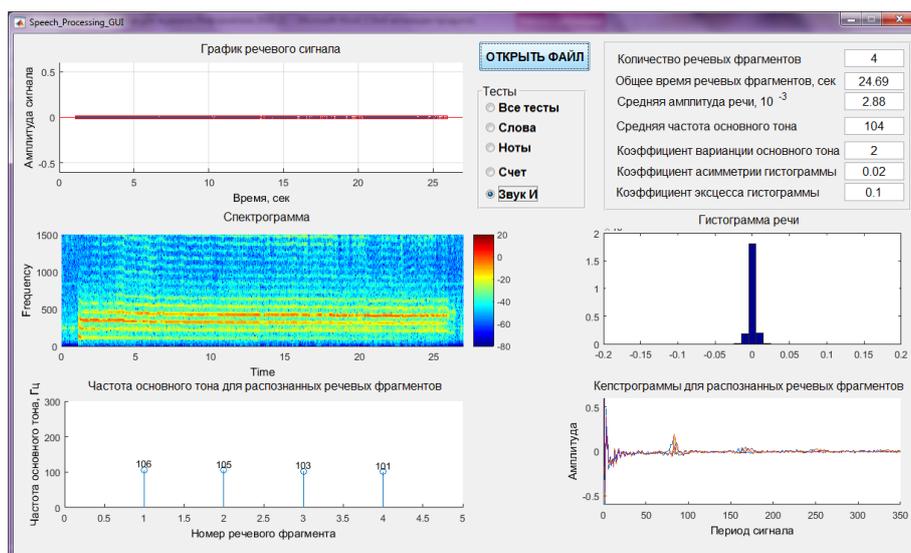
У пациента, страдающего бульбарным синдромом, речевые фрагменты на спектрограмме размыты, не имеют четкого очертания (рис. 5, б). Амплитуда речи (23,98) значительно слабее, чем в норме (36,88). Коэффициент эксцесса гистограммы низкий по сравнению с нормой (0,35).

Результаты обработки теста на длительное произнесение звука [u] здорового испытуемого и пациента, страдающего бульбарным синдромом, представлены на рис. 6, а и б соответственно. Длительность произнесения звука [u] у здорового испытуемого более 25 с, у пациента с бульбарными нарушениями – в пределах 25 с. Средняя амплитуда речи в норме высокая, соответствует значению 34,49, при патологии средняя амплитуда речи слабая, равна 2,88.

Количество выделенных речевых фрагментов у здорового испытуемого равно единице, что соответствует норме. У пациента с патологиями речи выделяются четыре фрагмента, что свидетельствует о наличии речевых отклонений (речь периодически прерывается). Показатели гистограммы речи у здорового испытуемого варьируются от $-0,2$ до $0,2$, у пациента с бульбарными нарушениями – от $-0,05$ до $0,05$.



а)



б)

Рис. 6. Результаты применения метода цифровой обработки речевых сигналов в норме (а) и для пациента с бульбарным синдромом (б): тест на основе длительного произнесения звука [u]

Заключение. В статье представлено методическое и аппаратно-программное обеспечение для регистрации и обработки речевых сигналов в диагностике неврологических заболеваний:

1. Для идентификации патологических изменений речи при бульбарном синдроме разработаны специальные речевые тесты: произнесение односложных слов, нот, счет от одного до десяти, длительное произнесение звука [и].

2. Для визуализации речевых тестов создан видеоряд. Каждый речевой тест начитается с общего информационного слайда, после этого отображаются собственно слова, наименования нот, цифры, чередующиеся с паузами в виде пустых экранов. Здоровый человек выполняет тесты без затруднений. Искажение речевых фонем, пропуск пауз свидетельствуют об отклонении от нормы.

3. Разработанное под платформу Android мобильное приложение реализует функции воспроизведения испытываемому видеоряда с речевыми тестами и одновременной регистрации данных с микрофона посредством Bluetooth-интерфейса. Мобильное приложение автоматически сохраняет записанные речевые сигналы, дает возможность воспроизводить и удалять записи. Bluetooth-гарнитура и мобильное приложение позволяют унифицировать условия диагностики, что обеспечивает сопоставимость и объективность результатов последующей обработки речевых сигналов.

4. Записанный речевой сигнал подвергается цифровой обработке посредством разработанного программного обеспечения в среде MatLab.

Апробация разработанных методических и программных средств выполнена на базе РНПЦ неврологии и нейрохирургии Министерства здравоохранения Республики Беларусь и Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. На базе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники проведены экспериментальные исследования речевых сигналов в норме (36 испытуемых), на базе РНПЦ неврологии и нейрохирургии Министерства здравоохранения Республики Беларусь – при бульбарном синдроме (24 испытуемых).

Результаты апробации выявили качественные (на основе полученных графиков спектрограмм, кепстрограмм, гистограмм) и количественные (на основе вычисленных параметров) различия между параметрами речевых сигналов в норме и при бульбарном синдроме.

Таким образом, предварительные результаты исследований подтвердили целесообразность использования разработанного авторами методического и аппаратно-программного обеспечения для регистрации и обработки речевых сигналов в диагностике неврологических заболеваний.

Список использованных источников

1. Завалишин, И. А. Боковой амиотрофический склероз / И. А. Завалишин. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 272 с.
2. EFNS guidelines on the clinical management of amyotrophic lateral sclerosis (MALS)-revised report of an EFNS task force / P. M. Andersen [et al.] // *European Journal of Neurology*. – 2012. – No. 19(3). – P. 360–375.
3. Practice parameter update: the care of the patient with amyotrophic lateral sclerosis. Drug, nutritional, and respiratory therapies (an evidence-based review): report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology / R. Miller [et al.] // *Neurology*. – 2009. – No. 73(15). – P. 1218–1226.
4. Гусев, Е. И. Неврология и нейрохирургия : учебник / Е. И. Гусев, А. Н. Коновалов, Г. С. Бурд. – М. : Медицина, 2000. – 347 с.
5. Голубев, В. Л. Неврологические синдромы. Руководство для врачей / В. Л. Голубев, А. М. Вейн. – М. : Эйдос Медиа, 2002. – 832 с.
6. Алгоритм классификации речевых патологий при органических поражениях головного мозга [Электронный ресурс] / Н. П. Кузенков [и др.] // *Информационные процессы*. – 2009. – Т. 9, № 3. – С. 121–137. – Режим доступа: <http://www.jipr.ru/2009/121-137-2009.pdf>. – Дата доступа: 06.10.2013.
7. Статистическое описание речи человека при органических нарушениях центрального отдела речевого аппарата / Н. П. Кузенков [и др.] // *Нелинейный мир*. – 2012. – № 4. – С. 247–255.
8. Скляр, О. П. V/U-ритм речи при чтении как индикатор состояния функции речевого дыхания у заикающихся / О. П. Скляр // *Техническая акустика*. – 2004. – Т. 4, № 16. – С. 163–173.
9. Скляр, О. П. Фракталы и крупномасштабная временная структура акустического речевого сигнала и музыки / О. П. Скляр // *Техническая акустика*. – 2004. – Т. 4, № 21. – С. 224–233.

10. Nonlinear analyses and algorithms for speech processing / Gómez P. [et al.] // *Voice Pathology Detection by Vocal Cord Biomechanical Parameter Estimation*. – Berlin : Springer, 2005. – P. 242–256.
11. Characterization of healthy and pathological voice through measures based on nonlinear dynamics / P. Henriquez [et al.] // *IEEE Trans Audio Speech Lang Processing*. – 2009. – Vol. 17, no. 6. – P. 1186–1195.
12. Phonatory impairment in parkinson's disease: evidence from nonlinear dynamic analysis and perturbation analysis / M. Chou [et al.] // *Journal of Voice*. – 2007. – Vol. 21. – P. 64–71.
13. Relative entropy measures applied to healthy and pathological voice characterization / P. R. Scalassara [et al.] // *Applied Mathematics and Computation*. – 2009. – Vol. 207, iss. 1. – P. 95–108.
14. Malyska, N. Automatic dysphonia recognition using biologically-inspired amplitude-modulation features / N. Malyska, T. F. Quatieri, D. Sturim // *Acoustics, Speech, and Signal Processing : Proc. of IEEE Intern. Conf. (ICASSP)*. – Philadelphia, 2005. – Vol. 1. – P. 873–876.
15. Оппенгейм, Э. Применение цифровой обработки сигналов : пер. с англ. / Э. Оппенгейм ; под ред. А. М. Рязанцева. – М. : Мир, 1980. – 552 с.
16. Ахмад, Х. М. Введение в цифровую обработку речевых сигналов : учеб. пособие / Х. М. Ахмад, В. Ф. Жирков. – Владимир : Владим. гос. ун-т., 2007. – 192 с.
17. Райгайян, Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Райгайян. – М. : Физматлит, 2007. – 440 с.
18. Куль Т. П. Алгоритм цифровой обработки речевых сигналов в норме и патологии / Т. П. Куль, М. М. Меженная, А. Н. Осипов // *Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : тез. докл. 13 Междунар. молодежной науч.-техн. конф.* – Севастополь, 2017. – С. 197.

References

1. Zavalishin I. A. Bokovoy amiotroficheskiy skleroz. *Amyotrophic Lateral Sclerosis*. Moscow, GEOTAR-Media, 2009, 272 p. (in Russian).
2. Andersen P. M., Abrahams Sh., Borasio G. D., Carvalho M. de, Chio A., ..., Weber M. EFNS guidelines on the clinical management of amyotrophic lateral sclerosis (MALS)-revised report of an EFNS task force. *European Journal of Neurology*, 2012, no. 19(3), pp. 360–375.
3. Miller R., Jackson C. E., Kasarskis E. J., England J. D., Forshew D., ..., Woolley S. C. Practice parameter update: the care of the patient with amyotrophic lateral sclerosis. Drug, nutritional, and respiratory therapies (an evidence-based review): report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology. *Neurology*, 2009, no. 73(15), pp. 1218–1226. DOI: 10.1212/WNL.0b013e3181bc0141
4. Gusev Ye. I., Kononov A. N., Burd G. S. *Nevrologiya i neyrokhirurgiya. Neurology and Neurosurgery*. Moscow, Meditsina, 2000, 347 p. (in Russian).
5. Golubev V. L., Veyn A. M. *Nevrologicheskiye sindromy. Rukovodstvo dlya vrachey. Neurological syndrome. Guide for doctors*. Moscow, Eydos Media, 2002, 832 p. (in Russian).
6. Kuzenkov N. P., Loginov V. M., Nikol'skaya O. N., Prokopenko S. V. Algoritm klassifikatsii rechevykh patologiy pri organicheskikh porazheniyakh golovnogo mozga [The algorithm for the classification of voice pathologies with organic lesions of the brain]. *Informatsionnyye protsessy [Information Processes]*, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 121–137 (in Russian). Available at: <http://www.jip.ru/2009/121-137-2009.pdf> (accessed 06.10.2013).
7. Kuzenkov N. P., Loginov V. M., Prokopenko S. V., Mozheyko Ye. Yu. Statisticheskoye opisaniye rechi cheloveka pri organicheskikh narusheniyakh tsentral'nogo otdela rechevogo apparata [Statistical description of human speech in organic disorders of the central department of speech apparatus]. *Nelineynyy mir [Nonlinear World]*, 2012, no. 4, pp. 247–255 (in Russian).
8. Sklyarov O. P. V/U-ritm rechi pri chtenii kak indikator sostoyaniya funktsii rechevogo dykhaniya u zaikayushchikhsya [V/U-rhythm of speech when reading as an indicator of the state of speech breathing function in stuttering]. *Tekhnicheskaya akustika [Technical Acoustics]*, 2004, vol. 4, no. 16, pp. 163–173 (in Russian).
9. Sklyarov O. P. Fraktaly i krupnomasshtabnaya vremennaya struktura akusticheskogo rechevogo signala i muzyki [Fractals and large-scale temporal structure of acoustic speech signal and music]. *Tekhnicheskaya akustika [Technical Acoustics]*, 2004, vol. 4, no. 21, pp. 224–233 (in Russian).
10. Gómez P., Martínez R., Díaz F., Lázaro C., Álvarez A., Rodellar V., Nietro V. Nonlinear analyses and algorithms for speech processing. *Voice Pathology Detection by Vocal Cord Biomechanical Parameter Estimation*. Berlin, Springer, 2005, pp. 242–256.
11. Henriquez P., Alonso J. B., Ferrer M. A., Travieso C. M., Godino-Llorente J. I., Diaz-de-Maria F. Characterization of healthy and pathological voice through measures based on nonlinear dynamics. *IEEE Trans Audio Speech Lang Processing*, 2009, vol. 17, no. 6, pp. 1186–1195.

12. Chou M., Jiang J. J., Rahn D. A., Zhang Y. Phonatory impairment in parkinson's disease: evidence from nonlinear dynamic analysis and perturbation analysis. *Journal of Voice*, 2007, vol. 21, pp. 64–71.
13. Scalassara P. R., Dajer M. E., Maciel C. D., Guido R. C., Pereira J. C. Relative entropy measures applied to healthy and pathological voice characterization. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, vol. 207, iss. 1, pp. 95–108.
14. Malyska N., Quatieri T. F., Sturim D. Automatic dysphonia recognition using biologically-inspired amplitude-modulation features. *Acoustics, Speech, and Signal Processing: Proceedings of IEEE International Conference (ICASSP)*, Philadelphia, 2005, vol. 1, pp. 873–876.
15. Oppenheim A. *Applications of Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 1978, 499 p.
16. Akhmad Kh. M., Zhirkov V. F. Vvedeniye v tsifrovuyu obrabotku rechevykh signalov. *Introduction to Digital Voice Processing*. Vladimir, Vladimirkij gosudarstvennyj universitet, 2007, 192 p. (in Russian).
17. Raygayyan R. M. Analiz biomeditsinskikh signalov. Prakticheskiy podkhod. *Analysis of biomedical signals. Practical approach*. Moscow, Fizmatlit, 2007, 440 p. (in Russian).
18. Kul T. P., Mezhenaya M. M., Osipov A. N. Algoritm tsifrovoy obrabotki rechevykh signalov v norme i patologii [Algorithm of digital processing of speech signals in norm and pathology]. *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikacij : tezisy dokladov 13 Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Abstracts of the 13th International Youth Scientific-Technical Conference "Modern problems of radio electronics and telecommunications"]*. Sevastopol, 2017, p. 197.

Информация об авторах

Куль Татьяна Петровна, магистр технических наук, аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.

Меженная Марина Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.
E-mail: mezhennaya@bsuir.by

Рухкевич Юлия Николаевна, кандидат медицинских наук, доцент, ведущий научный сотрудник неврологического отдела, РНПЦ неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь

Осипов Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Белорусская инженерная академия, первый проректор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.
E-mail: osipov@bsuir.by

Лихачев Сергей Александрович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий неврологическим отделом, РНПЦ неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь.
E-mail: likhachev@mail.ru

Рухкевич Ирина Вадимовна, лаборант, РНПЦ неврологии и нейрохирургии, студентка, Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.
E-mail: rina.rushkevich@gmail.com

Information about the authors

Tatiana P. Kul, Master Sci. (Eng.), Postgraduate Student of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.

Marina M. Mezhennaya, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.
E-mail: mezhennaya@bsuir.by

Yulia N. Rushkevich, Cand. Sci. (Med.), Assoc. Prof., Leading Researcher of the Neurological Department, The Republican Scientific and Practical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus.

Anatoly N. Osipov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Belarusian Engineering Academy, the First Rector, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.
E-mail: osipov@bsuir.by

Sergey A. Likhachev, Dr. Sci. (Med.), Prof., Head of the Neurological Department, The Republican Scientific and Practical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus.
E-mail: likhachev@mail.ru

Irina V. Rushkevich, Laboratory Assistant, The Republican Scientific and Practical Center of Neurology and Neurosurgery, Student, Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus.
E-mail: rina.rushkevich@gmail.com